



industriales
etsii

Escuela Técnica
Superior
de Ingeniería
Industrial

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

Desarrollo de un modelo de valores medios y de un modelo físico de un motor diésel industrial con Simcenter AMESIM

TRABAJO FIN DE MÁSTER

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL



Universidad
Politécnica
de Cartagena

Autor: Javier Martínez Escondrillas
Director: José Hernández Grau
Codirector: Daniel Albaladejo Hernández

Cartagena, 9 de octubre de 2020

Agradecimientos

Especial agradecimiento a las siguientes personas:

- José Hernández Grau, director de este Trabajo Fin de Máster, por su ayuda y facilitarme las prácticas en Navantia.
- Daniel Albaladejo Hernández, por su ayuda durante los meses que he estado trabajando con él mientras he realizado este trabajo.
- Olga Serón Aguirre y Miguel Méndez Macías, responsables de Ingeniería de Motores y de la sección de Diagnóstico e I+D de Navantia respectivamente, por las facilidades que me han dado y la oportunidad de trabajar en la Fábrica de Motores de Navantia.

ÍNDICE

Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1. Objetivo del trabajo	1
1.2. Importancia de los modelos en diagnosis de motores	2
1.2.1. Valor educativo	2
1.2.2. Apoyo a la experimentación	2
1.2.3. Técnica para estudiar ciertos parámetros.....	2
1.2.4. Estudios paramétricos.....	2
1.2.5. Optimización	2
1.2.6. Simulaciones para el control en tiempo real.....	3
1.3. Datos del motor generador.....	3
Capítulo 2. Metodología de modelado MCIA.....	4
2.1. Introducción	4
2.2. Modelos de mapas.....	4
2.3. Modelos de valores medios.....	4
2.4. Modelos 0D.....	5
2.5. Modelos 1D.....	6
2.6. Modelos 3D.....	6
2.7. Conclusiones del capítulo 2.....	7
Capítulo 3. Fundamentos teóricos de los submodelos de modelado global “valores medios” y modelado global en base a modelos “0D/1D”.....	9
3.1. Introducción	9
3.2. Sistema considerado para el análisis	9
3.2.1. Masa del sistema	10
3.2.2. Volumen del sistema.....	10
3.3. Ecuaciones de conservación de masa y energía.....	11
3.3.1. Simplificaciones	11
3.4. Calor liberado por la combustión.....	13
3.5. Transferencia de calor a través de las fronteras.....	14
3.6. Flujos de masa.....	16
3.6.1. Combustible inyectado	16
3.6.2. Fugas a través de segmentos (Blow-by)	16
3.6.3. Efecto de los volúmenes intersticiales (crevice volume).....	17
3.6.4. Flujos de masa en las válvulas.....	17
3.7. Expresión del modelo, simplificaciones y aplicación.....	17
Capítulo 4. Simcenter Amesim y librerías IFP.....	19
4.1. Introducción	19
4.2. Interfaz de usuario de Amesim.....	19
4.3. Librerías utilizadas en este trabajo.....	22

4.3.1.	1D Mechanical	23
4.3.2.	IFP Engine	23
4.3.3.	Thermal.....	24
4.3.4.	Thermal Hydraulic.....	25
4.3.5.	Signal.....	25
4.4.	Conclusiones del capítulo 4.....	26
Capítulo 5.	Ajuste y validación de modelo de valores medios de motor diésel generador.....	27
5.1.	Introducción	27
5.2.	Modelo de valores medios del motor generador.....	27
5.2.1.	Admisión y escape	29
5.2.2.	Caja negra	34
5.2.3.	Inyección.....	43
5.2.4.	Eje motor.....	44
5.3.	Calibración del modelo.....	48
5.4.	Validación del modelo	56
5.5.	Conclusiones del capítulo 5.....	62
Capítulo 6.	Ajuste y validación de modelo físico-fenomenológico.....	64
6.1.	Introducción	64
6.2.	Modelo físico del motor generador	64
6.2.1.	Admisión y escape	66
6.2.2.	Bloque motor.....	66
6.2.3.	Inyección.....	76
6.2.4.	Eje motor.....	80
6.3.	Calibración del modelo.....	92
6.4.	Validación del modelo	98
6.5.	Conclusiones del capítulo 6.....	101
Capítulo 7.	Comparación entre modelos.	103
7.1.	Introducción	103
7.2.	Comparativa de los modelos.....	103
7.2.1.	Implementación de los modelos	103
7.2.2.	Coste computacional.....	104
7.2.3.	Nivel de aproximación de los valores simulados	105
7.2.4.	Información que es posible obtener del modelo según el tipo	105
7.3.	Conclusiones del capítulo 7.....	107
Capítulo 8.	Conclusiones del trabajo.....	108
8.1.	Conclusiones.....	108
8.2.	Modelado de otro motor distinto a partir de los modelos creados	108
8.3.	Dificultades encontradas	109
8.4.	Puntos críticos.....	109

8.5. Pasos futuros	110
Bibliografía	111
Capítulo 9. Anexos	112
9.1. Datos requeridos de banco de ensayos	112
9.2. Guía de usuario.....	113
9.2.1. Simulación de uno o varios casos a la vez.....	114
9.2.2. Preparación e introducción de tablas en el formato adecuado	116
9.2.3. Representación gráfica de las variables	118
9.3. Gráficos de errores relativos de los parámetros obtenidos en los modelos	121
9.3.1. Primer modelo de valores medios	122
9.3.2. Segundo modelo de valores medios	126
9.3.3. Modelo físico-fenomenológico 'Chmela'	130
9.3.4. Modelo 'BMF'	134
9.4. Tablas de resultados de la validación de ambos modelos.....	135
9.5. Esquemas de los modelos físico-fenomenológicos ampliados	146

FIGURAS

Figura 1.1. Esquema de un motor genérico con turbosobrealimentación.	3
Figura 2.1. Resumen acerca de los tipos de modelado de motores de combustión interna. . .	8
Figura 3.1. Sistema considerado para el análisis.	9
Figura 3.2. Geometría del conjunto pistón-biela-cigüeñal.	10
Figura 3.3. Curvas de ajuste del calor liberado en MEC.	14
Figura 4.1. Interfaz de usuario de Amesim 2019.1.	20
Figura 4.2. Variables externas de un componente cilindro-pistón a modo de ejemplo.	22
Figura 4.3. Librería 1D Mechanical.	23
Figura 4.4. Librería IFP Engine.	24
Figura 4.5. Librería Thermal.	24
Figura 4.6. Librería Thermal Hydraulic.	25
Figura 4.7. Librería Signal.	26
Figura 5.1. Modelo de valores medios del motor generador. Primera forma.	28
Figura 5.2. Parámetros globales del modelo de valores medios.	28
Figura 5.3. Entradas y salidas del sistema. MVEM 1.	29
Figura 5.4. Admisión y escape del modelo de valores medios del motor generador.	29
Figura 5.5. Definición de propiedades de aire, combustible y gases quemados (G3) y gases contaminantes (G12).	30
Figura 5.6. Parámetros necesarios en el componente G3.	30
Figura 5.7. Parámetros necesarios en el componente G12.	31
Figura 5.8. Componente para introducir parámetros del turbocompresor.	31
Figura 5.9. Introducción de las curvas del compresor.	32
Figura 5.10. Introducción de las curvas de la turbina.	32
Figura 5.11. Parámetros del CAC.	34
Figura 5.12. Componente que simula los cilindros del motor en valores medios.	34
Figura 5.13. Herramienta de generación de mapas para modelo de valores medios.	35
Figura 5.14. Ventana de selección de archivos para la herramienta de MVEM.	36
Figura 5.15. Ventana de entrada de datos desde archivo de Excel para la herramienta de MVEM.	37
Figura 5.16. Ventana de recopilación de datos del modelo y de propiedades del archivo .xml para la herramienta de MVEM.	38
Figura 5.17. Ventana de relación de parámetros entre el archivo .xml y .xls para herramienta de MVEM.	39
Figura 5.18. Ventana de procesamiento de datos de la herramienta de MVEM.	40
Figura 5.19. Ventana de generación de mapas de la herramienta MVEM.	41
Figura 5.20. Parámetros del componente de la 'caja negra'.	42
Figura 5.21. Sistema de inyección para el primer modelo de valores medios.	43
Figura 5.22. Eje motor del primer modelo de valores medios.	44
Figura 5.23. Componente para simular las pérdidas mecánicas del motor.	44
Figura 5.24. Tabla de presión media de pérdidas mecánicas.	45
Figura 5.25. Parámetros del componente de pérdidas mecánicas en el modelo de valores medios.	45
Figura 5.26. Modelo de valores medios del generador. Segunda forma.	46
Figura 5.27. Entradas y salidas del sistema. MVEM 2.	47
Figura 5.28. Controlador para el cálculo del gasto másico de combustible en el segundo modelo de valores medios.	47
Figura 5.29. Parámetros del controlador proporcional integrador del segundo modelo de valores medios.	48
Figura 5.30. Coeficiente de efecto de pulso para calibrar el modelo de valores medios.	49
Figura 5.31. Valores simulados vs experimentales. Calibración. Presiones y temperaturas. Modelo 1 de valores medios.	50

Figura 5.32. Valores simulados vs experimentales. Calibración. Gastos, PMI y par efectivo. Modelo 1 de valores medios.....	51
Figura 5.33. Valores simulados vs experimentales. Calibración. Presiones y temperaturas. Modelo 2 de valores medios.....	53
Figura 5.34. Valores simulados vs experimentales. Calibración. Gastos, PMI y velocidad de giro. Modelo 2 de valores medios.....	54
Figura 5.35. Presión media efectiva simulada vs teórica. Validación. Modelo 1 de valores medios.....	57
Figura 5.36. Valores simulados vs experimentales. Validación. Presiones. Modelo 1 de valores medios.....	57
Figura 5.37. Valores simulados vs experimentales. Validación. Temperaturas. Modelo 1 de valores medios.....	58
Figura 5.38. Valores simulados vs experimentales. Validación. Gastos máxicos. Modelo 1 de valores medios.....	58
Figura 5.39. Valores simulados vs experimentales. Validación. PMI y par efectivo. Modelo 1 de valores medios.....	59
Figura 5.40. Presión media efectiva simulada vs teórica. Validación. Modelo 2 de valores medios.....	60
Figura 5.41. Valores simulados vs experimentales. Validación. Presiones. Modelo 2 de valores medios.....	60
Figura 5.42. Valores simulados vs experimentales. Validación. Temperaturas. Modelo 2 de valores medios.....	61
Figura 5.43. Valores simulados vs experimentales. Validación. Gastos máxicos. Modelo 2 de valores medios.....	61
Figura 5.44. Valores simulados vs experimentales. Validación. PMI y velocidad de giro. Modelo 2 de valores medios.....	62
Figura 6.1. Modelo físico del motor generador con cámara de combustión 'Chmela'.....	65
Figura 6.2. Parámetros globales del modelo físico.....	65
Figura 6.3. Entradas y salidas del sistema. Modelo 'Chmela'.....	66
Figura 6.4. Componente que simula la culata del cilindro.....	67
Figura 6.5. Componente que simula las válvulas.....	67
Figura 6.6. Componente que simula la cámara de combustión 'Chmela'.....	68
Figura 6.7. Componente que simula el cigüeñal.....	68
Figura 6.8. Cilindro completo modelado.....	69
Figura 6.9. Herramienta de parametrización de las válvulas.....	69
Figura 6.10. Levantamiento de válvulas. Configuración.....	70
Figura 6.11. Coeficientes de flujo de las válvulas. Configuración.....	71
Figura 6.12. Geometría de las válvulas. Configuración.....	71
Figura 6.13. Herramienta de parametrización del motor.....	72
Figura 6.14. Parámetros geométricos de los cilindros. Configuración.....	72
Figura 6.15. Orden de encendido de los cilindros. Configuración.....	73
Figura 6.16. Transmisión de calor a través de la pared del cilindro. Configuración.....	73
Figura 6.17. Sistema de inyección para el modelo físico.....	76
Figura 6.18. Croquis del trapecio de inyección de combustible para el modelo físico.....	77
Figura 6.19. Inyección trapezoidal para el caso de carga del 100%.....	78
Figura 6.20. Parámetros del componente de pérdidas mecánicas en el modelo físico.....	80
Figura 6.21. Modelo físico del motor generador con cámara de combustión 'BMF'.....	81
Figura 6.22. Entradas y salidas del sistema. Modelo 'BMF'.....	81
Figura 6.23. Componente que simula la cámara de combustión 'BMF'.....	82
Figura 6.24. Herramienta de configuración de la cámara de combustión 'BMF'.....	82
Figura 6.25. Utilidad de la herramienta de configuración de 'BMF'.....	83
Figura 6.26. Parámetros de la herramienta de configuración de 'BMF'.....	83
Figura 6.27. Creación de una plantilla de la herramienta de configuración de 'BMF' para introducir los datos de partida.....	84
Figura 6.28. Herramienta de configuración de 'BMF'. Pestaña 1.....	85

Figura 6.29. Herramienta de configuración de 'BMF'. Pestaña 2.	85
Figura 6.30. Herramienta de configuración de 'BMF'. Pestaña 3.	86
Figura 6.31. Herramienta de configuración de 'BMF'. Pestaña 4 - 1.	87
Figura 6.32. Herramienta de configuración de 'BMF'. Pestaña 4 – 2.	87
Figura 6.33. Ajuste de curvas simuladas a las experimentales. Herramienta de configuración de 'BMF'.	88
Figura 6.34. Herramienta de configuración de 'BMF'. Pestaña 5.	89
Figura 6.35. Parametrización de la cámara de combustión 'BMF'.	90
Figura 6.36. Experimentos para el modelo no predictivo 'BMF'.	90
Figura 6.37. Liberación de calor para el punto de operación del 100%. Modelo 'BMF'.	91
Figura 6.38. Valores simulados vs experimentales. Calibración. Presiones y temperaturas. Modelo 'Chmela'.	93
Figura 6.39. Valores simulados vs experimentales. Calibración. Gastos, PMI y par efectivo. Modelo 'Chmela'.	93
Figura 6.40. Valores simulados vs experimentales. Calibración. Presiones y temperaturas. Modelo 'BMF'.	96
Figura 6.41. Valores simulados vs experimentales. Calibración. Gastos, PMI y par efectivo. Modelo 'BMF'.	96
Figura 6.42. Presión media efectiva simulada vs teórica. Validación. Modelo 'Chmela'.	99
Figura 6.43. Valores simulados vs experimentales. Validación. Presiones. Modelo 'Chmela'.	99
Figura 6.44. Valores simulados vs experimentales. Validación. Temperaturas. Modelo 'Chmela'.	100
Figura 6.45. Valores simulados vs experimentales. Validación. Gastos máxicos. Modelo 'Chmela'.	100
Figura 6.46. Valores simulados vs experimentales. Validación. PMI y par efectivo. Modelo 'Chmela'.	101
Figura 7.1. Diagrama presión-cilindro para el estado de carga del 100%.	106
Figura 7.2. Diagrama presión-volumen para el estado de carga del 100%.	106
Figura 9.1. Cómo establecer un parámetro variable para simular varios casos.	114
Figura 9.2. Ventana para establecer valores diferentes a un parámetro.	115
Figura 9.3. Parámetros de simulación.	115
Figura 9.4. Cómo generar tablas en Amesim.	116
Figura 9.5. Editor de tablas de Amesim.	117
Figura 9.6. Tipos de tablas en Amesim.	117
Figura 9.7. Cómo importar datos externos a Amesim.	118
Figura 9.8. Importación de datos en Amesim.	118
Figura 9.9. Activar variables "Cross result".	119
Figura 9.10. Ejemplo de variables "Cross result" utilizadas.	120
Figura 9.11. Creación de las gráficas.	121
Figura 9.12. Errores relativos. Calibración. Presiones y temperaturas. Modelo 1 de valores medios.	122
Figura 9.13. Errores relativos. Calibración. Gastos, PMI y par efectivo. Modelo 1 de valores medios.	122
Figura 9.14. Errores relativos. Calibración. Presión media efectiva. Modelo 1 de valores medios.	123
Figura 9.15. Errores relativos. Validación. Presiones. Modelo 1 de valores medios.	123
Figura 9.16. Errores relativos. Validación. Temperaturas. Modelo 1 de valores medios.	124
Figura 9.17. Errores relativos. Validación. Gastos. Modelo 1 de valores medios.	124
Figura 9.18. Errores relativos. Validación. PMI y par efectivo. Modelo 1 de valores medios.	125
Figura 9.19. Errores relativos. Validación. Presión media efectiva. Modelo 1 de valores medios.	125
Figura 9.20. Errores relativos. Calibración. Presiones y temperaturas. Modelo 2 de valores medios.	126

Figura 9.21. Errores relativos. Calibración. Gastos, PMI y par efectivo. Modelo 2 de valores medios.	126
Figura 9.22. Errores relativos. Calibración. Presión media efectiva. Modelo 2 de valores medios.	127
Figura 9.23. Errores relativos. Validación. Presiones. Modelo 2 de valores medios.	127
Figura 9.24. Errores relativos. Validación. Temperaturas. Modelo 2 de valores medios.	128
Figura 9.25. Errores relativos. Validación. Gastos. Modelo 2 de valores medios.	128
Figura 9.26. Errores relativos. Validación. PMI y par efectivo. Modelo 2 de valores medios.	129
Figura 9.27. Errores relativos. Validación. Presión media efectiva. Modelo 2 de valores medios.	129
Figura 9.28. Errores relativos. Calibración. Presiones y temperaturas. Modelo 'Chmela'. ..	130
Figura 9.29. Errores relativos. Calibración. Gastos, PMI y par efectivo. Modelo 'Chmela'. .	130
Figura 9.30. Errores relativos. Calibración. Presión media efectiva. Modelo 'Chmela'.....	131
Figura 9.31. Errores relativos. Validación. Presiones. Modelo 'Chmela'.	131
Figura 9.32. Errores relativos. Validación. Temperaturas. Modelo 'Chmela'.	132
Figura 9.33. Errores relativos. Validación. Gastos. Modelo 'Chmela'.....	132
Figura 9.34. Errores relativos. Validación. PMI y par efectivo. Modelo 'Chmela'.....	133
Figura 9.35. Errores relativos. Validación. Presión media efectiva. Modelo 'Chmela'.	133
Figura 9.36. Errores relativos. Calibración. Presiones y temperaturas. Modelo 'BMF'.....	134
Figura 9.37. Errores relativos. Calibración. Gastos, PMI y par efectivo. Modelo 'BMF'.....	134
Figura 9.38. Errores relativos. Calibración. Presión media efectiva. Modelo 'BMF'.	135
Figura 9.39. Modelo físico del motor generador con cámara de combustión 'Chmela'. Ampliada.	147
Figura 9.40. Modelo físico del motor generador con cámara de combustión 'BMF'. Ampliada.	148

TABLAS

Tabla 3.1. Valores de los coeficientes c_1 y c_2 del modelo de Woschni.....	16
Tabla 5.1. Parámetros de calibrado del modelo de valores medios.....	50
Tabla 5.2. Valores simulados vs experimentales. Carga del 100%. Modelo 1 de valores medios.....	51
Tabla 5.3. Valores simulados vs experimentales. Carga del 75%. Modelo 1 de valores medios.....	52
Tabla 5.4. Valores simulados vs experimentales. Carga del 50%. Modelo 1 de valores medios.....	52
Tabla 5.5. Valores simulados vs experimentales. Carga del 25%. Modelo 1 de valores medios.....	52
Tabla 5.6. Valores simulados vs experimentales. Carga del 10%. Modelo 1 de valores medios.....	53
Tabla 5.7. Valores simulados vs experimentales. Carga del 100%. Modelo 2 de valores medios.....	54
Tabla 5.8. Valores simulados vs experimentales. Carga del 75%. Modelo 2 de valores medios.....	55
Tabla 5.9. Valores simulados vs experimentales. Carga del 50%. Modelo 2 de valores medios.....	55
Tabla 5.10. Valores simulados vs experimentales. Carga del 25%. Modelo 2 de valores medios.....	55
Tabla 5.11. Valores simulados vs experimentales. Carga del 10%. Modelo 2 de valores medios.....	56
Tabla 6.1. Datos de inyección introducidos en el inyector para el modelo físico.....	78
Tabla 6.2. Parámetros de calibrado del modelo físico.....	92
Tabla 6.3. Valores simulados vs experimentales. Carga del 100%. Modelo 'Chmela'.....	94
Tabla 6.4. Valores simulados vs experimentales. Carga del 75%. Modelo 'Chmela'.....	94
Tabla 6.5. Valores simulados vs experimentales. Carga del 50%. Modelo 'Chmela'.....	94
Tabla 6.6. Valores simulados vs experimentales. Carga del 25%. Modelo 'Chmela'.....	95
Tabla 6.7. Valores simulados vs experimentales. Carga del 10%. Modelo 'Chmela'.....	95
Tabla 6.8. Valores simulados vs experimentales. Carga del 100%. Modelo 'BMF'.....	97
Tabla 6.9. Valores simulados vs experimentales. Carga del 75%. Modelo 'BMF'.....	97
Tabla 6.10. Valores simulados vs experimentales. Carga del 50%. Modelo 'BMF'.....	97
Tabla 6.11. Valores simulados vs experimentales. Carga del 25%. Modelo 'BMF'.....	98
Tabla 6.12. Valores simulados vs experimentales. Carga del 10%. Modelo 'BMF'.....	98
Tabla 7.1. Información exigida según el tipo de modelo.....	103
Tabla 9.1. Datos requeridos para el modelo.....	113
Tabla 9.2. Valores simulados vs experimentales. Carga del 110%. Modelo 1 de valores medios.....	135
Tabla 9.3. Valores simulados vs experimentales. Carga del 100%. Modelo 1 de valores medios.....	136
Tabla 9.4. Valores simulados vs experimentales. Carga del 90%. Modelo 1 de valores medios.....	136
Tabla 9.5. Valores simulados vs experimentales. Carga del 80%. Modelo 1 de valores medios.....	136
Tabla 9.6. Valores simulados vs experimentales. Carga del 70%. Modelo 1 de valores medios.....	137
Tabla 9.7. Valores simulados vs experimentales. Carga del 60%. Modelo 1 de valores medios.....	137
Tabla 9.8. Valores simulados vs experimentales. Carga del 50%. Modelo 1 de valores medios.....	137
Tabla 9.9. Valores simulados vs experimentales. Carga del 40%. Modelo 1 de valores medios.....	138

Tabla 9.10. Valores simulados vs experimentales. Carga del 30%. Modelo 1 de valores medios.	138
Tabla 9.11. Valores simulados vs experimentales. Carga del 20%. Modelo 1 de valores medios.	138
Tabla 9.12. Valores simulados vs experimentales. Carga del 10%. Modelo 1 de valores medios.	139
Tabla 9.13. Valores simulados vs experimentales. Carga del 110%. Modelo 2 de valores medios.	139
Tabla 9.14. Valores simulados vs experimentales. Carga del 100%. Modelo 2 de valores medios.	139
Tabla 9.15. Valores simulados vs experimentales. Carga del 90%. Modelo 2 de valores medios.	140
Tabla 9.16. Valores simulados vs experimentales. Carga del 80%. Modelo 2 de valores medios.	140
Tabla 9.17. Valores simulados vs experimentales. Carga del 70%. Modelo 2 de valores medios.	140
Tabla 9.18. Valores simulados vs experimentales. Carga del 60%. Modelo 2 de valores medios.	141
Tabla 9.19. Valores simulados vs experimentales. Carga del 50%. Modelo 2 de valores medios.	141
Tabla 9.20. Valores simulados vs experimentales. Carga del 40%. Modelo 2 de valores medios.	141
Tabla 9.21. Valores simulados vs experimentales. Carga del 30%. Modelo 2 de valores medios.	142
Tabla 9.22. Valores simulados vs experimentales. Carga del 20%. Modelo 2 de valores medios.	142
Tabla 9.23. Valores simulados vs experimentales. Carga del 10%. Modelo 2 de valores medios.	142
Tabla 9.24. Valores simulados vs experimentales. Carga del 110%. Modelo 'Chmela'.	143
Tabla 9.25. Valores simulados vs experimentales. Carga del 100%. Modelo 'Chmela'.	143
Tabla 9.26. Valores simulados vs experimentales. Carga del 90%. Modelo 'Chmela'.	143
Tabla 9.27. Valores simulados vs experimentales. Carga del 80%. Modelo 'Chmela'.	144
Tabla 9.28. Valores simulados vs experimentales. Carga del 70%. Modelo 'Chmela'.	144
Tabla 9.29. Valores simulados vs experimentales. Carga del 60%. Modelo 'Chmela'.	144
Tabla 9.30. Valores simulados vs experimentales. Carga del 50%. Modelo 'Chmela'.	145
Tabla 9.31. Valores simulados vs experimentales. Carga del 40%. Modelo 'Chmela'.	145
Tabla 9.32. Valores simulados vs experimentales. Carga del 30%. Modelo 'Chmela'.	145
Tabla 9.33. Valores simulados vs experimentales. Carga del 20%. Modelo 'Chmela'.	146
Tabla 9.34. Valores simulados vs experimentales. Carga del 10%. Modelo 'Chmela'.	146

Capítulo 1. Introducción.

1.1. Objetivo del trabajo

El Trabajo Fin de Máster propuesto tiene como objetivo el modelado de un motor diésel rápido de aplicación como generador eléctrico utilizando el programa de simulación Simcenter Amesim de Siemens, y el posterior análisis de resultados comparándolos con los obtenidos en banco de ensayos. Dicho modelado se hará de dos formas:

- Modelo de valores medios.
- Modelo físico de componentes del motor.

El modelado de motores es una labor importante, pues permite realizar el mantenimiento de estos de forma predictiva, de tal forma que el ingeniero se pueda adelantar a los posibles fallos futuros. Una modelización de un motor es una forma más de diagnosis que en las últimas décadas se ha visto potenciada con la mejora de la tecnología. Actualmente, las grandes empresas dedicadas al sector de los motores desarrollan modelos matemáticos que van desde los casos más simples en los que se obtienen valores muy aproximados de forma bastante rápida, hasta casos muy complejos que utilizan la dinámica de fluidos computacional para realizar un estudio exhaustivo del flujo.

Para introducir al lector en el modelado de motores, se tendrán dos capítulos dedicados a ello. En el capítulo dos se verán los diferentes tipos de modelado existentes, en qué se basan y qué los diferencian. En el capítulo tres se expondrá la teoría fisicomatemática del modelado de motores cero-dimensionales y cuasi-dimensionales.

Se dedicará el capítulo cuatro a introducir brevemente el programa Simcenter Amesim para poder dar al lector una idea global de este.

Los capítulos cinco y seis corresponden al procedimiento de los dos modelos. Los modelados se realizarán partiendo de parámetros geométricos del motor, así como datos empíricos y parámetros operativos en diferentes condiciones de funcionamiento. Entre esta información se incluyen las curvas del turbocompresor, los levantamientos de válvulas, la geometría del motor ya mencionada y valores de presiones y temperaturas en puntos concretos. Para ello se utilizará la librería 'IFP Engine' disponible en Amesim y creada por el Instituto Francés del Petróleo, que cuenta con un gran número de componentes de motores, entre los que se encuentran varios tipos de cilindros que siguen modelos matemáticos distintos.

Haciendo uso de un amplio rango de valores en diferentes condiciones de funcionamiento se calibrará y validará el modelo.

En el capítulo siete se compararán ambas metodologías de modelado, teniendo en cuenta la precisión de las variables simuladas, el procedimiento a seguir en ambos métodos y sus aplicaciones prácticas.

El capítulo ocho recogerá las conclusiones del trabajo, donde se detallarán los problemas encontrados, los puntos críticos y los pasos futuros entre otros.

Por último, se recoge la bibliografía utilizada para desarrollar el trabajo.

Se pretende también que este proyecto sirva de guía para futuros usuarios que pretendan iniciarse en el modelado de motores con la herramienta Amesim. Para ello, se detallará de manera secuencial el procedimiento de modelado a seguir y se recogerán en un anexo varias explicaciones que podrían ser adecuadas para ayudar a introducirse en el manejo del programa.

1.2. Importancia de los modelos en diagnosis de motores

El objetivo de un modelado de motor es describir matemáticamente el conjunto de procesos que tienen lugar en un sistema tan complejo como este. Además, se pretende que este conjunto de ecuaciones matemáticas y físicas sea capaz de predecir el comportamiento del motor bajo condiciones diferentes. Los beneficios del modelado de motores son varios y se detallan a continuación.

1.2.1. Valor educativo

Cuando se decide modelar un sistema tan complejo como es un motor, es necesario tener claros los conceptos y entender los fundamentos básicos del problema. Por tanto, enfrentarse a un procedimiento de modelado permite al ingeniero conocer aún mejor los procesos termodinámicos, fluido mecánicos, de transferencia de calor o de la combustión.

1.2.2. Apoyo a la experimentación

La experimentación ha sido desde siempre muy importante en todos los ámbitos. Sin embargo, en muchas ocasiones requiere grandes inversiones de dinero, mano de obra y material. Es por ello por lo que es importante ser eficiente y minimizar experimentos innecesarios, promoviendo aquellos más importantes.

La experimentación aporta cosas que nunca podrá aportar una simulación mediante ordenador, pero los modelos apoyan de muchas formas a dicha experimentación. Un buen modelo permite disminuir el número de experimentos necesarios y reconducir otros por un camino donde se consigan obtener más y mejores resultados.

1.2.3. Técnica para estudiar ciertos parámetros

Existen algunos parámetros que no se pueden estudiar mediante experimentación, bien porque es difícil acceder a ellos o porque el hecho de medirlos alteraría el valor. En otras ocasiones resulta imposible medirlos. La simulación permite estudiar estos parámetros y conocer cómo afectan al sistema.

1.2.4. Estudios paramétricos

El hecho de poder simular el sistema bajo diversas condiciones diferentes es una gran ventaja de los modelos. Esto sería impensable para el caso de experimentación en banco de ensayos, pues el coste de los diferentes estudios se dispararía. Es por ello por lo que en estos casos se debe tener un modelo que permita conocer el comportamiento en estas situaciones variables.

1.2.5. Optimización

Las simulaciones de modelos son una muy buena forma de optimizar los sistemas que se están estudiando. Esta permite obtener la combinación óptima de parámetros que garantice el mejor rendimiento posible del sistema.

1.2.6. Simulaciones para el control en tiempo real

Algunos modelos se pueden utilizar como algoritmos para el control del sistema. Si se cuenta con los conocimientos avanzados necesarios, es posible utilizar un algoritmo inteligente que optimice los parámetros de forma que se alcancen los objetivos requeridos.

1.3. Datos del motor generador

En el Anexo del final de este trabajo se tiene toda la información técnica detallada del motor generador estudiado. En la Figura 1.1 siguiente se puede observar un esquema genérico del motor que se va a modelar. En dicho esquema no se muestran otros subsistemas que acompañan al bloque motor, como es el sistema de refrigeración externa.

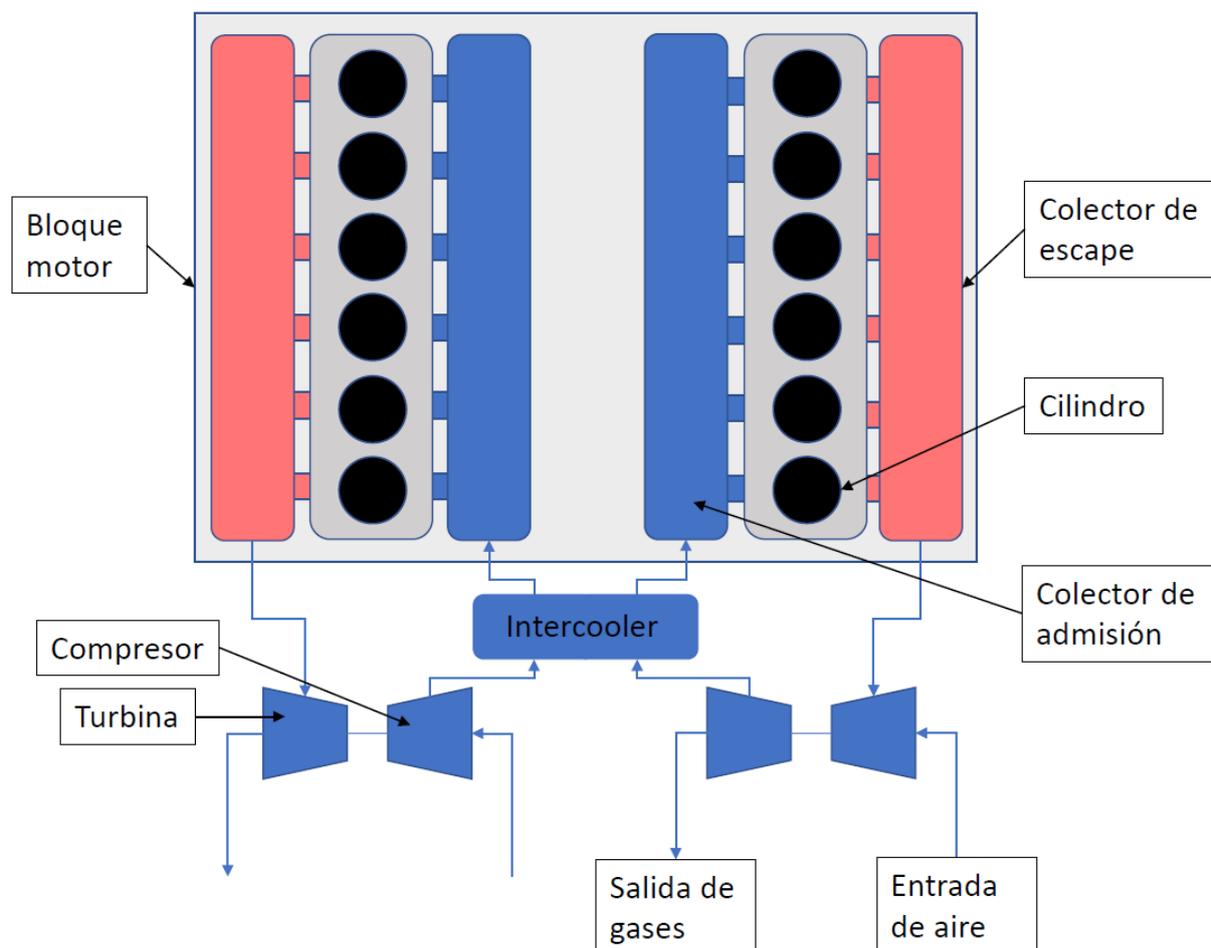


Figura 1.1. Esquema de un motor genérico con turbosobrealimentación.

Se aprecia que el motor cuenta con dos turbocompresores y un intercooler. El número total de cilindros es de doce, estando estos en una disposición en V a noventa grados.

Capítulo 2. Metodología de modelado MCIA.

2.1. Introducción

En este capítulo se va a introducir la teoría de modelado de motores de combustión interna alternativa. Se van a detallar las distintas formas existentes de modelado. Estas son varias, dependiendo de la cantidad de detalle que se quiera o se pueda proporcionar y del uso que se le quiera dar al modelo. Los métodos de modelado existentes son los siguientes:

- Modelos de mapas: Se trata del modelado más básico. Consiste en una base de datos de la cual salen todos los valores que proporciona.
- Modelo de valores medios: Se trata de un modelado más complejo que el anterior, pero muy similar. Se tiene una base de datos de la cual el modelo puede extrapolar nuevos valores.
- Modelos 0D: Basados en las leyes de la termodinámica y relaciones semi-empíricas, describen la combustión del combustible inyectado. Los valores simulados no parten de ninguna tabla, sino que son predichos en función de la configuración del modelo.
- Modelos 1D: En estos modelos la cámara de combustión se divide en múltiples zonas y las ecuaciones se resuelven en el tiempo. El nivel de detalle y complejidad es algo superior al de los modelos 0D, pero no llega al detalle de los modelos 3D.
- Modelos 3D: Los modelos 3D son los más sofisticados y complicados que se pueden realizar. Se trata del nivel más alto de modelado. Están basados en la mecánica de fluidos computacional (CFD).

2.2. Modelos de mapas

El modelado mediante mapas es el tipo de modelado más básico que se puede realizar. En él se recoge una gran base de datos del motor que proporciona todos los valores que se le pidan en cualquier momento. Por tanto, el modelo no simula ninguno de los valores, sino que simplemente accede a las tablas que necesita y busca el valor pedido. Se trata de un tipo de modelado que se utiliza cuando el sistema que se quiere simular es otro distinto del motor. Es decir, podría darse el caso de querer analizar el comportamiento general de un vehículo en una determinada situación y que para ello el detalle de modelado del motor no fuese lo más importante. En ese caso bastaría con tener los valores del motor directamente tabulados y no sería necesario ni recomendado dedicar tiempo a una simulación muy detallada del motor.

2.3. Modelos de valores medios

Aunque los modelos de valores medios están dentro de los modelos cero-dimensionales, se ha decidido separarlos para poder hablar sobre ellos de manera más detallada, pues se trata de un tipo de modelado que tiene una finalidad diferente a la de un modelo más fenomenológico.

Un modelo de valores medios consiste en una simulación del sistema del motor en el que se obtienen los resultados promediados en cada ciclo. Es decir, el modelo recoge los valores de todos los parámetros a lo largo de toda la duración del ciclo y cuando finaliza éste se realiza un promediado de todos estos valores. De esta forma, cuando en un modelo de valores medios se representa por ejemplo una temperatura, en la gráfica se aprecia que el valor es

constante a lo largo de todo el tiempo simulado (con excepción de los primeros ciclos, durante los cuales la variable parte de su valor inicial hasta llegar a su valor final).

Esto es así porque el conjunto de todos los cilindros del motor se modela considerándolos como una caja negra. Esta caja negra se define con una serie de ecuaciones fisicomatemáticas que permiten obtener unos resultados bastante aproximados a los que se tienen en realidad. Para poder realizar estos cálculos, el modelo contiene una base de datos previamente proporcionada por el usuario con la que se calculan los rendimientos volumétrico e indicado, así como el de gases de escape. De este modo, cuando se simula el modelo lo que realmente sucede es que los diferentes componentes entran en esta base de datos y recogen aquellos parámetros que necesitan para calcular los nuevos. Por tanto, no tiene nada que ver con el modelo de mapas del motor, en el cual todos los parámetros estaban recogidos en una gran base de datos, sino que en el modelo de valores medios se guardan ciertos valores específicos que permiten calcular otros tantos. De esta manera un modelo de valores medios puede utilizarse sin problemas como modelo predictivo para prever posibles comportamientos de un motor bajo determinadas condiciones que no puedan estudiarse experimentalmente por ser imposible simularlas o bien porque el coste que supondría realizarlo se incrementaría demasiado.

La gran ventaja que poseen los modelos de valores medios es que los tiempos de simulación son muy bajos, aproximadamente en torno al tiempo real y normalmente nunca lo supera. Es decir, si se simulan cien segundos reales de funcionamiento del motor, la simulación tardará en realizarse cien segundos o menos. Además, los resultados que consiguen obtenerse de estos modelos son muy buenos y se aproximan bastante a la realidad, siempre y cuando los datos de partida sean los adecuados y la calibración se haya hecho bien.

Por el contrario, en este tipo de modelado no es posible ver cómo se comporta el motor a lo largo del tiempo, pues los valores obtenidos son un promediado. Por tanto, un modelo de valores medios no te permite representar la presión del cilindro según el ángulo del cigüeñal. Para ello se deben dejar atrás los valores medios y realizar un modelo que estudie esta fenomenología sin realizar promediados. En estos modelos el concepto de la caja negra no existe.

2.4. Modelos 0D

Los modelos cero-dimensionales o termodinámicos se llevan realizando desde 1960, que es cuando la capacidad de computación empezó a incrementar y los subprocesos de un motor comenzaron a entenderse mejor. Como se ha comentado, los modelos cero-dimensionales están basados en las leyes termodinámicas (especialmente la primera ley) y relaciones semi-empíricas. Destacan por su sencillez de implementación, su exactitud y su rapidez de computación. En los modelos 0D la cámara de combustión se puede considerar como una sola zona o bien dividirse en varias.

Los modelos 0D son adecuados para describir la combustión y realizar estudios paramétricos de motores. En cuanto a la parametrización, optimización y velocidad de computación, los modelos fenomenológicos cero-dimensionales proporcionan resultados bastante buenos.

Se diferencian de los modelos unidimensionales en que no utilizan información espacial de la geometría de la cámara de combustión para describir la combustión, sino que los parámetros están en función del ángulo del cigüeñal. Además, no contienen ninguna información de la mecánica de fluidos del sistema.

Debido a que están basados en las leyes de la termodinámica se hace necesario definir volúmenes de control. Los gradientes de temperatura, ondas de presión o la vaporización del combustible entre otros son ignorados en estos modelos.

Las ecuaciones de un modelo cero-dimensional son:

- Conservación de la energía (Primera ley de la termodinámica)
- Balance de masa en el volumen de control
- Ecuación de los gases ideales

Como información añadida para resolver el sistema se tienen:

- Las condiciones iniciales
- La presión cilindro
- Expresiones para la energía interna, entalpía y constante del gas para productos y mezcla aire-combustible
- Correlaciones del coeficiente de transmisión del calor en las paredes del cilindro
- Temperaturas de las paredes de los cilindros
- Geometría del motor

Normalmente, debido a esta información que se le aporta al modelo, este sirve para diagnosticar el sistema en las condiciones impuestas. Si se aporta información del tipo de expresiones analíticas, estos modelos podrían permitir realizar predicciones para otras condiciones.

2.5. Modelos 1D

Los modelos 1D también se conocen como modelos cuasi-dimensionales y en ellos se resuelven las ecuaciones diferenciales ordinarias en el tiempo. Además, a diferencia de los modelos cero-dimensionales, estos sí utilizan la información espacial de la geometría de la cámara de combustión. También se incluyen relaciones empíricas del frente de llama y su propagación, introduciendo información de la turbulencia que tiene lugar en los cilindros. Es por esto por lo que estos modelos adquieren cierta dimensión respecto de los anteriores, aunque matemáticamente no existe una relación espacial matemática estricta.

El frente de llama que normalmente se asume en estos modelos es esférico, pues es una forma simple de tener localizado el frente con respecto a distintos puntos geométricos de la cámara.

El resto de las características que presentan los modelos cuasi-dimensionales son parecidas a los anteriores. A este nivel los modelos necesitan entradas de información empírica mayores y puede resultar difícil disponer de toda la información necesaria. Las simulaciones se calibran para aproximarse a los valores experimentales.

2.6. Modelos 3D

Los modelos 3D, englobados dentro de los conocidos como multidimensionales, son aquellos basados en la resolución de las ecuaciones en derivadas parciales. Se trata del modelado más detallado y que mayor coste computacional conlleva. Para poder completar la solución de estas ecuaciones en derivadas parciales, los submodelos utilizan información de la turbulencia, las reacciones químicas, la transmisión del calor, el comportamiento del chorro de combustible y de la capa límite. El potencial de este tipo de simulaciones radica en que se conoce de forma muy detallada la información temporal y espacial de todo el modelo a partir de las ecuaciones fundamentales que gobiernan el proceso.

En los modelos 3D se tiene lo que se conoce como la malla. Esta malla consiste en una serie de nodos unidos unos con otros formando figuras geométricas, que se adaptan a las superficies de los objetos que se están analizando. Un buen mallado resulta de vital importancia, pues es necesario para obtener unos resultados muy aproximados a la realidad.

Hay que tener en cuenta que un mallado excesivo no siempre proporcionará un mejor resultado y además incrementará enormemente el coste computacional. Por ello, la dificultad radica en encontrar una malla bien adaptada a las superficies que se van a estudiar, de forma que el modelo proporcione resultados muy buenos con un coste computacional adecuado. Por ejemplo, en el caso de motores, realizar un buen mallado en las cámaras de combustión es bastante complicado, pues en ocasiones presenta formas irregulares. Cuanto más irregular sea la superficie que se pretende simular, mayor dificultad habrá para realizar un buen mallado.

Las mallas no tienen por qué ser homogéneas, sino que es preferible que sean más finas en aquellas zonas críticas, donde la superficie cambie de dirección o exista alguna intersección con otras superficies. En cambio, serán más gruesas en aquellas zonas donde no existan grandes gradientes. Por ejemplo, en el cilindro de un motor será recomendable que la malla sea fina en las zonas cercanas a la pared y más gruesa por el centro.

El uso de modelos 3D siempre se da de forma conjunta con modelos termodinámicos 0D o 1D, debido a que se complementan muy bien entre ellos. De esta manera los ingenieros se aprovechan de las fortalezas de todas las formas de modelado existentes para conocer aún más el motor que se está modelando. Un buen modelo 3D proporciona como ya se ha dicho una información temporal y espacial del motor muy detallada. Estos detalles permiten entender mejor la física del chorro de combustible, la evaporación del combustible, la mezcla aire-combustible, la combustión, las transferencias de calor y las emisiones, entre otros. En cambio, la obtención de los estados termodinámicos del motor para una variedad de condiciones de operación es algo más adecuado para modelos termodinámicos y sería poco práctico utilizar un modelo multidimensional como los que se han mencionado ahora.

Por último, conviene decir que es sabido por todos que hoy en día aún no se han resuelto las ecuaciones de Navier-Stokes y por tanto los modelos 3D no han llegado a su punto más álgido. Hay grandes grupos de investigación tratando de encontrar la forma de resolver las seis ecuaciones en derivadas parciales y conseguir así definir completamente la mecánica de fluidos y la transmisión del calor de cualquier sistema.

2.7. Conclusiones del capítulo 2

El objetivo de este capítulo ha sido realizar una breve introducción al modelado de motores, explicando las diferentes formas mediante las que se puede abordar. Se han descrito todas las metodologías más utilizadas, desde lo más básico hasta lo más complejo y detallado, explicando cuándo conviene usar uno u otro.

En ocasiones se tiende a pensar que cuanto más detalle y más complejidad presente el modelo mejor. Sin embargo, no siempre es así, pues determinados modelos sencillos se utilizan para observar comportamientos que en ocasiones son más complejos de ver en modelos muy detallados. Lo más lógico y lo que suele hacerse cuando se pretende simular el comportamiento de un motor de combustión es realizar varios tipos de modelos que permitan obtener toda la información requerida. Por tanto, como ya se ha mencionado antes, en muchas ocasiones se trabaja conjuntamente con modelos 0D, 1D y 3D, ya que se complementan muy bien.

Para recoger de forma resumida todo lo visto en este capítulo, en la Figura 2.1 se tienen todos los tipos de modelado explicados en orden de dificultad ascendente.

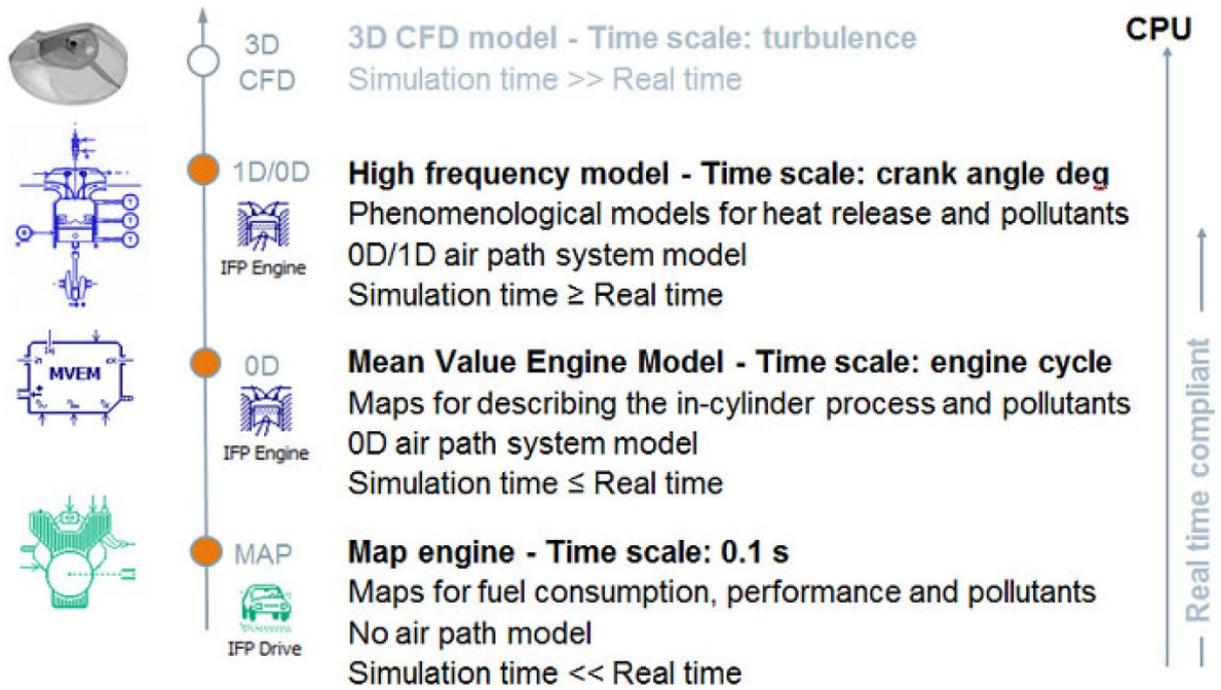


Figura 2.1. Resumen acerca de los tipos de modelado de motores de combustión interna.

Capítulo 3. Fundamentos teóricos de los submodelos de modelado global “valores medios” y modelado global en base a modelos “0D/1D”

3.1. Introducción

El objetivo de este capítulo es desarrollar la teoría de modelado termodinámico de motores. Es decir, en este capítulo se verán los fundamentos teóricos matemáticos de los modelos cero-dimensionales y cuasi-dimensionales.

En primer lugar, se va a describir el sistema considerado para realizar el análisis. Después se introducirán las ecuaciones de conservación que utiliza el modelo. Una vez introducidas las ecuaciones de partida, se hablará acerca del calor liberado por la combustión y de la transferencia de calor a través de las fronteras del volumen de control establecido. Por último, se describirán los principales flujos de masa que pueden darse en el modelo y se resumirá lo visto.

3.2. Sistema considerado para el análisis

Anteriormente se ha mencionado que en los modelos termodinámicos se trabaja definiendo un volumen de control. El volumen de control que se va a considerar es el volumen del cilindro. Se trata de un volumen abierto, pues se producen intercambios de masa con el exterior. Aparte de intercambios de masa también se dan intercambios de energía. Como fronteras del sistema se tienen las paredes del cilindro, la superficie superior del pistón y la culata.

Para el análisis se va a considerar sólo la parte cerrada del ciclo, es decir, la parte del proceso que transcurre entre el cierre de la válvula de admisión y la apertura de la válvula de escape. En la Figura 3.1 se representa el sistema considerado.

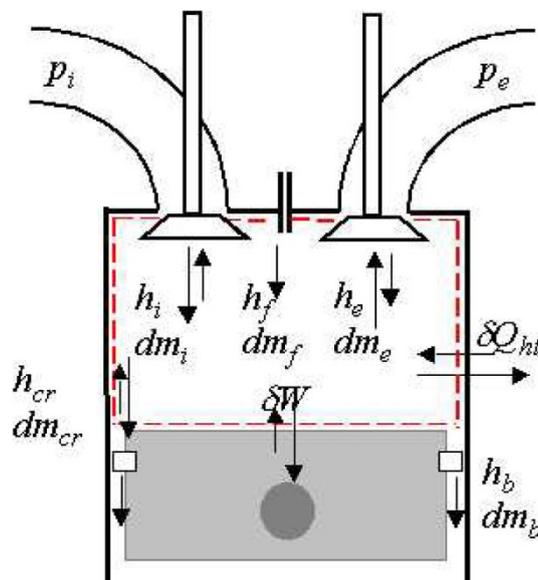


Figura 3.1. Sistema considerado para el análisis.

En la Figura 3.1 pueden verse los flujos de masa y energía del sistema. A continuación, se describe cada uno:

- δW es el trabajo realizado por el sistema.
- δQ_{ht} es el calor que se pierde por convección y conducción a través de las fronteras.

- dm_i representa el flujo de masa a través de la válvula de admisión y h_i su entalpía.
- dm_e representa el flujo de masa a través de la válvula de escape y h_e su entalpía.
- dm_f representa el flujo de combustible entrante y h_f su entalpía.
- dm_{cr} representa el flujo de masa que se pierde por intersticios no considerados y h_{cr} su entalpía.
- dm_b representa el flujo de masa que se pierde los segmentos y h_b su entalpía.

La mezcla de gases del cilindro contiene aire, combustible y gases quemados, que permanecen como residuos del ciclo anterior. Esta mezcla se va a considerar homogénea a lo largo de todo el capítulo. Como las propiedades están continuamente variando con el tiempo, el proceso es no estacionario.

3.2.1. Masa del sistema

La masa en el sistema tras el cierre de la admisión es fácil de calcular y su ecuación es la siguiente:

$$m = \frac{60 \cdot i \cdot \dot{m}_a}{n \cdot z}$$

Siendo:

- i : el número de revoluciones por ciclo (1 en motores de dos tiempos y 2 en motores de cuatro tiempos).
- \dot{m}_a es el gasto de aire del motor en kg/s.
- n es la velocidad del motor en rpm.
- z es el número de cilindros del motor.

3.2.2. Volumen del sistema

El volumen del sistema también se determina en función del diámetro del cilindro B , la carrera del pistón s , la relación de compresión r_c y la longitud de biela l . Dicho volumen es función del ángulo del cigüeñal θ y en la Figura 3.2 se representa la geometría a partir de la cual se puede obtener.

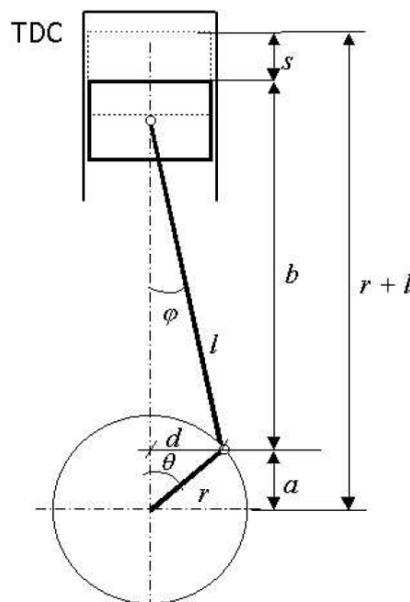


Figura 3.2. Geometría del conjunto pistón-biela-cigüeñal.

En primer lugar, se calcula la distancia recorrida por el pistón medida desde el punto muerto superior (PMS) en función del ángulo del cigüeñal siendo:

$$s(\theta) = r(1 - \cos(\theta)) + l \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{r}{l}\right)^2 \text{sen}^2(\theta)} \right)$$

Una vez obtenida esta distancia, el cálculo del volumen es sencillo:

$$V(\theta) = V_c + \frac{\pi B^2}{4} \left(r(1 - \cos(\theta)) + l \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{r}{l}\right)^2 \text{sen}^2(\theta)} \right) \right)$$

No se ha tenido en cuenta la deformación del sistema pistón-biela que suele suceder debido a las fuerzas de inercia y a la presión de los gases. En los modelos sencillos como este se suele despreciar sin ningún problema.

3.3. Ecuaciones de conservación de masa y energía

Con el sistema ya definido, el siguiente paso es aplicar las ecuaciones de conservación de masa y energía (primer principio de la termodinámica). La conservación de masa supone lo siguiente:

$$dm = \sum dm_{in} - \sum dm_{out}$$

La conservación de la energía supone:

$$dU = (\delta Q_{ch} - \delta Q_{ht}) - \delta W + \sum h_{in} dm_{in} - \sum h_{out} dm_{out}$$

Siendo:

- dU : la variación de energía interna de la masa del sistema.
- δQ_{ch} : la entrada de energía al sistema debido al calor liberado por la combustión.
- δQ_{ht} : la transferencia de calor a través de las paredes del cilindro.
- δW : trabajo realizado por el gas sobre el pistón.
- dm_i representa el flujo de masa a través de la válvula de admisión y h_i su entalpía.
- dm_e representa el flujo de masa a través de la válvula de escape y h_e su entalpía.

3.3.1. Simplificaciones

Se van a establecer una serie de simplificaciones que facilitan los cálculos y no afectan demasiado a los resultados finales.

- Se supone que la mezcla se va a comportar como un gas ideal.
- La composición de la mezcla es constante durante todo el ciclo.
- Los gases inquemados se determinan usando el dosado y la proporción de gases residuales.
- Las concentraciones de los productos de la combustión se obtienen mediante algoritmos de cálculo numérico basados en el equilibrio químico.
- Los productos inquemados son una mezcla de aire, combustible y gases residuales.
- Haciendo uso de las ecuaciones de equilibrio químico se puede determinar la composición de los productos de la combustión.

- Si la temperatura es lo suficientemente baja se puede considerar la mezcla de gases congelada, que quiere decir que a partir de dicha temperatura no tienen lugar las reacciones.
- Las propiedades termodinámicas de las especies químicas dependen de la presión, temperatura y composición. Se estiman utilizando expresiones polinómicas que dependen de la presión y de la temperatura.
- Los valores de la constante de gas ideal \bar{R} , así como los calores específicos \bar{C}_p y \bar{C}_v se consideran constantes para una temperatura media en el tiempo o intervalo angular de cálculo.
- Es posible también considerar la relación de calores específicos γ lineal con la temperatura y constante durante la combustión.

La expresión del modelo del gas ideal es la siguiente:

$$pV = n\bar{R}T$$

Esta ecuación puede diferenciarse de manera que se logre obtener lo siguiente (\bar{R} es constante):

$$pdV + Vdp = n\bar{R}dT + \bar{R}Tdn \rightarrow dT = \frac{1}{\bar{R}} \frac{V}{n} dp + \frac{1}{\bar{R}} \frac{p}{n} dV - \frac{T}{n} dn$$

La relación que existe entre calores específicos es:

$$\bar{C}_p = \bar{C}_v + \bar{R}; \gamma = \frac{\bar{C}_p}{\bar{C}_v} \rightarrow \bar{C}_v = \frac{\bar{R}}{\gamma - 1}; \bar{C}_p = \frac{\gamma\bar{R}}{\gamma - 1}$$

Sabiendo que la energía interna total en el volumen puede obtenerse como el producto del número de moles y la energía interna específica:

$$U = n\bar{u} \rightarrow dU = n d\bar{u} + \bar{u}dn = n\bar{C}_v dT + \bar{C}_v T dn = \bar{C}_v (ndT + Tdn)$$

$$dU = \frac{1}{\gamma - 1} (pdV + Vdp)$$

Como se ha comentado que las propiedades son constantes en cada intervalo angular y que γ varía linealmente con la temperatura, será necesario conocer esta variación. Se suele estimar el valor de γ en cada intervalo angular, siendo el error bajo cuanto más pequeño sea dicho intervalo. La estimación se puede realizar de diferentes maneras según varios autores:

- Chun y Heywood (1987): proponen funciones lineales $\gamma(T) = a + bT$ para cada combustible en función del dosado y gases residuales.
- Krieger y Borman (1986): en motores con dosados menores que la unidad proporcionan una expresión para calcular la energía interna y otra para la constante de gas ideal que depende de la temperatura y del dosado.

$$u(T, \phi) = K_1(T) - K_2(T)\phi; R(\phi) = K_3 + K_4\phi$$

- Brunt (1988): en motores gasolina donde el dosado relativo se encuentre entre 0,8 y 1,2 se propone la correlación siguiente:

$$\gamma(T) = 1,338 - 6 \cdot 10^5 T + 10^{-8} T^2; \text{En otro caso podría tomar el valor de } 1,28$$

3.4. Calor liberado por la combustión

En la práctica sucede que no todo el combustible se quema, sino que al término de la combustión quedan inquemados como CO, H₂ o hidrocarburos sin quemar. Por tanto, no se consigue aprovechar nunca al máximo el poder calorífico de un combustible.

En motores de encendido por compresión (MEC) el contenido de inquemados es despreciable, exceptuando el carbono no quemado. Se puede asumir que el rendimiento de la combustión es la unidad si la opacidad de los humos es baja. Sin embargo, en los motores de encendido provocado (MEP) el rendimiento se obtiene a partir del contenido de CO, H₂ e hidrocarburos. Para estimar el rendimiento de la combustión en un MEP, Blair propuso una correlación en función del exceso de aire λ y de un valor de rendimiento máximo (cercano a la unidad):

$$\eta_c = \eta_{max}(-1,6082 + 4,6509\lambda - 2,0764\lambda^2)$$

Para evaluar el calor liberado por la combustión existen dos formas:

- En función de la masa quemada y la entalpía de formación de reactivos y productos de la combustión
- A partir del poder calorífico del combustible y de la eficiencia del proceso de combustión

A partir de la segunda forma se puede obtener:

$$\delta Q_{ch} = \eta_c \cdot PCI \cdot m_f \cdot \delta x_b = \eta_c \cdot PCI \cdot \frac{m}{1 + AFR} \cdot \delta x_b$$

Donde:

- η_c es el rendimiento de la combustión.
- PCI es el poder calorífico inferior del combustible.
- m es la masa de la carga del cilindro.
- AFR es la relación aire-combustible.
- δx_b es la fracción de masa de combustible quemado.

En motores de encendido provocado con dosados cercanos al estequiométrico, la evolución de la fracción de masa quemada se obtiene con la función de Wiebe:

$$x_b(\theta) = 1 - \exp\left(-a \left(\frac{\theta - \theta_0}{\Delta\theta}\right)^{m+1}\right)$$

Con:

- θ_0 el ángulo de inicio de la combustión.
- $\Delta\theta$ la duración angular de la combustión.
- a y m son parámetros de la función que se deben ajustar en cada motor.

En mezclas cuyos dosados no sean cercanos al estequiométrico, las funciones de ajuste son más complicadas y tienen más parámetros.

Para motores de encendido por compresión las funciones para la evolución de fracción de masa quemada son más complejas, distinguiendo dos fases durante la combustión: una primera fase de premezcla y otra de combustión por difusión. La función es como sigue:

$$x_b(\theta) = \beta f_1(\theta) + (1 - \beta) f_2(\theta)$$

En la Figura 3.3 siguiente se tiene la curva.

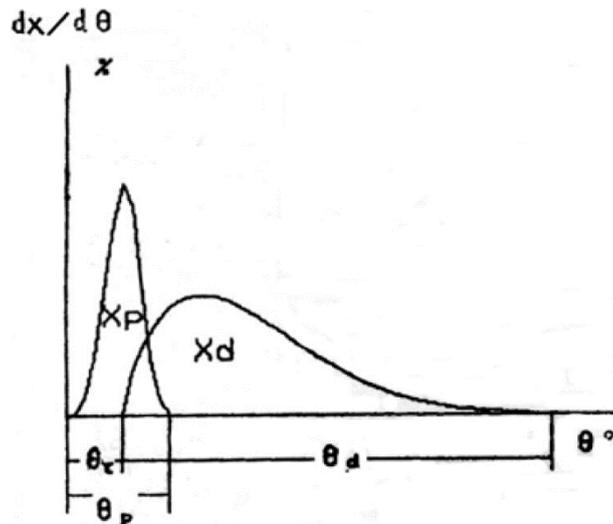


Figura 3.3. Curvas de ajuste del calor liberado en MEC.

Watson propuso ecuaciones para ajustar las curvas en las dos fases:

$$x_p = 1 - (1 - \tau^{C_7})^{C_8}; x_d = 1 - \exp(-C_9 \tau^{C_{10}})$$

Cuyos parámetros C_7 a C_{10} se obtienen de forma empírica o bien iterando, y varían según el motor.

3.5. Transferencia de calor a través de las fronteras

Tal y como se ha comentado en el apartado anterior, la combustión nunca tiene un rendimiento de la unidad. Entre otras cosas, esto se debe a que parte del calor liberado por el combustible se pierde por conducción y convección a través de las fronteras del sistema: paredes del cilindro, culata y pistón. El flujo de calor a través de las paredes se calcula como:

$$\dot{Q}_{ht,i} = h_{gas}(\theta) A_{w,i}(\theta) (T_{gas}(\theta) - T_{w,i})$$

Siendo:

- h_{gas} el coeficiente de transferencia de calor por convección y radiación.
- T_{gas} la temperatura media del gas en el cilindro.
- $T_{w,i}$ la temperatura de cada una de las paredes.
- $A_{w,i}$ el área de cada una de las tres zonas.

Estas áreas son:

$$A_{w,piston} = \frac{\pi B^2}{4}; A_{w,head} = \frac{\pi B^2}{4} + \frac{4V_c}{B}; A_{w,liner} = \pi B s(\theta)$$

La temperatura media de las paredes se puede estimar como propusieron Cheung y Heywood:

- $T_w = 400 \text{ K}$ para $\phi < 0,833$
- $T_w = 425 \text{ K}$ para $0,833 < \phi < 0,9$
- $T_w = 450 \text{ K}$ para $\phi > 0,9$

También existe una correlación:

$$T_w = a + b(\rho C_m)^{0,8} + c(pme)$$

Donde:

- ρ es la densidad del aire en el colector de admisión en kg/m^3 .
- C_m es la velocidad media del pistón en m/s .
- p_{me} es la presión media efectiva en bar.
- a, b y c son constantes que se ajustan por medidas experimentales.

El coeficiente de transferencia de calor es un parámetro muy difícil de obtener. De forma general, aplicando análisis dimensional se puede obtener:

$$f\left(h_c, B, z, y_1, y_2, \dots, y_n, v, u_1, u_2, \dots, u_n, k, \mu, c_p, \rho, \frac{\dot{Q}_{ch}}{V_d}, n, \theta\right) = 0$$

$$F\left(\frac{h_c D}{k}, \frac{\rho c_m D}{\mu}, \frac{\mu c_p}{k}, \frac{B}{s}, \frac{\dot{Q}_{ch}}{\rho c_p T n V_d}, r_c, \frac{r}{l}, y_1, \dots, y_n, u_1, \dots, u_n, \theta\right) = 0$$

Por tanto,

$$\frac{h_c D}{k} = C \left(\frac{\rho v D}{\mu}\right)^m \left(\frac{\mu c_p}{k}\right)^n \left(\frac{B}{s}\right)^l$$

Si se hacen un par de suposiciones se llega a una expresión final:

$$\left. \begin{matrix} \left(\frac{B}{s}\right)^{5 \cdot 10^{-2}} \\ Pr^n \approx cte \end{matrix} \right\} \rightarrow h_c = c D^{m-1} v^m k \left(\frac{\mu}{\rho}\right)^{-m}; \quad \left. \begin{matrix} k = a T^b \text{ y } \mu = c T^d \\ \rho = \frac{Mp}{RT} \end{matrix} \right\} \rightarrow h_c = c D^{m-1} v^m p^m T^{b-m(d+1)}$$

El coeficiente de transmisión del calor se puede pronosticar con las correlaciones de Annand o Woschni.

- La de Annand considera de forma separada la convección y la radiación. Como longitud característica (D) se toma el valor del diámetro del cilindro, B y la velocidad característica será la velocidad media del pistón, c_m .

$$h = h_c + h_r = c \frac{k}{D} \left(\frac{c_m D}{\mu} \frac{p(\theta)}{RT(\theta)}\right)^{0,7} + r \sigma \frac{(T^4(\theta) - T_{w,i}^4)}{(T(\theta) - T_{w,i})}$$

donde:

- $0,35 < c < 0,8$
- $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$
- $r = 0$ durante admisión y compresión
- $r = 0,567\sigma$ durante combustión y expansión (MEC); $r = 0,07\sigma$ (MEP)

$$k = \frac{C_p \mu}{Pr}; C_p = \frac{\gamma R}{\gamma - 1}; Pr = 0,7; \mu = 4,702 \cdot 10^{-7} T^{0,645} \frac{SN}{m^2}; R = 288,8 \frac{kJ}{kgK}$$

- Woschni tiene en cuenta la transferencia de calor por convección y radiación, tomando como longitud característica también el diámetro del cilindro, B , y como velocidad una que valore la del pistón y la de la combustión. Woschni es el método más usado en general, siendo más exacto en motores de encendido por compresión que en los de encendido provocado. La ecuación en la que está basada es la de transmisión de calor en conductos.

$$Nu = k \cdot Re^{0,8}$$

$$k \propto T^{0,75} \text{ y } \mu \propto T^{0,62} \rightarrow h_c = 130 B^{-0,2} v(\theta)^{0,8} p(\theta)^{0,8} T(\theta)^{-0,53}$$

$$v = c_1 c_m + c_2 \frac{V_d T_{IVC}}{p_{IVC} V_{IVC}} (p(\theta) - p_m) \text{ donde } p_m = p_{IVC} \left(\frac{V_{IVC}}{V(\theta)}\right)^n$$

El valor que toma n es aproximadamente de 1,3. Las constantes c_1 y c_2 dependen de la fase del ciclo en la que se esté y del tipo de motor. En la Tabla 3.1 se tienen los valores posibles.

Fase del ciclo	C_1	C_2	
		MEC inyección indirecta	Resto de motores
Renovación de la carga	$6,18+0,417 \cdot (B\omega_p/2)/C_m$	0	0
Compresión	$2,28+0,308 \cdot (B\omega_p/2)/C_m$	0	0
Combustión y expansión	$2,28+0,308 \cdot (B\omega_p/2)/C_m$	$6,22 \cdot 10^{-3}$	$3,24 \cdot 10^{-3}$

Tabla 3.1. Valores de los coeficientes c_1 y c_2 del modelo de Woschni.

La temperatura media del gas en el cilindro para cada intervalo angular se obtiene con la ecuación de gas perfecto.

$$T_{gas} = \frac{p(\theta)V(\theta)}{mR}$$

3.6. Flujos de masa

Se van a describir todos los posibles intercambios energéticos con el exterior asociados a la masa que pueden suceder en el volumen de control. La masa de combustible, los volúmenes intersticiales y flujos en las válvulas se incluyen, aunque Bertrand D. Hsu postula que estos efectos se pueden despreciar en estos motores sin tener una gran influencia en los resultados.

3.6.1. Combustible inyectado

Cuando se inyecta combustible este tiene cierta energía y, dependiendo de la que tenga la cámara, puede que el combustible ceda parte de esa energía o la absorba del ambiente de la cámara. De forma que pueda inflamarse es necesario que adquiera cierta energía. No obstante, esta absorción sucede dentro de las fronteras del volumen de control y no supone flujos de calor al exterior.

3.6.2. Fugas a través de segmentos (Blow-by)

Los segmentos no hacen una junta perfecta entre el cilindro y el pistón, y es posible que una pequeña cantidad de carga se escape por estas zonas. Su energía asociada es:

$$\delta E_b = dm_b h_b = dm_b C_p T$$

El flujo de masa en los segmentos es dm_b y se obtiene con:

$$\frac{dm_b}{d\theta} = c_b \frac{m}{\omega}$$

- c_b siendo un coeficiente de pérdidas de gas por los segmentos.
- m la masa de carga del cilindro.
- ω la velocidad angular del motor.
- C_p el calor específico a presión constante de la masa de carga.
- T la temperatura de la masa de carga.

3.6.3. Efecto de los volúmenes intersticiales (crevice volume)

Los pequeños intersticios que puede haber y no se incluyen en los teóricos son los que se mencionan aquí. Estos intersticios puede ser por ejemplo el espacio por encima de los segmentos, en la culata o en el asiento de las válvulas. Se consideran como un flujo de masa δm_{cr} que entra o sale del cilindro. Las condiciones de presión y temperatura que se consideran para estos flujos son las del cilindro.

$$dE_{cr} = dm_{cr} h_{cr}$$

Esta ecuación representa la energía perdida o ganada por el sistema, dependiendo de si el flujo entra o sale. Esta energía es función del flujo de masa y su entalpía, calculada en las condiciones del cilindro si el flujo sale o con las del volumen intersticial si entra al cilindro.

3.6.4. Flujos de masa en las válvulas

Como se mencionó anteriormente, la masa que entra y sale de las válvulas es, respectivamente, dm_i y dm_e , siendo sus entalpías h_i y h_e .

$$\frac{dm_i}{d\theta} = \left(\frac{dt}{d\theta}\right) \dot{m}_i; \quad \frac{dm_e}{d\theta} = \left(\frac{dt}{d\theta}\right) \dot{m}_e$$

$$h_i = c_p T_i; \quad h_e = c_p T$$

Donde T_i es la temperatura de admisión y T es la temperatura de la masa del sistema.

Las siguientes ecuaciones permiten calcular los flujos de entrada y salida según el valor de la presión:

- Si $\frac{p_i}{p(\theta)} < \left(\frac{\gamma+1}{2}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \rightarrow \dot{m}_i = C_{v,i} A_{v,i} \frac{p_i}{\sqrt{RT_i}} \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \left(\left(\frac{p(\theta)}{p_i}\right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{p(\theta)}{p_i}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right)}$
- Si $\frac{p_i}{p(\theta)} \geq \left(\frac{\gamma+1}{2}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \rightarrow \dot{m}_i = C_{v,i} A_{v,i} \frac{p_i}{\sqrt{RT_i}} \sqrt{\gamma \left(\frac{2}{\gamma-1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}}$
- Si $\frac{p(\theta)}{p_e} < \left(\frac{\gamma+1}{2}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \rightarrow \dot{m}_e = C_{v,e} A_{v,e} \frac{p(\theta)}{\sqrt{RT(\theta)}} \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \left(\left(\frac{p_e}{p(\theta)}\right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{p_e}{p(\theta)}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right)}$
- Si $\frac{p(\theta)}{p_e} \geq \left(\frac{\gamma+1}{2}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \rightarrow \dot{m}_e = C_{v,e} A_{v,e} \frac{p(\theta)}{\sqrt{RT(\theta)}} \sqrt{\gamma \left(\frac{2}{\gamma-1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}}$

C_v es el coeficiente de flujo en las válvulas y depende del área y del levantamiento de estas. Su valor está en torno a 0,7. El flujo inverso en las válvulas no se considera en este caso. Ello no supone gran problema, pues el análisis se restringe al ciclo cerrado y los flujos de masa son despreciables si las válvulas se ajustan bien a sus asientos.

3.7. Expresión del modelo, simplificaciones y aplicación

A modo de resumen, hasta ahora se han hecho las siguientes asunciones y simplificaciones:

- La carga del cilindro es un gas único e ideal.
- El volumen está en función del ángulo del cigüeñal.
- Se supone que los calores específicos y la relación de los mismos son constantes en cada intervalo angular.

- La relación de calores específicos se halla mediante una correlación lineal con la temperatura.
- El sistema realiza un trabajo sobre el pistón $\delta W = p dV$

Si se introducen los desarrollos de los apartados anteriores en la ecuación de conservación de la energía se obtiene la expresión general del modelo de combustión.

$$\begin{aligned} \frac{1}{\gamma-1} V \frac{dp}{d\theta} + \left(\frac{1}{\gamma-1} + 1 \right) p \frac{dV}{d\theta} = & \left(\eta_c PCI \frac{m}{1+AFR} \frac{dx_b}{d\theta} - \frac{dt}{d\theta} \dot{Q}_{ht} \right) + \\ & + c_p T_i \frac{dt}{d\theta} \dot{m}_i - \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{pV}{m} \left(\frac{dt}{d\theta} \dot{m}_e + c_b \frac{m}{\omega} \right) + (-h_{vap,f} + c_f T_f) \frac{dm_f}{d\theta} + \\ & + V_{cr} \left(\frac{T'}{T_w} + \frac{T'}{T_w(\gamma-1)} + \frac{1}{bT_w} \ln \left(\frac{\gamma-1}{\gamma'-1} \right) \right) \frac{dp}{d\theta} \end{aligned}$$

Según Bertrand D. Hsu es posible despreciar los intercambios de masas con el exterior sin afectar mucho el proceso global de combustión. Se harán las siguientes suposiciones:

- Análisis restringido al ciclo cerrado.
- No hay fugas por segmentos ni por válvulas.
- No existen efectos debidos a volúmenes intersticiales.
- Los efectos de la inyección de combustible son despreciables.

La expresión simplificada que se obtiene ahora es:

$$\frac{1}{\gamma-1} V \frac{dp}{d\theta} + \left(\frac{\gamma}{\gamma-1} \right) p \frac{dV}{d\theta} = \eta_c PCI \frac{m}{1+AFR} \frac{dx_b}{d\theta} - \frac{dt}{d\theta} \dot{Q}_{ht} = \frac{\delta Q_{fuel}}{\delta \theta} - \frac{\delta Q_{ht}}{\delta \theta}$$

Si se integra la ecuación anterior y se obtiene un método explícito se podrá aplicar el modelo. En una primera aproximación se integra en un intervalo $\Delta\theta$ y se consideran como condiciones iniciales las que se tienen al cierre de la admisión. Así se obtiene la expresión definitiva para la diagnosis de la combustión.

$$\begin{aligned} \frac{\Delta Q_{fuel}(\theta)}{\Delta\theta} = & \frac{1}{\gamma(T(\theta))-1} V(\theta) \left(\frac{p(\theta + \Delta\theta) - p(\theta)}{\Delta\theta} \right) + \frac{\gamma(T(\theta))}{\gamma(T(\theta))-1} p(\theta) \left(\frac{V(\theta + \Delta\theta) - V(\theta)}{\Delta\theta} \right) + \\ & + \frac{60}{n(rpm)} \frac{1}{360} \dot{Q}_{ht}(\theta) \end{aligned}$$

Otra posible forma de describir la combustión es como sigue:

$$\frac{\Delta Q_{fuel}(\theta)}{\Delta\theta} = \left(p(\theta + \Delta\theta) - \left(p(\theta) \left(\frac{V(\theta)}{V(\theta + \Delta\theta)} \right)^n \right) \right) \left(\frac{1}{\gamma(T(\theta))-1} V(\theta + \Delta\theta) + \left(\frac{V(\theta + \Delta\theta) - V(\theta)}{2} \right) \right)$$

El calor total que aporta el combustible es:

$$Q_{fuel} = \sum_{\theta=ESOC}^{\theta=EEOC} \Delta Q_{ch}(\theta)$$

El calor liberado acumulado normalizado es:

$$Q_{fuel,acum}(\theta) = \frac{\sum_{\theta=ESOC}^{\theta} Q_{fuel}(\theta)}{\sum_{\theta=ESOC}^{\theta=EEOC} Q_{fuel}(\theta)}$$

Capítulo 4. Simcenter Amesim y librerías IFP.

El objetivo de este capítulo es introducir al lector al programa utilizado para realizar el modelado del motor. Dicho programa es de la empresa Siemens y se llama Simcenter Amesim. En los próximos apartados se van a detallar los aspectos más importantes del software.

4.1. Introducción

Amesim (Advanced Modeling Environment for performing Simulations of engineering systems) es un programa de simulación que permite al ingeniero modelar de forma muy realista diferentes sistemas pertenecientes a distintas disciplinas de la ingeniería, entre las que destacan sobre todo la mecatrónica, la hidráulica y neumática y la de motores. De esta manera se consiguen evaluar los aspectos más importantes de estos sistemas, pudiendo prever cómo responderán en todo momento según las diferentes situaciones a las que estén sometidos. Se trata de una herramienta muy potente, con una gran cantidad de diferentes librerías que contienen los componentes necesarios para poder modelar los sistemas requeridos. Estos modelos tienen programadas distintas ecuaciones matemáticas o físicas que permiten al programa calcular todo tipo de parámetros. Las diferentes librerías que contiene el programa están programadas en C y permiten que el usuario que tenga nociones de este lenguaje de programación se pueda programar sus propios componentes en caso de necesitar algo más específico de lo que ya incluye.

Amesim guarda una estrecha similitud con otro programa comercial ampliamente conocido como es Simulink de Matlab. Dicha similitud se basa en que ambos programas funcionan con bloques, los cuales van introduciéndose en el área de trabajo y se van configurando uno a uno y uniéndose entre sí para formar un sistema completo. Si bien, aunque es posible realizar modelados de motores en Simulink y existen multitud de modelos realizados mediante este programa, normalmente es utilizado mayoritariamente para sistemas de control. Es en sistemas de control donde Simulink es muy completo. Sin embargo, Amesim nació para modelar mayormente sistemas del ámbito mecatrónico, en el que los sistemas de control pueden ser importantes, pero no son lo primordial. Por tanto, se podría decir que Amesim y Simulink se hacen competencia el uno al otro, aunque en muchas ocasiones se utilizan conjuntamente. De hecho, en ambos programas existen componentes que permiten la comunicación entre ellos por medio de lo que se conoce como FMI (Functional Mock-up Interface), que no es más que una interfaz estándar de una maqueta funcional de sistemas ciberfísicos.

4.2. Interfaz de usuario de Amesim

En este apartado se va a describir de forma general la interfaz del programa. En la Figura 4.1 se puede apreciar la interfaz de usuario (GUI) de Amesim en su versión 2019.1.

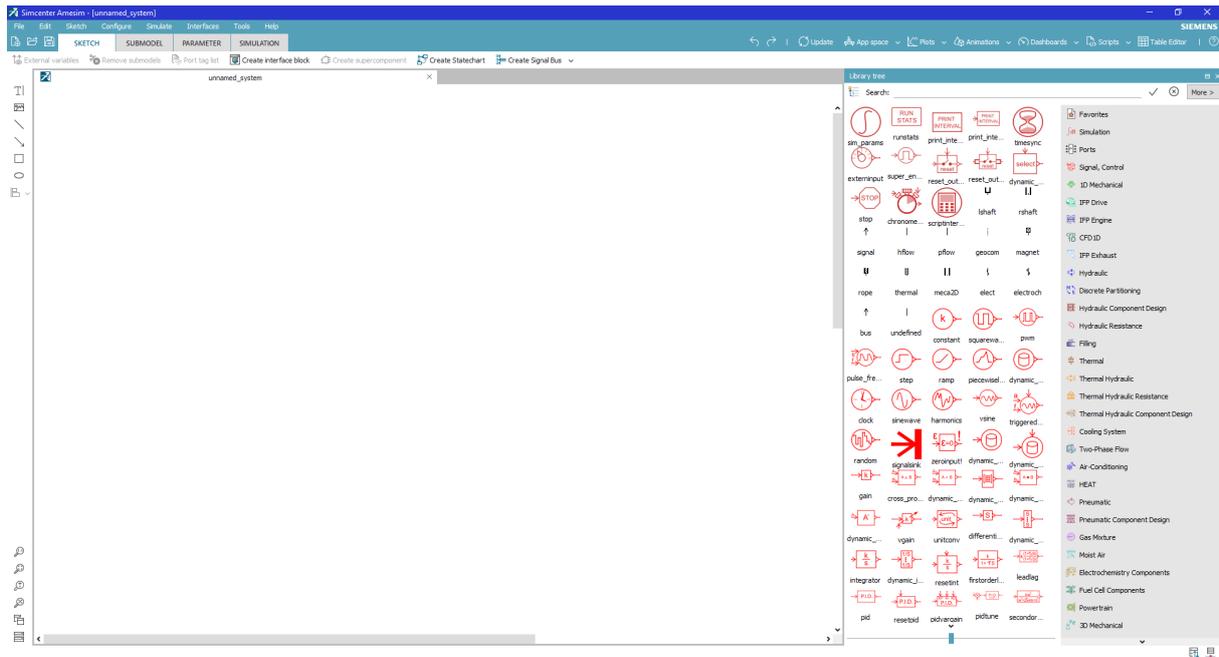


Figura 4.1. Interfaz de usuario de Amesim 2019.1.

Tal y como se puede observar en la Figura 4.1, la interfaz de usuario de Amesim cuenta con una ventana principal acompañada por la barra de herramientas habitual en la parte superior, y un panel que permite acceder a las distintas librerías en la zona derecha. La ventana principal dispone de cuatro pestañas: “Sketch”, “Submodels”, “Parameters” y “Simulation”. Será necesario pasar por cada una de ellas en ese orden antes de obtener resultados.

A modo de resumen, se detalla cada una de las pestañas:

- **Sketch:** Es la primera pestaña seleccionada por el programa cuando se empieza con un modelo nuevo. En esta pestaña se introducen los componentes uno a uno y se unen de la forma adecuada hasta conseguir formar el sistema deseado. Para introducir estos componentes basta con hacer clic en el componente deseado de la librería y hacer clic de nuevo en cualquier lugar del espacio de trabajo. Es importante resaltar que si no se unen todos los componentes como es debido, Amesim no dejará pasar a la siguiente pestaña. Cuando un componente no se ha unido a otros completamente, aparece sombreado. De esta manera se le facilita al usuario la corrección de esto último.
- **Submodels:** Cuando ya se haya completado el sistema (al menos en su primera fase), se podrá seleccionar la siguiente pestaña. En esta sección del programa se seleccionan para cada componente del sistema los diferentes submodelos disponibles. A la hora de elegir entre estos submodelos, Amesim da una idea de las diferencias existentes según la forma de denominarlos. No obstante, para profundizar aún más en las diferencias entre submodelos, Amesim cuenta con una ayuda fuera de línea muy buena, que suele ser necesaria para conocer las diferencias sutiles que se dan en muchas ocasiones entre submodelos. En general, estas diferencias pueden darse en las ecuaciones matemáticas que se utilizan para obtener las variables, en la existencia de fricción si por ejemplo se están manejando tuberías o incluso simplemente en una inversión de las variables que entran y salen del modelo. En muchas ocasiones se quiere realizar un sistema inicial muy rápido y el usuario no pretende ser demasiado específico a la hora de seleccionar los submodelos. Para ello, se dispone de la opción

“Premier Submodel”, que lo que hace es seleccionar los submodelos más simples para todos los componentes del esquema.

- **Parameters:** Una vez se tengan todos los componentes deseados y se hayan unido de tal forma que formen el sistema que se quiere modelar, hay que introducirles los parámetros a estos componentes, uno a uno. Dependiendo del tipo de componente, la entrada de datos será de un tipo u otro. En algunos casos se pedirán valores iniciales y geométricos concretos y en otros habrá que introducir tablas creadas previamente. Dichas tablas pueden ser creadas con la herramienta de entrada de datos que dispone Amesim. Esta pestaña es sin duda la más importante de todas, ya que la bondad del modelo dependerá de estos datos de entrada que se le están imponiendo. A la hora de introducir parámetros se puede observar que algunos aparecen precedidos de una almohadilla. Este símbolo indica que los valores que se introduzcan se considerarán como los iniciales. Cuanto más se aproximen estos valores a los finales, más rápida será la convergencia.
- **Simulation:** Por último, en esta pestaña se elige el tiempo de simulación y la frecuencia de muestreo de resultados (cuanto mayor sea la frecuencia más pesa el archivo, pues se guarda un número mayor de datos). Se puede cambiar el tipo de integrador, las tolerancias con las que se desea resolver, y si se desea, se pueden simular varios casos del modelo en los que varíen algunos parámetros. Esto es especialmente útil en el caso del modelado de motores, pues variando el parámetro de la carga del motor es posible simular este para los casos de carga que se desee (por ejemplo, los casos típicos de 10, 25, 50, 75 y 100%).

A modo de ejemplo, en la Figura 4.2 se puede observar una representación de las entradas y salidas de un componente cualquiera. Se observa que las entradas se representan en rojo y las salidas en verde. Esto se ha mencionado anteriormente en el detalle de la pestaña “Submodels” y resulta muy importante, ya que no todos los elementos pueden conectarse entre sí debido a lo que se conoce como “Causality”. Sólo podrán conectarse entre sí elementos cuyos puertos tengan como entradas las salidas del otro. De lo contrario Amesim dará error, indicando que no es posible realizar dicha unión.

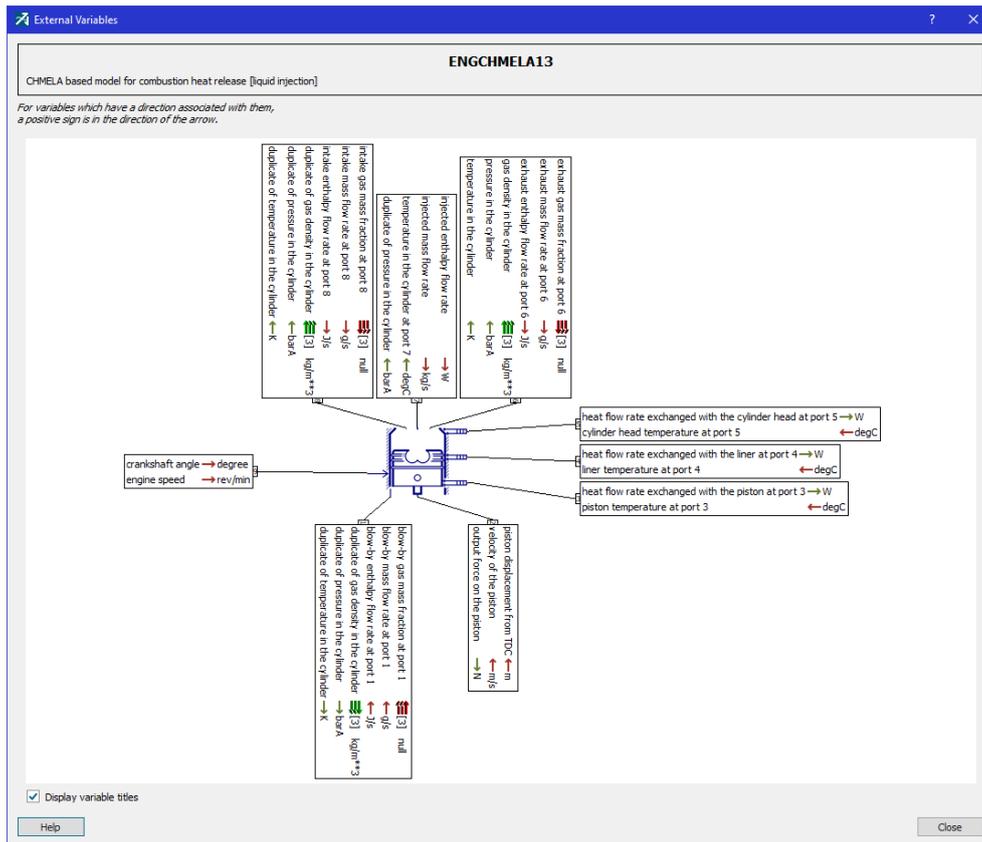


Figura 4.2. Variables externas de un componente cilindro-pistón a modo de ejemplo.

En el caso de la Figura 4.2 puede verse que para este componente concreto existen nueve puertos a través de los cuales hay un traspaso de información de un componente a otro. Esta es la manera que tiene Amesim de comunicar todos los elementos del sistema.

4.3. Librerías utilizadas en este trabajo

A continuación, se van a mostrar las librerías de las cuales se utilizarán componentes. Estas librerías, compatibles entre sí, son las siguientes:

- 1D Mechanical
- IFP Engine
- Thermal
- Thermal Hydraulic
- Signal

Excepto la librería de IFP Engine, el resto son librerías estándar que vienen con la licencia normal de Amesim. La librería de IFP Engine es una librería creada por el instituto francés del petróleo. Se trata de una librería específica para el modelado de motores de combustión interna alternativos. En el caso de este trabajo, es la librería principal de la que depende el mismo. Al no ser una librería estándar se requiere una licencia adicional. No es la única librería de este tipo, pues se pueden encontrar dos librerías más de IFP, así como otras que requieren de licencias adicionales.

4.3.1. 1D Mechanical

La librería de componentes mecánicos unidimensionales es una librería en la que pueden encontrarse elementos de tipo mecánico como pueden ser resortes, amortiguadores, elementos masa o cargas rotatorias entre otras. De esta librería se obtienen los componentes que simulan las inercias de las turbos, de cigüeñales y pistones entre otros, así como sensores de velocidad angular. La Figura 4.3 muestra los iconos de los componentes incluidos en esta librería.

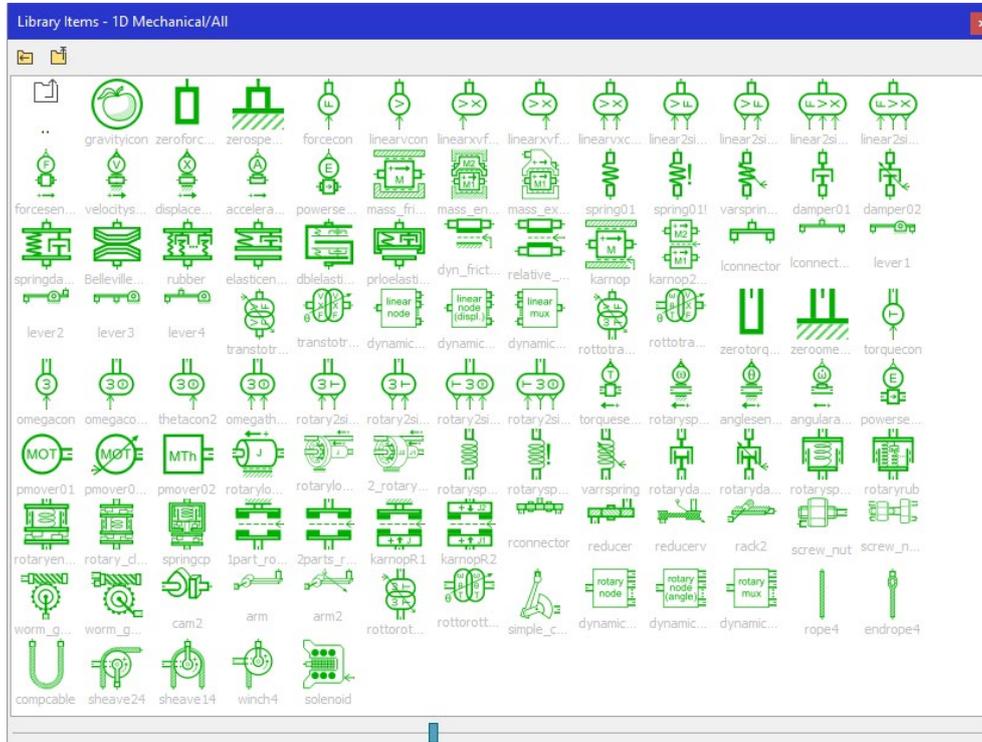


Figura 4.3. Librería 1D Mechanical.

4.3.2. IFP Engine

En esta librería se pueden encontrar todos los componentes relacionados con un motor, tales como las válvulas, inyectores, cabezas de cilindros, cilindros o cigüeñales. La mayor parte de los componentes de los sistemas que se van a realizar en este trabajo se obtienen de esta librería. En la Figura 4.4 se aprecian los iconos de los componentes de esta librería.

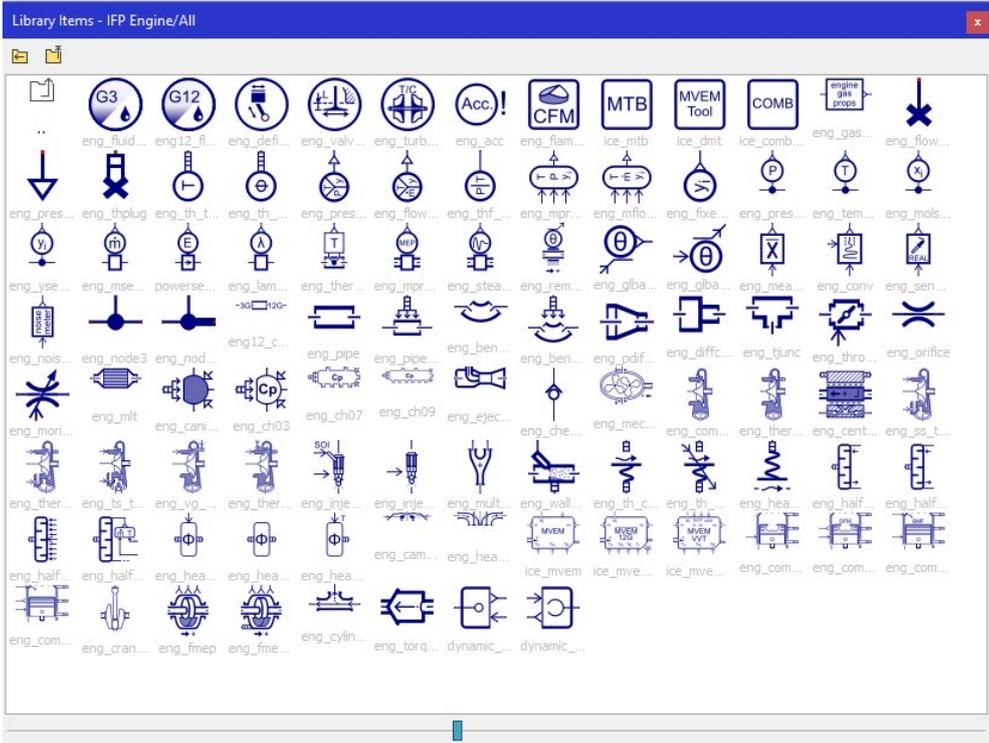


Figura 4.4. Librería IFP Engine.

4.3.3. Thermal

En esta librería se encuentran aquellos componentes utilizados para modelar la transmisión del calor en sólidos. En la Figura 4.5 se observan sus componentes.

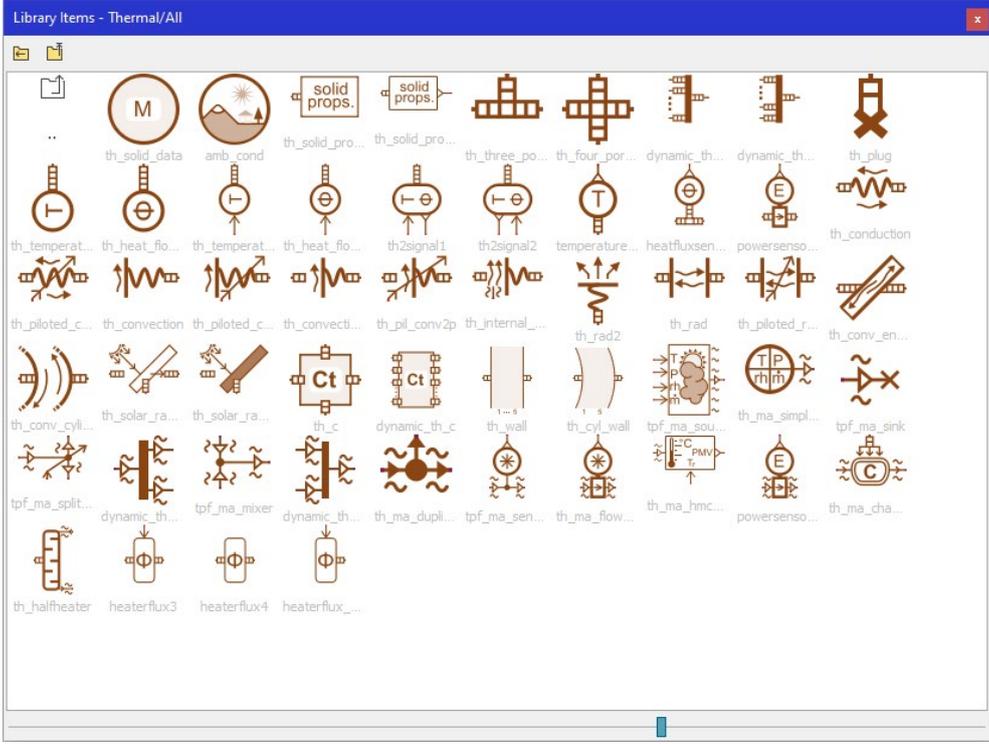


Figura 4.5. Librería Thermal.

4.3.4. Thermal Hydraulic

Esta librería dispone de los componentes utilizados para modelar la transmisión de calor de fluidos. En la Figura 4.6 se muestran sus componentes.

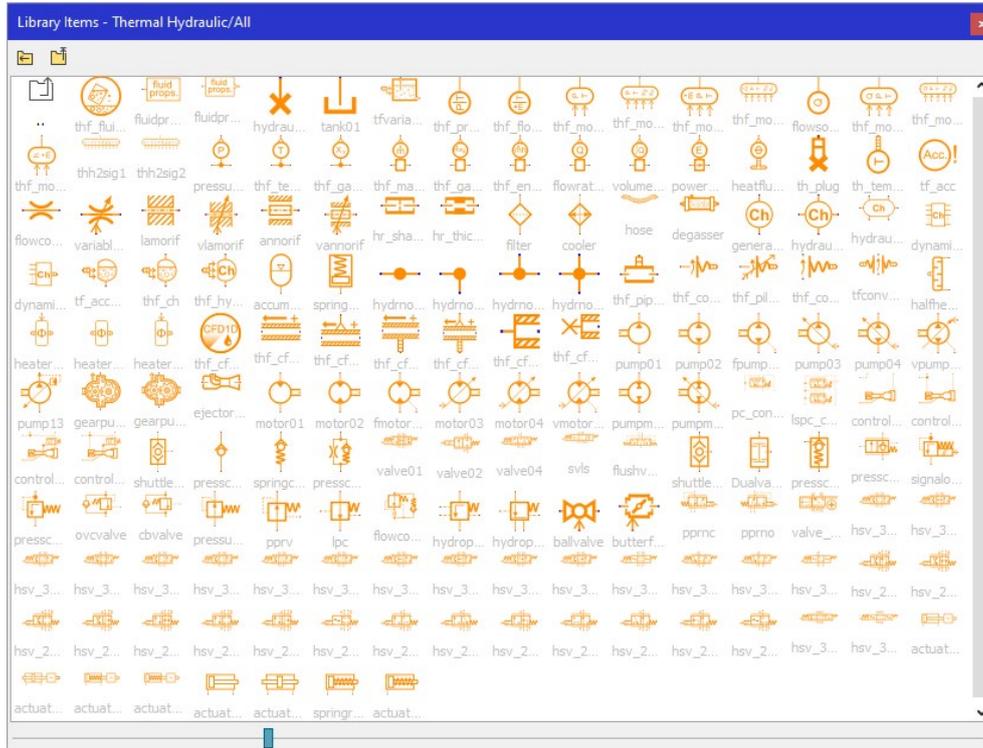


Figura 4.6. Librería Thermal Hydraulic.

4.3.5. Signal

La librería "Signal" contiene elementos de control o de introducción de datos en forma de tabla entre otros. La Figura 4.7 muestra sus componentes.

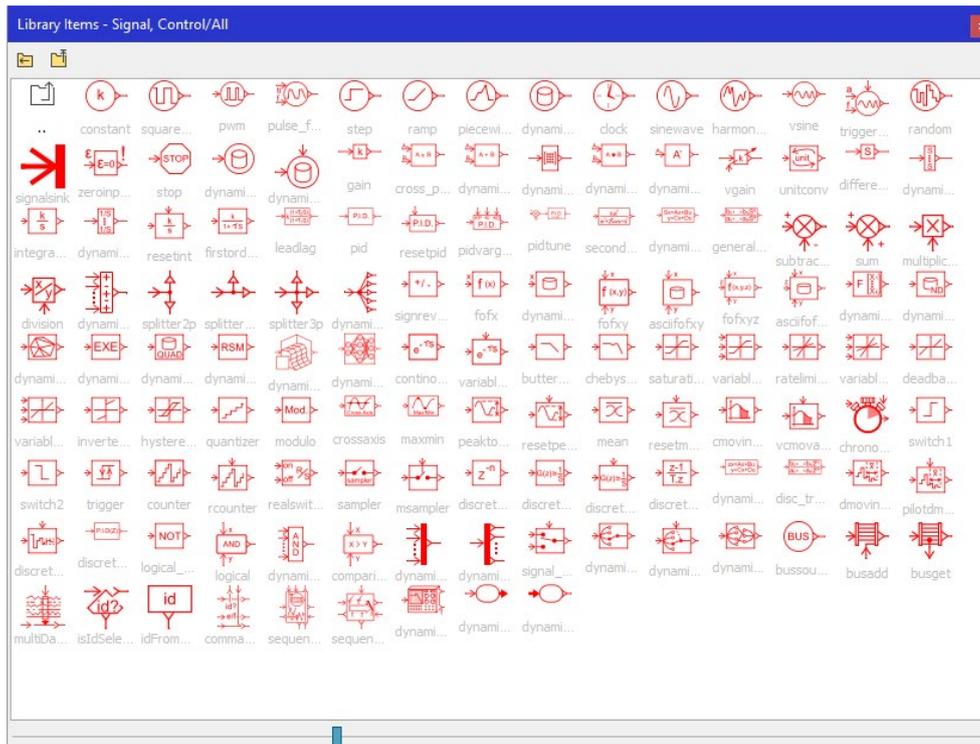


Figura 4.7. Librería Signal.

Se puede observar que cada librería tiene un color asignado. De esta manera se puede distinguir a simple vista la librería a la que pertenece un elemento de un sistema. No obstante, esto no es suficiente, pues en muchas ocasiones los colores se cambian para diferenciar entre las distintas partes del sistema y ya debe mirarse en la ayuda del componente a qué librería pertenece.

4.4. Conclusiones del capítulo 4

En este capítulo se ha querido dar una idea general del programa utilizado en este trabajo para realizar los modelos del motor generador. Se ha descrito la interfaz del programa y se han mencionado las librerías importantes que se van a utilizar. En los anexos al final de este trabajo se recoge más información de Amesim que sirve de guía a cualquier nuevo usuario del programa. En él se recogen algunos procedimientos importantes que pueden ser de gran ayuda.

Capítulo 5. Ajuste y validación de modelo de valores medios de motor diésel generador.

5.1. Introducción

El objetivo del presente capítulo es detallar el proceso de creación de un modelo de valores medios (MVEM: Mean Value Engine Model) del motor con la herramienta Amesim. La característica más importante que tienen este tipo de modelos es que todos los valores que se obtienen en la simulación son valores que no fluctúan. Es decir, cuando el modelo converge y se estabiliza, se observa que todos los valores de las variables del modelo son constantes y no varían entre un rango de valores como sí ocurre en otro tipo de modelos. Esto es así porque el modelo, como bien se puede deducir de su nombre, proporciona valores medios.

El modelo de valores medios es bastante útil cuando se comienza a modelar un motor, pues proporciona resultados bastante buenos con tiempos de simulación muy bajos, menores que el tiempo real de simulación en la mayoría de los casos. No obstante, tiene sus desventajas. Debido a que en este tipo de modelos los cilindros se introducen como una caja negra, no es posible acceder a las variaciones de la presión y temperatura en los cilindros, entre otras. Si la presión cilindro resulta necesaria, que en muchos casos lo es, se debe realizar un modelo más complejo que se verá en el siguiente capítulo.

La metodología que se va a seguir para detallar el modelo es la siguiente:

Este modelo de valores medios se va a realizar de dos formas distintas para que así se pueda comprobar que un modelado no es único. Se va a realizar un modelo donde el combustible y la velocidad de giro serán datos de entrada y un segundo modelo en el que se introducirá el par efectivo, y la velocidad de giro deberá alcanzarse de forma controlada mediante un regulador que calculará la cantidad de combustible necesaria. Es decir, en este segundo modelo, lo que en el primero eran entradas ahora serán salidas.

En primer lugar, se va a presentar el modelo completo sin separarlo en sus diferentes partes. Una vez se muestre el modelo final se procederá a descomponerlo en varias partes y se detallará cada una de ellas en diferentes subapartados. Estas partes son:

- Admisión y escape.
- Caja negra que simula los cilindros.
- Inyección.
- Eje del motor.

Para no saturar demasiado el trabajo con muchas figuras, se ha decidido no introducir capturas de los parámetros de componentes que sean muy básicos. Sólo se detallarán aquellos que sean más concretos.

Por último, se valida el modelo comparándolo con los datos obtenidos en banco de ensayos.

5.2. Modelo de valores medios del motor generador

Como se ha comentado en el apartado anterior, el modelo se va a realizar de dos formas diferentes. En primer lugar, se comenzará a detallar el caso para el cual el consumo de combustible y la velocidad de giro son datos de entrada.

Modelo de valores medios con consumo de combustible y velocidad de giro como parámetros de entrada

A continuación, en la Figura 5.1 se observa el modelo de valores medios del motor generador que se ha creado.

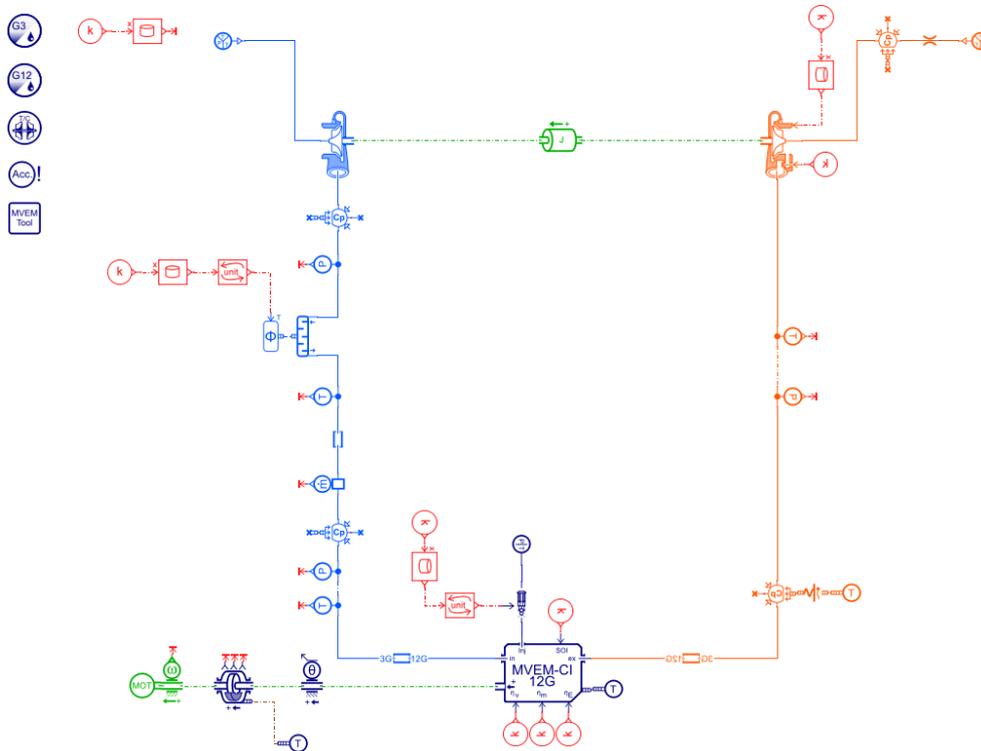


Figura 5.1. Modelo de valores medios del motor generador. Primera forma.

De la figura se puede observar en color azul claro la admisión del motor y en naranja el escape, siendo los componentes de color rojo los utilizados para el control e introducción de datos al sistema. En la Figura 5.2 siguiente se observan los parámetros globales que se han definido para introducirlos más fácilmente en los distintos componentes cuando sea necesario.

Name	Title	Value	Unit	Tags	Minimum	Default	Maximum	Type
Load	Load	100	null					Real
LHV	Lower Heating V...	43040	kJ/kg					Real
FRho	Fuel density	832	kg/m**3					Real
Ncyl	No. of cylinders	12	null					Real
Nstrk	No. of stokes	4	null					Real
Bore	Bore	165	mm					Real
Stroke	Stroke	185	mm					Real
Rod_Legth	Rod length	341	mm					Real
CR	Compression ratio	15.5	null					Real
IMVol	Intake manifold ...	16.171	L					Real
EMVol	Exhaust manifold...	11.61	L					Real
TurboInertia	Turbocharger in...	0.0001	kgm**2					Real
Tamb	Ambient temper...	298	K					Real
Pamb	Ambient pressure	1.01325	barA					Real
Pfuel	Fuel pressure	300	barA					Real
Tfuel	Fuel temperature	50	degC					Real
SOI	Start Of Injection	21	degree					Real
RPM	Engine rpm	1800	rev/min					Real

Figura 5.2. Parámetros globales del modelo de valores medios.

De forma que se puedan ver de un vistazo las entradas y salidas del modelo, la Figura 5.3 siguiente las muestra.

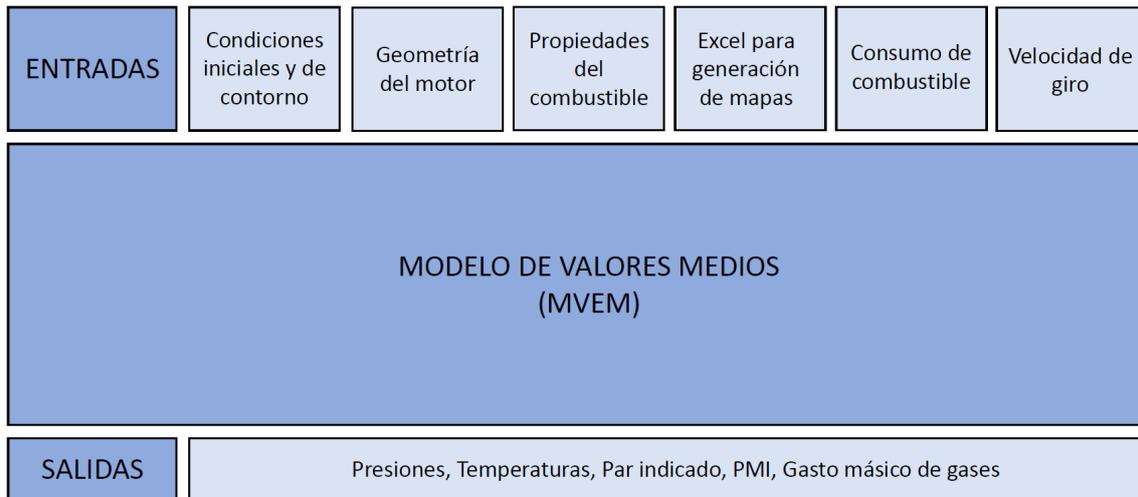


Figura 5.3. Entradas y salidas del sistema. MVEM 1.

A continuación, se detalla el modelo en profundidad.

5.2.1. Admisión y escape

En la Figura 5.4 se observan solamente la admisión y el escape del modelo del motor generador. Se han añadido anotaciones para saber qué es cada componente. No obstante, se van a detallar los componentes, así como los parámetros que han de introducirse.

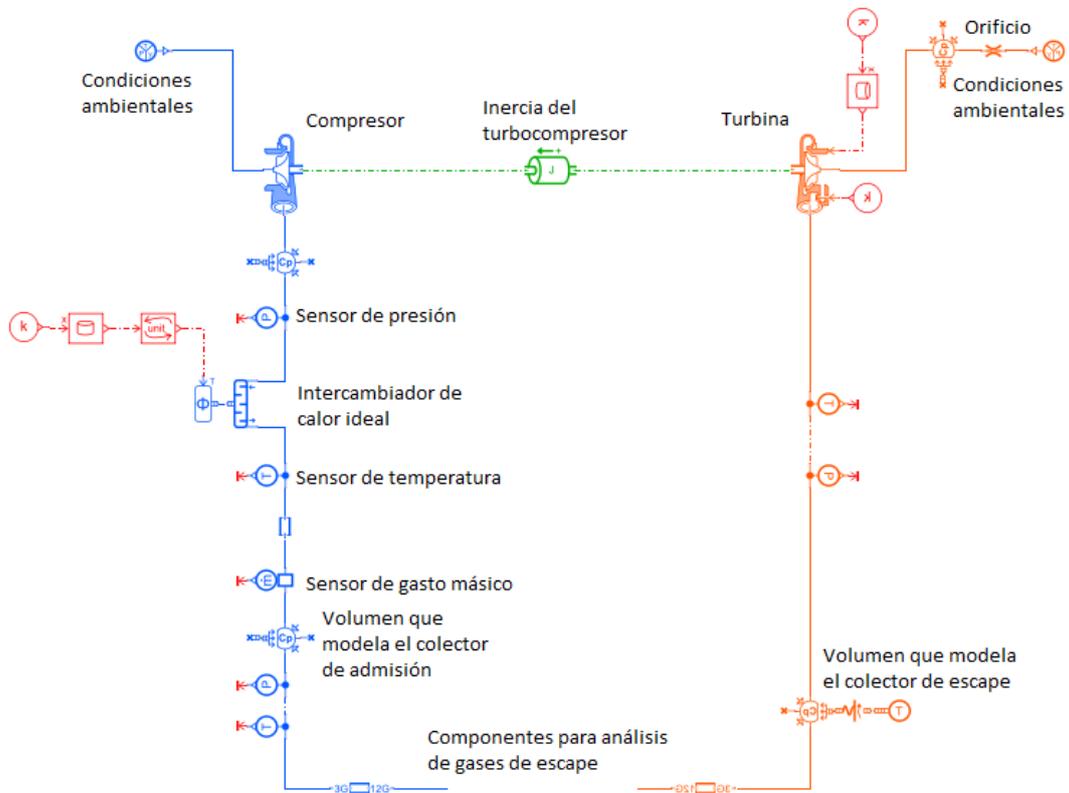


Figura 5.4. Admisión y escape del modelo de valores medios del motor generador.

Salta a la vista la existencia de un solo turbocompresor. Como ya se mencionó anteriormente, el motor generador cuenta con dos turbocompresores. Sin embargo, como se trata de un modelo muy básico al ser de valores medios, se ha preferido introducir solamente uno para simplificarlo al máximo. No obstante, el programa ha de ‘saber’ que en realidad hay dos turbocompresores y ello se le dice al introducir los parámetros y las curvas de estos.

En primer lugar, a la hora de modelar la admisión y el escape es necesario definir las propiedades del aire y del combustible según las condiciones a las que estén sometidos. Ello se realiza con uno de los dos componentes de la Figura 5.5.



Figura 5.5. Definición de propiedades de aire, combustible y gases quemados (G3) y gases contaminantes (G12).

La diferencia entre el componente G3 y el G12 reside en el número de gases que es capaz de simular. El componente G3 se utiliza cuando la obtención de los gases contaminantes de escape no sea necesaria, pues solo simula el aire, el combustible y los gases de escape de manera simple. Si se quiere realizar un estudio de los gases contaminantes de escape habrá que introducir el componente G12 que cuenta con los siguientes gases: combustible, nitrógeno, oxígeno, hidrógeno, agua, monóxido de carbono, dióxido de carbono, monóxido de nitrógeno, dióxido de nitrógeno, hidrocarburos, amoníaco y partículas sólidas de carbono. En este caso, en el modelo de valores medios creado se han introducido los dos para detallar cómo se podrían simular los gases contaminantes de escape, muy importantes hoy en día en el ámbito de los motores.

En la Figura 5.6 se observan los parámetros que se han de introducir en Amesim en el componente G3.

Parameters of eng_fluid_data [ENGMDO2-1]				
Title	Value	Unit	Tags	Name
mixture index	1			mixt
liquid fuel properties	ENG			fuelprops
gas properties	Janaf-Yaws			gasprops
fuel coefficient x in CxHyOz	12	null		xCxHyOz
fuel coefficient y in CxHyOz	26	null		yCxHyOz
fuel coefficient z in CxHyOz	0	null		zCxHyOz
fuel heating value	LHV	kJ/kg		pci
constant density of liquid fuel	FRho	kg/m**3		rho_liq
constant specific heat of liquid fuel	2230	J/kg/K		cp_liq
fuel latent heat of evaporation at reference temperature	335000	J/kg		lv_tref
reference temperature for fuel latent heat of evaporation	300	K		tref_lv
filename for air thermodynamic properties (Janaf)	...Janaf-Yaws/air_Janaf.data			fatp4
filename for fuel thermodynamic properties (Janaf)	...f-Yaws/C12H26_Janaf.data			fftp4
filename for burned gases thermodynamic properties (Janaf)	...ws/BG_C12H26_Janaf.data			fbgtp4

Figura 5.6. Parámetros necesarios en el componente G3.

Como puede verse, en primer lugar, se define el número de la mezcla de los tres componentes (aire, combustible y gases quemados) por si se llegara a utilizar más de un tipo. En este caso sólo se tiene un tipo de combustible y por tanto solo hay un componente G3 en el modelo que será el número uno. Las propiedades de los líquidos pueden introducirse de manera simple eligiendo ‘ENG’ o de las librerías “Thermal Hydraulic”. En este caso, como se conoce la densidad y el poder calorífico inferior de combustible se introduce de forma manual. Las propiedades de los gases pueden ser constantes, lineales o se pueden obtener de las tablas

de Janaf-Yaws. Como Amesim cuenta con tablas de Janaf-Yaws para diésel, se ha decidido utilizar estas. Por tanto, se definen los valores de 'x' 'y' y 'z' del combustible, su densidad y poder calorífico inferior entre otros y los archivos de propiedades Janaf del aire, combustible y gases quemados. Con esto ya están definidos los fluidos que usará Amesim para realizar los cálculos termo-fluidodinámicos.

En la Figura 5.7 se puede apreciar lo mismo, pero esta vez para el componente G12.

Title	Value	Unit	Tags	Name
mixture index		2		mixt
liquid fuel properties		ENG		fuelprops
LHV calculation mode		LHV		LHVmode
gas properties		Janaf-Yaws		gasprops
Coeff x of CxHyOz for the fuel		12 null		xCxHyOz
Coeff y of CxHyOz for the fuel		26 null		yCxHyOz
Coeff z of CxHyOz for the fuel		0 null		zCxHyOz
CxHyOz fuel heating value		LHV kJ/kg		pciCxHyOz
Coeff a of CaHb for the hydrocarbons		12 null		aCaHb
Coeff b of CaHb for the hydrocarbons		26 null		bCaHb
CaHb heating value		LHV kJ/kg		pciCaHb
Coeff n of Cn for the soot		50 null		Cn
constant density of liquid fuel		FRho kg/m**3		rholiq
constant specific heat of liquid fuel		2230 J/kg/K		cpliq
fuel latent heat of evaporation at reference temperature		335000 J/kg		lvtrf
reference temperature for fuel latent heat of evaporation		300 K		trfvl
filename for fuel (CxHyOz) thermodynamic properties (Janaf)	...f-Yaws/C12H26_Janaf.data			tpfuelpropsJanaf
filename for HC (CaHb) thermodynamic properties (Janaf)	...f-Yaws/C12H26_Janaf.data			tpHCpropsJanaf
filename for soot (Cn) thermodynamic properties (Janaf)	...ies/Janaf-Yaws/Soot_Janaf.data			tpsootpropsJanaf
directory for the gas properties of the other species (Janaf)	...2/Standard_Species/Janaf-Yaws			tpdirpropsJanaf

Figura 5.7. Parámetros necesarios en el componente G12.

De la figura anterior se observa que es muy parecida a la Figura 5.6 y, por tanto, no se va a detallar mucho más. En las últimas filas se observa que es necesario introducir las propiedades de Janaf de los otros compuestos que se incluyen en este componente.

Una vez definidos los fluidos de trabajo, se introducen los componentes del sistema de admisión y escape del motor. Para ello se introduce en primer lugar el componente que permite introducir las condiciones ambientales de presión y temperatura definidas en los parámetros globales. A continuación, se introducen el compresor y la turbina, junto a su inercia, que cuentan con un componente específico para definir todos sus parámetros. Este componente es el de la Figura 5.8.



Figura 5.8. Componente para introducir parámetros del turbocompresor.

A través de este icono del turbocompresor se introducen las curvas tanto del compresor como de la turbina, y además se proporcionan las ecuaciones de corrección de gasto másico y velocidad angular para ambos, así como las condiciones iniciales a las que están referidas dichas correcciones. Tanto las curvas como las correcciones las debe proporcionar el fabricante del turbocompresor. Además de lo mencionado, a través de esta herramienta también se introducen una serie de valores que permiten ajustar las curvas para suavizarlas, así como valores que regulen el número de extrapolaciones que pueden ser necesarias realizar a partir de ellas.

En la Figura 5.9 y Figura 5.10 se muestran las curvas del turbocompresor del motor a modelar.

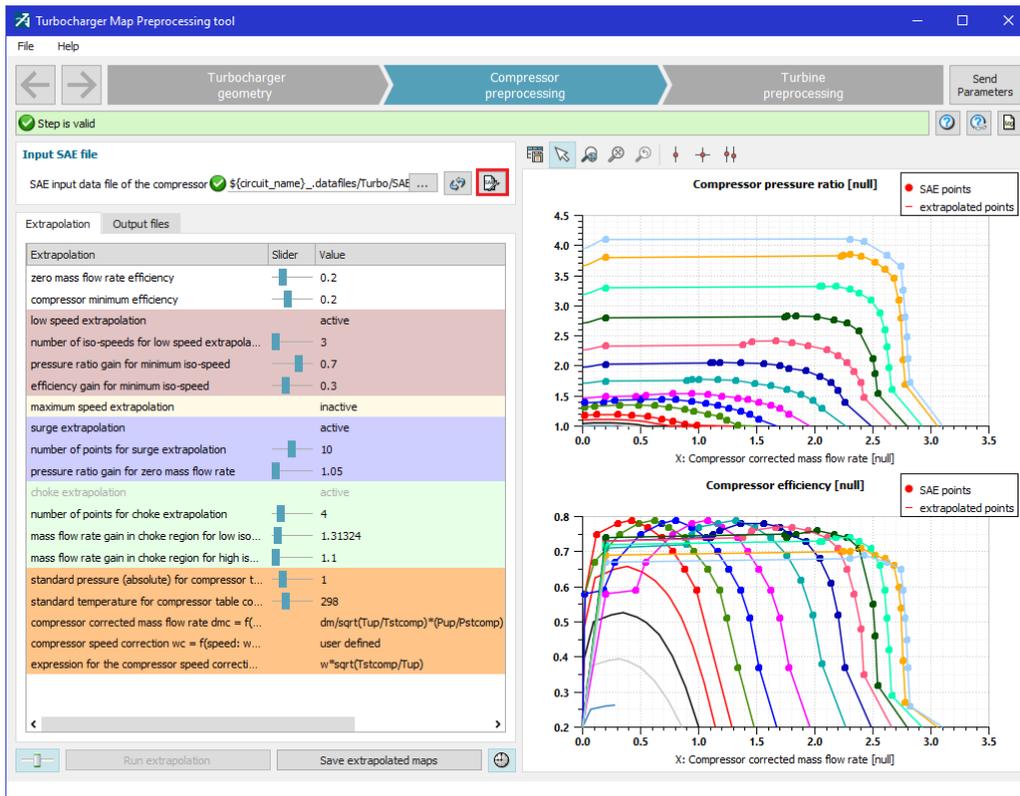


Figura 5.9. Introducción de las curvas del compresor.

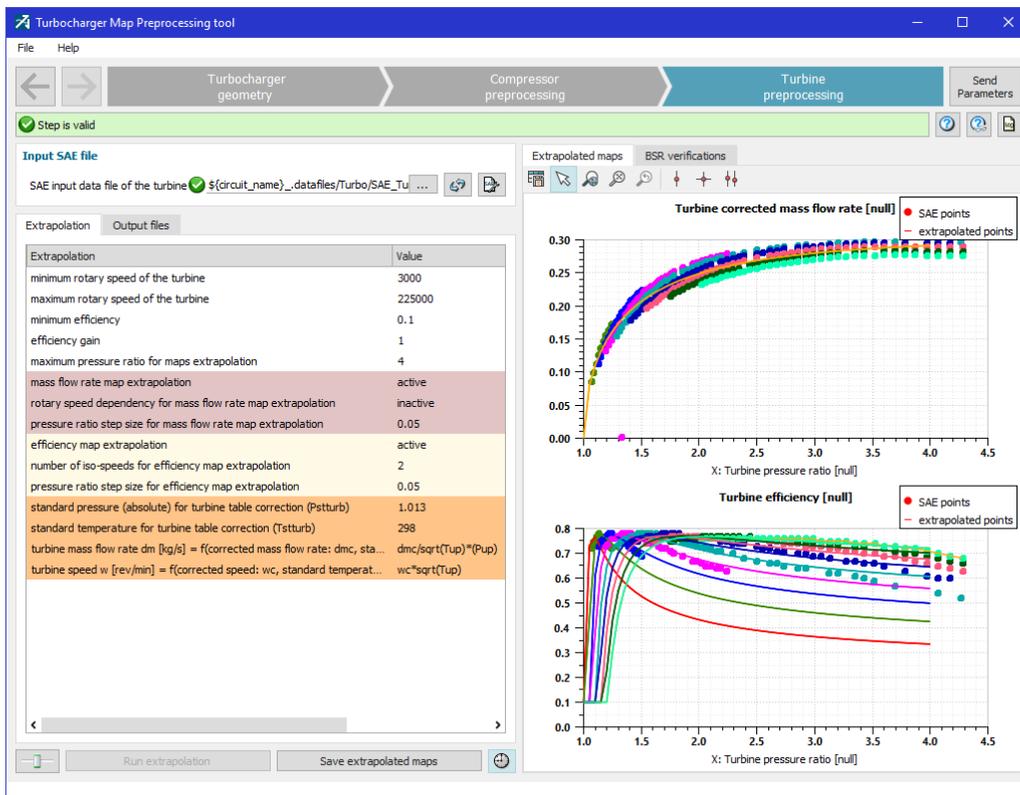


Figura 5.10. Introducción de las curvas de la turbina.

En la Figura 5.9 se puede observar que se ha recuadrado un botón en rojo. Esto se ha hecho para mencionar que accediendo a una nueva ventana clicando ahí, se le puede dar una ganancia de valor dos al gasto másico para decirle a Amesim que en realidad se tienen dos turbocompresores, como es el caso del motor generador que se está modelando.

En cuanto a lo que se puede observar en ambas figuras, se aprecia que en la parte superior de ambas se tiene una representación de las curvas de gastos másicos y en la parte inferior las de eficiencia. En la parte izquierda se tiene un panel donde se pueden variar los parámetros mencionados anteriormente.

Una vez finalizada la introducción de las curvas se procede a pulsar en el botón de “Send parameters” para que se guarden los ajustes. De esta forma ya se habrán caracterizado los turbocompresores del modelo. En la turbina se pueden observar dos señales entrando a ella. Una de ellas es el porcentaje de apertura de la válvula de escape de la turbina, que se ha dejado en cero y el otro es el parámetro de efecto de pulso que se utiliza para calibrar el modelo y se verá en un apartado posterior. Este efecto de pulso es un parámetro que ha de introducirse debido a que las curvas del turbocompresor son curvas teóricas obtenidas al analizarlo de forma separada en un banco de ensayos. Sin embargo, cuando se monta el turbocompresor en el motor, los efectos pulsantes de este hacen que la eficiencia de la turbina no sea la misma que cuando estaba desacoplada. Esto se debe tener en cuenta con este parámetro que permitirá aproximar los valores obtenidos en la simulación a los experimentales.

Los colectores de admisión y de escape se modelan como volúmenes, los cuales pueden observarse inmediatamente antes de la ‘caja negra’ en la Figura 5.4. Para modelarlos basta con introducir sus volúmenes, que se obtienen de la base de datos del motor, y proporcionar las condiciones iniciales que ayuden a la convergencia. Se observa la existencia de otros volúmenes en la parte superior. Estos son para respetar las reglas de causalidad (entradas y salidas) de los componentes de manera que puedan conectarse los distintos elementos del sistema. En el caso de un modelo de valores medios estos volúmenes no influyen en el resultado de forma significativa. Hay que mencionar que en el caso del colector de escape se ha introducido un componente que modela la convección del calor que emana de este. Se ha conectado una fuente de temperatura de ochenta grados que es el valor de temperatura que tiene el circuito de refrigeración interna por agua del sistema que aquí no se ha modelado. De esta manera se produce una transmisión de calor desde el colector de escape al exterior. El valor de la ganancia de la transmisión de calor de este componente se utilizará para realizar el calibrado del modelo.

Por último, para dar por finalizada la explicación de la admisión y escape se debe mencionar el intercambiador de calor agua-aire (CAC: “Charge Air Cooler”) justo después de la salida del compresor. Como no se ha modelado el circuito de refrigeración del motor, se trata de medio intercambiador de calor al que por el otro lado se le introduce una temperatura de consigna que se quiere obtener a la salida de mismo. Por tanto, se trata de un intercambiador bastante ideal. La temperatura de consigna se introduce mediante una tabla que recoge los cinco valores distintos de cada punto de operación en unidades de Kelvin. El componente que calcula la transmisión de calor necesita estos datos en Celsius, por lo que previamente se pasan por un componente que cambia las unidades. En la Figura 5.11 se observan sus parámetros.

Title	Value	Unit	Tags	Nam
# pressure (absolute) at port 1	1.013	barA		p1
mixture index	1			mixt
flow accuracy	global accuracy			flag
# temperature at port 1	293.15	K		t10
# mass fraction of gas 1	1	null		xinit
# mass fraction of gas 2	0	null		xinit
# mass fraction of gas 3	0	null		xinit
▼ <input type="checkbox"/> pneumatic computation				
flow rate computation	constant flow coefficient Cq			fr
free-flow cross-sectional area	2000*100	mm**2		area
flow coefficient	0.99	null		cq
▼ <input type="checkbox"/> fins				
fins consideration	no			fin
▼ <input type="checkbox"/> thermal computation				
characteristic length of the heat excha...	50	mm		cdim
convective exchange area	1000	mm**2		cear
volume of gas involved in the exchange	44.25	L		vol
minimal Reynolds number for convectiv...	2300	null		re1
maximal Reynolds number for convectiv...	10000	null		re2
expression for laminar Nusselt number ...	3.66			tp2
expression for turbulent Nusselt numbe...	0.027*re^0.8*pr^(1/3)			tp3

Figura 5.11. Parámetros del CAC.

El resto de los componentes que se observan en la admisión y escape son sensores de temperatura y presión que se utilizarán para poder obtener valores en aquellos puntos específicos donde se tienen valores experimentales.

5.2.2. Caja negra

A continuación, se detalla el componente que se utiliza para simular la combustión del motor. Se trata de una 'caja' que contiene la información de los cilindros del motor. En la Figura 5.12 se observa este componente.

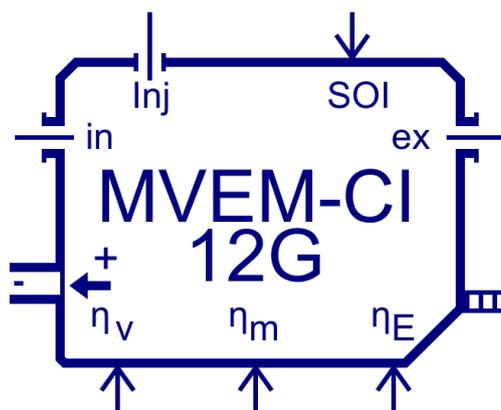


Figura 5.12. Componente que simula los cilindros del motor en valores medios.

Se puede ver que el componente tiene nueve puertos. Los dos de arriba corresponden a la inyección. En el de la izquierda ha de introducirse la cantidad de combustible inyectada en

kilogramos por hora y en el de la derecha ha de introducirse el valor del comienzo de la inyección en grados. Es importante mencionar que este valor tiene como referencia el punto medio superior de la fase de compresión. Un valor positivo de, por ejemplo, veintiuno como en este caso, significa que la inyección comienza a los $360 - 21 = 339^\circ$ del cigüeñal. Los puertos superiores de los lados corresponden a la entrada y salida de aire y gases quemados respectivamente. En el puerto inferior izquierdo del lateral se conecta el eje del motor y por el derecho se calculan las pérdidas de calor. Los puertos inferiores son ganancias que se introducen como valores constantes y que en este caso son iguales a la unidad.

En este caso, en el puerto de pérdidas se ha introducido una fuente de temperatura de ochenta y cinco grados que simula la temperatura a la que debe estar el agua del circuito de refrigeración en ese punto.

Este componente de valores medios, específico para encendido por compresión (CI), se basa en los tres mapas siguientes:

- Rendimiento volumétrico
- Rendimiento indicado
- Rendimiento del escape

Para ello se utiliza una herramienta de Amesim que permite crear los mapas a partir de un Excel donde se incluyan los valores experimentales. Este procedimiento se va a explicar a continuación debido a la gran importancia que tiene en los modelos de valores medios.

En la Figura 5.13 se puede observar el componente que es necesario utilizar para obtener los mapas anteriores.



Figura 5.13. Herramienta de generación de mapas para modelo de valores medios.

Haciendo clic en el componente en el modo "Parameters" aparece en la parte derecha un enlace que lleva a un script de Python. Pulsando sobre este enlace se abre la ventana de la Figura 5.14.

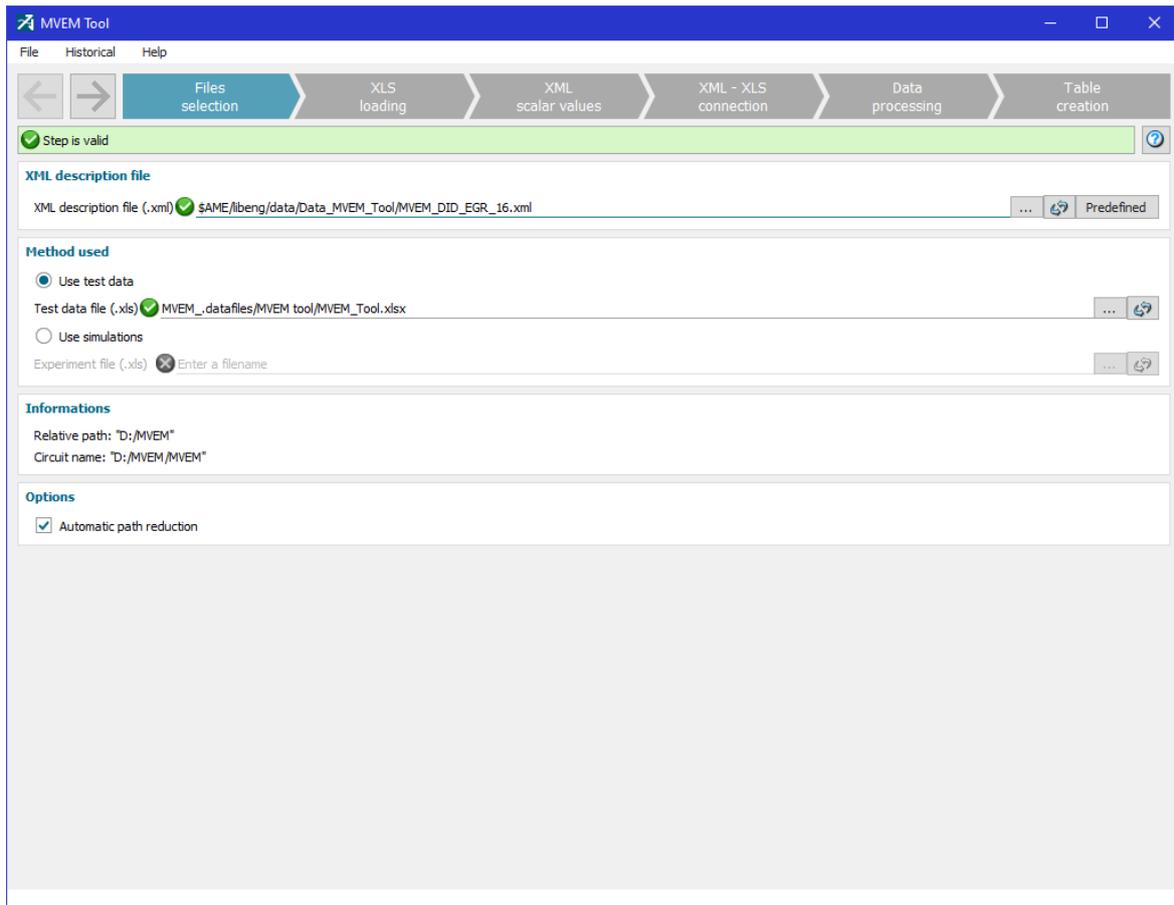


Figura 5.14. Ventana de selección de archivos para la herramienta de MVEM.

Como puede apreciarse, la herramienta cuenta con seis pestañas. En la figura anterior se aprecia la primera que aparece cuando se abre la herramienta. En esta ventana es necesario introducir los archivos que utilizará Amesim para generar los mapas. Lo primero que debe hacerse es introducir un archivo .xml en el que esté recogida toda la formulación necesaria para dicha generación de mapas. Amesim cuenta con varios archivos predefinidos y por tanto se elige la opción “To Diesel MVEM”. Automáticamente Amesim selecciona un archivo para motores diésel, como es este caso.

Después de elegir el archivo con toda la formulación hay que introducir el archivo .xls que recoge todos los datos necesarios obtenidos en banco de ensayo. Si se tiene un modelo físico del modelo y se quiere realizar uno de valores medios a partir de este, pueden elegirse datos de simulaciones de ese modelo físico en vez del archivo de Excel. Una vez hecho esto, se pasa a la segunda pestaña, que puede verse en la Figura 5.15.

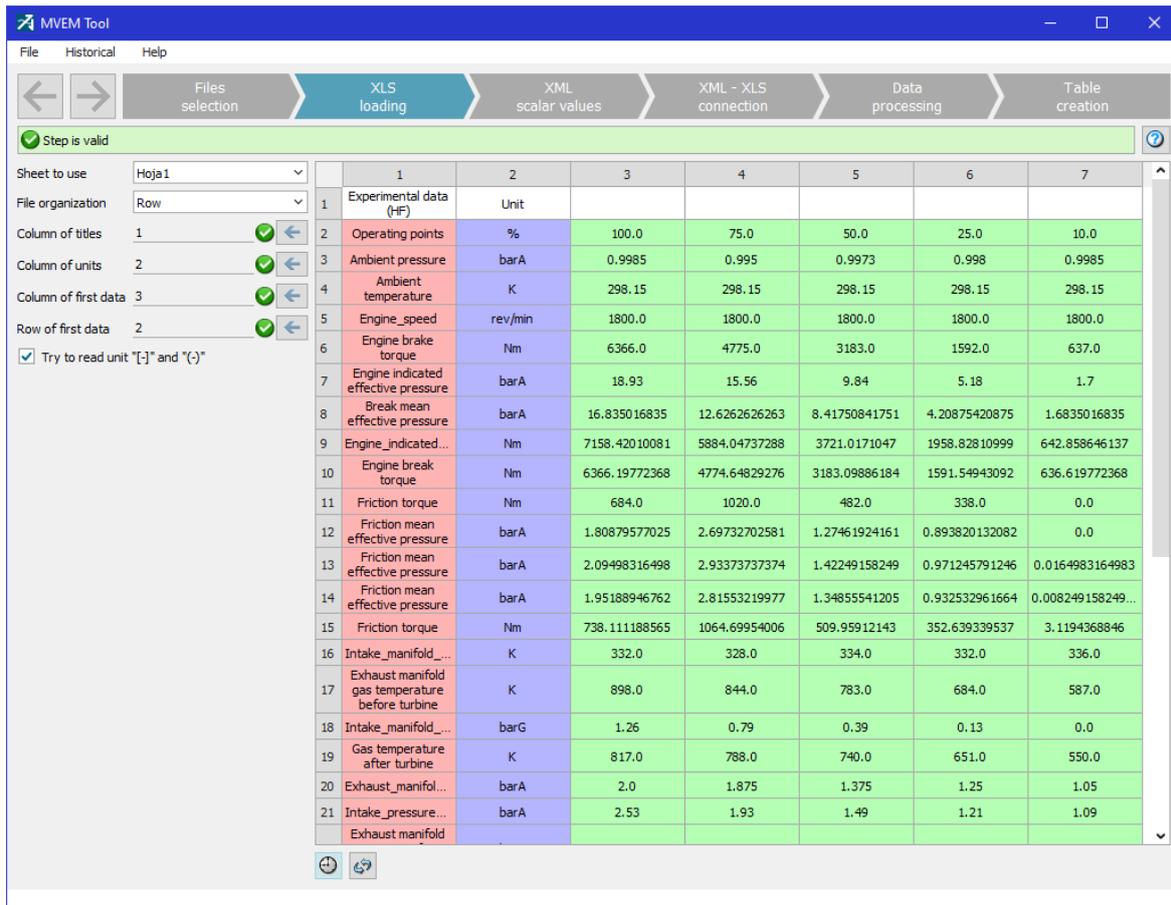


Figura 5.15. Ventana de entrada de datos desde archivo de Excel para la herramienta de MVEM.

En esta ventana se carga el archivo de datos que incluye los datos experimentales y en la columna de la izquierda se debe decirle al programa si la forma en la que están organizados los datos es por columnas o por filas, en qué filas o columnas se encuentran los títulos y las unidades y en qué fila y columna se encuentra el primer dato. Es importante que no haya ninguna casilla vacía en el Excel de entrada ya que si esto sucede Amesim no detecta bien todos los valores.

El siguiente paso es comprobar que Amesim ha recopilado correctamente los datos necesarios del modelo con los que realizará cálculos. Estos datos corresponden al número de cilindros, el diámetro del pistón, la carrera y el poder calorífico del combustible entre otros. En la parte superior de la columna derecha aparecen propiedades del aire, combustible y gases quemados que se obtienen automáticamente desde el archivo predefinido de Amesim. En la parte inferior se puede visualizar el volumen unitario y total calculado a partir de los datos del modelo. En la Figura 5.16 se puede observar esta pestaña.

Ajuste y validación de modelo de valores medios de motor diésel generador.

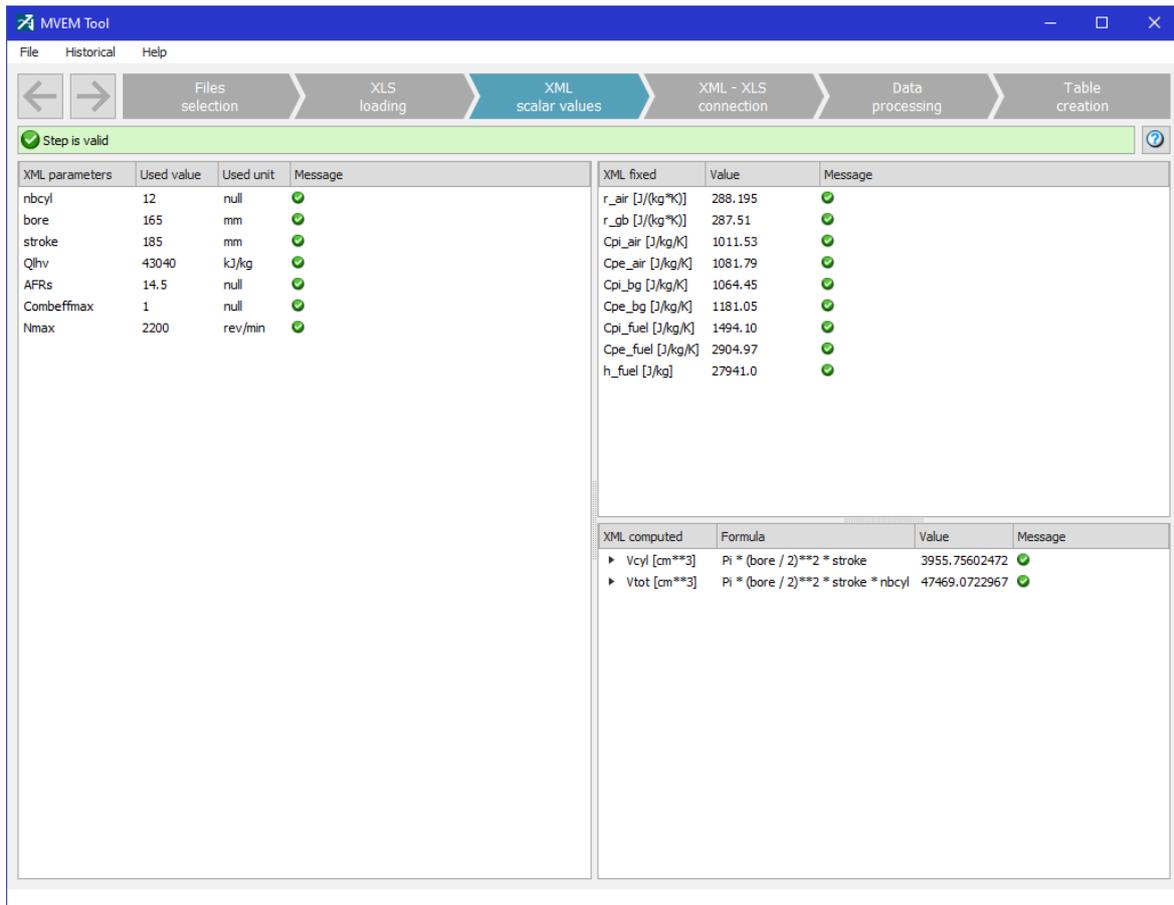


Figura 5.16. Ventana de recopilación de datos del modelo y de propiedades del archivo .xml para la herramienta de MVEM.

Una vez se ha comprobado que los datos de la columna izquierda son correctos, se pasa a la siguiente pestaña, reflejada en la Figura 5.17.

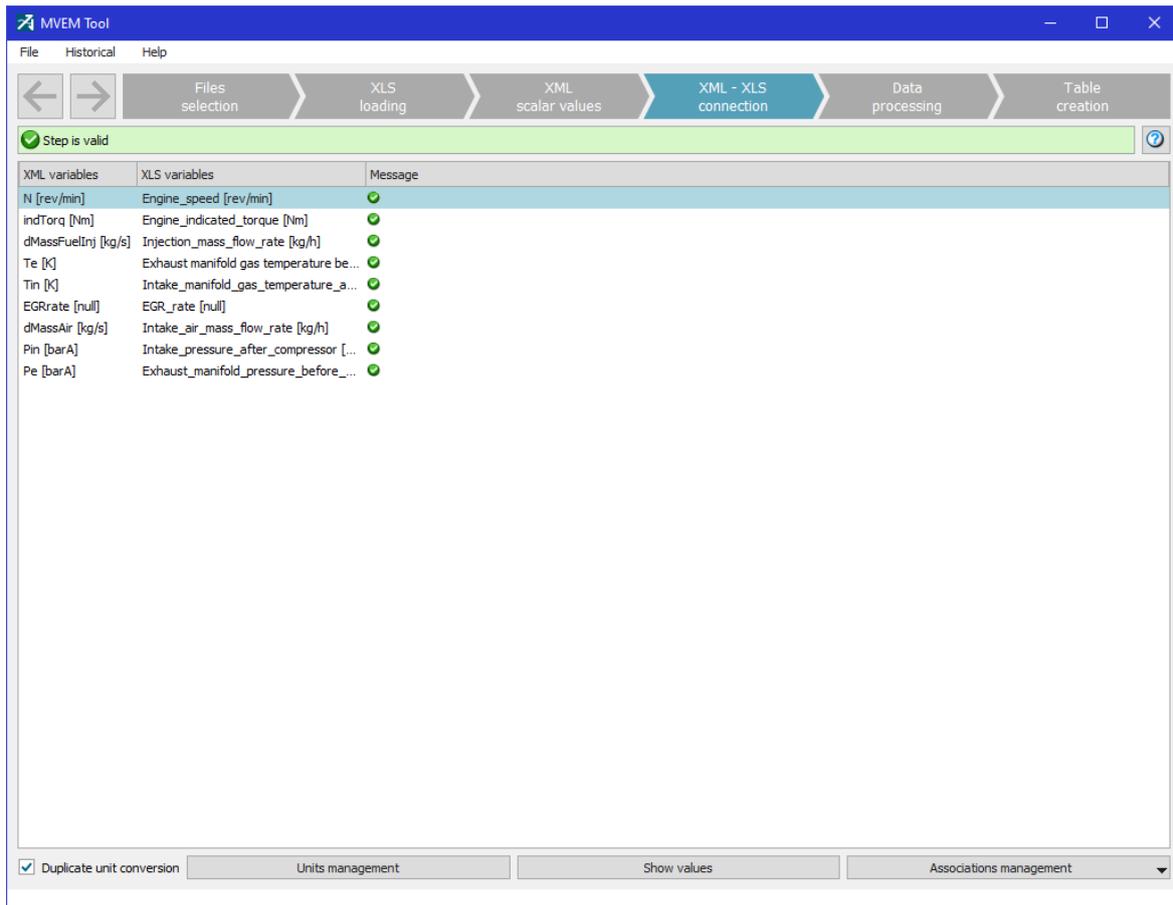


Figura 5.17. Ventana de relación de parámetros entre el archivo .xml y .xls para herramienta de MVEM.

En esta ventana el objetivo es relacionar las variables del archivo predefinido de Amesim que se seleccionó en la primera pestaña con los valores experimentales del archivo Excel. En principio este proceso suele ser automático, no obstante, en ocasiones hay algún parámetro que debe relacionarse de forma manual. El objetivo aquí es comprobar que las relaciones son las correctas.

Se pasa ahora a la siguiente pestaña, donde Amesim automáticamente realiza los cálculos. Esta pestaña es la de la Figura 5.18.

Ajuste y validación de modelo de valores medios de motor diésel generador.

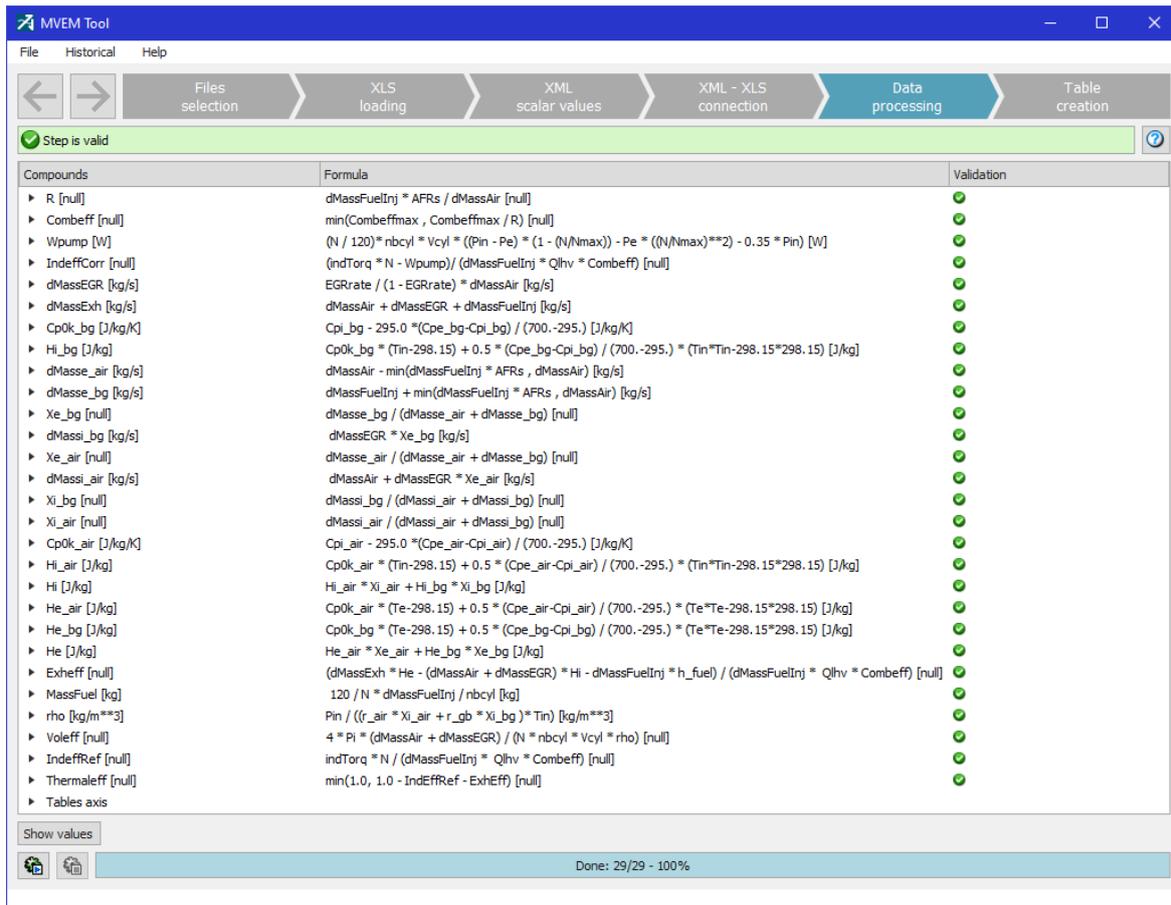


Figura 5.18. Ventana de procesamiento de datos de la herramienta de MVEM.

Se puede apreciar que en esta pestaña aparecen las variables acompañadas por las ecuaciones utilizadas para su cálculo. En esta pestaña no es necesario realizar nada, pues el proceso es automático. Así pues, se llega a la última pestaña, donde se generan los mapas en la carpeta que decida el usuario. En la Figura 5.19 se puede ver el contenido de esta pestaña.

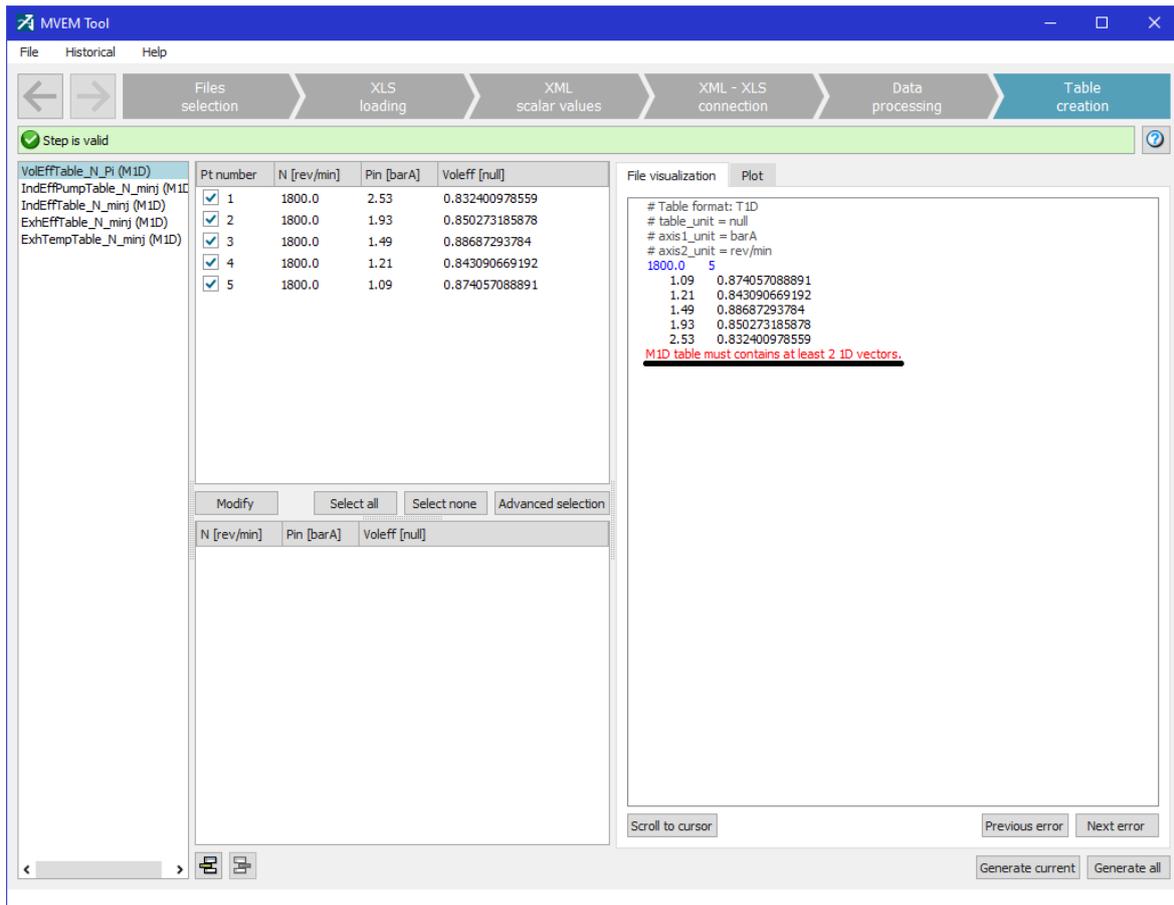


Figura 5.19. Ventana de generación de mapas de la herramienta MVEM.

Se ha subrayado en negro un aviso de la herramienta en el que menciona que es necesario tener al menos dos velocidades de motor en estos mapas, ya que si no se tienen Amesim no leerá los mapas. La solución es generar los mapas y editarlos añadiéndole una velocidad de giro adicional con los mismos valores que ha generado la herramienta. Como se sabe, en este caso se tiene una única velocidad de giro ya que se trata de un motor generador.

Una vez finalizada la generación de los mapas, hay que introducirlos en el componente principal del motor de la Figura 5.12. Esto se realiza clicando en el componente, de tal forma que en la columna de la derecha de la ventana de Amesim aparece lo que se puede observar en la Figura 5.20.

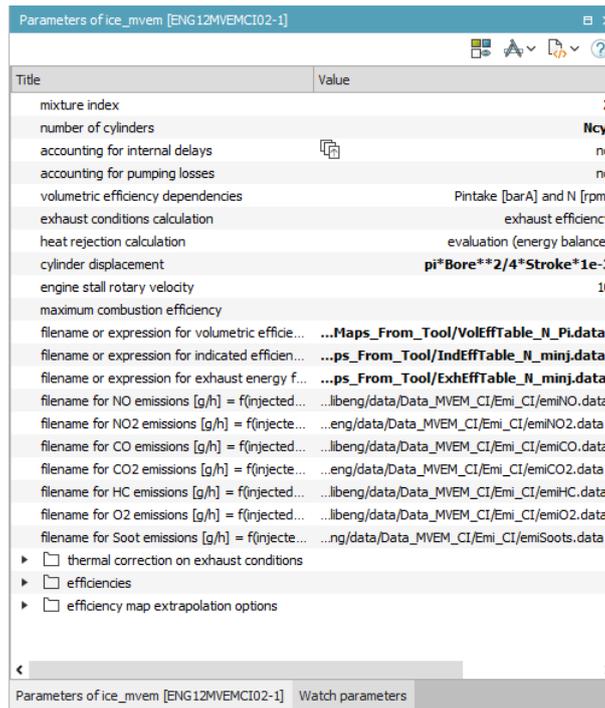


Figura 5.20. Parámetros del componente de la 'caja negra'.

Como se puede ver, los mapas de rendimientos volumétrico, indicado y de escape generados anteriormente se introducen en el componente. Además, se introducen otros valores como el desplazamiento unitario de los cilindros. Se puede ver que es posible introducir mapas de emisiones. En este caso no se ha realizado, pero se ha utilizado el componente G12 para que el usuario pueda aprender cómo se introducirían. Estos mapas recogen los gramos por hora emitidos por el motor en función de la cantidad de combustible inyectada y la velocidad de giro del motor.

Por último, se van a mostrar algunas de las ecuaciones internas del componente que pueden ser encontradas en la ayuda del programa.

El gasto másico de aire entrando al motor se calcula de la siguiente forma:

$$dm_{intake} = \frac{\rho_{in}\eta_v\omega C}{4\pi}$$

Siendo C el desplazamiento volumétrico, ω la velocidad de giro del motor, η_v el rendimiento volumétrico y ρ_{in} la densidad del aire en las condiciones de entrada. Esta densidad se calcula mediante la ecuación de gases ideales:

$$\rho_{in} = \frac{P_{in}}{R_{air}T_{in}}$$

El calor liberado en la combustión se obtiene como:

$$dh_{comb} = dm_{fuel}Q_{hv}\eta_{comb}$$

Donde dm_{fuel} es la cantidad de combustible inyectada, Q_{hv} el poder calorífico del combustible y η_{comb} el rendimiento de la combustión.

El rendimiento indicado tiene la expresión siguiente:

$$\eta_{ind} = \frac{T_{ind}\omega}{dm_{fuel}Q_{hv}\eta_{comb}}$$

El rendimiento del escape se relaciona con otras variables de la siguiente forma:

$$\eta_{exh} = \frac{dh_{exh} - dh_{inj} - dh_{in}}{dm_{fuel} Q_{hv} \eta_{comb}}$$

Siendo dh los flujos de entalpía.

Por último, el calor que sale del motor se calcula con el balance siguiente:

$$\eta_{th} = 1 - \eta_{ind} - \eta_{exh}$$

Estos rendimientos se obtienen a partir de los mapas generados con la herramienta vista. A partir de ellos Amesim obtiene los demás parámetros mediante las relaciones vistas.

La potencia de la combustión se divide en tres potencias diferentes, representándolas como los porcentajes respecto a la potencia total aportada por el combustible:

- P_1 : Corresponde al porcentaje de la potencia indicada y se calcula una vez se ha obtenido de las tablas el rendimiento indicado.
- P_2 : Corresponde al porcentaje de la potencia transferida a los gases de escape y como se ha visto, se obtiene a partir del rendimiento del escape de las tablas. No obstante, existe otra forma de obtener este valor sin necesidad de introducir la tabla de dicho rendimiento. Este método se basa en introducir la temperatura de escape directamente en modo de tabla, pero no se ha elegido esta opción, pues se considera que la otra es mejor.
- P_3 : Corresponde al porcentaje de la potencia perdida mediante intercambios de calor. Como se ha elegido la opción de balance energético en la Figura 5.20, este valor se obtiene restando al cien por cien los valores de las dos anteriores. La otra forma que se admite en el programa es mediante la introducción de una tabla de pérdidas de calor a través de las paredes. No obstante, no se recomienda esta última debido a que la suma de los tres porcentajes difícilmente será cien.

5.2.3. Inyección

La inyección es otra parte importante del modelo y merece un subapartado propio. Existen varias formas de abordar su modelado. Aquí se realiza de una manera sencilla, sin profundizar en un gran detallado del sistema de inyección, pues no se conoce tan bien como para poder realizarlo. En la Figura 5.21 se muestra el sistema de inyección.

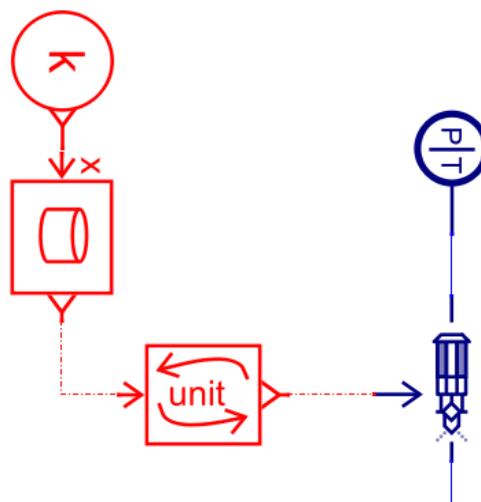


Figura 5.21. Sistema de inyección para el primer modelo de valores medios.

Como se puede ver, al inyector se le conecta en su puerto superior un componente de presión y temperatura que representan las condiciones a las que se encuentra el combustible. En este caso la presión es de trescientos bares y la temperatura de cincuenta grados. La cantidad de combustible inyectado se introduce según los cinco puntos experimentales utilizados para calibrar el modelo (10, 25, 50, 75 y 100%). Para cada punto se introduce un valor mediante el uso de una tabla. En la otra variante de este modelo de valores medios se aprenderá a realizarlo de otro modo.

5.2.4. Eje motor

Por último, se describe a continuación la última parte de modelo correspondiente al eje del motor. La Figura 5.22 lo muestra.

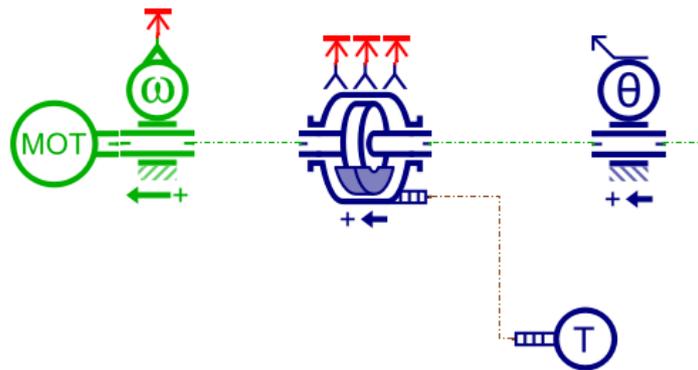


Figura 5.22. Eje motor del primer modelo de valores medios.

Puede verse que la velocidad de giro del motor se le impone con un componente. Para medir el ángulo de giro del cigüeñal se introduce un sensor que enviará al componente del bloque motor este valor en todo momento para que sepa cuándo inyectar. Se ha introducido también un sensor de velocidad angular. Como puede observarse en la figura anterior y echando un vistazo a la Figura 5.12, las flechas de los componentes van todas en el mismo sentido. Es importante respetar este sentido para evitar problemas de simulación, pues esas flechas indican el sentido positivo de parámetros que se está midiendo. Para simular las pérdidas mecánicas del motor se introduce el componente de la Figura 5.23.

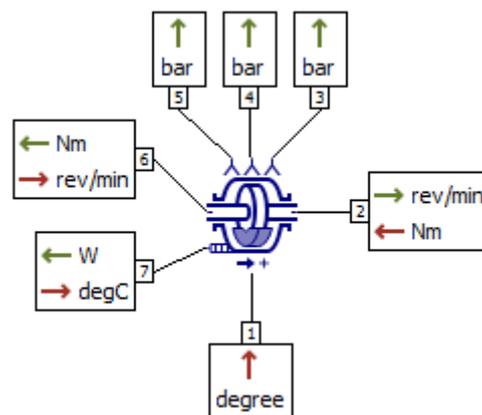


Figura 5.23. Componente para simular las pérdidas mecánicas del motor.

Estas pérdidas mecánicas se introducen mediante una tabla cuyos datos se obtuvieron en banco. Esta tabla ha de introducirse en los parámetros del componente y es de la forma representada en la Figura 5.24.

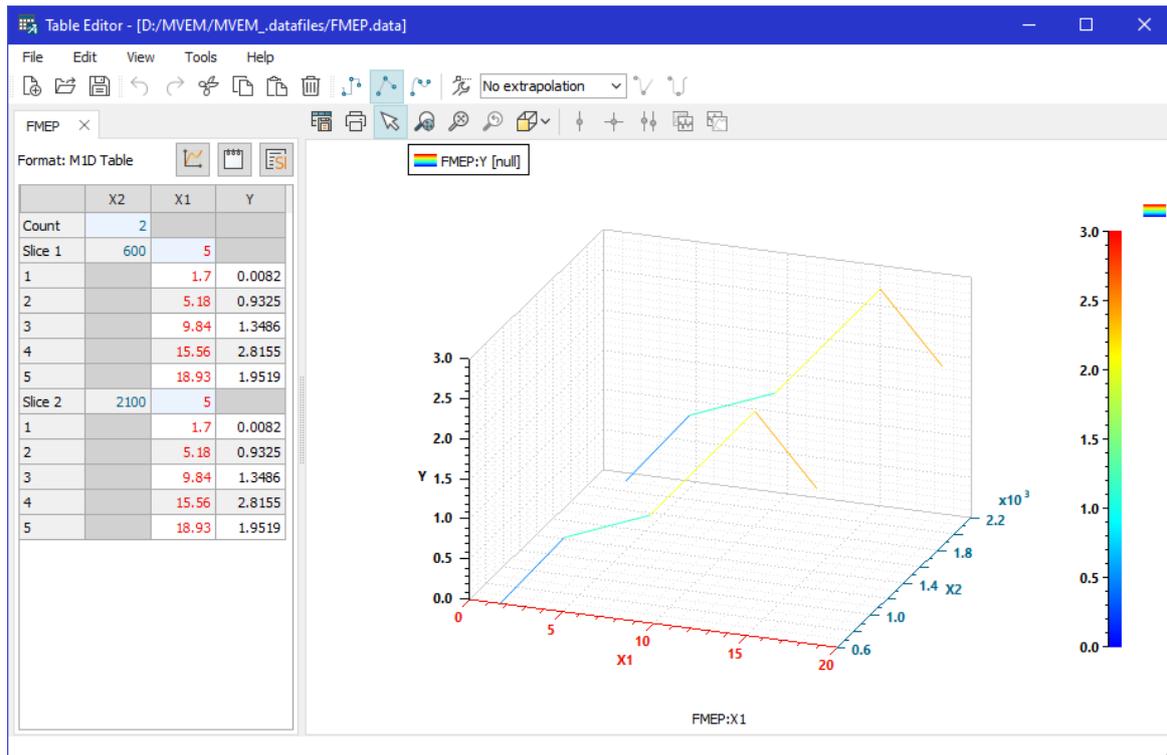


Figura 5.24. Tabla de presión media de pérdidas mecánicas.

Puede apreciarse que se han introducido los valores de presión media de pérdidas mecánicas en función de la presión media indicada obtenida en cada uno de los cinco estados de carga para dos velocidades diferentes. Esto es parecido a lo que sucedía con los mapas para el bloque motor. Se necesitan dos velocidades distintas. Por tanto, se añade otra velocidad cualquiera. Como ya se ha dicho, esta tabla es un archivo de datos que se introduce en los parámetros, tal y como se refleja en la Figura 5.25.

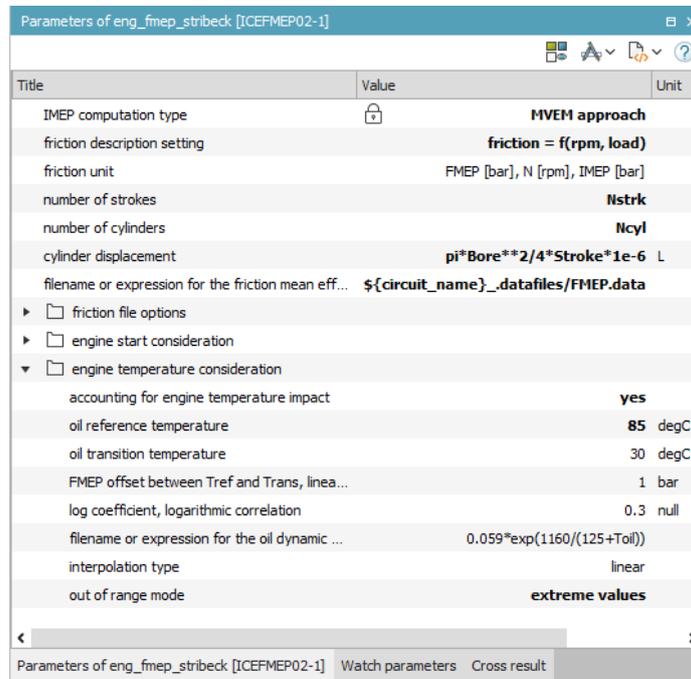


Figura 5.25. Parámetros del componente de pérdidas mecánicas en el modelo de valores medios.

En primer lugar, en este caso ha de elegirse la opción de “MVEM approach” porque es un modelo de valores medios. Se le dice que los datos que se van a proporcionar dependen de la carga del motor y su velocidad. Se introducen el número de carreras y cilindros y el volumen unitario. Si se quiere considerar que el componente va a estar refrigerado, se introduce la temperatura del aceite, que en este caso es de ochenta y cinco grados. La fuente de temperatura conectada al componente simula la temperatura que debería tener en ese punto el agua del circuito de refrigeración que también es de ochenta y cinco grados.

Modelo de valores medios con par efectivo como parámetro de entrada

De forma que pueda comprenderse que no hay un camino único para modelar sistemas, en este caso un motor, se han decidido introducir unos cambios en la forma de modelar el sistema de inyección y el eje motor. Todo lo demás es igual que el caso anterior y, por tanto, para no ser repetitivo no se va a describir de nuevo.

En la Figura 5.26 se representa otro modelo de valores medios del mismo motor con ligeros cambios.

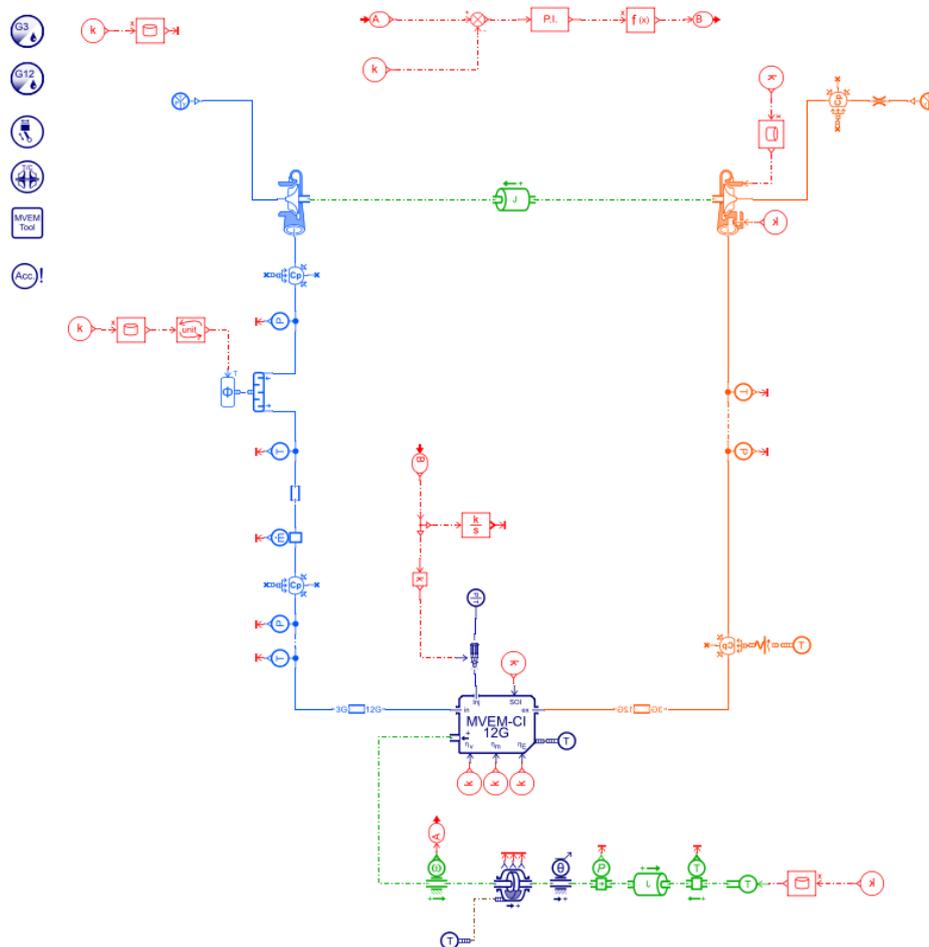


Figura 5.26. Modelo de valores medios del generador. Segunda forma.

Como puede verse, tanto en la inyección como en el eje motor hay cambios. De forma resumida se puede decir que ahora no se introduce el combustible, sino que éste se obtiene mediante un controlador que compara la velocidad de giro del motor con la de consigna y calcula cuánto combustible se necesita introducir para alcanzar dicha velocidad. Por tanto, la velocidad de giro no se fija. Lo que se fija aquí es el par haciendo uso de una tabla que

contiene los diferentes valores del par efectivo según la carga. En la Figura 5.27 se muestran las entradas y salidas al sistema en este caso.

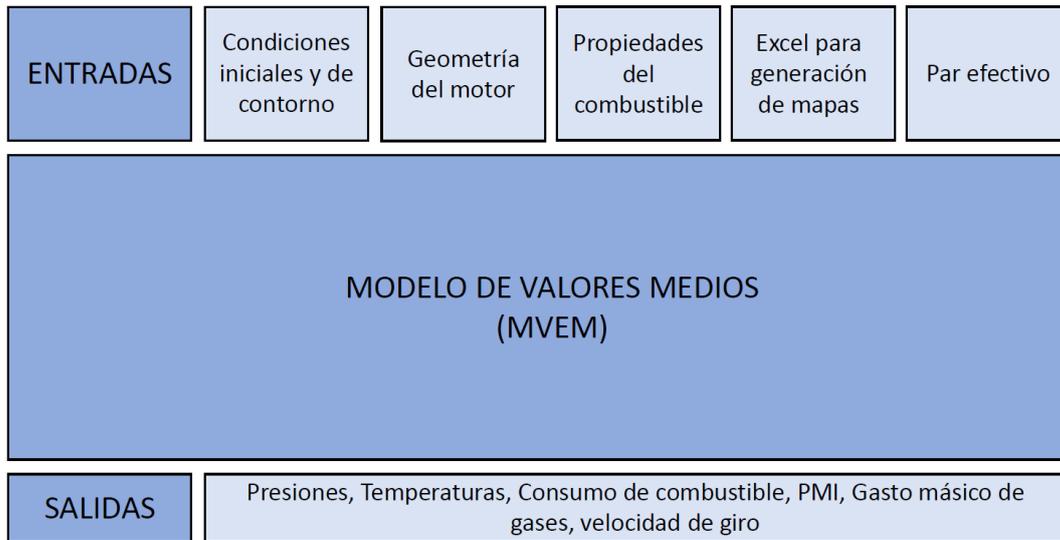


Figura 5.27. Entradas y salidas del sistema. MVEM 2.

En la Figura 5.28 se muestra el controlador proporcional integral que calcula el valor del gasto másico de combustible necesario.

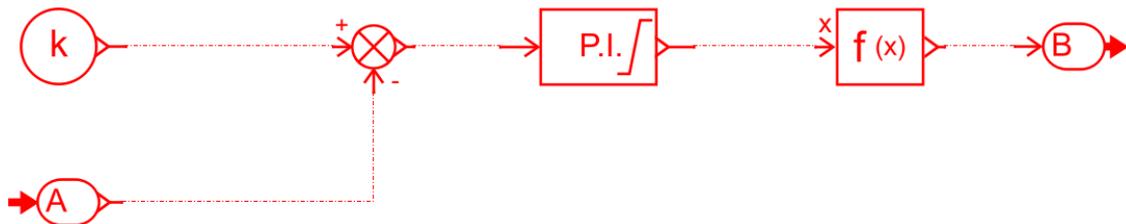


Figura 5.28. Controlador para el cálculo del gasto másico de combustible en el segundo modelo de valores medios.

El proceso que sigue el controlador es el siguiente: Mediante una constante 'k' se fija la velocidad de giro de 1800 vueltas y con un emisor se manda la velocidad actual al receptor, que es el componente que tiene la letra 'A'. Al valor de consigna se le resta el valor actual de velocidad de giro y el valor calculado con esta resta se introduce en el proporcional integrador configurado con los parámetros de la Figura 5.29.

Title	Value	Unit	Tags	Name
# integral part		0	null	ipart
controller type	🔒	PI		outputtype
limit output		yes		outlim
proportional gain		0.1	null	Kp
integral gain		0.01	null	Ki
▼ <input type="checkbox"/> saturation				
maximum permitted output value		1	null	outmax
minimum permitted output value		0.01	null	outmin
anti windup method	back calculation and tracking			antiwind
backtracking gain		0	null	Ks

Parameters of pid [PID001-1] Watch parameters Cross result

Figura 5.29. Parámetros del controlador proporcional integrador del segundo modelo de valores medios.

De la figura anterior se puede ver que la salida del controlador no podrá ser inferior a 0,01 ni superior a 1. Las constantes se fijan de manera que la de la parte proporcional sea de 0,1 y la de la parte integral sea 0,01. Por último, la salida del controlador se hace pasar por un componente que multiplica el valor obtenido por una constante. Para el caso de carga del cien por cien, el consumo de combustible es de 254 kg/h, que transformados a g/s son 70,56 g/s. De esta forma, si se le da un valor de ochenta a la constante del componente mencionado se asegura que el valor simulado esté cerca del requerido. Así pues, cuando se simulen el resto de las cargas, donde el consumo es menor, los valores obtenidos para dicho consumo irán bajando progresivamente.

5.3. Calibración del modelo

Una vez introducidos todos los componentes que modelan el motor, se debe calibrar el modelo de forma que los resultados que se obtengan mediante la simulación sean muy cercanos a aquellos medidos en puntos concretos en banco de ensayo. La calibración consiste en introducir parámetros que a priori no es posible obtener de forma experimental en banco y han de sacarse simulando de manera repetida hasta que el usuario determina que los valores simulados son lo suficientemente correctos.

Los parámetros utilizados para comprobar que el modelo está bien calibrado son los siguientes:

- Presión después del compresor.
- Presión antes de la turbina.
- Presión después de la turbina.
- Temperatura después del CAC.
- Temperatura antes de la turbina.
- Temperatura después de la turbina.
- Gasto másico de aire.
- Presión media indicada.
- Par efectivo / Gasto másico de combustible.

En el caso de la segunda forma de modelado expuesta al final de la sección anterior, el par efectivo no se utiliza para calibrar, puesto que es un valor fijado. En ese caso se utiliza la velocidad de giro del motor. El consumo de combustible también se utiliza, ya que es un parámetro que en ese modelo no es una entrada.

Aunque la temperatura después del CAC es una entrada, se va a representar para comprobar que converge adecuadamente al valor impuesto. Esto es debido a que si el modelo no se realiza correctamente es posible que la temperatura no converja a dicho valor, aunque sea una entrada.

A continuación, se va a presentar el procedimiento seguido para la calibración del modelo. Para realizar dicho calibrado se han tocado fundamentalmente dos parámetros:

- Constante de efecto de pulso de la turbina.
- Ganancia en la transmisión de calor en el colector de escape.

La constante de efecto de pulso se mencionó anteriormente y ya se explicó a qué se debía. En cuanto a la ganancia de la transmisión de calor del colector de escape, su variación afecta a los valores de presión en el colector de entrada y al de la temperatura a la salida de los cilindros. En ambas formas de modelado expuestas los parámetros de calibración son iguales. En la Figura 5.30 se observan los parámetros de efecto de pulso utilizados.

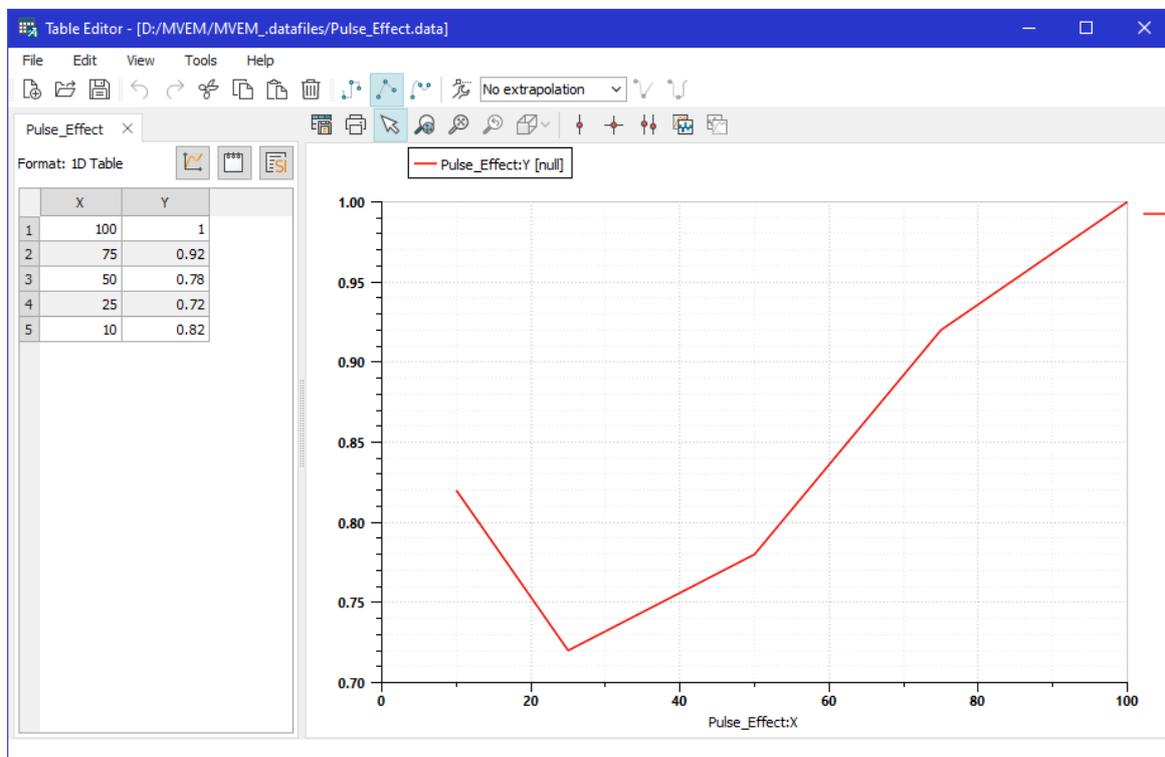


Figura 5.30. Coeficiente de efecto de pulso para calibrar el modelo de valores medios.

Para recopilar de manera más clara los datos usados para la calibración, se muestran a continuación en la Tabla 5.1.

Carga	Constante de efecto de pulso	Ganancia en la transmisión del calor del colector de escape
100%	1,00	400
75%	0,92	
50%	0,78	
25%	0,72	
10%	0,82	

Tabla 5.1. Parámetros de calibrado del modelo de valores medios.

Con todo lo expuesto anteriormente, se realizan una serie de gráficos de barras que permiten comparar los valores simulados con los experimentales.

Modelo de valores medios con consumo de combustible y velocidad de giro como datos de entrada

En la Figura 5.31 se tienen unos gráficos de barras que comparan las temperaturas y presiones simuladas y experimentales en determinados puntos del motor.

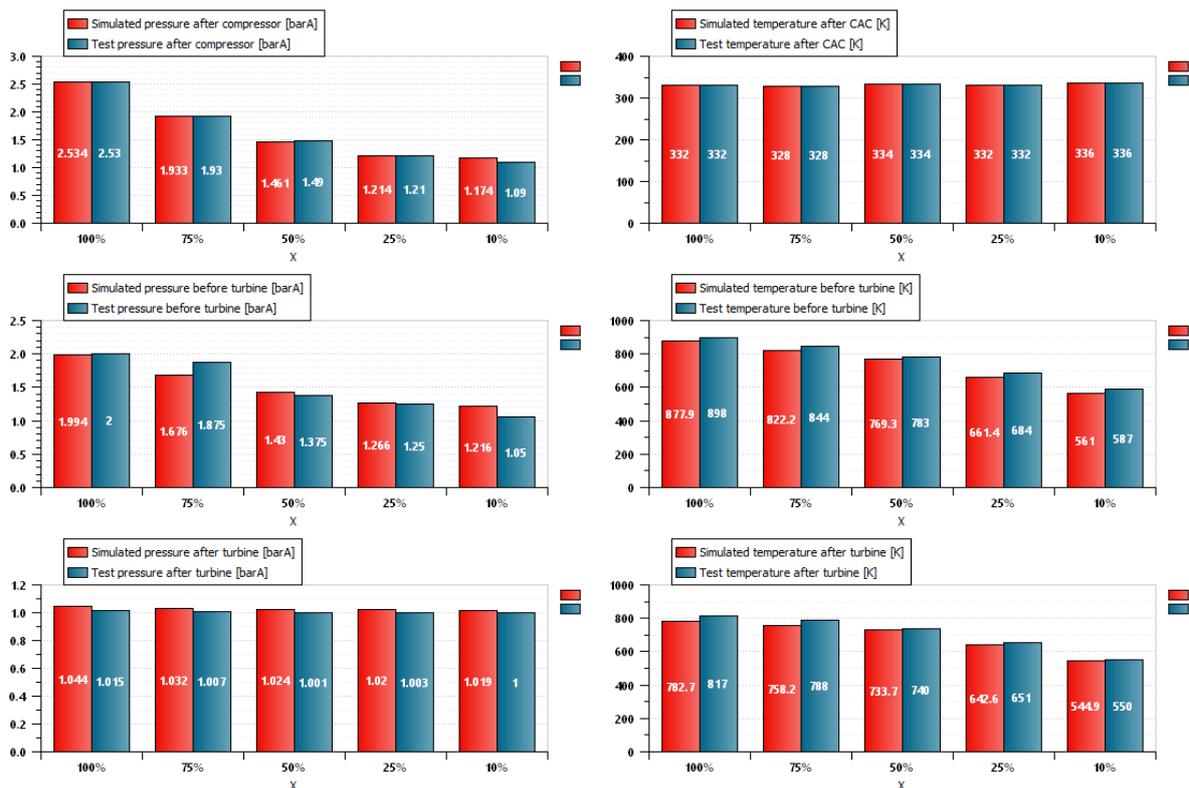


Figura 5.31. Valores simulados vs experimentales. Calibración. Presiones y temperaturas. Modelo 1 de valores medios.

En la Figura 5.32 se representan otros gráficos de barras en los que se comparan consumos de combustible, gasto de aire, presiones medias indicadas y par efectivo.

Ajuste y validación de modelo de valores medios de motor diésel generador.

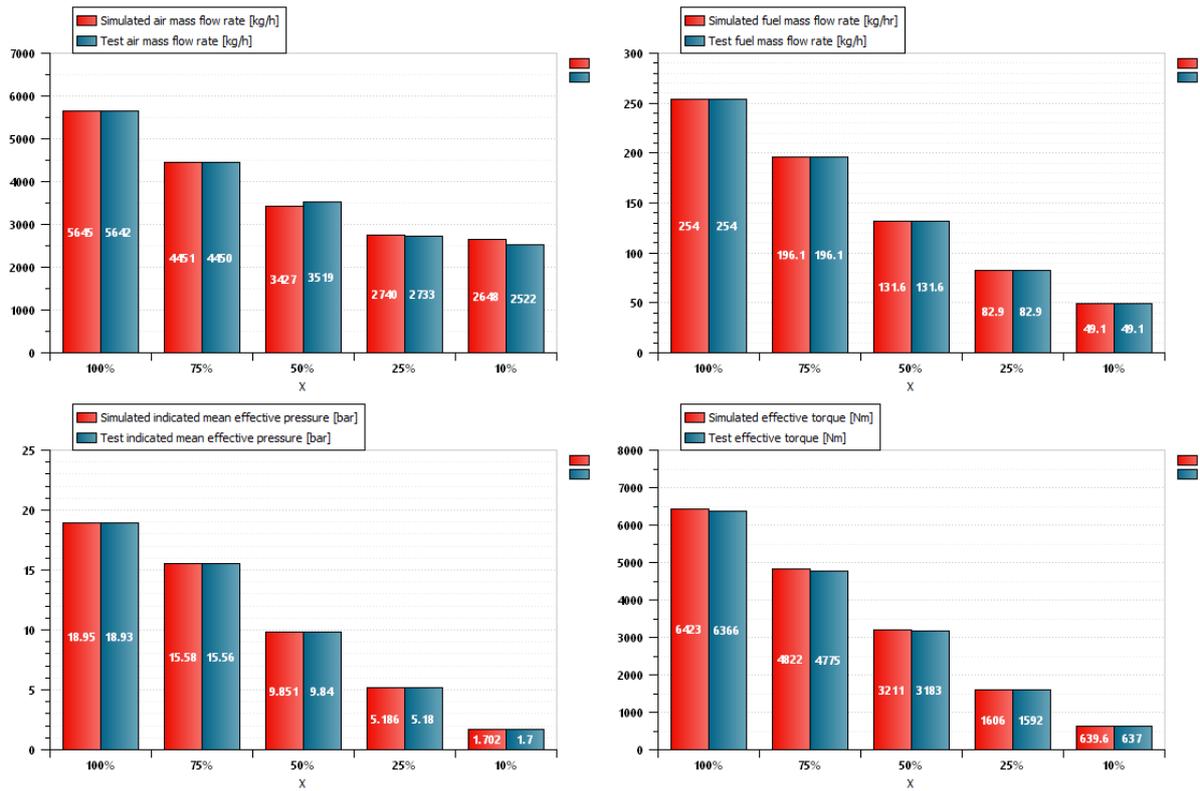


Figura 5.32. Valores simulados vs experimentales. Calibración. Gastos, PMI y par efectivo. Modelo 1 de valores medios.

A continuación, todos estos valores se reflejan en unas tablas donde se recogen también los errores relativos para cada parámetro. En el anexo final se recogen gráficas de los errores relativos para así poder apreciar mejor la bondad del modelo.

100% de carga	Valor simulado	Valor experimental	Error relativo (%)
Presión después del compresor (bar)	2,5340	2,53	0,16
Presión antes de la turbina (bar)	1,9941	2	0,29
Presión después de la turbina (bar)	1,0444	1,015	2,90
Temperatura después del CAC (K)	332	332	0,00
Temperatura antes de la turbina (K)	877,9	898	2,24
Temperatura después de la turbina (K)	782,653	817	4,20
Gasto másico de aire (kg/h)	5645,08	5642	0,05
Presión media indicada (bar)	18,9503	18,93	0,11
Par efectivo (Nm)	6423,06	6366	0,90

Tabla 5.2. Valores simulados vs experimentales. Carga del 100%. Modelo 1 de valores medios.

Ajuste y validación de modelo de valores medios de motor diésel generador.

75% de carga	Valor simulado	Valor experimental	Error relativo (%)
Presión después del compresor (bar)	1,9326	1,930	0,13
Presión antes de la turbina (bar)	1,6761	1,875	10,61
Presión después de la turbina (bar)	1,0320	1,007	2,48
Temperatura después del CAC (K)	328	328	0,00
Temperatura antes de la turbina (K)	822,229	844	2,58
Temperatura después de la turbina (K)	758,238	788	3,78
Gasto másico de aire (kg/h)	4451,39	4450	0,03
Presión media indicada (bar)	15,5767	15,56	0,11
Par efectivo (Nm)	4822,12	4775	0,99

Tabla 5.3. Valores simulados vs experimentales. Carga del 75%. Modelo 1 de valores medios.

50% de carga	Valor simulado	Valor experimental	Error relativo (%)
Presión después del compresor (bar)	1,4607	1,490	1,97
Presión antes de la turbina (bar)	1,4304	1,375	4,03
Presión después de la turbina (bar)	1,0238	1,001	2,28
Temperatura después del CAC (K)	334	334	0,00
Temperatura antes de la turbina (K)	769,312	783	1,75
Temperatura después de la turbina (K)	733,665	740	0,86
Gasto másico de aire (kg/h)	3427,4	3519	2,60
Presión media indicada (bar)	9,8506	9,84	0,11
Par efectivo (Nm)	3210,56	3183	0,87

Tabla 5.4. Valores simulados vs experimentales. Carga del 50%. Modelo 1 de valores medios.

25% de carga	Valor simulado	Valor experimental	Error relativo (%)
Presión después del compresor (bar)	1,2137	1,210	0,31
Presión antes de la turbina (bar)	1,2656	1,250	1,25
Presión después de la turbina (bar)	1,0200	1,003	1,70
Temperatura después del CAC (K)	332	332	0,00
Temperatura antes de la turbina (K)	661,398	684	3,30
Temperatura después de la turbina (K)	642,643	651	1,28
Gasto másico de aire (kg/h)	2740,06	2733	0,26
Presión media indicada (bar)	5,1856	5,18	0,11
Par efectivo (Nm)	1606,39	1592	0,90

Tabla 5.5. Valores simulados vs experimentales. Carga del 25%. Modelo 1 de valores medios.

10% de carga	Valor simulado	Valor experimental	Error relativo (%)
Presión después del compresor (bar)	1,1742	1,09	7,72
Presión antes de la turbina (bar)	1,2161	1,05	15,82
Presión después de la turbina (bar)	1,0191	1,00	1,91
Temperatura después del CAC (K)	336	336	0,00
Temperatura antes de la turbina (K)	561,036	587	4,42
Temperatura después de la turbina (K)	544,938	550	0,92
Gasto másico de aire (kg/h)	2647,69	2522	4,98
Presión media indicada (bar)	1,7018	1,70	0,11
Par efectivo (Nm)	639,578	637	0,40

Tabla 5.6. Valores simulados vs experimentales. Carga del 10%. Modelo 1 de valores medios.

Puede apreciarse que los datos obtenidos en la simulación del modelo calibrado son muy buenos, pues la mayoría de los errores están por debajo de 5%, siendo los mayores errores del 16% y 10,61%, que tampoco son demasiado altos.

Modelo de valores medios con par efectivo como dato de entrada

Se van a mostrar también para este segundo modelo los diagramas de barras comparativos. En la Figura 5.33 se muestran el diagrama de barras comparativo de presiones y temperaturas en diversos puntos.

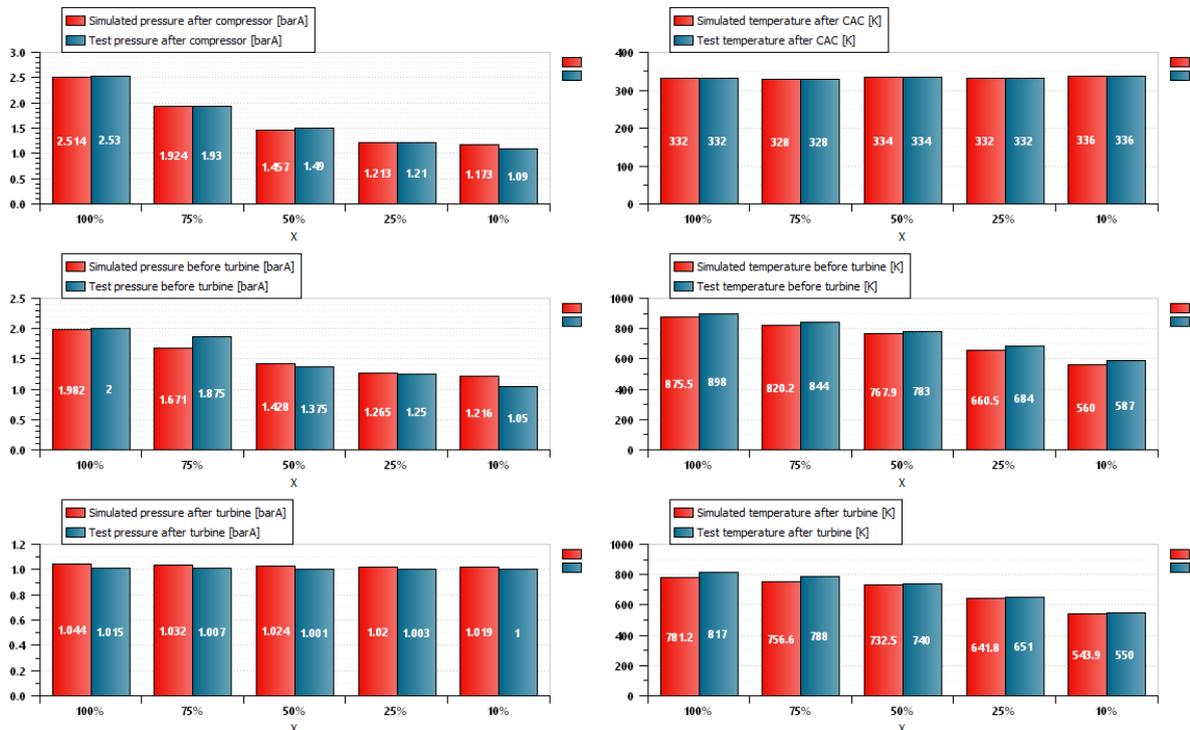


Figura 5.33. Valores simulados vs experimentales. Calibración. Presiones y temperaturas. Modelo 2 de valores medios.

En la Figura 5.34 se representan diagramas comparativos de consumos de combustible, gasto de aire, presiones medias indicadas y velocidad de giro.

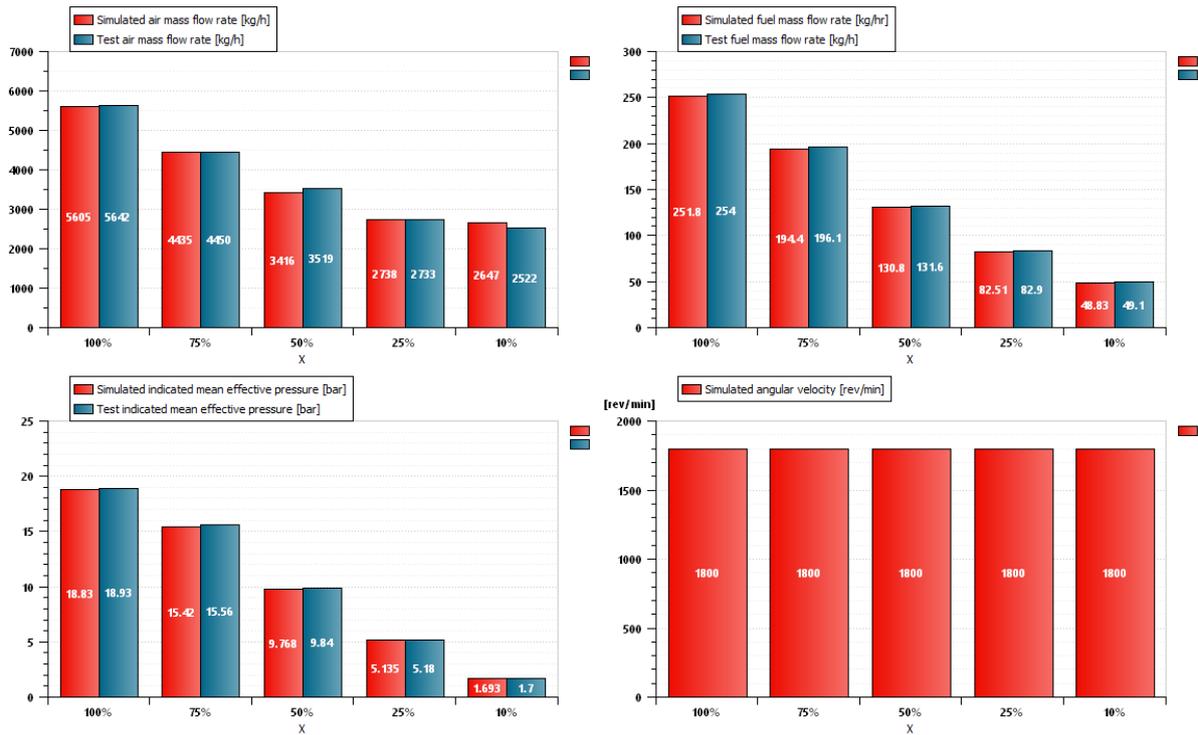


Figura 5.34. Valores simulados vs experimentales. Calibración. Gastos, PMI y velocidad de giro. Modelo 2 de valores medios.

A continuación, todos estos valores se reflejan en unas tablas donde se recogen también los errores relativos para cada parámetro. De nuevo, en el anexo final se recogen gráficas de los errores relativos.

100% de carga	Valor simulado	Valor experimental	Error relativo (%)
Presión después del compresor (bar)	2,51	2,53	0,63
Presión antes de la turbina (bar)	1,98	2	0,89
Presión después de la turbina (bar)	1,04	1,015	2,85
Temperatura después del CAC (K)	332,00	332	0,00
Temperatura antes de la turbina (K)	875,49	898	2,51
Temperatura después de la turbina (K)	781,15	817	4,39
Gasto másico de aire (kg/h)	5604,59	5642	0,66
Presión media indicada (bar)	18,83	18,93	0,53
Gasto másico de combustible (kg/h)	251,76	254	0,88

Tabla 5.7. Valores simulados vs experimentales. Carga del 100%. Modelo 2 de valores medios.

Ajuste y validación de modelo de valores medios de motor diésel generador.

75% de carga	Valor simulado	Valor experimental	Error relativo (%)
Presión después del compresor (bar)	1,92	1,930	0,31
Presión antes de la turbina (bar)	1,67	1,875	10,88
Presión después de la turbina (bar)	1,03	1,007	2,46
Temperatura después del CAC (K)	328,00	328	0,00
Temperatura antes de la turbina (K)	820,17	844	2,82
Temperatura después de la turbina (K)	756,62	788	3,98
Gasto másico de aire (kg/h)	4435,12	4450	0,33
Presión media indicada (bar)	15,42	15,56	0,90
Gasto másico de combustible (kg/h)	194,42	196,10	0,85

Tabla 5.8. Valores simulados vs experimentales. Carga del 75%. Modelo 2 de valores medios.

50% de carga	Valor simulado	Valor experimental	Error relativo (%)
Presión después del compresor (bar)	1,46	1,490	2,23
Presión antes de la turbina (bar)	1,43	1,375	3,83
Presión después de la turbina (bar)	1,02	1,001	2,27
Temperatura después del CAC (K)	334,00	334	0,00
Temperatura antes de la turbina (K)	767,93	783	1,92
Temperatura después de la turbina (K)	732,53	740	1,01
Gasto másico de aire (kg/h)	3416,02	3519	2,93
Presión media indicada (bar)	9,77	9,84	0,73
Gasto másico de combustible (kg/h)	130,84	131,60	0,58

Tabla 5.9. Valores simulados vs experimentales. Carga del 50%. Modelo 2 de valores medios.

25% de carga	Valor simulado	Valor experimental	Error relativo (%)
Presión después del compresor (bar)	1,21	1,210	0,24
Presión antes de la turbina (bar)	1,26	1,250	1,19
Presión después de la turbina (bar)	1,02	1,003	1,70
Temperatura después del CAC (K)	332,00	332	0,00
Temperatura antes de la turbina (K)	660,51	684	3,43
Temperatura después de la turbina (K)	641,81	651	1,41
Gasto másico de aire (kg/h)	2737,95	2733	0,18
Presión media indicada (bar)	5,14	5,18	0,87
Gasto másico de combustible (kg/h)	82,51	82,90	0,47

Tabla 5.10. Valores simulados vs experimentales. Carga del 25%. Modelo 2 de valores medios.

10% de carga	Valor simulado	Valor experimental	Error relativo (%)
Presión después del compresor (bar)	1,17	1,09	7,66
Presión antes de la turbina (bar)	1,22	1,05	15,77
Presión después de la turbina (bar)	1,02	1,00	1,90
Temperatura después del CAC (K)	336,00	336	0,00
Temperatura antes de la turbina (K)	559,96	587	4,61
Temperatura después de la turbina (K)	543,92	550	1,11
Gasto másico de aire (kg/h)	2646,70	2522	4,94
Presión media indicada (bar)	1,69	1,70	0,44
Gasto másico de combustible (kg/h)	48,83	49,10	0,55

Tabla 5.11. Valores simulados vs experimentales. Carga del 10%. Modelo 2 de valores medios.

Los valores obtenidos para el calibrado de este segundo modelo de valores medios son también bastante buenos. Del mismo modo que para el primer modelo, los errores se mantienen prácticamente siempre por debajo del 5%. El valor más alto es de 16% aproximadamente y se da en el caso de carga del 10%.

5.4. Validación del modelo

A continuación, se va a exponer el procedimiento de validación del modelo. En este proceso, el objetivo es simular el modelo a cargas diferentes para las que ha sido calibrado y comparar los valores que se obtienen de la simulación con datos experimentales obtenidos en banco para esos nuevos puntos de operación. En este caso se ha decidido realizar la validación con puntos de carga en saltos de diez por ciento. Debido a que no se tienen datos reales de banco de ensayo para estos puntos, se ha decidido interpolar los valores de presiones y temperaturas que deberían obtenerse para los diferentes puntos de carga. Debido a que se cuenta con cinco puntos de carga medidos en banco que cubren todo el rango de operación del motor, se puede asegurar que la interpolación de los datos va a ser buena y los valores se acercarán bastante a los reales. Además, puesto que la presión media efectiva teórica sí se puede obtener, se podrá comparar el valor simulado con el teórico, siendo esta comparación aún más fiable.

Las gráficas comparativas son las mismas que las anteriores. Sin embargo, debido a que el número de puntos es superior, se ha decidido separar en más figuras estas gráficas para asegurar una buena lectura.

Como se trata de muchos casos, las tablas de resultados y errores se pueden encontrar en el anexo al final de este trabajo. De esta forma se evita saturar el capítulo con las tablas.

Modelo de valores medios con consumo de combustible y velocidad de giro como datos de entrada

En primer lugar, se muestra en la Figura 5.35 siguiente una comparación de los valores obtenidos de presiones medias indicadas con los valores teóricos.

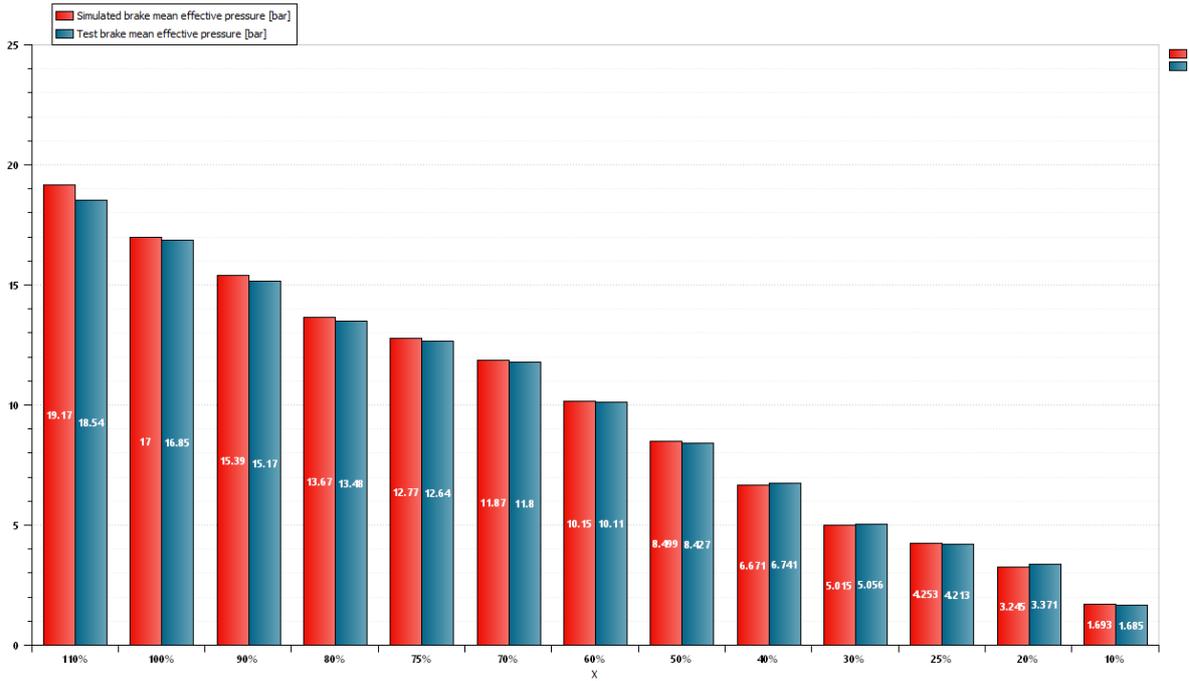


Figura 5.35. Presión media efectiva simulada vs teórica. Validación. Modelo 1 de valores medios.

Las Figura 5.36 y Figura 5.37 siguientes muestran los valores de presiones y temperaturas en los diferentes puntos de carga utilizados en la validación.

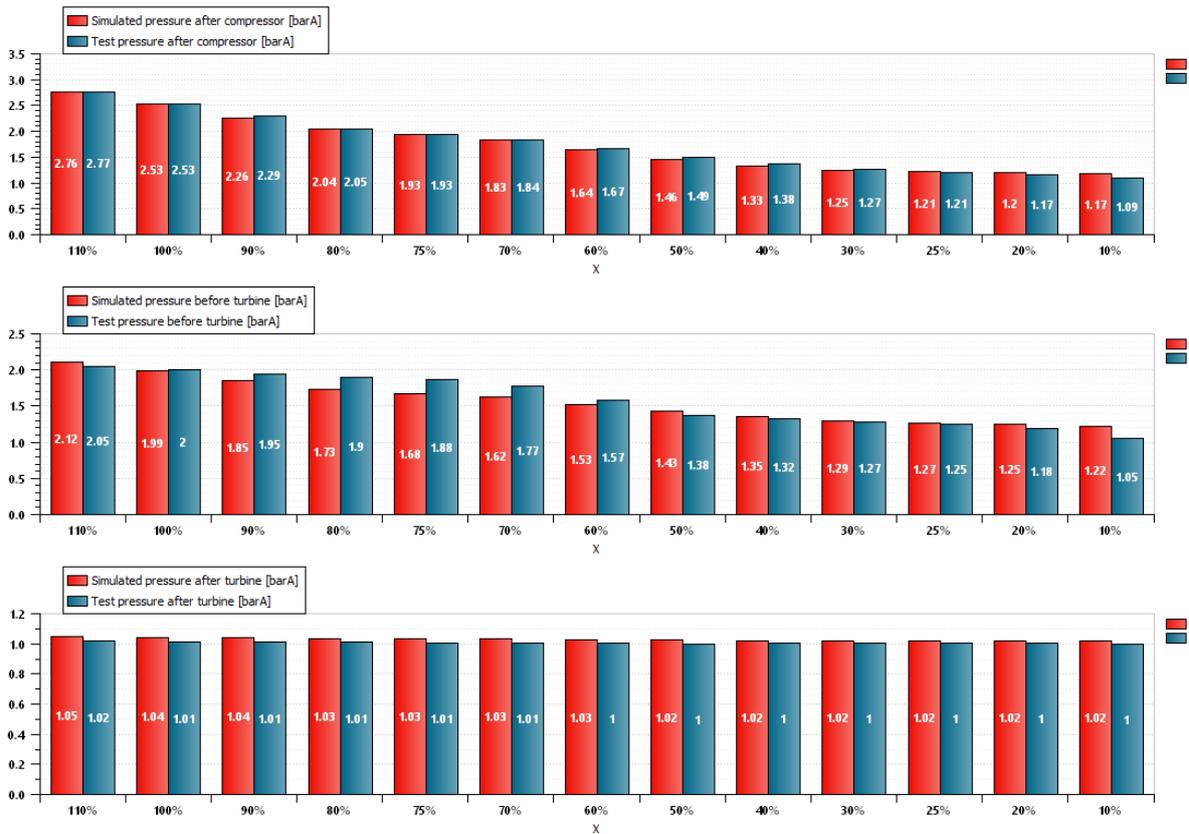


Figura 5.36. Valores simulados vs experimentales. Validación. Presiones. Modelo 1 de valores medios.

Ajuste y validación de modelo de valores medios de motor diésel generador.

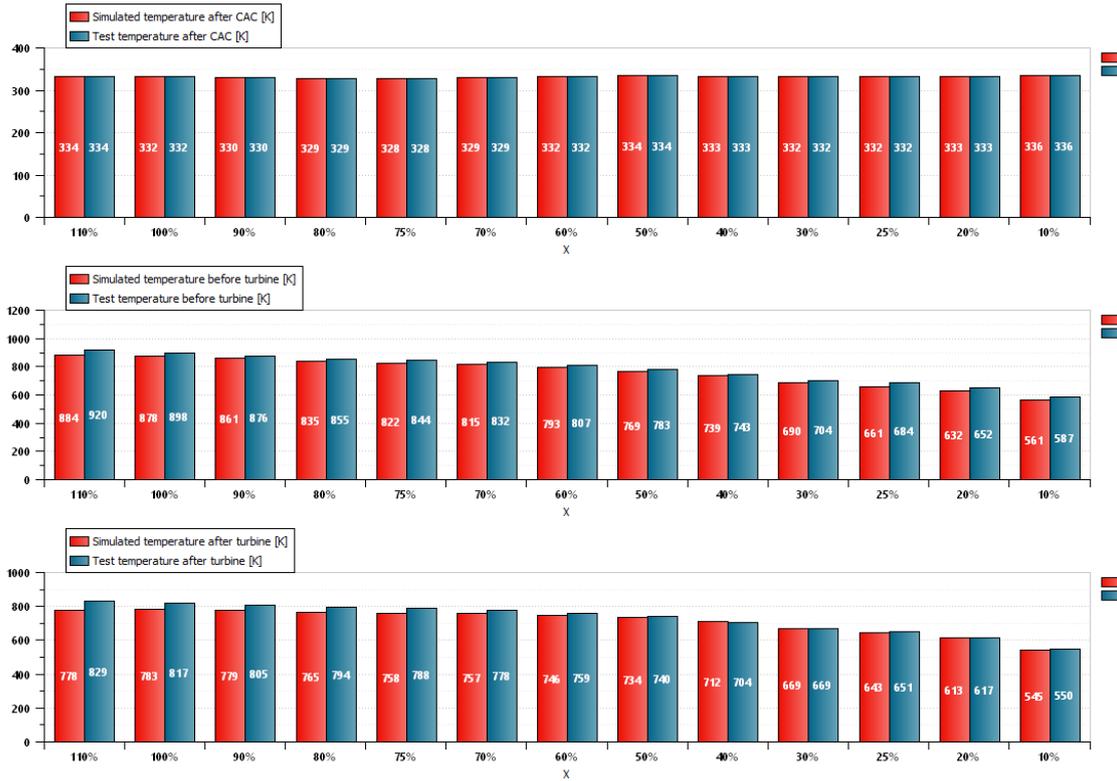


Figura 5.37. Valores simulados vs experimentales. Validación. Temperaturas. Modelo 1 de valores medios.

Por último, en las Figura 5.38 y Figura 5.39 siguientes se muestran los valores de presión media indicada, par efectivo, y gastos máxicos de aire y combustible.

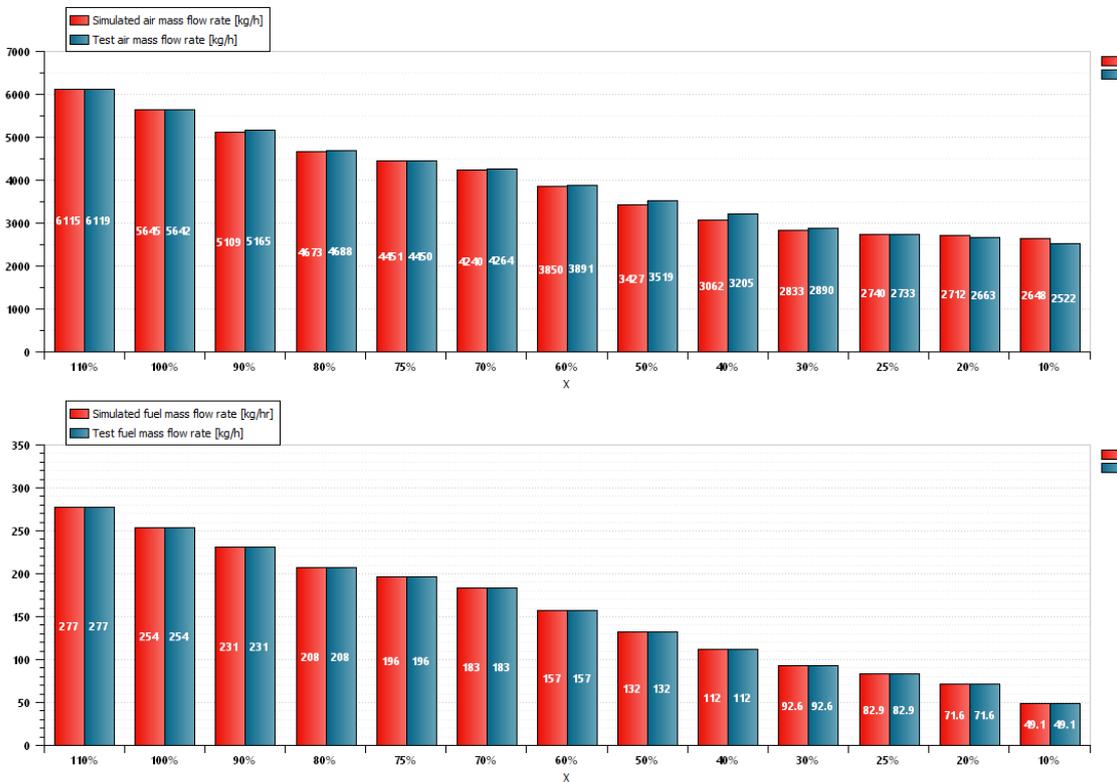


Figura 5.38. Valores simulados vs experimentales. Validación. Gastos máxicos. Modelo 1 de valores medios.

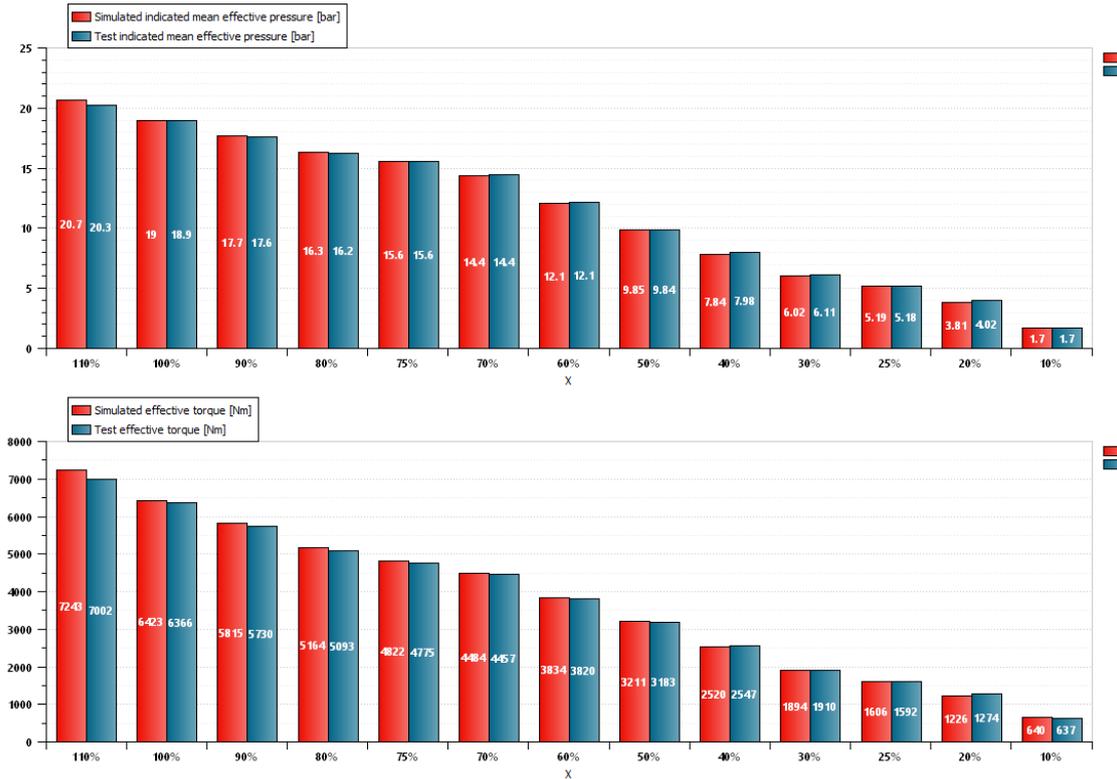


Figura 5.39. Valores simulados vs experimentales. Validación. PMI y par efectivo. Modelo 1 de valores medios.

Observando la Figura 5.35 se puede comprobar la bondad del modelo. Los valores predichos son prácticamente iguales los que se obtienen teóricamente. En cuanto al resto de figuras, aunque se estén comparando con valores de banco extrapolados a partir de los reales se puede ver que también son muy parecidos. Así pues, se puede asegurar que este primer modelo de valores medios está bien calibrado y es capaz de predecir adecuadamente el comportamiento del motor generador en un rango de puntos de operación que va desde el 10% al 110%.

El anexo final recoge estas mismas gráficas, pero esta vez mostrando los errores relativos.

Modelo de valores medios con par efectivo como dato de entrada

De igual forma que para el modelo anterior, se van a mostrar las mismas figuras comparativas para poder concluir la bondad del modelo. En primer lugar, en la Figura 5.40 siguiente se muestra de nuevo una comparación de los valores obtenidos de presiones medias indicadas con los valores teóricos.

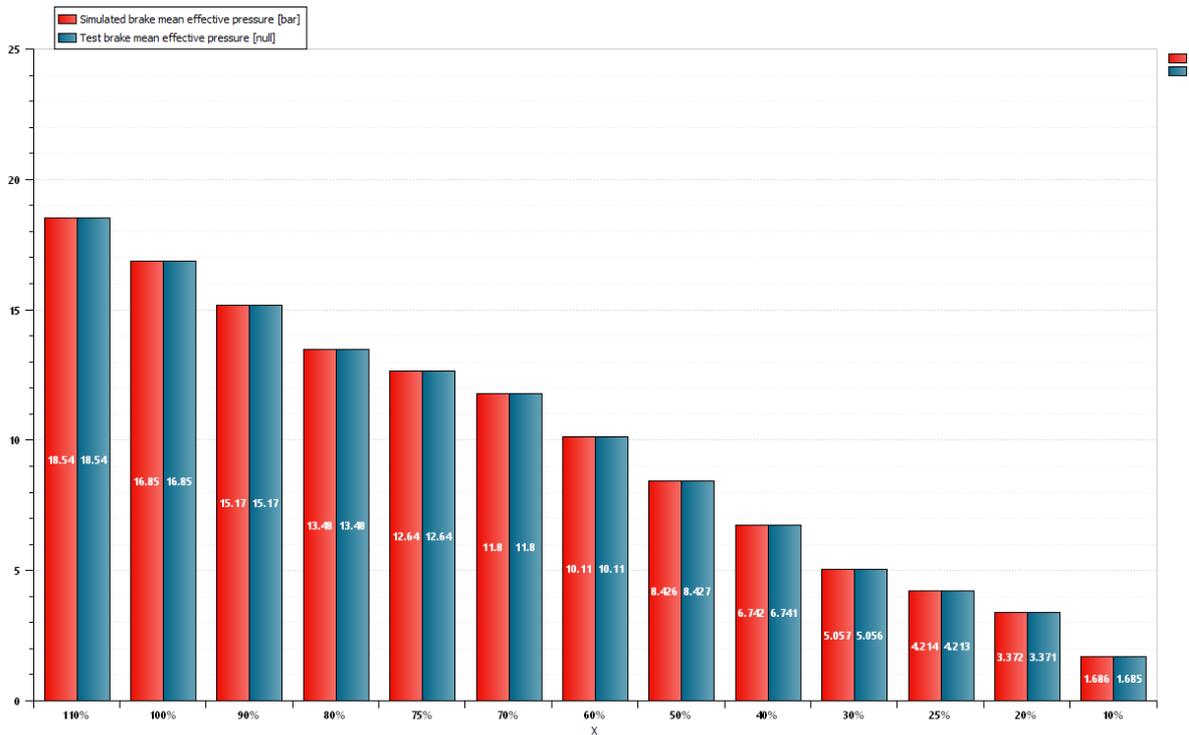


Figura 5.40. Presión media efectiva simulada vs teórica. Validación. Modelo 2 de valores medios.

Las Figura 5.41 y Figura 5.42 siguientes muestran los valores de presiones y temperaturas en los diferentes puntos de carga utilizados en la validación.

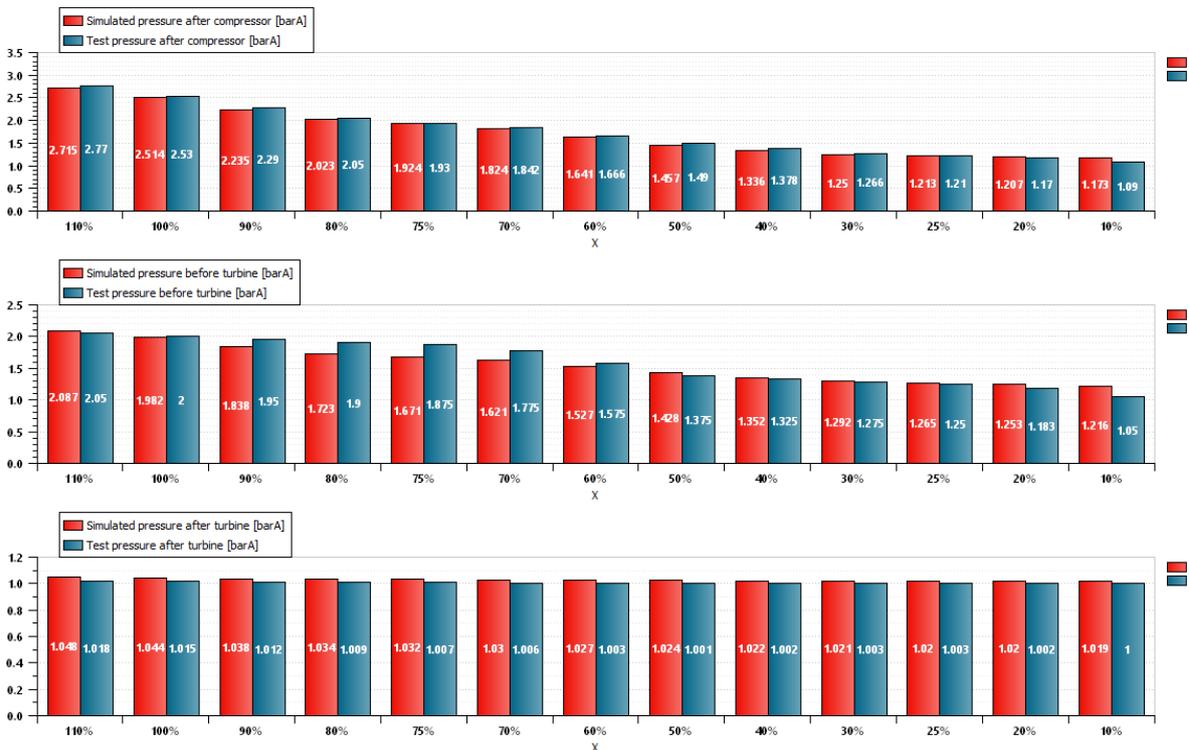


Figura 5.41. Valores simulados vs experimentales. Validación. Presiones. Modelo 2 de valores medios.

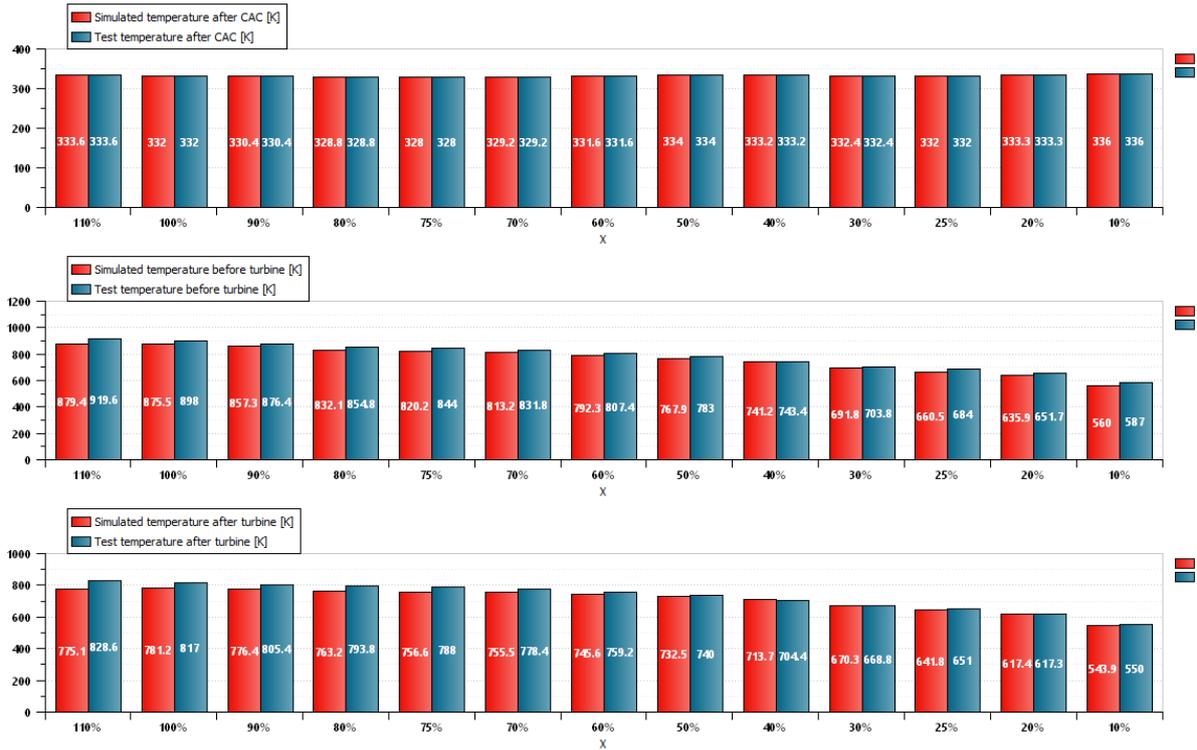


Figura 5.42. Valores simulados vs experimentales. Validación. Temperaturas. Modelo 2 de valores medios.

Las Figura 5.43 y Figura 5.44 siguientes se muestran los valores de presión media indicada, velocidad de giro y gastos másicos de aire y combustible.

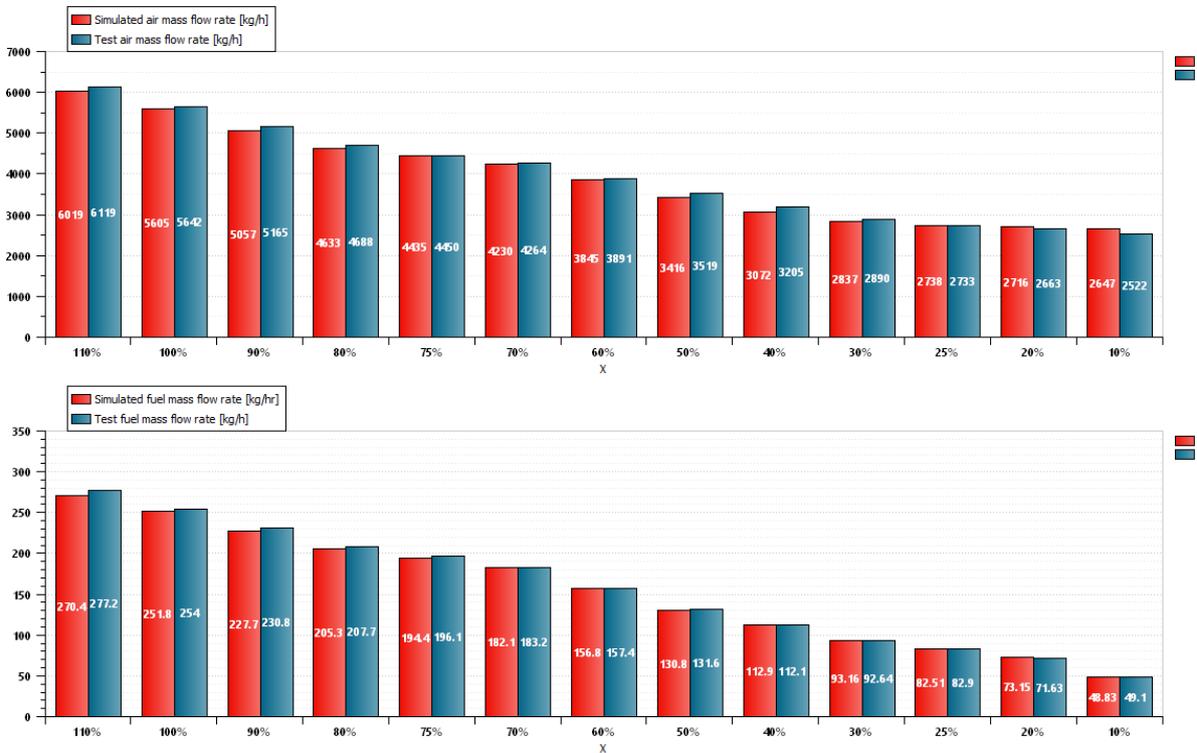


Figura 5.43. Valores simulados vs experimentales. Validación. Gastos másicos. Modelo 2 de valores medios.

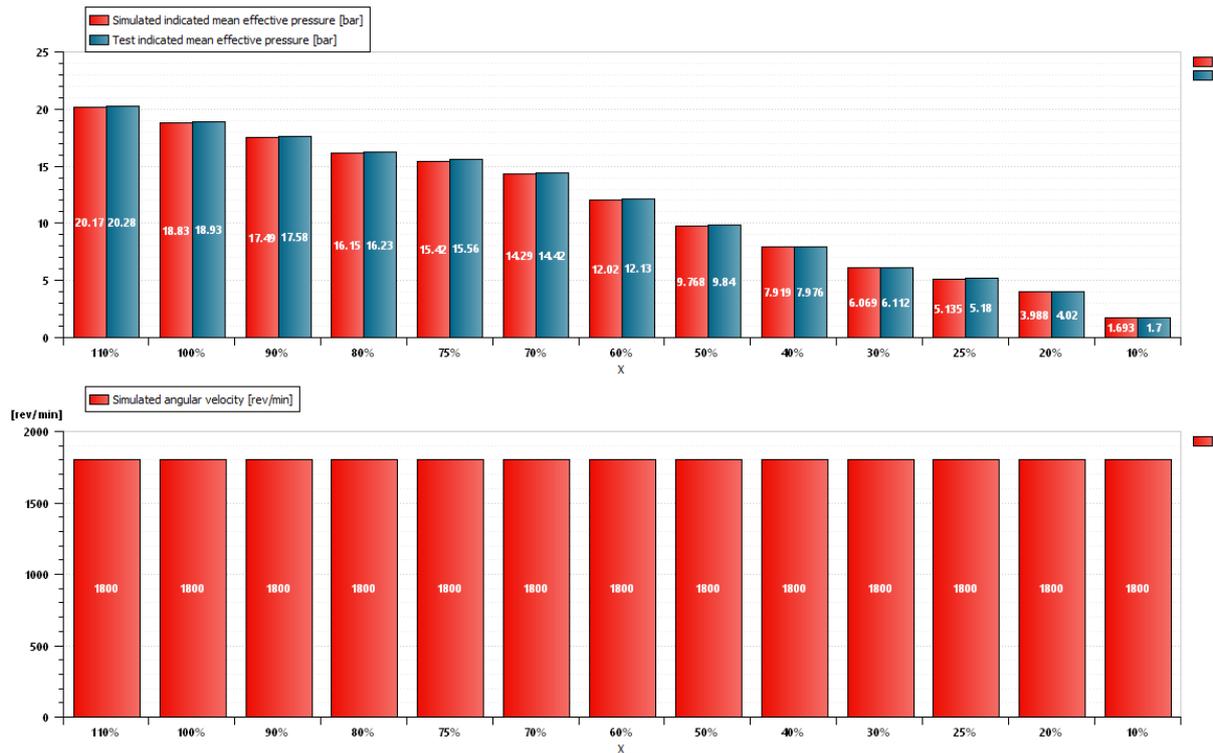


Figura 5.44. Valores simulados vs experimentales. Validación. PMI y velocidad de giro. Modelo 2 de valores medios.

De nuevo, echando un vistazo a la Figura 5.40 se concluye que el modelo es bastante bueno. En este caso las presiones medias efectivas salen iguales. Esto se debe a que se le ha introducido el par efectivo como dato de entrada. Dicho par efectivo está íntimamente relacionado con la presión media efectiva. Por tanto, de esto se asegura que los datos de par obtenidos en banco son los correctos. En el resto de las figuras, al igual que sucedía con el primer modelo de valores medios la capacidad de predicción del modelo es excelente, consiguiendo simular el motor en diferentes puntos de carga de forma perfecta.

El anexo final recoge estas mismas gráficas, pero esta vez mostrando los errores relativos.

5.5. Conclusiones del capítulo 5

En este capítulo se ha mostrado al lector el procedimiento a seguir para crear un modelo de valores medios de un motor. Para aportar mayor cantidad de información se ha decidido realizar dos modelos cuyos datos de entrada varían, pero su finalidad es la misma. La diferencia entre el primer modelo y el segundo es que, mientras que en el primero se ha introducido la cantidad de combustible que se midió en banco, en el segundo se ha introducido el par y el gasto de combustible ha pasado a ser una salida.

El proceso mostrado ha sido el siguiente:

- Modelado de la admisión y el escape, configurando los diferentes elementos que lo componen, destacando en este motor el turbocompresor.
- Modelado de la combustión del motor, mediante una 'caja negra' que recoge todos los elementos que permiten llevar a cabo la combustión en un motor.
- Modelado de la inyección de forma básica, aportando la cantidad en el primer modelo o bien con un controlador que consiga alcanzar la velocidad de consigna en el segundo modelo.

- Modelado del eje motor, introduciendo las pérdidas por fricción reales.

Una vez se han acoplado los diferentes subsistemas y se han configurado adecuadamente, se ha procedido a calibrar el modelo para aproximar los valores simulados a los experimentales de los cinco puntos de carga medidos en banco (10, 25, 50, 75 y 100%). Para ello se han tocado la constante de efecto de pulso de la turbina y la ganancia en la transmisión de calor del colector de escape.

Por último, se han validado ambos modelos con puntos de carga que van en saltos de diez, llegando incluso a sobrecargar el motor hasta el 110%.

Viendo las gráficas mostradas y los errores que se tienen se puede confirmar que ambos modelos de valores medios son válidos para predecir el comportamiento del motor generador en diferentes puntos de carga y condiciones.

Capítulo 6. Ajuste y validación de modelo físico-fenomenológico.

6.1. Introducción

Una vez se ha visto cómo realizar un modelo de valores medios en Amesim y se ha comprobado que los resultados obtenidos son bastante buenos, el siguiente paso es realizar un modelo más físico que represente mejor la fenomenología de un motor. En este capítulo se recoge el procedimiento a seguir para crear este modelo. Los resultados obtenidos de la simulación de este tipo de modelos fenomenológicos no son constantes, sino que oscilan en un rango pequeño. Por ello, los parámetros se obtendrán realizando la media de los valores obtenidos a cada lado del motor.

La gran ventaja de estos modelos es la capacidad de simular el comportamiento de los cilindros y las fluctuaciones reales que siempre se dan en los motores. Esto no era posible en los modelos de valores medios, tal y como pudo comprobarse en capítulos anteriores. Esto hace que sea posible obtener la presión cilindro, así como la variación de temperatura en dicho cilindro a lo largo del tiempo. Como desventaja respecto al modelo de valores medios se tiene que el tiempo de computación se eleva significativamente pasando de tardar segundos a minutos e incluso horas dependiendo del nivel de detalle.

Se va a seguir una metodología parecida a la del capítulo anterior.

Amesim cuenta con varios tipos de cilindros distintos para poder modelar un motor diésel. En este capítulo se van a detallar dos de ellos:

- Chmela: se trata de un submodelo de cilindro que permite realizar un modelo predictivo, es decir, se puede utilizar para todos los puntos de operación.
- BMF: son las siglas de “Burnt Mass Fraction” o Fracción Máfica Quemada y se trata de un submodelo de cilindro utilizado para simular un motor en un punto de operación concreto.

Desde el punto de vista del mantenimiento preventivo, el cilindro ‘Chmela’ resulta mucho más interesante, pues no depende tanto de unos valores iniciales de banco de ensayo. Se trata de un tipo de cilindro que puede predecir de forma bastante aproximada distintos puntos de operación a partir de otros ya conocidos. No obstante, debido al carácter de guía de usuario que también se le pretende dar a este trabajo, se va a explicar el funcionamiento de otro tipo de cilindro para que el usuario sepa cuándo deben usarse y para qué los distintos cilindros.

De la misma forma en que se llevó a cabo el detallado del modelo en el capítulo anterior, en este se va a separar en sus diferentes partes para ir explicando una a una. De nuevo estas partes son las siguientes:

- Admisión y escape.
- Bloque motor.
- Inyección.
- Eje del motor.

No obstante, debido a que algunas partes serán prácticamente iguales, el nivel de detalle de estas se reducirá para evitar repeticiones innecesarias.

6.2. Modelo físico del motor generador

Tal y como se ha explicado en el apartado anterior, se procede a detallar el modelado físico del motor para los distintos tipos de cilindros estudiados.

Modelo físico utilizando el cilindro 'Chmela'

En la Figura 6.1 siguiente se aprecia el modelo físico creado. En el anexo del final se puede observar dicha figura ampliada.

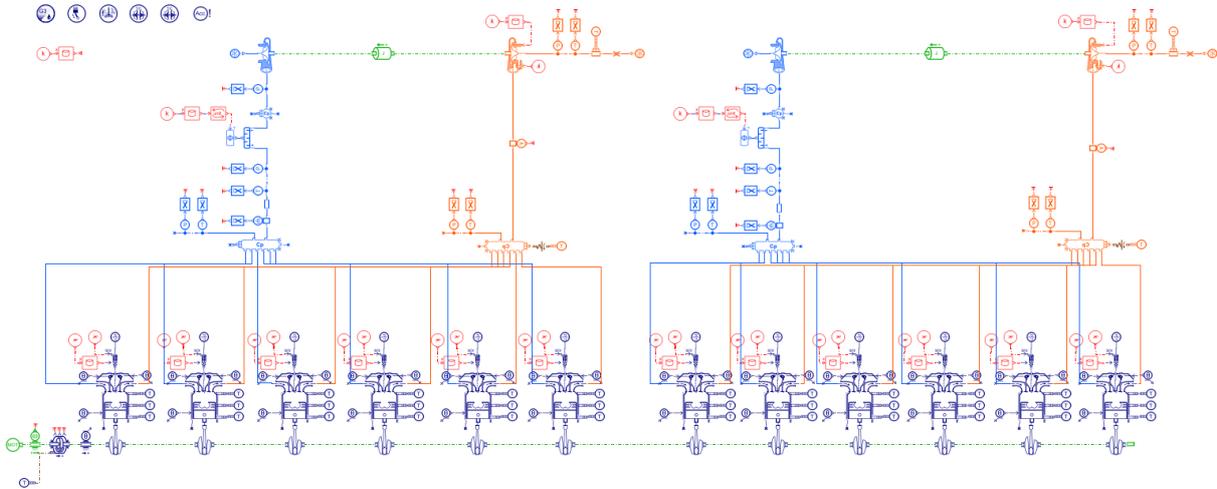


Figura 6.1. Modelo físico del motor generador con cámara de combustión 'Chmela'.

De la figura anterior se puede apreciar que la admisión de nuevo se ha representado en color azul y el escape en naranja. Además, pueden observarse los doce cilindros de los que está compuesto el motor. Los cambios más significativos respecto al modelo de valores medios son el detallado del bloque motor y la disposición de cilindros según lado A y lado B.

En la Figura 6.2 se recogen los parámetros globales utilizados en el modelo.

Name	Title	Value	Unit	Tags	Minimum	Default	Maximum	Type
Load	Load	100	null					Real
LHV	Lower Heating V...	43040	kJ/kg					Real
FRho	Fuel density	832	kg/m**3					Real
Ncyl	No. of cylinders	12	null					Real
Nstrk	No. of strokes	4	null					Real
Bore	Bore	165	mm					Real
Stroke	Stroke	185	mm					Real
Rod_Length	Connecting rod l...	341	mm					Real
CR	Compression Ratio	15.5	null					Real
CylHeadS	Cylinder head su...	28000	mm**2					Real
PistonS	Piston surface	21000	mm**2					Real
Vcyl	Cylinder volume	$\pi * \text{Bore}^2 / 4 * \text{St}...$	L					Real
Vangle	V angle	90	degree					Real
IMVol	Intake Manifold ...	16.171	L					Real
EMVol	Exhaust Manifol...	11.61	L					Real
TurboInertia	Turbocharger in...	0.0001	kgm**2					Real
Tamb	Ambient temper...	298	K					Real
Pamb	Ambient pressure	1.01325	barA					Real
Pfuel	Fuel pressure	300	barA					Real
Tfuel	Fuel temperature	50	degC					Real
SOI	Start of Injection	21	degree					Real
RPM	Engine rpm	1800	rev/min					Real
Tpiston	Piston temperat...	450	K					Real
Thead	Piston head tem...	450	K					Real
Tliner	Liner temperature	450	K					Real
Cmode	Combustion gain	450	kJ/kg/degree					Real
Crate	Combustion mixi...	0.008	s					Real
Cdiss	Turbulent dissip...	100	Hz					Real
IVO	Intake Valve Op...	36	degree					Real
EVC	Exhaust Valve Cl...	28	degree					Real
TO	Needle opening ...	0.0005	s					Real
TC	Needle closure t...	0.0005	s					Real

Figura 6.2. Parámetros globales del modelo físico.

En la Figura 6.3 se muestran las entradas y salidas del modelo.

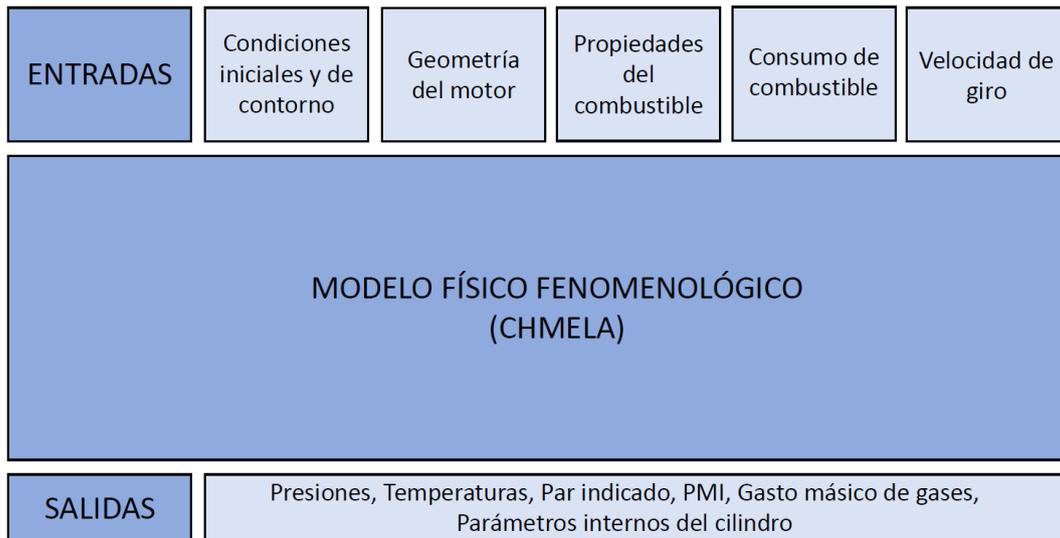


Figura 6.3. Entradas y salidas del sistema. Modelo 'Chmela'.

En los próximos subapartados se detalla el modelo.

6.2.1. Admisión y escape

La admisión y el escape del modelo físico creado es igual que el de valores medios. La única diferencia es que en este modelo sí que se han introducido los dos turbocompresores con los que cuenta el motor generador estudiado. Esto se debe a que se trata de un modelo más realista que el anterior y por tanto el nivel de detalle ha de ser mayor. Debido a que los valores que se obtienen para las variables simuladas no son valores constantes, en los sensores se ha introducido un componente que saca el valor medio a lo largo del tiempo simulado. De esta manera, a partir de las variables que fluctúan en torno a un rango se consigue obtener un valor constante con el que poder comparar los valores de banco.

6.2.2. Bloque motor

El cambio más significativo respecto a un modelo de valores medios se da en el bloque motor. En el capítulo anterior se vio que en un modelo de valores medios el bloque motor se modela mediante una 'caja negra' sin entrar en mucho más detalle de los componentes reales del motor. En un modelo físico se modela el cilindro completo en el que se incluyen la culata, las válvulas, la cámara de combustión y el cigüeñal. En las siguientes figuras se van a mostrar las diferentes partes que componen el cilindro en Amesim, independientemente de cómo se modele la combustión.

En la Figura 6.4 se puede ver la culata de un cilindro.

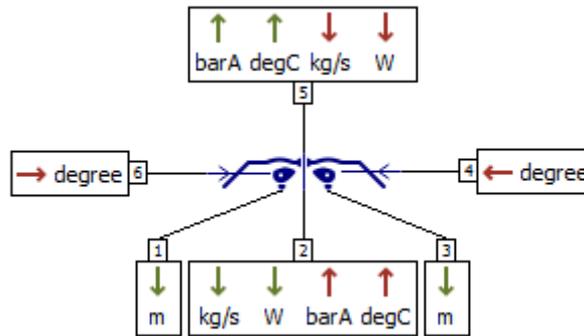


Figura 6.4. Componente que simula la culata del cilindro.

En la figura se pueden ver qué variables necesita el componente para realizar los cálculos y cuáles se obtienen para proporcionarlas a otros componentes conectados a ella.

En la Figura 6.5, Figura 6.6 y Figura 6.7 se muestran las válvulas, la cámara de combustión y el cigüeñal respectivamente.

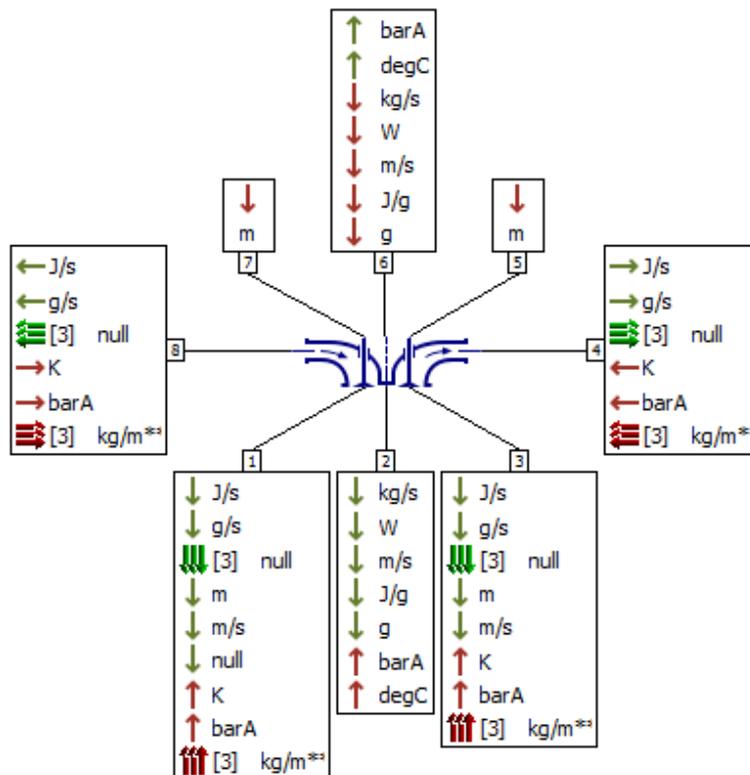


Figura 6.5. Componente que simula las válvulas.

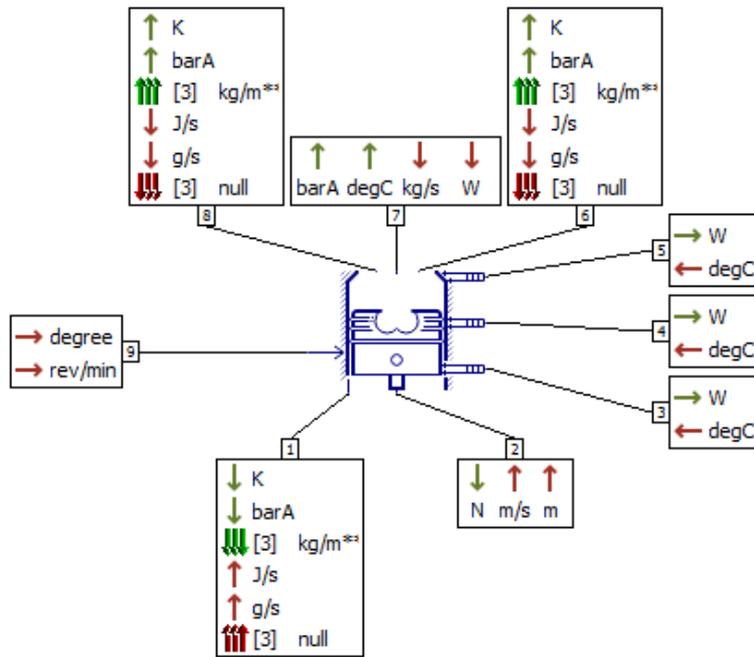


Figura 6.6. Componente que simula la cámara de combustión 'Chmela'.

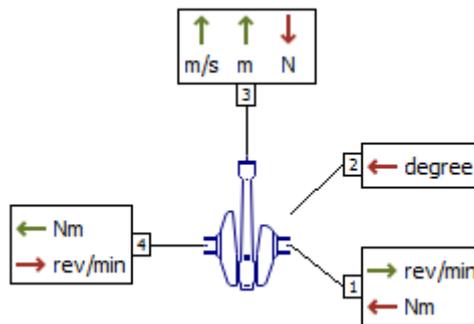


Figura 6.7. Componente que simula el cigüeñal.

En las figuras anteriores se han visto los distintos componentes necesarios para modelar un cilindro. En la Figura 6.8 siguiente se muestran estos componentes conectados de tal forma que se puede apreciar el cilindro completo.

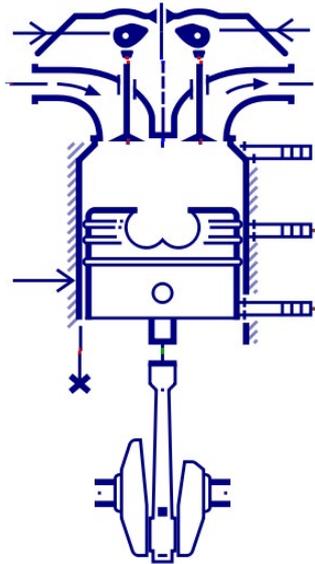


Figura 6.8. Cilindro completo modelado.

Una vez se ha visto qué componentes son necesarios para modelar un cilindro, a continuación se va a explicar cómo se han de parametrizar para modelar los motores que se deseen. En este caso, se parametriza con los valores concretos del motor generador estudiado.

En primer lugar, de la Figura 6.1 se puede ver que se han añadido dos nuevos iconos que en el modelo de valores medios no estaban. Esto es porque al introducir los cilindros físicamente, se hace necesario definir nuevos parámetros correspondientes a válvulas y motor. Se va a detallar la parametrización de cada uno.

En la Figura 6.9 se muestra el icono que permite introducir los parámetros de las válvulas tales como el número de válvulas de admisión y escape, los levantamientos de estas con respecto al ángulo del cigüeñal y los coeficientes de flujo.



Figura 6.9. Herramienta de parametrización de las válvulas.

Al igual que sucedía con los iconos del turbocompresor o de la herramienta de valores medios, este icono permite acceder a una aplicación interna de Amesim que permite introducir los parámetros necesarios para poder modelar de manera realista las válvulas de los cilindros. En las Figura 6.10, Figura 6.11 y Figura 6.12 siguientes se pueden ver las tres fases de parametrización que hay que seguir.

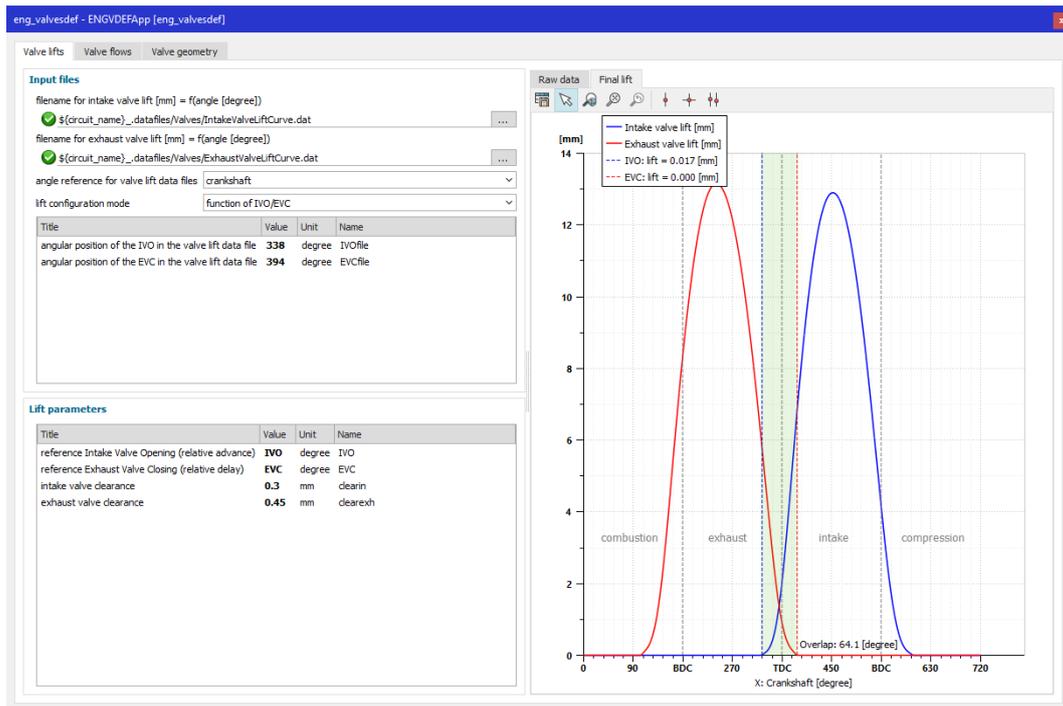


Figura 6.10. Levantamiento de válvulas. Configuración

De la figura anterior se puede observar que la herramienta pide que se le introduzca el levantamiento de las válvulas según el ángulo girado por el cigüeñal. Previamente se tendrán que haber introducido los datos de los levantamientos en un formato adecuado para que Amesim lo entienda. Esto no tiene dificultad ninguna, pues Amesim dispone de una opción en la barra de herramientas que permite introducir datos y guardarlo automáticamente en un formato adecuado. Una vez introducidos estos levantamientos son necesarios otros datos como son el asentamiento de válvulas, el avance de apertura de la admisión o el retraso en el cierre del escape. Los cambios que se hagan en la parte izquierda se verán reflejados automáticamente en la gráfica. En este caso se introducen los datos y el solapamiento de válvulas obtenido es el correcto: 64°.

Una vez se han introducido todos los datos de la primera pestaña, se pasa a la siguiente.

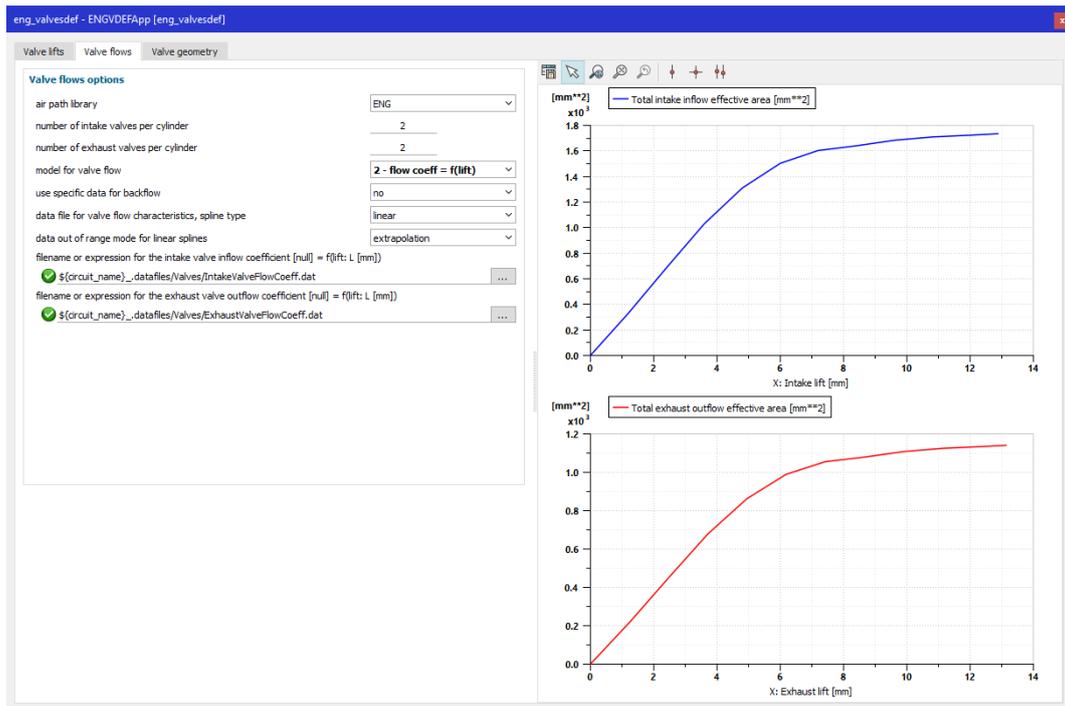


Figura 6.11. Coeficientes de flujo de las válvulas. Configuración.

En esta pestaña se define el número de válvulas en admisión y escape, que en este caso son dos en cada una, y se introducen los coeficientes de flujo de ellas. Este coeficiente de flujo puede ser constante o estar en función del levantamiento o el área de las válvulas. En este caso se tiene en función del levantamiento.

Por último, se definen las propiedades geométricas de las válvulas.

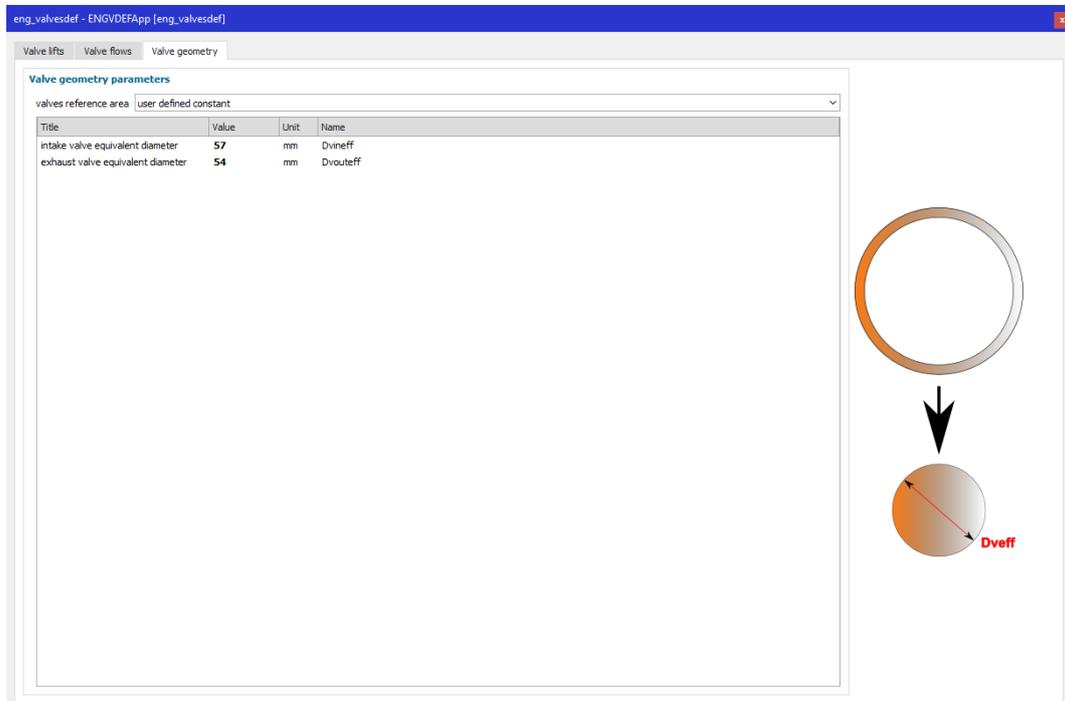


Figura 6.12. Geometría de las válvulas. Configuración.

Estas propiedades, definidas en este caso de forma simple con los diámetros de las válvulas, también se pueden definir de forma más detallada con valores del diseño de la válvula completa como ángulos del asiento, diámetros de válvulas y asientos y el diámetro del tronco de la válvula.

Con este procedimiento descrito se modela el comportamiento de las válvulas de los cilindros. Ahora es necesario proporcionar parámetros geométricos del motor y para ello, de forma parecida a lo que se ha hecho con las válvulas, se utiliza herramienta del icono de la Figura 6.13.



Figura 6.13. Herramienta de parametrización del motor.

Esta herramienta permite, como se verá a continuación, introducir los datos geométricos de los cilindros, el orden de encendido de los cilindros y los parámetros relativos a las pérdidas de calor a través de las paredes del cilindro. En la Figura 6.14, Figura 6.15 y Figura 6.16 se pueden ver los pasos a seguir en la herramienta.

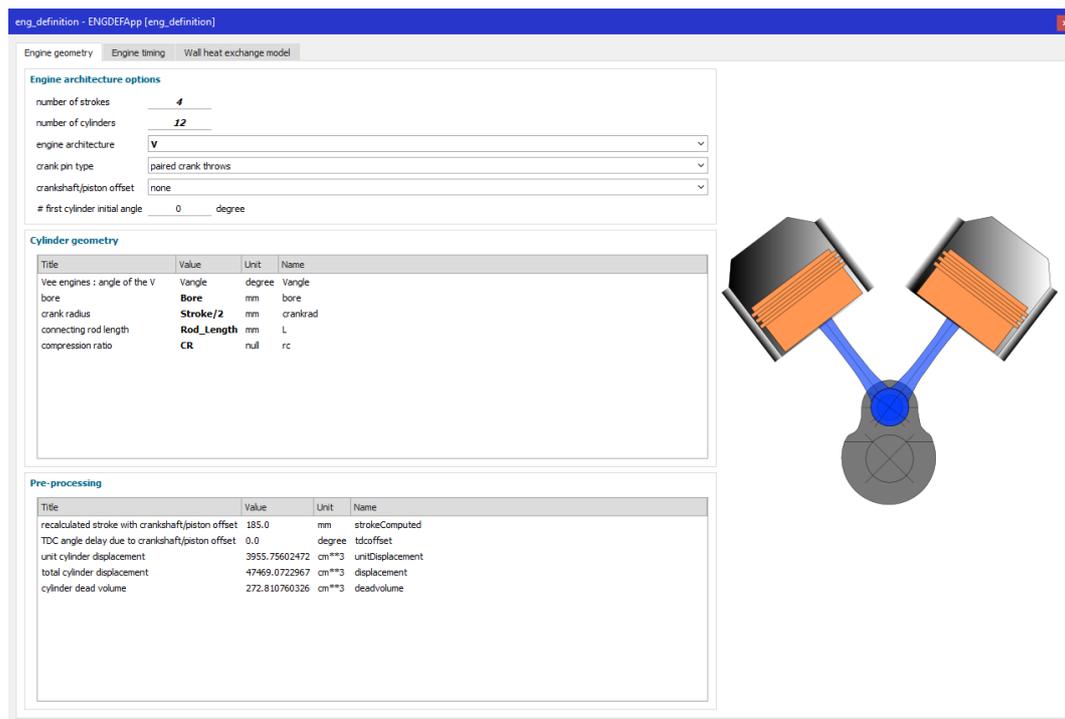


Figura 6.14. Parámetros geométricos de los cilindros. Configuración.

En esta primera pestaña han de introducirse los parámetros del motor tales como el número de carreras, el número de cilindros o el tipo de arquitectura entre otros. En la franja central la herramienta pide que se introduzcan datos geométricos del pistón y biela. La tercera franja se calcula automáticamente a partir de las dos anteriores y sirve para comprobar que se ha proporcionado adecuadamente la información.

En la pestaña siguiente se define el orden de encendido de los cilindros.

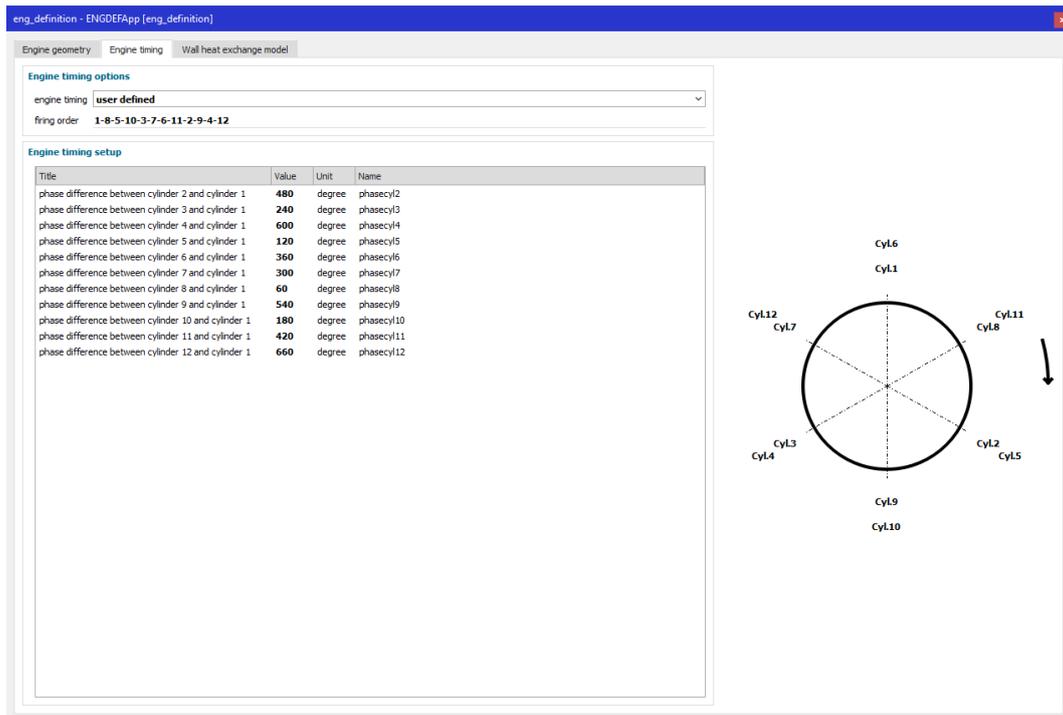


Figura 6.15. Orden de encendido de los cilindros. Configuración.

El orden de encendido puede hacerse automáticamente o, si se conoce como en este caso, se puede introducir. La referencia de los ángulos es el cilindro uno, y tal y como se ha establecido en la primera pestaña esta referencia son los cero grados. A la derecha se puede ver el esquema de encendido.

Por último, en la tercera pestaña se introducen parámetros relativos transmisión del calor.

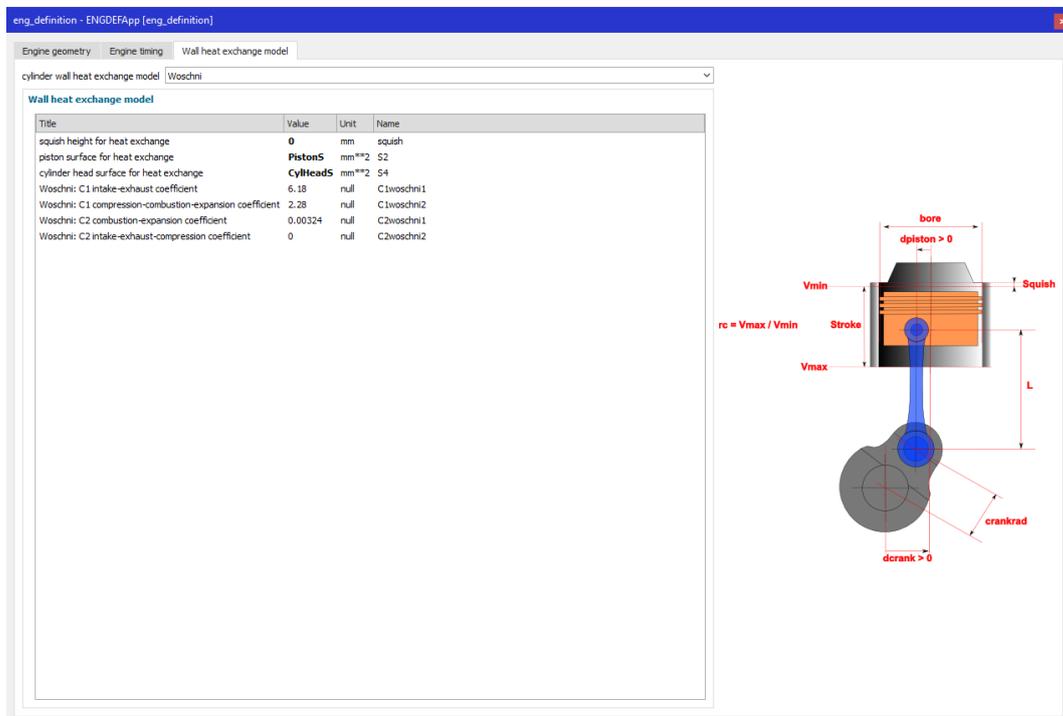


Figura 6.16. Transmisión de calor a través de la pared del cilindro. Configuración.

El intercambio de calor se puede modelar según las siguientes teorías:

- Woschni
- Annand
- Eichelberg
- Adiabático

En este caso se ha elegido el modelo de Woschni con los parámetros de la figura anterior. La formulación que sigue este modelo es la siguiente:

$$h_{conv} = \frac{130p^{0,8}}{T^{0,53} \cdot Bore^{0,2}} \left(C_1 V_p + C_2 \frac{V_0 T_1}{p_1 V_1} (p - p_0) \right)^{0,8} ; V_p = 2s\omega$$

Donde:

- h_{conv} es el coeficiente de transmisión de calor.
- V_p es la velocidad media del pistón en m/s.
- s es la carrera del pistón en m.
- p es la presión de la cámara de combustión en bar.
- T es la temperatura de la cámara de combustión en K.
- C_1 es el primer coeficiente de Woschni.
- C_2 es el segundo coeficiente de Woschni.
- V_0 es el volumen de la cámara de combustión en m^3 .
- P_1 es la presión antes de la combustión en bar.
- T_1 es la temperatura antes de la combustión en K.
- V_1 es el volumen antes de la combustión en m^3 .
- P_0 es la presión cuando no hay combustión en bar.

El valor del coeficiente de transmisión de calor se usa en las siguientes ecuaciones:

$$Q_{conv,pist} = h_{conv}(T - T_{pist})S_{pist}$$

$$Q_{conv,wall} = h_{conv}(T - T_{wall})S_{wall}$$

$$Q_{conv,head} = h_{conv}(T - T_{head})S_{head}$$

Dichas ecuaciones representan el flujo de calor en tres zonas distintas del cilindro: superficie del pistón, pared del cilindro y cabeza del cilindro.

Para tener en cuenta el cálculo de la transmisión de calor a través de las paredes, el cilindro cuenta con tres puertos donde necesita recibir información en forma de temperatura. Este dato se conoce y se ha introducido una temperatura de pared de 450 K.

Para terminar con lo que concierne al bloque motor se va a detallar la cámara de combustión utilizada. Se trata de un modelo de cámara de combustión que sigue las ecuaciones de 'Chmela'. Esta cámara permite crear un modelo predictivo, el cual se calibra para determinados puntos y permite obtener resultados para otros puntos diferentes. Las ecuaciones que rigen este modelo son las siguientes:

- Rendimiento volumétrico: el rendimiento volumétrico en este submodelo de cilindro se calcula de la siguiente manera:

$$\eta_{vol} = \frac{M_{cyl}^{air}}{M_{ref}} ; M_{ref} = \frac{P_{atm} V_{cyl}}{r_{air} T_{ref}} ; \text{siendo } T_{ref} = 273,15 \text{ K y } P_{atm} = 101300 \text{ Pa}$$

- Presión cilindro

$$\frac{dp}{dt} = \rho \left(\frac{dr}{dt} T + r \frac{dT}{dt} \right) + \frac{d\rho}{dt} r T$$

Las variaciones de densidad a lo largo del tiempo se calculan a partir de los gastos másicos.

$$\frac{dm_i}{dt} = \left(\frac{dm_i}{dt} \right)_{ports} + \left(\frac{dm_i}{dt} \right)_{comb}$$

Debido a que se tiene una mezcla de gases, la constante del gas se obtiene a partir de las fracciones molares y constantes de los gases que forman la mezcla:

$$r = \sum_i x_i r_i; \frac{dr}{dt} = \sum_i \frac{dx_i}{dt} r_i = \sum_i \left(\frac{\dot{\rho}_i}{\rho} - \rho_i \frac{\dot{\rho}_i}{\rho^2} \right) r_i$$

La temperatura en el cilindro se calcula a partir de la ecuación de los gases ideales.

$$T = \frac{P}{\rho r}$$

- Intercambios de calor: se calculan a partir del coeficiente de transmisión de calor presentado anteriormente, siendo para el modelo de Woschni de la siguiente forma:

$$Q = \frac{130 p^{0,8}}{T^{0,53} \cdot Bore^{0,2}} \left(C_1 V_p + C_2 \frac{V_0 T_1}{p_1 V_1} (p - p_0) \right)^{0,8} S_w$$

- Combustión: La liberación de calor está basada en un modelo extendido de 'Chmela'. Considera que el calor liberado es función del combustible disponible en la cámara y de la turbulencia inducida por el chorro de combustible.

$$\frac{dQ_{comb}}{dt} = C_{mode} m_{fuel} e^{C_{rate} \frac{\sqrt{k}}{\sqrt[3]{V_{cyl}}}}$$

Siendo las constantes C_{mode} y C_{rate} parámetros de calibración de la combustión, m_{fuel} la masa de combustible en la cámara, V_{cyl} el volumen de la cámara y k la energía cinética de turbulencia inducida por el chorro de la inyección de combustible.

Existe otra constante C_{diss} que aparece en el cálculo de la energía cinética disipada y representa la destrucción de esta. La energía cinética del chorro de combustible es:

$$\frac{dE_{kin,spray}}{dt} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{n_{nozzle} \rho_f S_{nozzle}} \right)^2 \left(\frac{dm_{inj}}{dt} \right)^3$$

Donde n_{nozzle} y S_{nozzle} son el número de orificios y la superficie de cada uno del inyector, $\frac{dm_{inj}}{dt}$ es la variación de la masa de combustible inyectada y ρ_f es la densidad del combustible inyectado.

La energía cinética disipada es:

$$\frac{dE_{diss,kin}}{dt} = \frac{dE_{kin,spray}}{dt} - C_{diss} E_{diss,kin}$$

La energía cinética de turbulencia k se obtiene como:

$$k = \frac{E_{diss,kin}}{m_{gas}}$$

Por último, el calor liberado se utiliza junto el poder calorífico del combustible y la relación aire combustible estequiométrica para hallar los gastos másicos de aire fresco, combustible y gases quemados.

$$\left(\frac{dm_{fuel}}{dt}\right)_{comb} = -\frac{1}{PCI} \frac{dQ_{comb}}{dt}$$

$$\left(\frac{dm_{freshair}}{dt}\right)_{comb} = -\frac{PCO}{PCI} \frac{dQ_{comb}}{dt}$$

$$\left(\frac{dm_{bg}}{dt}\right)_{comb} = -\left(\frac{dm_{fuel}}{dt}\right)_{comb} - \left(\frac{dm_{freshair}}{dt}\right)_{comb}$$

6.2.3. Inyección

La inyección en un modelo físico es diferente a la de valores medios. En el modelo de valores medios había que introducir el valor constante de gasto másico conocido de banco de ensayos. En un modelo físico esto es diferente, pues es necesario introducir cómo varía este gasto durante el tiempo de inyección. Para afrontar esto existen tres submodelos de inyectores disponibles. Si se da el caso de que se conoce completamente el sistema de inyección de combustible se podría realizar un modelado de este mucho más complejo. Lamentablemente no es el caso y por ello se ha optado por introducir el combustible con una ley trapezoidal para cada caso de carga de calibración. La idea es calibrar el modelo utilizando los valores de inyección de banco de ensayo para cinco casos de carga, como se vio en el capítulo anterior. Para simular casos de carga distintos lo que hace el modelo es interpolar o extrapolar a partir de los valores proporcionados. La ley trapezoidal se obtiene proporcionando el tiempo de duración de la inyección y el valor máximo alcanzado de forma que el área del trapecio sea igual a la cantidad de combustible que entra a cada cilindro por ciclo.

En la Figura 6.17 se representa el sistema de inyección utilizado.

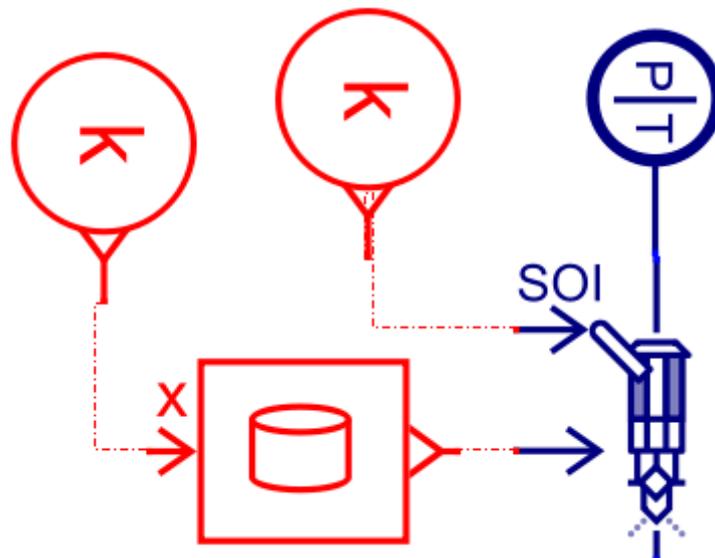


Figura 6.17. Sistema de inyección para el modelo físico.

De la figura anterior se puede ver que el componente del inyector pide que se le proporcione el comienzo de la inyección (SOI). Este valor, como ya se comentó es de 21°. Además de esto, ha de proporcionarse la duración de la combustión y el valor máximo, tal y como se ha dicho. Para ello, el proceso seguido para obtener los trapecios es como se indica a continuación.

Partiendo de los valores de consumo de combustible para los cinco casos de carga en kg/h hay que pasar los datos a mg/carrera. El cambio de unidades es el siguiente:

$$\frac{mg}{strk} = \frac{kg}{h} \cdot \frac{1}{3600} \cdot \frac{h}{s} \cdot \frac{1}{1800} \cdot \frac{min}{rev} \cdot 60 \cdot \frac{s}{min} \cdot \frac{1}{0,5} \cdot \frac{rev}{ciclo} \cdot 10^6 \cdot \frac{mg}{kg} \cdot \frac{1}{4} \cdot \frac{ciclo}{strk}$$

Con esto se logra obtener la cantidad de combustible por carrera necesaria para el total de los cilindros. Una vez obtenidos estos valores se puede hallar la cantidad en mg por cilindro simplemente multiplicando por cuatro y dividiendo entre doce. Utilizando los valores de la duración de la inyección se obtiene la cantidad en kilogramos por segundo que entra al cilindro.

La ley de inyección es trapecial porque el inyector no abre ni cierra inmediatamente, sino que tarda unos segundos en realizar este proceso. Los valores de tiempo de apertura y cierre introducido son de 0,5 ms. Para asegurar que la cantidad total de combustible inyectado es la que se obtuvo en banco, se calcula el área del trapecio, se iguala a dicha cantidad y se despeja el valor máximo. Este proceso se indica abajo con la ayuda de un croquis.

En la Figura 6.18 se observa un croquis del trapecio con sus valores característicos acotados.

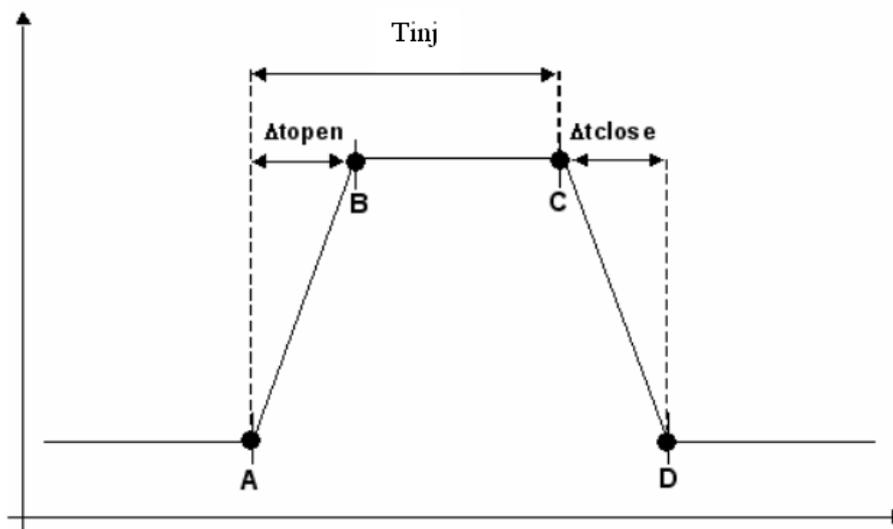


Figura 6.18. Croquis del trapecio de inyección de combustible para el modelo físico.

$$m_{fuel} = \frac{1}{2} t_{open} \dot{m}_{max} + (t_{inj} - t_{open}) \dot{m}_{max} + \frac{1}{2} t_{close} \dot{m}_{max} = \frac{\dot{m}_{max}}{2} (2t_{inj} + t_{close} - t_{open})$$

$$\dot{m}_{max} = \frac{2m_{fuel}}{2t_{inj} + t_{close} - t_{open}}$$

Se observa que, si los tiempos de apertura y de cierre son iguales, el valor máximo que alcanza el trapecio se simplifica a:

$$\dot{m}_{max} = \frac{m_{fuel}}{t_{inj}}$$

En la Tabla 6.1 se detallan los valores de los cinco casos de carga.

Carga	Gasto másico de combustible (kg/h)	Combustible por carrera (mg/strk)	Masa de combustible inyectada (mg)	Duración de inyección (s)	Gasto de combustible por cilindro (kg/s)
100%	254	1175,93	4703,70	0,00577	0,067933
75%	196,1	907,87	3631,48	0,00556	0,054429
50%	131,6	609,26	2437,04	0,00392	0,051808
25%	82,9	383,80	1535,19	0,00318	0,040230
10%	49,1	227,31	909,26	0,00678	0,011176

Tabla 6.1. Datos de inyección introducidos en el inyector para el modelo físico.

Como ejemplo del trapecio de inyección se muestra en la Figura 6.19 la inyección para el caso de carga del 100%.

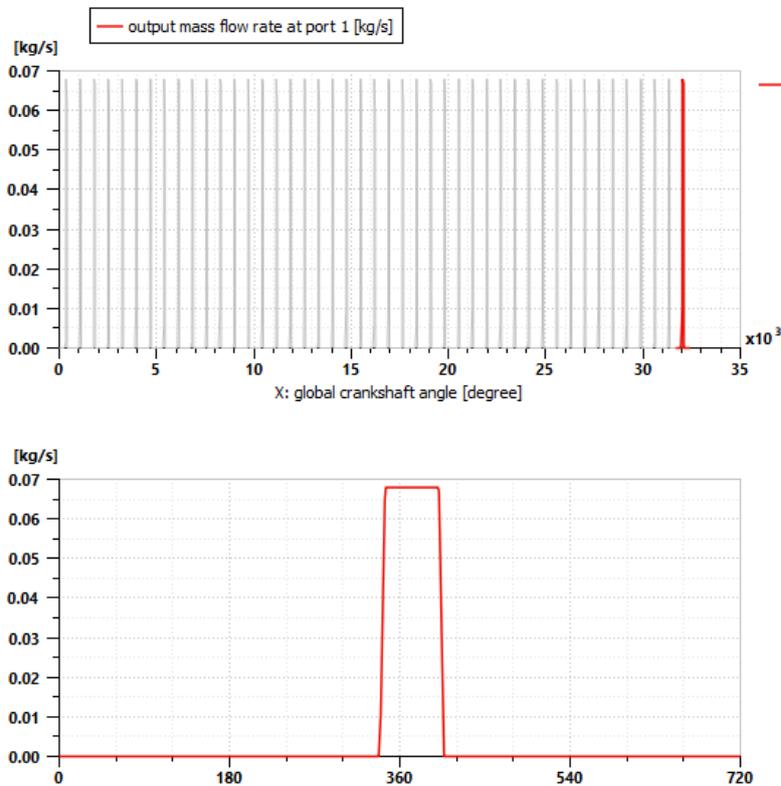


Figura 6.19. Inyección trapezoidal para el caso de carga del 100%.

En cuanto a la presión y temperaturas de inyección, los valores son los mismos que en el capítulo anterior, siendo la presión de trescientos bares y la temperatura de cincuenta grados.

Este procedimiento expuesto da resultados bastante buenos, aunque no se modele la inyección de la manera más real posible. En caso de contar con un sistema de inyección en banco que permitiera recoger datos más aproximados de la inyección a lo largo del tiempo, podría obtenerse una inyección en función del tiempo y utilizarse otro inyector para ello.

Por último, se recogen las ecuaciones de inyección del modelo de cilindro 'Chmela' utilizado. En condiciones normales, y así sucede en este caso, el combustible utilizado se encuentra en estado líquido. Por tanto, al inyectarse en forma de espray las partículas de combustible se evaporan. Esta evaporación está contemplada en Amesim, que permite elegir el estado en el

que se encuentra el combustible cuando va a ser inyectado. Las ecuaciones que sigue este proceso de evaporación son las siguientes:

$$\tau_{evap} = \frac{D_0^2}{\Lambda}; \Lambda = \frac{4(\dot{m}_{evap} + \dot{m}_{boil})}{\pi D_0 \rho_{liq}}$$

$$\dot{m}_{boil} = \left(\frac{\max(T_{cc} - T_{eb}, 0)}{L_v} \lambda \frac{Nu}{D_0} \right) \pi D_0^2$$

$$\dot{m}_{evap} = \frac{Sh \cdot \pi D_0 P_0 D_v^{(0)} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{P_{sat}(T_{cc}) W_{fu}}{P_{\infty} W_{air} + P_{sat}(T_{cc}) W_{fu}} - x_{\infty} \right)}{RT_{cc}}$$

Siendo,

- τ_{evap} el tiempo característico de evaporación del combustible en s.
- T_{cc} la temperatura media en el cilindro en K.
- R la constante de gases ideales en J/mol/K.
- D_0 el diámetro de la gota en μm .
- ρ_{liq} la densidad del combustible líquido en kg/m^3 .
- Sh el número de Sherwood.
- $D_v^{(0)}$ la difusividad combustible-aire en m^2/s .
- T_0 la temperatura de referencia para la difusión en K.
- W_{fu} el peso molecular del combustible en kg/m^3 .
- P_{∞} la presión en el infinito en PaA.
- W_{air} el peso molecular del aire en kg/m^3 .
- x_{∞} la fracción másica de combustible en el infinito.
- W_{mixt} el peso molecular de la mezcla en kg/m^3 .
- P_0 la presión de referencia en PaA.
- P_{sat} la presión de saturación en PaA.
- P_{eb} la presión de referencia para el punto de ebullición en PaA.
- L_v el calor latente de vaporización en J/kg.
- T_{eb} la temperatura de referencia para el punto de ebullición en K.
- Nu el número de Nusselt.
- λ la conductividad térmica del gas en W/m/K.

Estas ecuaciones están basadas en octano puro. Cuando se utilice otro combustible se puede jugar con la eficiencia del proceso de evaporación para ajustarlo. No obstante, en un modelo como este la evaporación no termina de ser un factor crucial.

Durante la evaporación se asume que la temperatura de las gotas de combustible no varía y por tanto se cumplen las ecuaciones siguientes:

$$\frac{dm_{Fu}}{dt} = \frac{m_{Fu_{liq}}}{\tau}$$

$$\frac{dH}{dt} \Big|_{evap} = \frac{dm_{Fu}}{dt} (h_{liq} + Q_{lv} x_{heat,wall})$$

Con m_{Fu} y $m_{Fu_{liq}}$ la masa de combustible gaseoso y líquido respectivamente, h_{liq} la entalpía del combustible líquido, Q_{lv} el calor latente de vaporización y $x_{heat,wall}$ la fracción de calor de vaporización obtenida de las paredes del cilindro.

Con esto ha quedado explicado el procedimiento utilizado en el modelo para introducir la inyección de combustible.

6.2.4. Eje motor

En el modelado del eje motor no ha habido cambios con respecto al modelo de valores medios. La única diferencia se encuentra a la hora de parametrizar el componente que simula las pérdidas mecánicas. Puede verse en la Figura 6.20 que ahora hay que decir que es un modelo “High Frequency”.

Title	Value	Unit	Tag
IMEP computation type	High Frequency approach		
friction description setting	friction = f(rpm, load)		
friction unit	FMEP [bar], N [rpm], IMEP [bar]		
number of strokes	Nstrk		
number of cylinders	Ncyl		
initial IMEP	0	bar	
cylinder displacement	Vcyl	L	
number of engine revolution between samplings	2	null	
filename or expression for the friction mean effecti...	\${circuit_name}._datafiles/FMEP.data		
▶ <input type="checkbox"/> friction file options			
▶ <input type="checkbox"/> engine start consideration			
▼ <input type="checkbox"/> engine temperature consideration			
accounting for engine temperature impact	yes		
oil reference temperature	85	degC	
oil transition temperature	30	degC	
FMEP offset between Tref and Trans, linear co...	1	bar	
log coefficient, logarithmic correlation	0.3	null	
filename or expression for the oil dynamic visc...	0.059*exp(1160/(125+Toil))		
interpolation type	linear		
out of range mode	extreme values		

Figura 6.20. Parámetros del componente de pérdidas mecánicas en el modelo físico.

La presión del cilindro se transmite al eje del motor siguiendo las siguientes ecuaciones:

$$F_{piston} = (P_{cyl} - P_{atm}) \cdot A_{piston}$$

El volumen total de la cámara de combustión se calcula teniendo en cuenta el espacio muerto, que se obtiene de la siguiente forma:

$$d_v = \frac{\pi B^2 R}{2(r_c - 1)}; \text{siendo } r_c = \frac{(V_d + d_v)}{d_v}$$

V_d es el volumen desplazado por el cilindro, r_c es la ratio de compresión, R es la mitad de la carrera del pistón y B su diámetro.

Modelo físico utilizando el cilindro ‘BMF’

El modelo físico detallado en el apartado anterior es un modelo físico que puede funcionar a diferentes puntos de carga sin tener que introducir otros datos, pues se trata de un modelo predictivo capaz de interpolar y extrapolar parámetros. En este apartado se va a describir el modelado de un modelo no predictivo que solo permite simular puntos de operación concretos. El modelo usa un tipo de cámara de combustión denominada ‘BMF’, que como se dijo anteriormente viene de “Burnt Mass Fraction”. Se trata de un cilindro cuyos parámetros de entrada se obtienen con la ayuda de una herramienta incluida en Amesim a partir de los valores de presión cilindro en los diferentes puntos de operación que se tengan y de algunos valores de presiones, temperaturas y consumos. La gran diferencia entre este modelo y el

anterior radica en la cámara de combustión y es aquí donde se centra esta explicación. Se va a detallar el proceso que hay que seguir para utilizar la herramienta adecuadamente y obtener la tabla de calor liberado y la de fracción de masa quemada a lo largo del tiempo partiendo de datos experimentales.

En la Figura 6.21 se representa el modelo 'BMF'. En el anexo del final se tiene la misma figura ampliada.

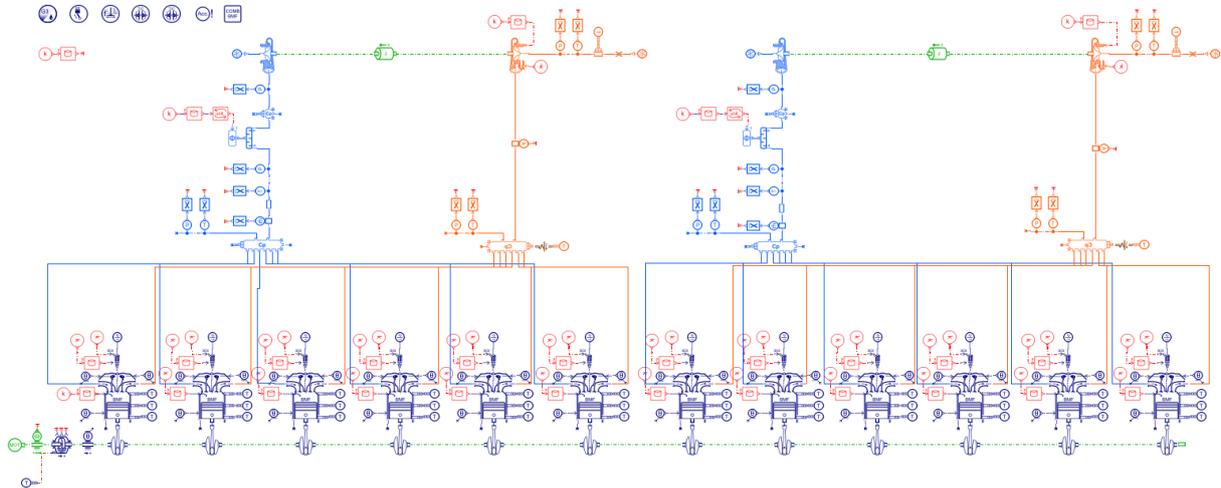


Figura 6.21. Modelo físico del motor generador con cámara de combustión 'BMF'.

Se puede ver que las únicas diferencias están en la inclusión de la herramienta de configuración 'BMF' y las cámaras de combustión.

La Figura 6.22 muestra las entradas y salidas del sistema.

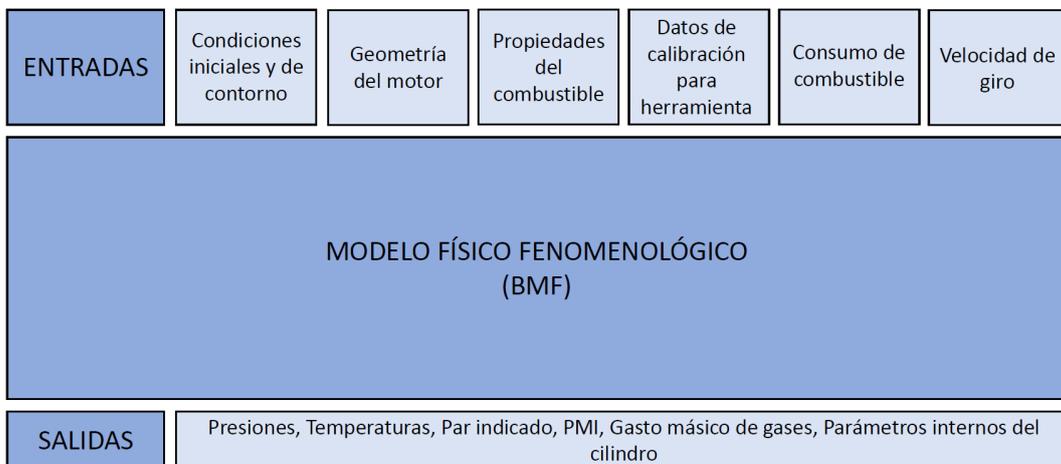


Figura 6.22. Entradas y salidas del sistema. Modelo 'BMF'.

En la Figura 6.23 se muestra la cámara de combustión utilizada en más detalle.

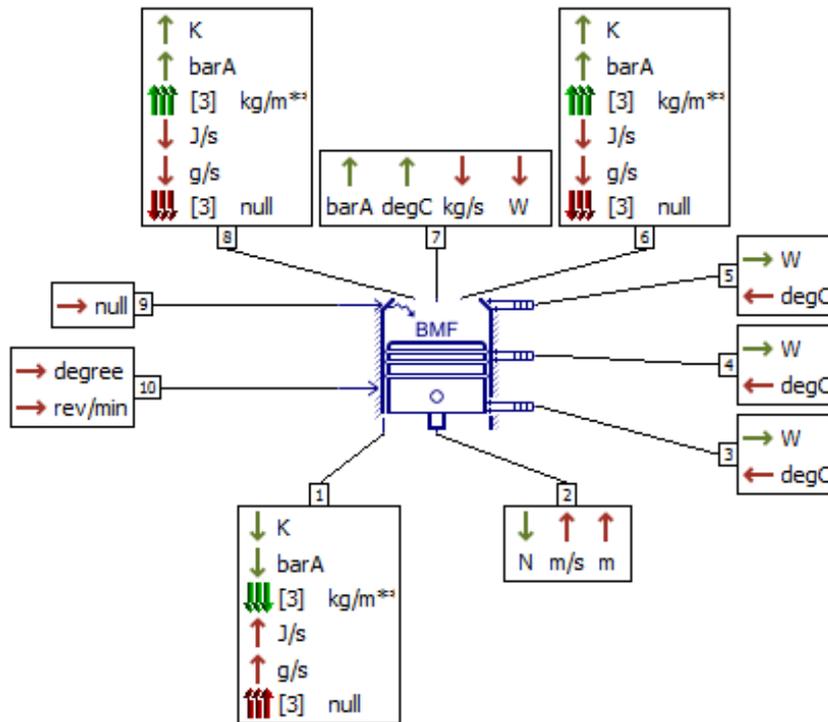


Figura 6.23. Componente que simula la cámara de combustión 'BMF'.

La gran diferencia entre esta cámara de combustión y la anterior es la presencia de un puerto extra, concretamente el número nueve, en el que para el caso de un motor de encendido por compresión ha de introducirse la cantidad de combustible que entra al cilindro en cada ciclo en miligramos.

La herramienta necesaria para configurar esta cámara de combustión se puede ver en la Figura 6.24. En la Figura 6.25 se observa su utilidad.



Figura 6.24. Herramienta de configuración de la cámara de combustión 'BMF'.

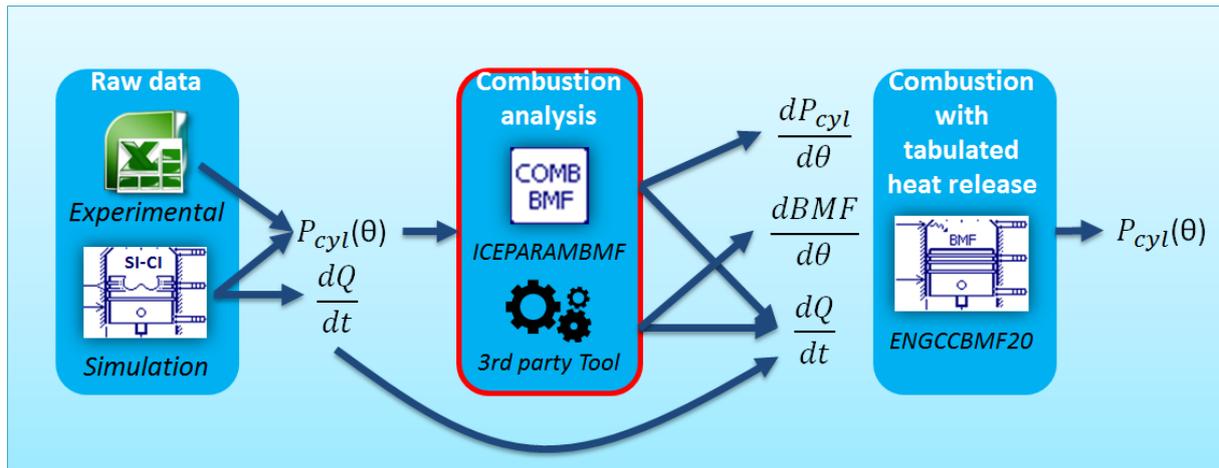


Figura 6.25. Utilidad de la herramienta de configuración de 'BMF'.

Como se puede observar de la figura anterior, partiendo bien de una simulación previa o de una hoja de cálculo, la herramienta permite obtener las tablas de calor liberado o de fracción másica quemada, entre otras, que hay que introducir. La Figura 6.26 muestra los parámetros del componente.

Title	Value
mixture index	1
combustion type	compression ignition
input file	<code>\${circuit_name}_BMF/BMF_imput.xls</code>
options	
injected fuel	liquid
vaporization model	expression of tau
filename or expression for the fuel evaporatio...	...evaporation/tau_vaporization_droplet10micro_hp.data
efficiency for evaporation law	0.7
fraction of vaporization heat taken from walls	0.3
fuel heating value	constant from engine gas definition
standard solver tolerance	1e-07
template generator	<code>ILPython \$AME/libeng/utis/Combustion_tool/TemplateG</code>
injection generation	<code>ILPython \$AME/libeng/utis/Injection_tool/INJMain.pyc</code>
BMF tool	<code>ILPython \$AME/libeng/utis/Combustion_tool/COMBMain</code>
send parameters to combustion chambers	<code>ILPython \$AME/libeng/utis/Combustion_tool/COMBSenc</code>

Figura 6.26. Parámetros de la herramienta de configuración de 'BMF'.

Previamente a abrir la herramienta se debe configurar. En la figura anterior se aprecia que se debe introducir el número de mezcla, que se vio en el capítulo anterior, que es el número uno, pues solamente se tiene esa. Se ha de indicar el tipo de combustión, que es por compresión en este caso. Además, se debe especificar si el combustible entra en estado líquido o gaseoso. Como ya se ha comentado, la herramienta necesita una hoja de cálculo como punto de partida. En la hoja de cálculo se introducen todos los puntos de operación de los que se disponga y para estos puntos se piden los siguientes parámetros:

- Velocidad de giro.
- Presión media efectiva.
- Porcentaje de recirculación de gases de escape (%EGR).
- Presiones y temperaturas de admisión y escape.
- Opcionalmente pueden darse los valores iniciales de presión, temperatura y fracciones másicas de la mezcla.
- Apertura y cierre de válvulas.
- Gastos másicos de aire y combustible por cilindro.
- Opcionalmente se pueden proporcionar los valores de presión media indicada, ratio aire-combustible y temperatura de las paredes del cilindro.
- Ruta y nombres de los archivos de inyección en kg/s y de presión cilindro en bar.
- Presión y temperatura de combustible inyectado y comienzo de la inyección.

Esta hoja de cálculo se rellena a partir de una plantilla que proporciona el propio Amesim, como se puede ver en la Figura 6.27.

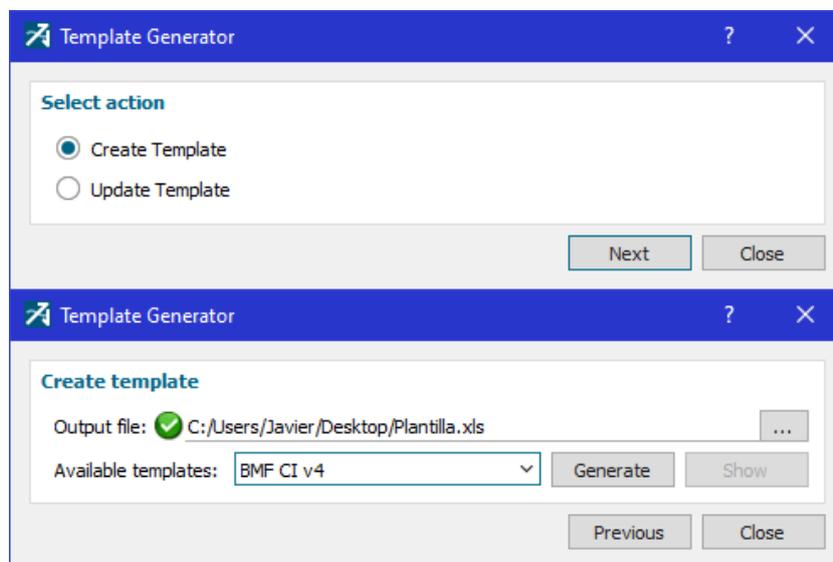


Figura 6.27. Creación de una plantilla de la herramienta de configuración de 'BMF' para introducir los datos de partida.

Una vez se haya configurado lo anterior se procede a abrir la herramienta haciendo clic en el enlace de color azul que aparece al lado de 'BMF Tool'.

Al abrir la herramienta, los datos recogidos en la hoja de cálculo son leídos automáticamente. Se abre una nueva ventana que cuenta con cinco pestañas. En las Figura 6.28 a Figura 6.34 se muestran esas pestañas y se explica lo que se hace en cada una de ellas.

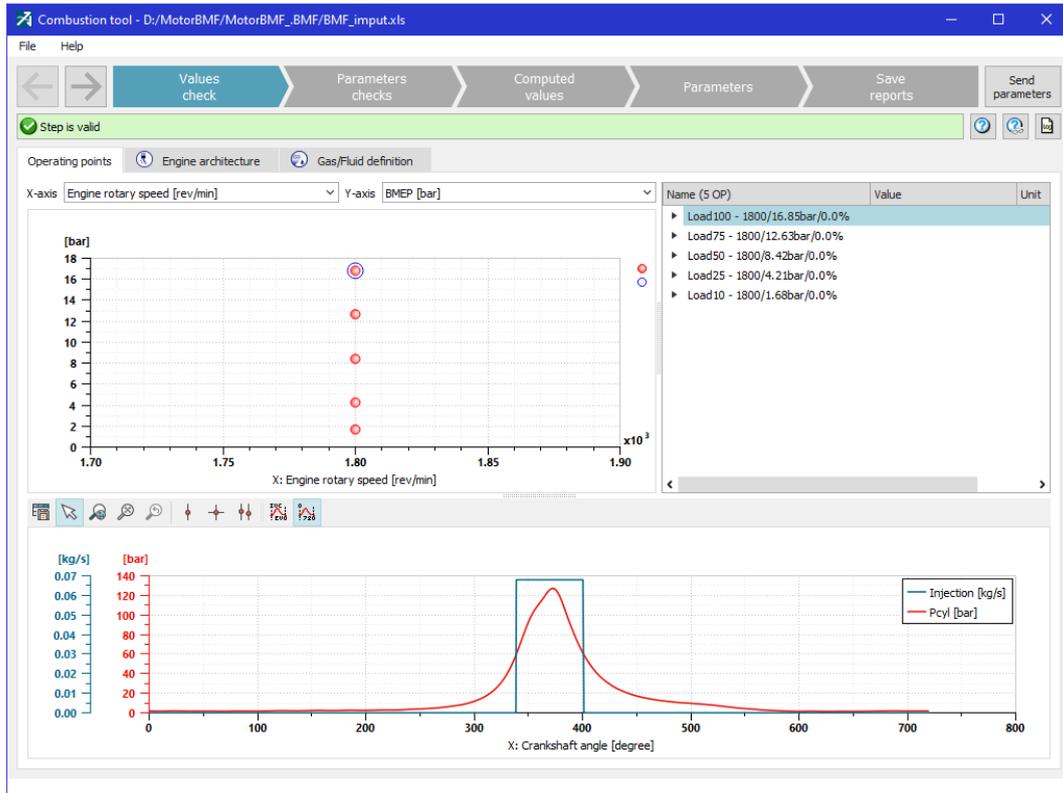


Figura 6.28. Herramienta de configuración de 'BMF'. Pestaña 1.

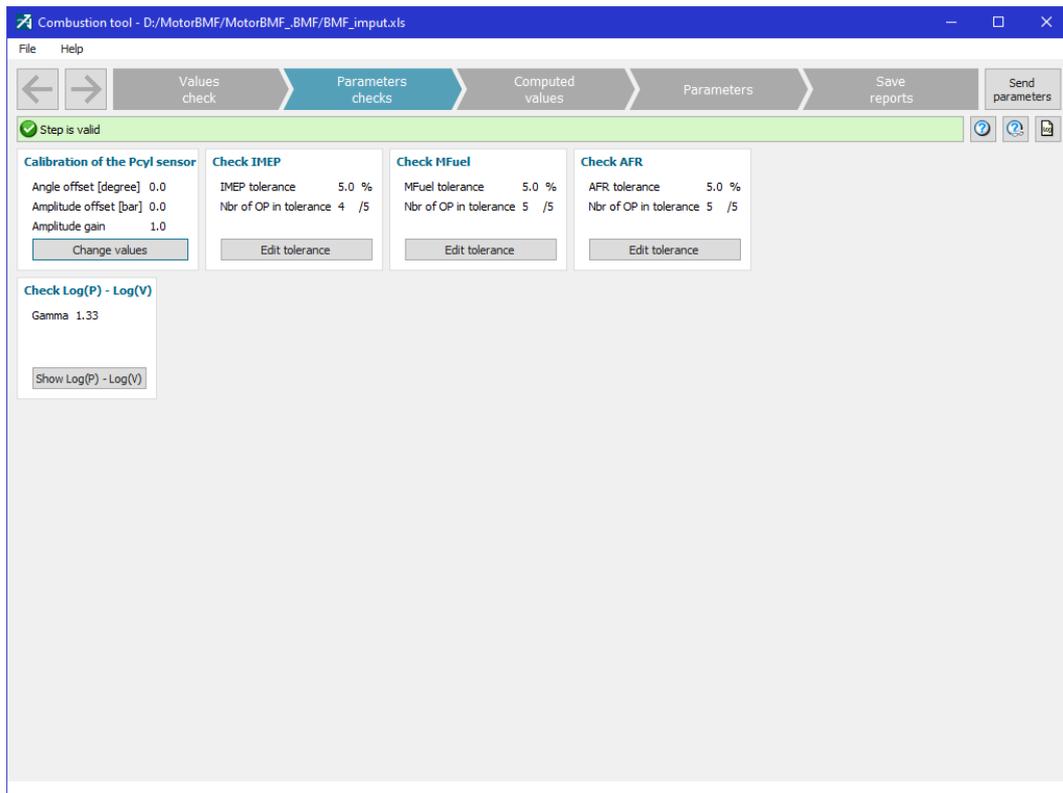


Figura 6.29. Herramienta de configuración de 'BMF'. Pestaña 2.

En la primera pestaña (Figura 6.28) se recogen los valores de presión cilindro e inyección proporcionados para los diferentes estados de carga del motor en los archivos indicados en

la hoja de cálculo. Se trata de una pestaña que permite comprobar que los datos son correctos. Aparte de los puntos de operación también muestra los parámetros de la arquitectura del motor y de la mezcla definida

La segunda pestaña (Figura 6.29) de nuevo es puramente informativa, y en ella se comprueba que los valores de partida proporcionados y los calculados por Amesim a partir de la geometría del motor y propiedades del aire y combustible son del mismo orden y no presentan errores elevados.

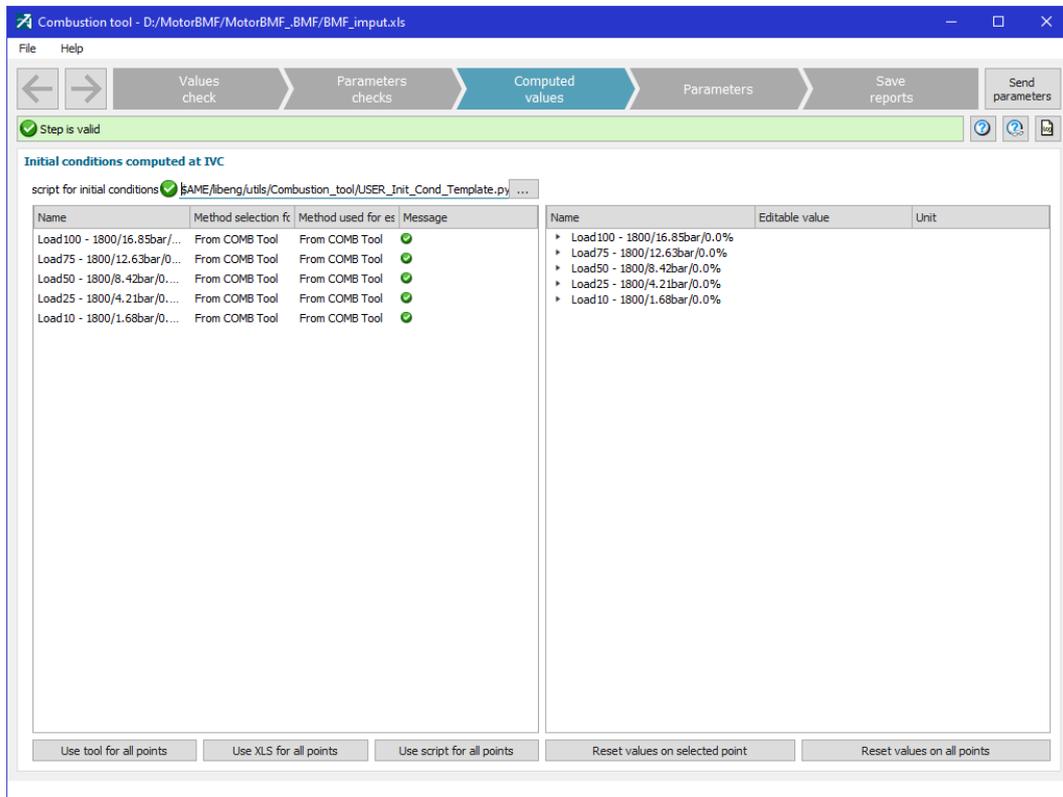


Figura 6.30. Herramienta de configuración de 'BMF'. Pestaña 3.

En esta tercera pestaña la herramienta pide cómo se quiere que calcule los valores iniciales en el momento del cierre de la válvula de admisión. Hay tres opciones:

- De la herramienta de combustión: esta se encarga de elegir los valores adecuados teniendo en cuenta el motor y los valores proporcionados en la hoja de cálculo.
- Con un script de Python: para usuarios aún más avanzados se da la posibilidad de programar un script que calcule estos valores iniciales.
- De la hoja de cálculo: si previamente se introdujeron estos valores opcionales se le puede decir a la herramienta que utilice estos.

En este caso se ha optado por que sea la propia herramienta la que decida qué valores iniciales son adecuados.

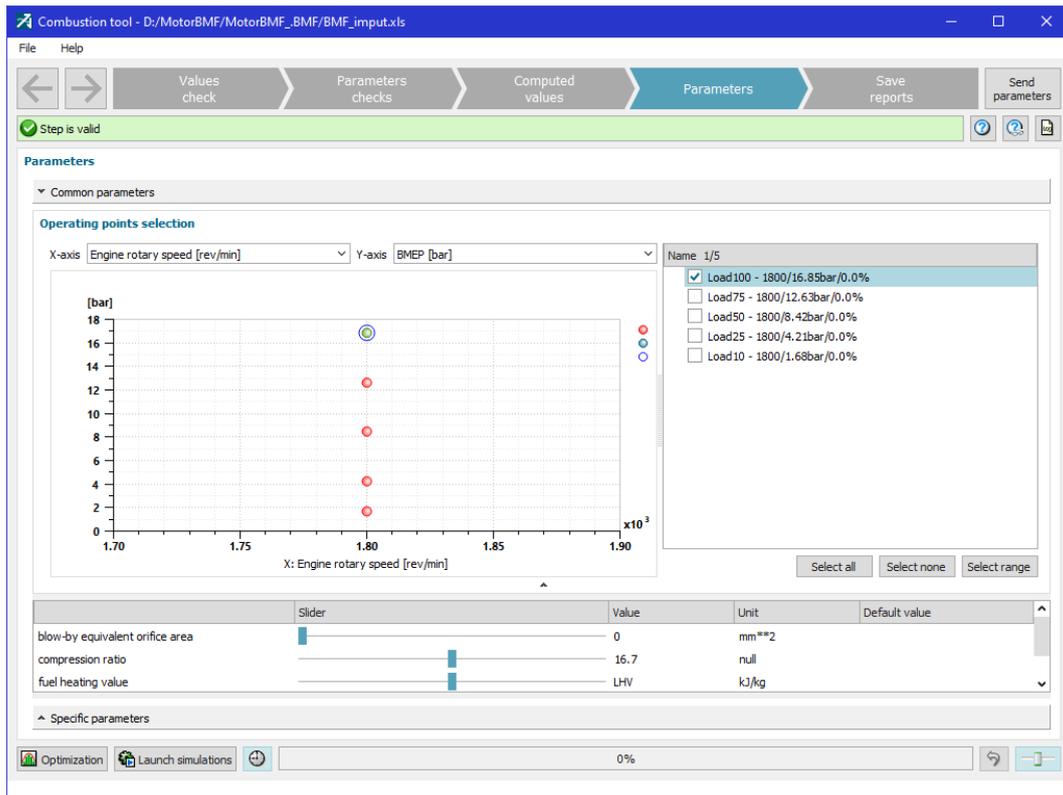


Figura 6.31. Herramienta de configuración de 'BMF'. Pestaña 4 - 1.

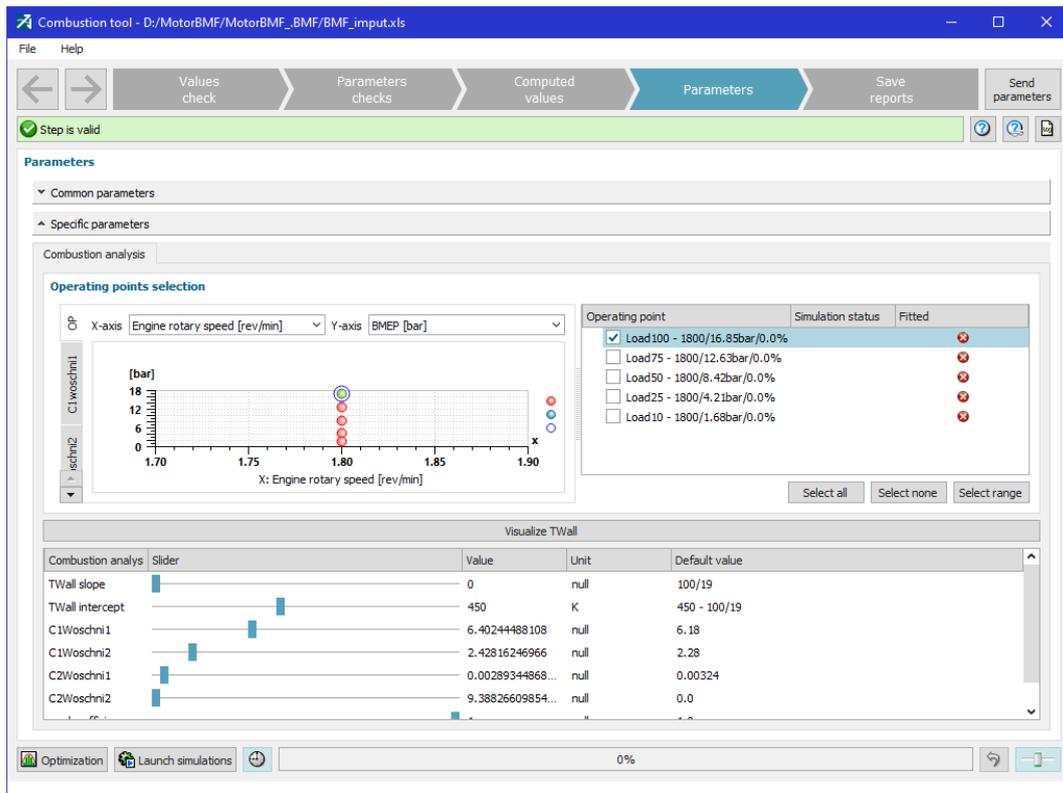


Figura 6.32. Herramienta de configuración de 'BMF'. Pestaña 4 - 2.

En esta cuarta pestaña es donde se ajustan las curvas de presión cilindro simuladas a las experimentales. Ese ajuste puede ser manual o automático con una herramienta de

optimización. Los parámetros de Woschni (Figura 6.32) se han obtenido automáticamente con la optimización y el ajuste de las curvas se ha hecho ajustando la ratio de compresión ligeramente (Figura 6.31). En la Figura 6.33 se muestran las curvas simuladas (rojas) ajustadas a las experimentales (verdes).

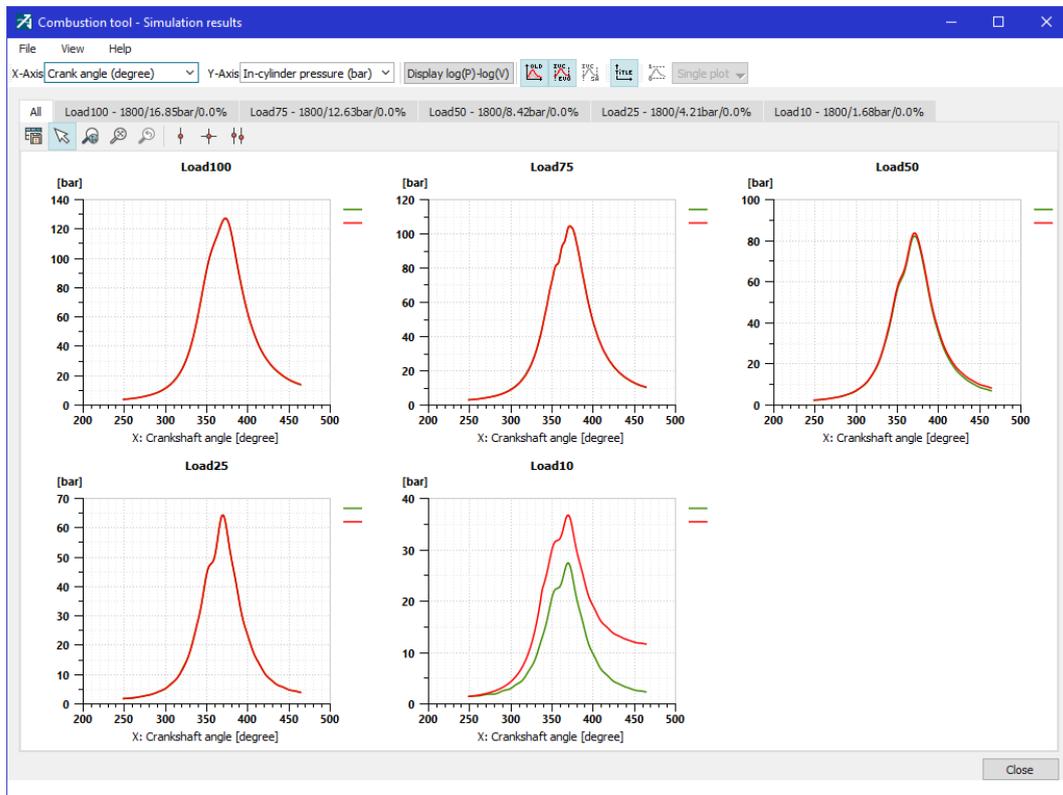


Figura 6.33. Ajuste de curvas simuladas a las experimentales. Herramienta de configuración de 'BMF'.

Se puede ver que en todos los casos menos en el del 10% se ajustan muy bien, estando las curvas incluso superpuestas en varios casos. El mal ajuste en el 10% puede que se deba a un exceso de ruido en los datos de presión cilindro obtenidos en banco de ensayo para este punto de operación. Un motor generador no está hecho para trabajar al 10% de carga. Por tanto, si se pone a funcionar a baja carga, aparte de ser altamente ineficiente, el comportamiento no es adecuado. Este fallo en el ajuste se verá que tiene consecuencias en los parámetros obtenidos más adelante en la simulación.

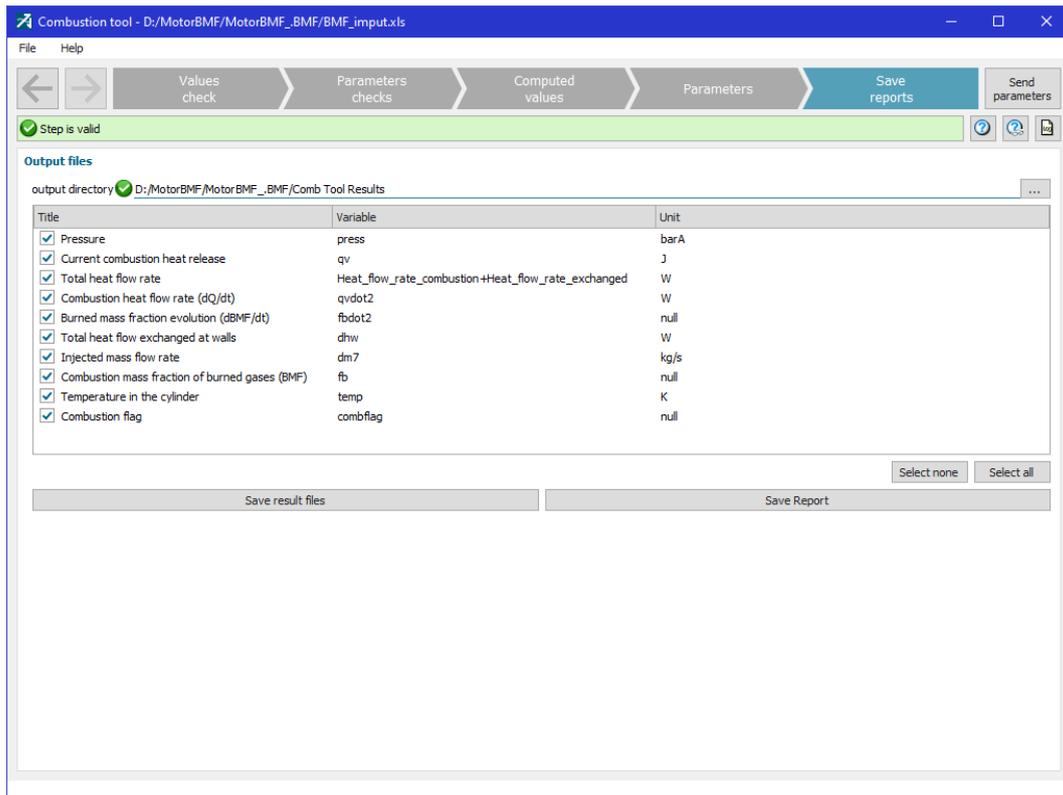


Figura 6.34. Herramienta de configuración de 'BMF'. Pestaña 5.

Por último, se guardan en una carpeta una serie de tablas obtenidas para los cinco casos de carga estudiados. De aquí se obtiene la tabla que se introduce en los parámetros de la cámara de combustión. Una vez guardadas las tablas en la carpeta deseada se hace clic en "Send parameters" y se cierra la ventana, volviendo a la ventana principal de Amesim. En los parámetros del icono de la herramienta 'BMF' (Figura 6.26) ahora debe seleccionarse la última opción.

Los parámetros de la cámara de combustión también deben configurarse y se realiza según la forma de la Figura 6.35.

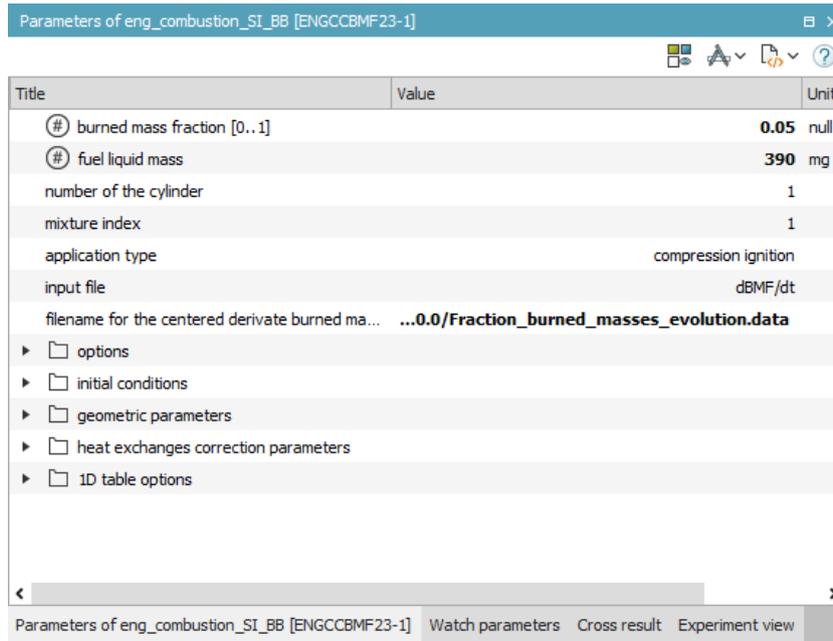


Figura 6.35. Parametrización de la cámara de combustión 'BMF'.

En este modelo no predictivo se simulan los cinco casos de carga (10, 25, 50, 75 y 100%) de manera individual y no a la vez como sí podía realizarse en el modelo predictivo anterior usando la cámara de combustión de 'Chmela'.

Para ello, cuando se simula cada caso individual se guardan los parámetros utilizados y los resultados obtenidos como un nuevo experimento. De esta forma se puede acceder a los datos de simulación de los diferentes estados de carga en cualquier momento, tal y como se ve en la Figura 6.36.

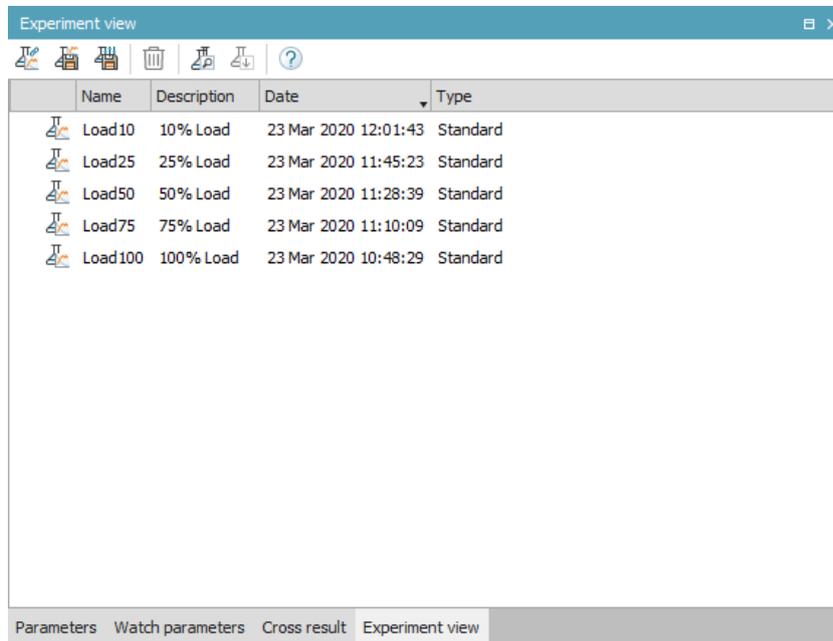


Figura 6.36. Experimentos para el modelo no predictivo 'BMF'.

En cada punto de operación se introduce la tabla de fracción másica quemada a lo largo del tiempo correspondiente, obtenida con la herramienta. En la Figura 6.37 se tiene la del caso de 100% de carga.

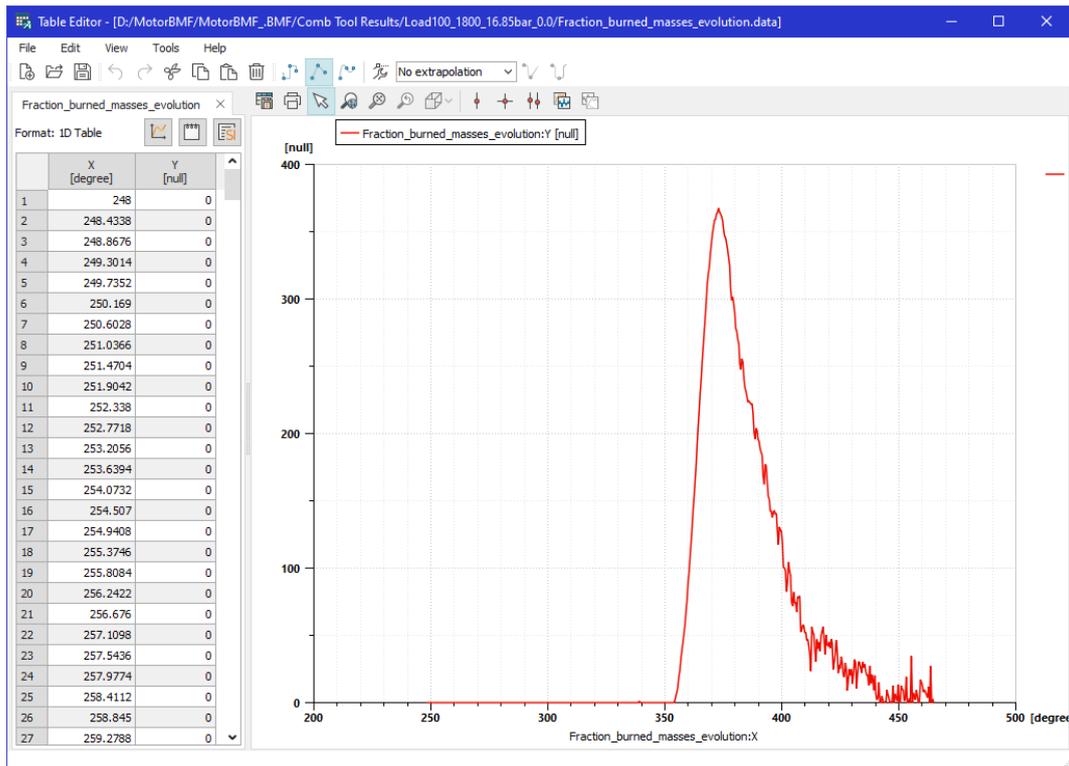


Figura 6.37. Liberación de calor para el punto de operación del 100%. Modelo 'BMF'.

Antes de finalizar esta sección y pasar al calibrado del modelo se van a detallar las ecuaciones que sigue la cámara de combustión 'BMF' utilizada. Así pueden verse las diferencias existentes con la cámara de combustión anterior.

Como ya se ha comentado, en la Figura 6.35 se introduce la tabla que puede verse en la Figura 6.37 para cada uno de los casos. En función de si se introduce la tabla de la liberación de calor o de la fracción másica quemada a lo largo del tiempo, la forma de simular la combustión es diferente. En este caso se ha introducido la fracción másica quemada, pero se van a detallar los dos casos.

- Si se proporciona la fracción másica quemada $\frac{dBMF}{dt}$:

Se calcula la masa de combustible quemada como:

$$\left(\frac{dm_{fuel}}{dt}\right)_{combustion} = \left(\frac{dBMF}{dt}\right) \cdot m_{ref}$$

m_{ref} se obtiene del valor proporcionado a la cámara de combustión en uno de sus puertos (concretamente el nueve) cuando la inyección es directa, como es en este caso. En ese puerto, tal y como se observa en la Figura 6.21, se introduce una tabla con la cantidad de combustible inyectado en cada cilindro por ciclo. Si la inyección es indirecta se toma como referencia la cantidad de combustible disponible en la cámara cuando se produce la ignición.

Una vez calculada la masa de combustible quemada, el calor liberado se obtiene de la siguiente forma:

$$\frac{dQ_{comb}}{dt} = -PCI \cdot \left(\frac{dm_{fuel}}{dt}\right)_{combustion}$$

- Si se proporciona el calor liberado:

En este caso ya se le están proporcionando los valores necesarios para realizar los cálculos. Por último, igual que en el caso de la cámara de combustión 'Chmela' utilizada antes, el calor liberado se utiliza junto el poder calorífico del combustible y la relación aire combustible estequiométrica para hallar los gastos máscicos de aire fresco, combustible y gases quemados.

$$\left(\frac{dm_{fuel}}{dt}\right)_{comb} = -\frac{1}{PCI} \frac{dQ_{comb}}{dt}$$

$$\left(\frac{dm_{freshair}}{dt}\right)_{comb} = -\frac{PCO}{PCI} \frac{dQ_{comb}}{dt}$$

$$\left(\frac{dm_{bg}}{dt}\right)_{comb} = -\left(\frac{dm_{fuel}}{dt}\right)_{comb} - \left(\frac{dm_{freshair}}{dt}\right)_{comb}$$

6.3. Calibración del modelo

Tal y como se hizo en el capítulo anterior, el modelo ha de ser calibrado para ajustarlo a los valores experimentales obtenidos en banco de ensayo para los cinco estados de carga: 10, 25, 50, 75 y 100%. Los parámetros utilizados para calibrar el modelo son los siguientes:

- Presión después del compresor.
- Presión antes de la turbina.
- Presión después de la turbina.
- Temperatura después del CAC.
- Temperatura antes de la turbina.
- Temperatura después de la turbina.
- Gasto máscico de aire.
- Presión media indicada.
- Par efectivo.

El procedimiento seguido para calibrar los modelos es prácticamente igual al de valores medios. En este caso, aparte de los parámetros tocados en el modelo de valores medios, se ha tocado también un parámetro de coeficiente de flujo a la salida del escape. En la Tabla 6.2 siguiente se presentan estos parámetros y sus valores.

Carga	Constante de efecto de pulso	Coficiente de flujo a la salida del escape	Ganancia en la transmisión del calor del colector de escape
100%	0,85	0,72	1200
75%	0,85		
50%	0,80		
25%	0,70		
10%	0,85		

Tabla 6.2. Parámetros de calibrado del modelo físico.

El coeficiente de flujo se ha tocado ligeramente para terminar de ajustar valores. Sin embargo, los más importantes son los otros dos parámetros.

Ahora se van a presentar los resultados de las simulaciones para los cinco casos de carga y se acompañan con diagramas de barras que comparan los resultados de simulación con los experimentales.

Modelo físico utilizando el cilindro 'Chmela'

En la Figura 6.38 se tienen unos gráficos de barras que comparan las temperaturas y presiones simuladas y experimentales en determinados puntos del motor.

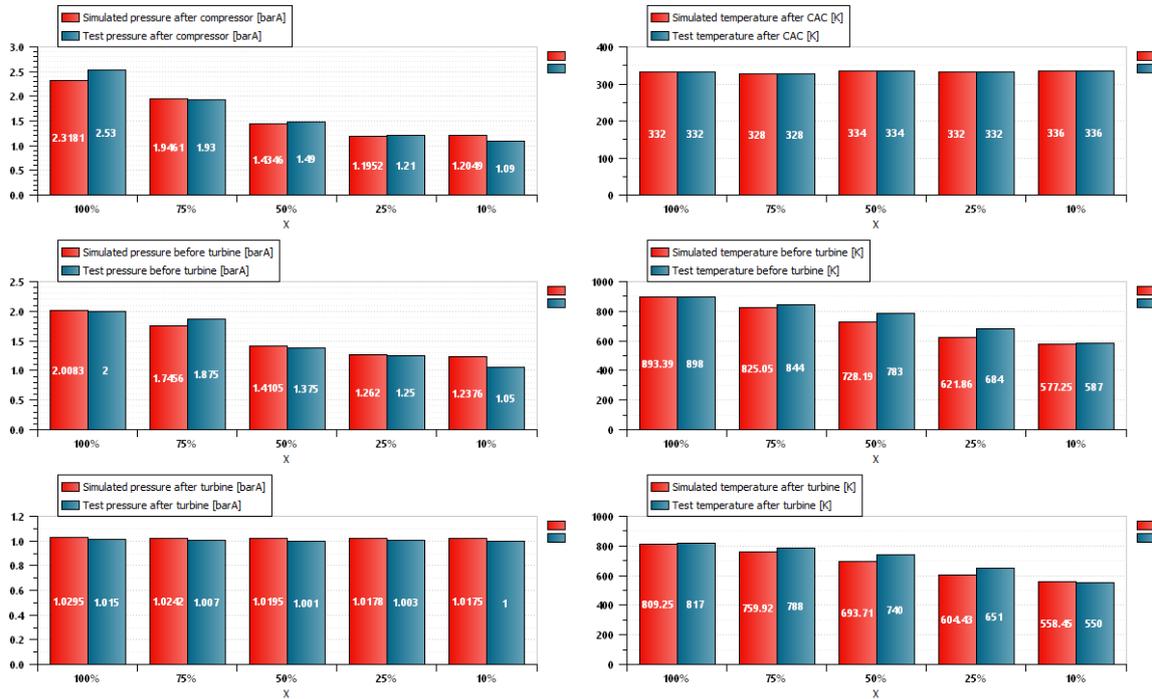


Figura 6.38. Valores simulados vs experimentales. Calibración. Presiones y temperaturas. Modelo 'Chmela'.

En la Figura 6.39 se representan otros gráficos de barras en los que se comparan consumos de combustible, gasto de aire, presiones medias indicadas y par efectivo.

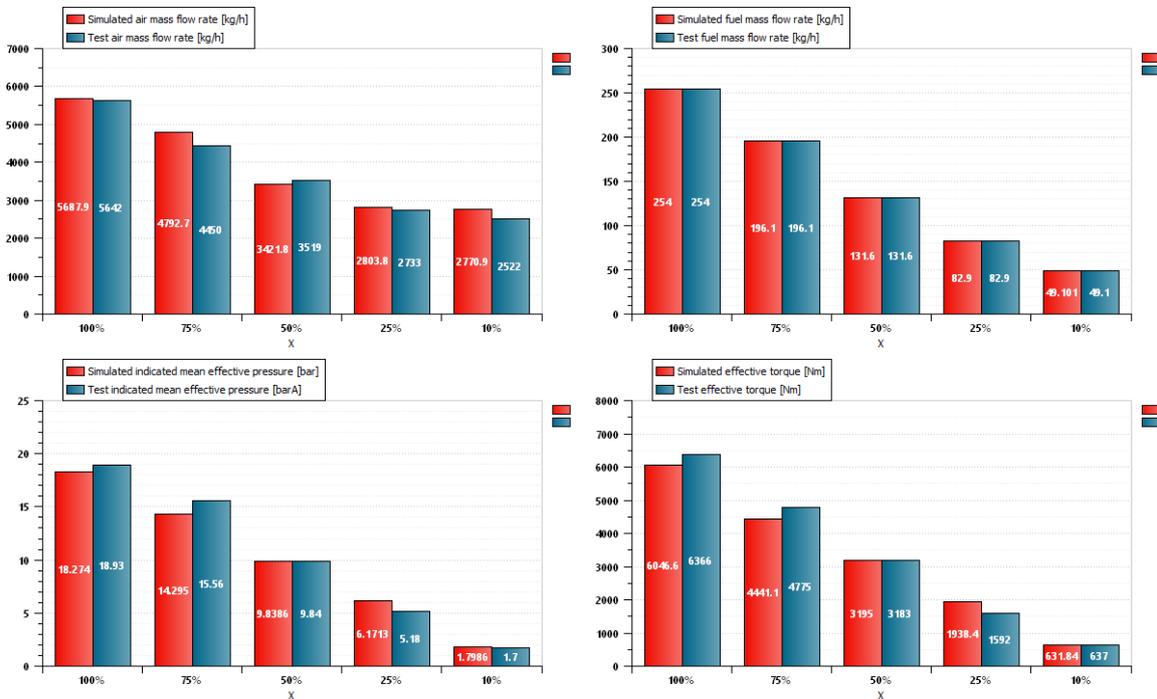


Figura 6.39. Valores simulados vs experimentales. Calibración. Gastos, PMI y par efectivo. Modelo 'Chmela'.

Todos estos valores se reflejan en tablas donde se recogen también los errores relativos.

100% de carga	Valor simulado	Valor experimental	Error relativo (%)
Presión después del compresor (bar)	2,32	2,53	8,38
Presión antes de la turbina (bar)	2,01	2,00	0,42
Presión después de la turbina (bar)	1,03	1,02	1,43
Temperatura después del CAC (K)	332,00	332,00	0,00
Temperatura antes de la turbina (K)	893,39	898,00	0,51
Temperatura después de la turbina (K)	809,25	817,00	0,95
Gasto másico de aire (kg/h)	5687,91	5642,00	0,81
Presión media indicada (bar)	18,27	18,93	3,46
Par efectivo (Nm)	6046,64	6366,00	5,02

Tabla 6.3. Valores simulados vs experimentales. Carga del 100%. Modelo 'Chmela'.

75% de carga	Valor simulado	Valor experimental	Error relativo (%)
Presión después del compresor (bar)	1,95	1,93	0,83
Presión antes de la turbina (bar)	1,75	1,88	6,90
Presión después de la turbina (bar)	1,02	1,01	1,71
Temperatura después del CAC (K)	328,00	328,00	0,00
Temperatura antes de la turbina (K)	825,05	844,00	2,24
Temperatura después de la turbina (K)	759,92	788,00	3,56
Gasto másico de aire (kg/h)	4792,73	4450,00	7,70
Presión media indicada (bar)	14,30	15,56	8,13
Par efectivo (Nm)	4441,07	4775,00	6,99

Tabla 6.4. Valores simulados vs experimentales. Carga del 75%. Modelo 'Chmela'.

50% de carga	Valor simulado	Valor experimental	Error relativo (%)
Presión después del compresor (bar)	1,43	1,49	3,72
Presión antes de la turbina (bar)	1,41	1,38	2,58
Presión después de la turbina (bar)	1,02	1,00	1,85
Temperatura después del CAC (K)	334,00	334,00	0,00
Temperatura antes de la turbina (K)	728,19	783,00	7,00
Temperatura después de la turbina (K)	693,71	740,00	6,25
Gasto másico de aire (kg/h)	3421,83	3519,00	2,76
Presión media indicada (bar)	9,84	9,84	0,01
Par efectivo (Nm)	3194,95	3183,00	0,38

Tabla 6.5. Valores simulados vs experimentales. Carga del 50%. Modelo 'Chmela'.

25% de carga	Valor simulado	Valor experimental	Error relativo (%)
Presión después del compresor (bar)	1,20	1,21	1,22
Presión antes de la turbina (bar)	1,26	1,25	0,96
Presión después de la turbina (bar)	1,02	1,00	1,48
Temperatura después del CAC (K)	332,00	332,00	0,00
Temperatura antes de la turbina (K)	621,86	684,00	9,08
Temperatura después de la turbina (K)	604,43	651,00	7,15
Gasto másico de aire (kg/h)	2803,83	2733,00	2,59
Presión media indicada (bar)	6,17	5,18	19,14
Par efectivo (Nm)	1938,37	1592,00	21,76

Tabla 6.6. Valores simulados vs experimentales. Carga del 25%. Modelo 'Chmela'.

10% de carga	Valor simulado	Valor experimental	Error relativo (%)
Presión después del compresor (bar)	1,20	1,09	10,54
Presión antes de la turbina (bar)	1,24	1,05	17,87
Presión después de la turbina (bar)	1,02	1,00	1,75
Temperatura después del CAC (K)	336,00	336,00	0,00
Temperatura antes de la turbina (K)	577,25	587,00	1,66
Temperatura después de la turbina (K)	558,45	550,00	1,54
Gasto másico de aire (kg/h)	2770,85	2522,00	9,87
Presión media indicada (bar)	1,80	1,70	5,80
Par efectivo (Nm)	631,84	637,00	0,81

Tabla 6.7. Valores simulados vs experimentales. Carga del 10%. Modelo 'Chmela'.

En general se puede observar que los valores obtenidos en las simulaciones se aproximan mucho a los experimentales, pues los errores no son excesivamente altos. No obstante, en los dos estados de carga menores aparecen errores ligeramente superiores, lo cual es lógico porque estos motores no están hechos para trabajar a baja carga y, por tanto, su comportamiento en estas cargas bajas no es tan bueno. Debido a esto las medidas no son tan fiables como las de puntos de operación más cercanos al cien por cien.

En el anexo final se muestran las gráficas de errores relativos.

Modelo físico utilizando el cilindro 'BMF'

A continuación, se muestran los diagramas comparativos de la misma forma que se ha hecho hasta ahora para el modelo que utiliza la cámara de combustión 'BMF'.

En la Figura 6.40 se tienen unos gráficos de barras que comparan las temperaturas y presiones simuladas y experimentales en determinados puntos del motor.

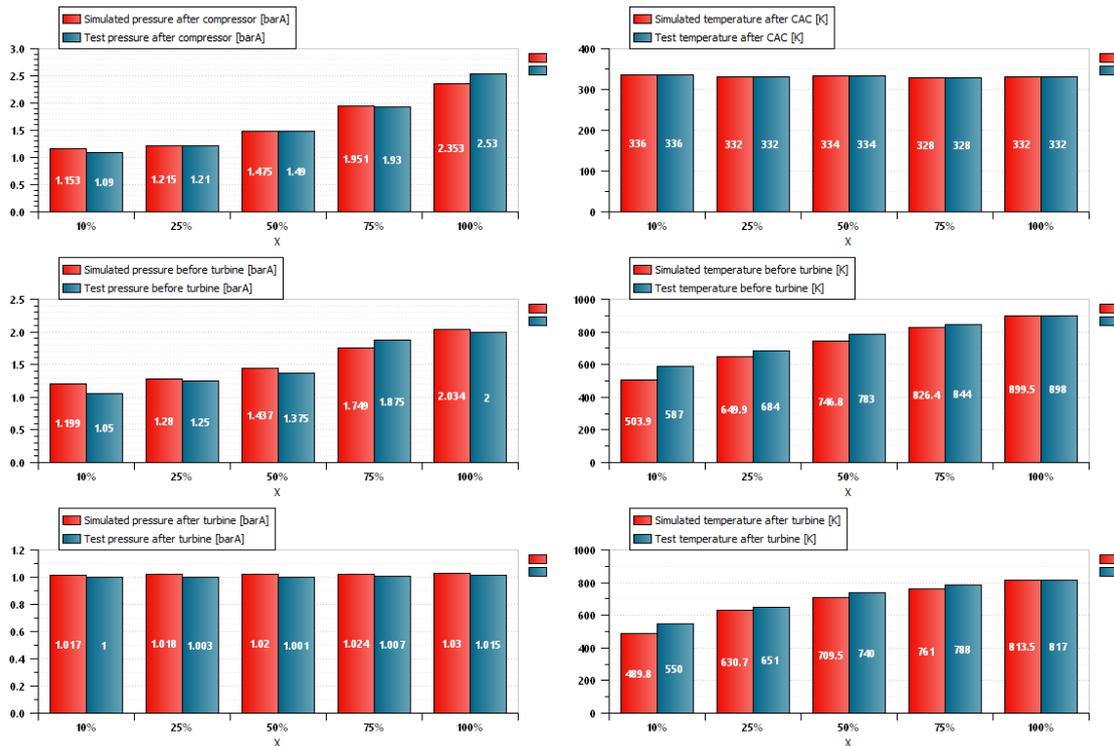


Figura 6.40. Valores simulados vs experimentales. Calibración. Presiones y temperaturas. Modelo 'BMF'.

En la Figura 6.41 se representan otros gráficos de barras en los que se comparan consumos de combustible, gasto de aire, presiones medias indicadas y par efectivo.

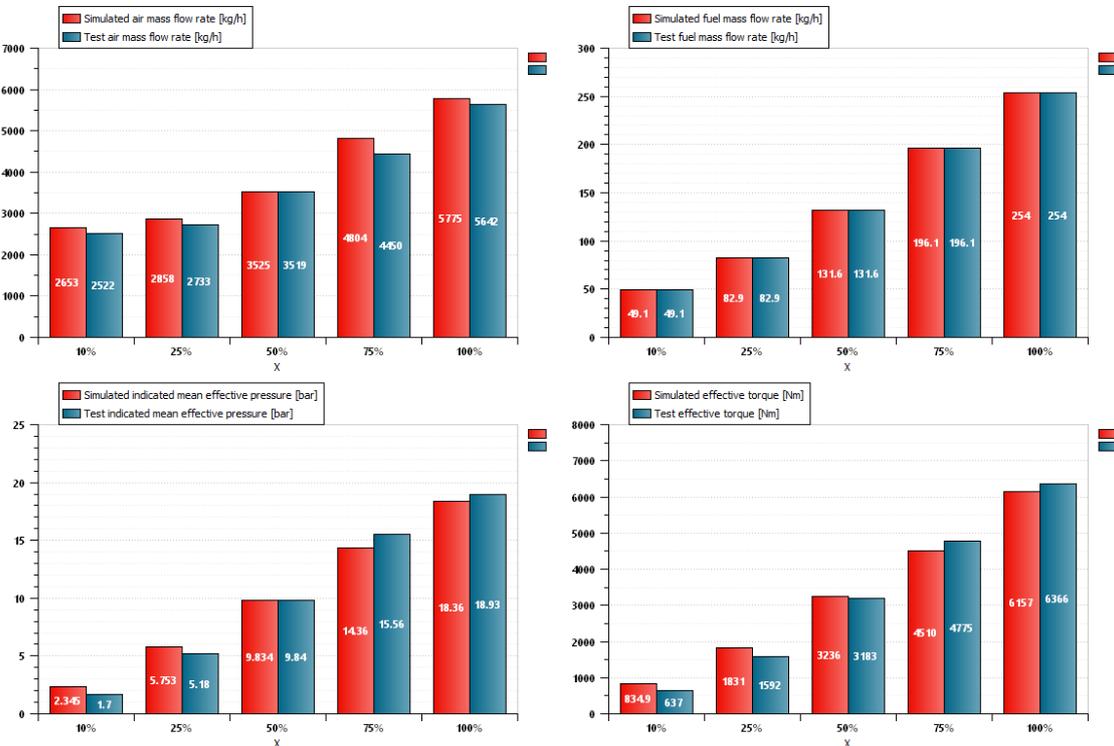


Figura 6.41. Valores simulados vs experimentales. Calibración. Gastos, PMI y par efectivo. Modelo 'BMF'.

Todos estos valores se reflejan en tablas donde se recogen también los errores relativos.

100% de carga	Valor simulado	Valor experimental	Error relativo (%)
Presión después del compresor (bar)	2,35	2,53	6,98
Presión antes de la turbina (bar)	2,03	2	1,68
Presión después de la turbina (bar)	1,03	1,015	1,49
Temperatura después del CAC (K)	332,00	332	0,00
Temperatura antes de la turbina (K)	899,47	898	0,16
Temperatura después de la turbina (K)	813,49	817	0,43
Gasto másico de aire (kg/h)	5775,47	5642	2,37
Presión media indicada (bar)	18,36	18,93	2,99
Par efectivo (Nm)	6156,83	6366	3,29

Tabla 6.8. Valores simulados vs experimentales. Carga del 100%. Modelo 'BMF'.

75% de carga	Valor simulado	Valor experimental	Error relativo (%)
Presión después del compresor (bar)	1,95	1,93	1,09
Presión antes de la turbina (bar)	1,75	1,88	6,72
Presión después de la turbina (bar)	1,02	1,01	1,71
Temperatura después del CAC (K)	328,00	328,00	0,00
Temperatura antes de la turbina (K)	826,44	844,00	2,08
Temperatura después de la turbina (K)	761,03	788,00	3,42
Gasto másico de aire (kg/h)	4803,94	4450,00	7,95
Presión media indicada (bar)	14,36	15,56	7,71
Par efectivo (Nm)	4510,44	4775,00	5,54

Tabla 6.9. Valores simulados vs experimentales. Carga del 75%. Modelo 'BMF'.

50% de carga	Valor simulado	Valor experimental	Error relativo (%)
Presión después del compresor (bar)	1,47	1,49	1,03
Presión antes de la turbina (bar)	1,44	1,38	4,54
Presión después de la turbina (bar)	1,02	1,00	1,88
Temperatura después del CAC (K)	334,00	334,00	0,00
Temperatura antes de la turbina (K)	746,82	783,00	4,62
Temperatura después de la turbina (K)	709,52	740,00	4,12
Gasto másico de aire (kg/h)	3525,14	3519,00	0,17
Presión media indicada (bar)	9,83	9,84	0,06
Par efectivo (Nm)	3236,21	3183,00	1,67

Tabla 6.10. Valores simulados vs experimentales. Carga del 50%. Modelo 'BMF'.

25% de carga	Valor simulado	Valor experimental	Error relativo (%)
Presión después del compresor (bar)	1,22	1,21	0,43
Presión antes de la turbina (bar)	1,28	1,25	2,36
Presión después de la turbina (bar)	1,02	1,00	1,50
Temperatura después del CAC (K)	332,00	332,00	0,00
Temperatura antes de la turbina (K)	649,87	684,00	4,99
Temperatura después de la turbina (K)	630,74	651,00	3,11
Gasto másico de aire (kg/h)	2857,76	2733,00	4,56
Presión media indicada (bar)	5,75	5,18	11,07
Par efectivo (Nm)	1830,91	1592,00	15,01

Tabla 6.11. Valores simulados vs experimentales. Carga del 25%. Modelo 'BMF'.

10% de carga	Valor simulado	Valor experimental	Error relativo (%)
Presión después del compresor (bar)	1,15	1,09	5,79
Presión antes de la turbina (bar)	1,20	1,05	14,16
Presión después de la turbina (bar)	1,02	1,00	1,70
Temperatura después del CAC (K)	336,00	336,00	0,00
Temperatura antes de la turbina (K)	503,93	587,00	14,15
Temperatura después de la turbina (K)	489,78	550,00	10,95
Gasto másico de aire (kg/h)	2653,45	2522,00	5,21
Presión media indicada (bar)	2,35	1,70	37,97
Par efectivo (Nm)	834,93	637,00	31,07

Tabla 6.12. Valores simulados vs experimentales. Carga del 10%. Modelo 'BMF'.

Se observa que en general los valores se aproximan muy bien a los puntos de calibrado. En los casos de 10 y 25% los errores se han incrementado, siendo los del 10% muy grandes. Esto es debido a lo que se mencionó cuando se representó la Figura 6.33. Se dijo que se vería algún valor anómalo y puede verse que así ha sido. Entra dentro de lo normal si se tiene en cuenta el mal rendimiento que tiene un motor de estas características a tan baja carga.

6.4. Validación del modelo

En esta sección se va a mostrar el proceso de validación del modelo predictivo que se ha visto en este capítulo ("Chmela"). Para ello se simula el modelo en nuevos puntos de carga, diferentes de los de calibración. Se trata del mismo procedimiento que se comentó en el capítulo anterior. Como ya se comentó en dicho capítulo, no se cuenta con datos reales para estos nuevos puntos de carga. Sin embargo, como los valores reales que se tienen abarcan todo el espectro de funcionamiento del motor, es posible interpolar para poder así obtener los valores de los puntos de carga elegidos. Estos nuevos puntos de carga donde se va a realizar la validación son: 10-110% en saltos de 10%. De nuevo, el valor teórico de la presión media efectiva sí que se tiene y por tanto también se usará para validar el modelo. Las gráficas serán del mismo tipo que las que se usaron para validar los modelos de valores medios.

En la Figura 6.42 siguiente se muestra una comparativa entre los valores simulados y experimentales de la presión media efectiva.

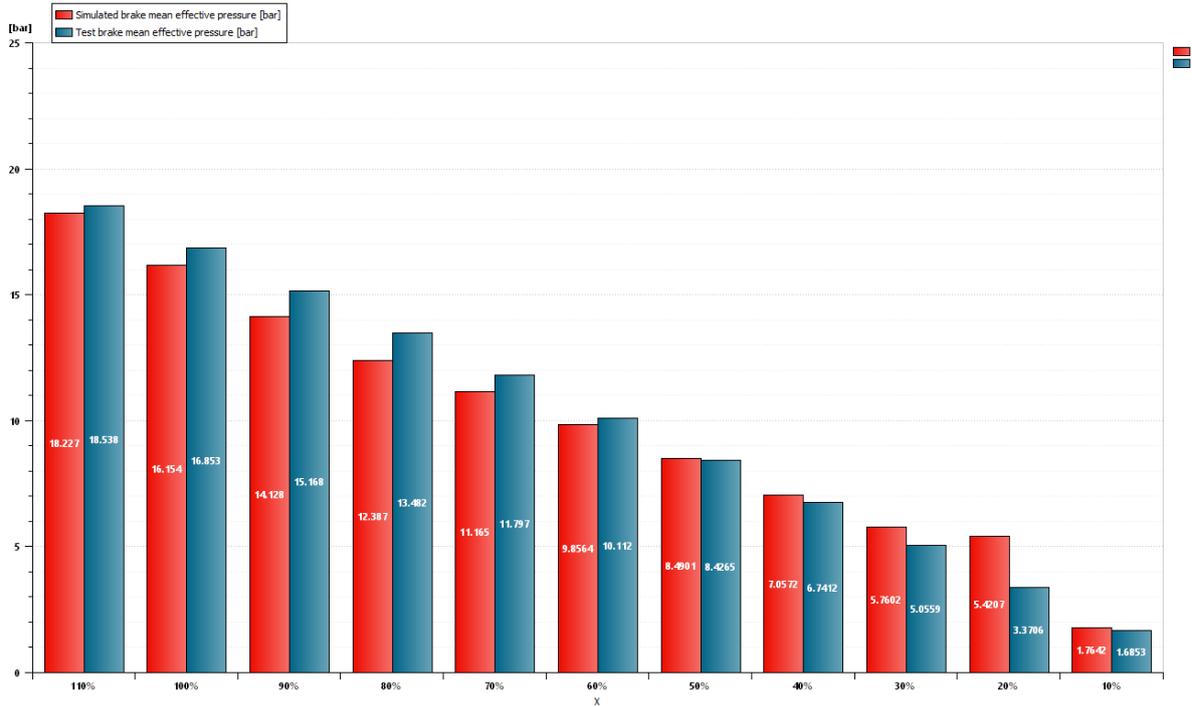


Figura 6.42. Presión media efectiva simulada vs teórica. Validación. Modelo 'Chmela'.

Las Figura 6.43 y Figura 6.44 siguientes muestran una comparación de las presiones y temperaturas respectivamente.

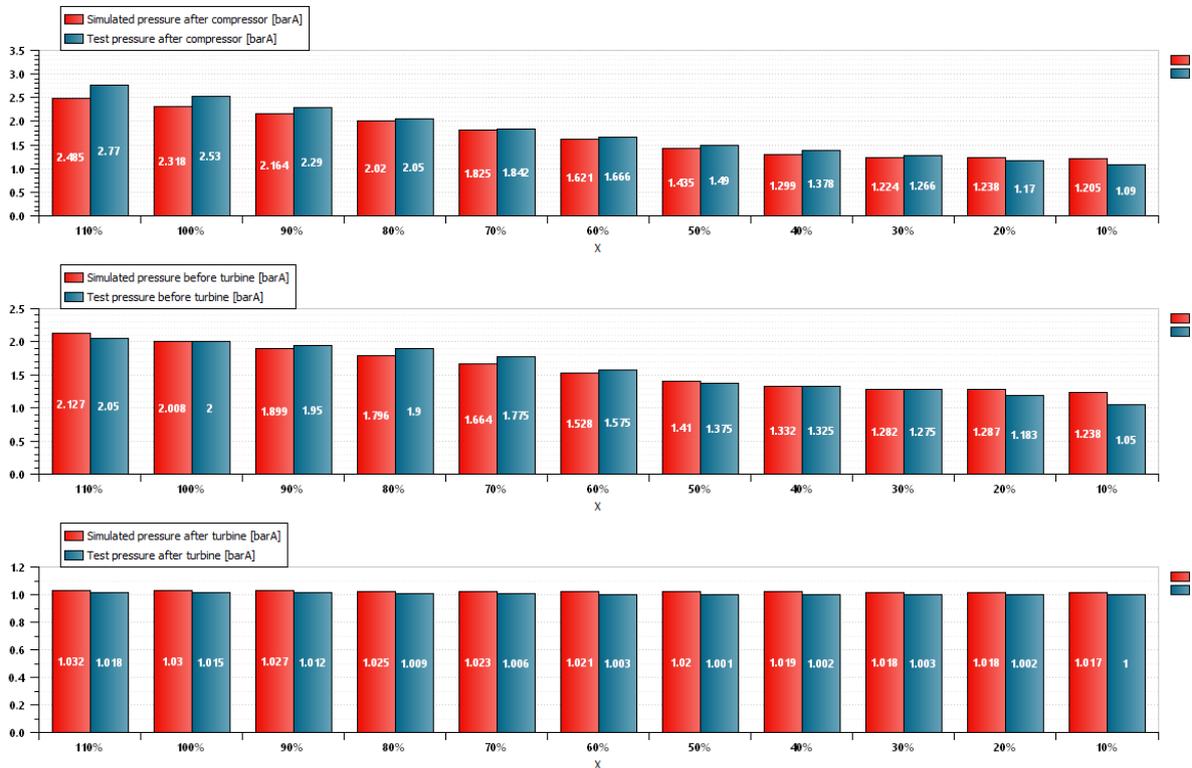


Figura 6.43. Valores simulados vs experimentales. Validación. Presiones. Modelo 'Chmela'.

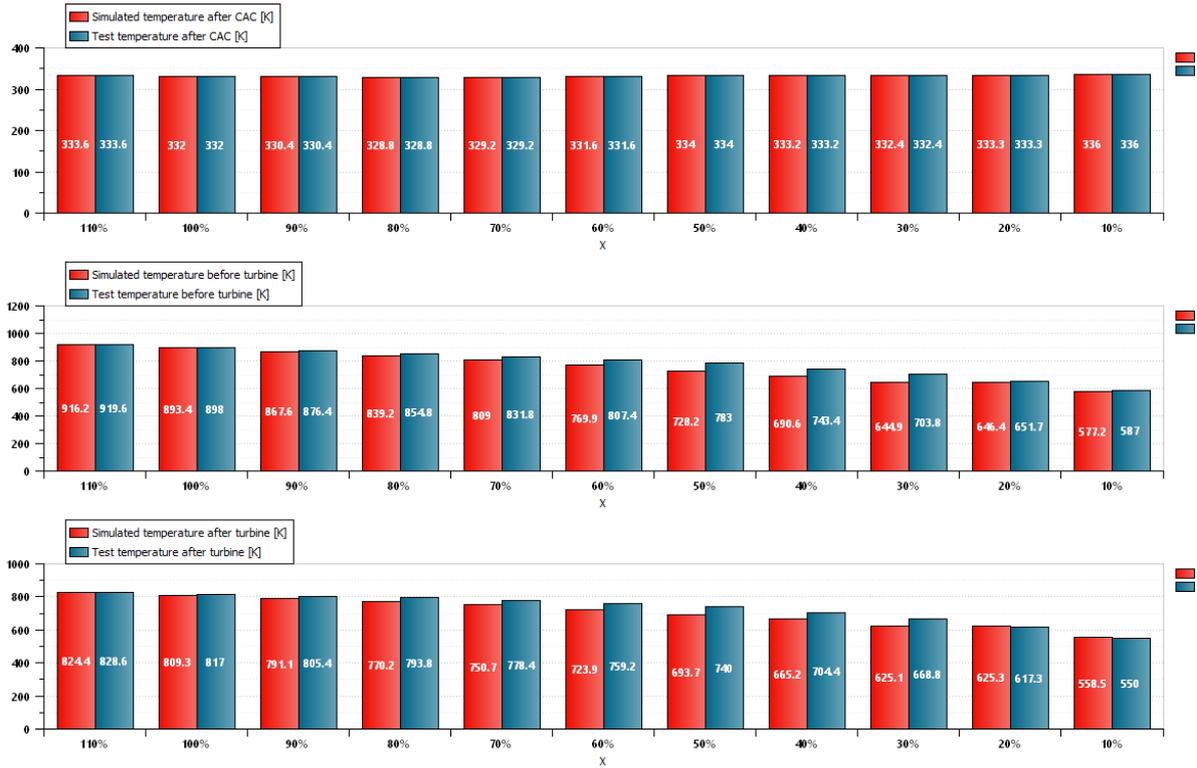


Figura 6.44. Valores simulados vs experimentales. Validación. Temperaturas. Modelo 'Chmela'.

Por último, en las Figura 6.45 y Figura 6.46 siguientes se muestran los valores de presión media indicada, par efectivo, y gastos máxicos de aire y combustible.

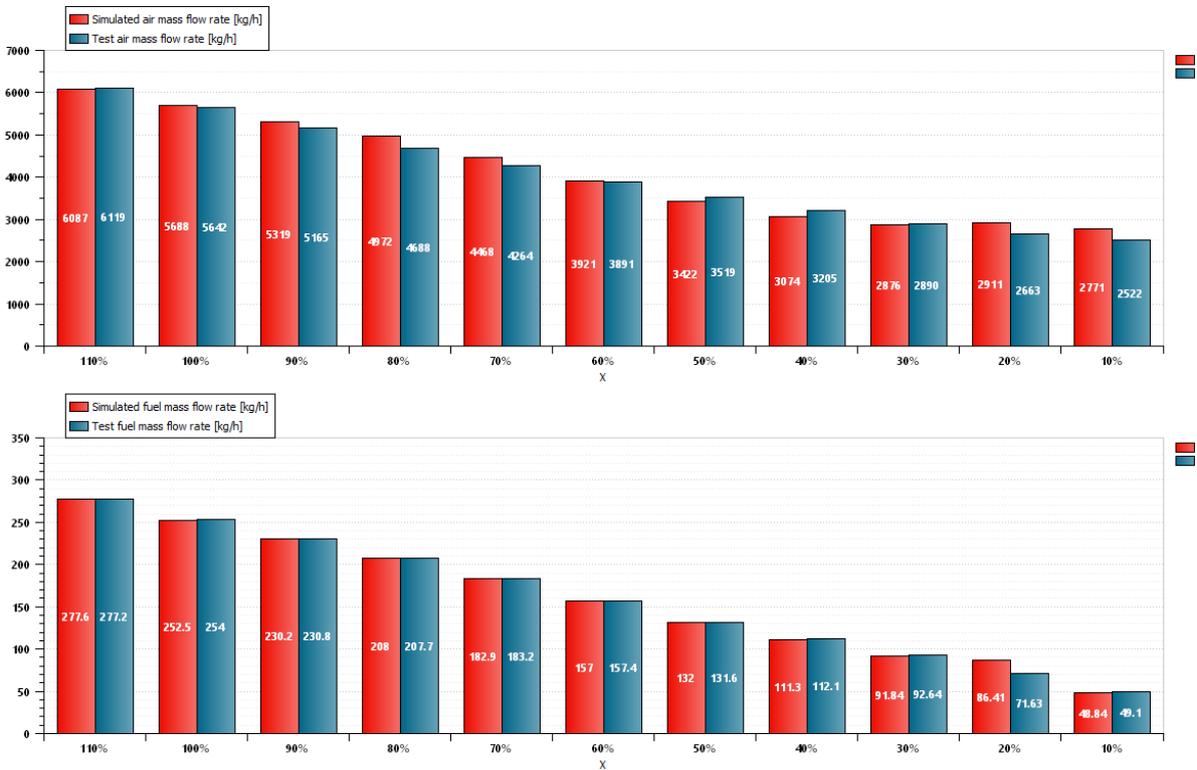


Figura 6.45. Valores simulados vs experimentales. Validación. Gastos máxicos. Modelo 'Chmela'.

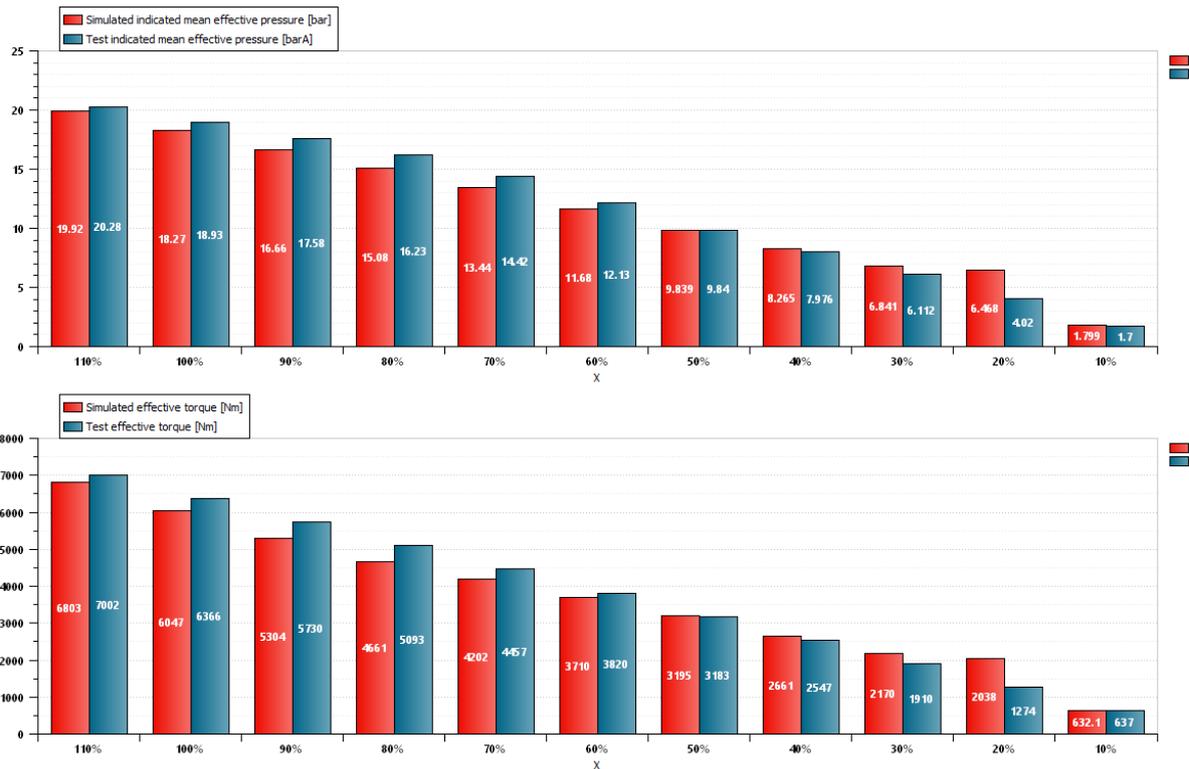


Figura 6.46. Valores simulados vs experimentales. Validación. PMI y par efectivo. Modelo 'Chmela'.

Observando las gráficas se puede afirmar que el modelo es bastante bueno y que tiene capacidad para predecir el comportamiento de motor. Los errores son ligeramente superiores a los que se tenían en el modelo de valores medios, pero se trata de algo esperable, pues es un modelo con mayor complejidad. No obstante, los errores no son excesivos, pues es posible apreciar que las barras están prácticamente todas al mismo nivel. Existen unos valores que se alejan más que el resto. Es el caso de los valores de presión media indicada, consumo de combustible y par efectivo en el punto de carga del 20%. Todos ellos están íntimamente relacionados. Este ligero aumento del error puede ser debido a un error en la medida de duración de inyección en el punto de carga del 10%. Como ya se ha comentado anteriormente, este tipo de motores de generación no están hechos para trabajar a pequeñas cargas y, por tanto, es posible que a la hora de medir en estos puntos de operación cueste bastante más obtener un valor constante. Sin embargo, quitando ese valor puntual, el resto de los valores obtenidos son buenos.

Como se trata de muchos casos, las tablas de resultados y errores, así como las gráficas de estos, se pueden encontrar en el anexo al final de este trabajo. De esta forma se evita saturar el capítulo con las tablas.

6.5. Conclusiones del capítulo 6

En este capítulo se ha mostrado al lector el procedimiento a seguir para crear un modelo más físico de un motor, que recoja el comportamiento interno de los cilindros y evitando tener que utilizar un componente de 'caja negra'. Es decir, se ha incrementado el nivel de detalle del subsistema donde tiene lugar la combustión, que son los cilindros. Para mostrar al lector que existen distintos tipos de modelos, se ha decidido realizar dos modelos con una finalidad bastante diferente. El primer modelo, 'Chmela', es un modelo predictivo capaz de calibrarse en puntos concretos y predecir el comportamiento del motor en otros. Sin embargo, el segundo modelo realizado, 'BMF', es un modelo que no tiene la capacidad de predicción, pues se

calibra para unos puntos concretos de operación y no se puede simular en otros distintos. Otra diferencia entre el primer modelo y el segundo es que en el segundo se ha utilizado una herramienta propia de Amesim para terminar de calibrar el modelo.

El proceso mostrado, igual que en el capítulo anterior, ha sido el siguiente:

- Modelado de la admisión y el escape, configurando los diferentes elementos que lo componen, destacando en este motor el turbocompresor.
- Modelado de la combustión del motor, incluyendo los doce cilindros que tiene el motor, aportando su información geométrica.
- Modelado de la inyección de forma básica, aportando la cantidad en ambos modelos según una ley trapezoidal.
- Modelado del eje motor, introduciendo las pérdidas por fricción reales.

Una vez se han acoplado los diferentes subsistemas y se han configurado adecuadamente, se ha procedido a calibrar el modelo para aproximar los valores simulados a los experimentales de los cinco puntos de carga medidos en banco (10, 25, 50, 75 y 100%). Para ello se han tocado la constante de efecto de pulso de la turbina, el coeficiente de flujo de la válvula del escape y la ganancia en la transmisión de calor del colector de escape.

Por último, se ha validado el modelo 'Chmela' con puntos de carga que van en saltos de diez, llegando incluso a sobrecargar el motor hasta el 110%.

Viendo las gráficas mostradas y los errores que se tienen se puede confirmar que el modelo 'Chmela' es válido para predecir el comportamiento del motor. El modelo 'BMF', quitando los errores elevados del punto de carga del 10%, es también un modelo que simula bastante bien el motor en los puntos concretos del 10, 25, 50, 75 y 100%.

Capítulo 7. Comparación entre modelos.

7.1. Introducción

Este capítulo tiene por objetivos comparar ambos tipos de modelo creados, presentando las ventajas e inconvenientes de ambos, desde el punto de vista del autor. Esta comparación está basada en aspectos tales como el coste computacional, el nivel de aproximación de los valores simulados, la propia dificultad de implementación de cada tipo de modelo y la información que es posible obtener de cada uno, entre otros.

7.2. Comparativa de los modelos

En los capítulos cinco y seis se ha podido observar un modelo de valores medios y otro más físico, respectivamente. Se ha podido seguir el procedimiento de inicio a fin, incluyendo el calibrado de ambos modelos con cinco puntos de operación y su validación con otros distintos. De forma que ambos modelos puedan compararse de la manera más justa posible, el procedimiento en ambos ha sido el mismo y lo único distinto ha sido la utilización de componentes según sea un modelo de valores medios o uno más físico-fenomenológico. En el capítulo seis, además de presentar el modelo predictivo, se ha incluido un modelo con una cámara de combustión diferente que ha dado lugar a un modelo no predictivo.

Tanto para los modelos de valores medios del capítulo cinco como para los más físicos del capítulo seis, los valores obtenidos mediante simulación se aproximan bastante a los experimentales. Sin embargo, el enfoque y la manera de proceder en la creación del modelo en ambos capítulos es distinto. Ello muestra que es posible enfocar los modelos de diferentes formas y aun así obtener resultados muy buenos. El enfoque dependerá del tipo de información que se quiera obtener y del tiempo del que se dispone para ello. A continuación, se reflejan las diferencias entre ambos enfoques.

7.2.1. Implementación de los modelos

Uno de los aspectos más importantes a la hora de enfrentarse al modelado de un sistema es tener claro qué dificultad se tendrá a la hora de introducir los detalles que reflejen fielmente la realidad de dicho sistema. Es obvio que un modelo de valores medios no va a exigir el mismo nivel de detalle en la introducción de datos que uno más físico-fenomenológico donde se recoge una serie de información que proporciona más detalle. En general, puede decirse que un modelo de valores medios se genera en menos tiempo, pues hay una serie de información que no se necesita.

En la Tabla 7.1 siguiente se resumen los datos que hay que aportar al modelo según el tipo.

Modelo	Combustible	Curvas de turbocompresor	Geometría del motor	Levantamiento de válvulas
Valores medios	Sí	Sí	Básica	No
Físico-fenomenológico	Sí	Sí	Más detallada	Sí

Tabla 7.1. Información exigida según el tipo de modelo.

De la tabla anterior se pueden extraer las siguientes conclusiones. Es obvio que ambos modelos necesitan la información del combustible, es decir, qué tipo de combustible es y qué valor de poder calorífico tiene. Eso no cambia de un modelo a otro. Lo mismo sucede con las curvas del turbocompresor, en caso de disponer de él en el motor. En ambos modelos el nivel

de detalle de la turbo-sobrealimentación es el mismo. Como ya se vio anteriormente, se piden las curvas tanto del compresor como de la turbina, y sus ecuaciones de corrección de las variables que las definen. El cambio más importante de un modelo a otro viene a la hora de definir los cilindros y el proceso de combustión, así como el levantamiento de válvulas que está muy relacionado con ello. En el modelo de valores medios el detalle de la geometría que se pide es pequeño, pues tan solo se piden las dimensiones del pistón y la carrera que realiza. Sin embargo, en el otro modelo más detallado ya se pide la introducción del orden de encendido del cilindro y las áreas de transferencia de calor en ellos, así como el método elegido (Woschni en este caso). Además, se entra un poco más en el detalle constructivo de los cilindros. Por ejemplo, se ha de decir si las bielas comparten muñón dos a dos o si son independientes, y si el motor es en línea o en V, por ejemplo. Para el levantamiento de válvulas se piden las curvas para las válvulas de admisión y escape según el ángulo del cigüeñal, así como los coeficientes de pérdidas en función de la apertura y la geometría de estas.

Se puede comprobar pues que el modelo físico-fenomenológico necesita de información extra además de los datos introducidos en el de valores medios. Esto se debe a que se prescinde de la “caja negra” que se tiene en valores medios para introducir los cilindros de forma más realista. Es por esto por lo que la preparación previa para poder realizar un modelo de este detalle es ligeramente mayor. Traducido en tiempo, es normal que el modelo físico-fenomenológico lleve más tiempo que el de valores medios. Sin embargo, la diferencia tampoco es tan grande y si se dispone del tiempo puede ser preferible realizar este tipo de modelados.

7.2.2. Coste computacional

En ingeniería como en tantos otros ámbitos, el tiempo es un factor clave. Para una empresa la diferencia entre un minuto o dos puede suponer una gran cantidad de dinero. Por eso, cuando se simulan modelos, ya sea de elementos finitos, de mecánica de fluidos computacional (CFD) o cualquier otro tipo, el tiempo de computación adquiere una gran importancia. El objetivo siempre es obtener la máxima información posible en el menor tiempo que se pueda. El coste computacional es un parámetro que, si bien depende en gran medida del sistema y de los cálculos exigidos, puede variar drásticamente según el ordenador en el cual se hagan los cálculos. Cuanto mayor capacidad de cálculo y procesamiento tenga el ordenador, menor será el coste computacional. Además, a la hora de modelar, si se introducen de forma adecuada las condiciones iniciales que permitan ayudar al modelo a converger antes, se estará disminuyendo de forma considerable este coste.

Centrando esta explicación en los dos tipos de modelado vistos en este trabajo, se pueden observar diferencias claras entre ambos. Aunque dependiendo de la carga se ha observado que el coste computacional varía ligeramente, siempre se mantienen en el mismo orden de magnitud en cada tipo de modelado. Existe una diferencia clara en el coste computacional del modelo de valores medios y del modelo físico-fenomenológico. Mientras en el primero la simulación de cien segundos lleva apenas unos cinco segundos reales, en el segundo la simulación de tres segundos (asegurando así que se dan el número de ciclos adecuado para poder llegar al régimen permanente) tarda una media de diez minutos. Es decir, el coste computacional del segundo tipo de modelo es de aproximadamente cuatro mil veces el del primer modelo extrapolando a un tiempo de cien segundos. Se trata de una diferencia muy sustancial, que en muchas ocasiones puede servir para decantarse por uno u otro. En este caso el tiempo tampoco es excesivo, pero sí que es grande. Al ser un trabajo académico, el coste computacional no tiene tanta importancia como podría tenerlo en un trabajo de ámbito profesional.

Por todo ello, se puede ver que la ventaja más clara que tiene un modelo de valores medios es la capacidad de proporcionar resultados bastante buenos en tiempos muy pequeños.

7.2.3. Nivel de aproximación de los valores simulados

Los resultados obtenidos en ambos modelos son bastante buenos y se aproximan bastante a los valores experimentales. Además, como ha podido comprobarse, ambos modelos predicen correctamente las nuevas condiciones del motor en puntos de carga diferentes de los de calibración.

Realizando una comparación de los errores que se obtienen para ambos modelos se puede observar que el orden de magnitud de estos es muy parecido. Si bien se aprecia que los modelos de valores medios se aproximan ligeramente mejor a los valores reales en ciertos parámetros, pues los errores son un poco más pequeños. Esto es un punto a favor de estos modelos, sin embargo, como ya se ha comentado, de ellos no puede obtenerse información de lo que está sucediendo internamente en los cilindros y tampoco se pueden observar las fluctuaciones reales que suceden a lo largo del tiempo. No obstante, dependiendo del parámetro y de la carga del motor, algunos errores en el modelo físico-fenomenológico son menores, por lo que en general tampoco podría decirse que ninguno proporcione mejores resultados que el otro.

7.2.4. Información que es posible obtener del modelo según el tipo

La razón principal por la que se decide realizar un modelo y no otro se debe en muchas ocasiones a la información que se necesita simular. Si se considera que solamente es necesario tener una cierta idea de los valores que se van a dar en determinadas circunstancias, sin tener la necesidad de conocer el comportamiento interno del sistema, puede que se opte por un modelo de valores medios. Sin embargo, si además de lo anterior se desea conocer cómo se comporta internamente, es posible que sea necesario elegir un modelo más físico que recoja la fenomenología interna de los cilindros. Por supuesto también se deben tener en cuenta lo que se ha mencionado en los subapartados anteriores acerca del coste computacional o la dificultad de implementación debido a los datos necesarios.

Como ya se mencionó en el capítulo seis, la gran diferencia del modelo visto en este capítulo (el modelo físico-fenomenológico) radica en la cámara de combustión. En dicho modelo se representan los cilindros completos y la combustión se aproxima más a la realidad, obteniéndose además valores pulsantes y no medios. Como ejemplo de información que se puede obtener en este segundo modelo y que no puede obtenerse del primero, en la Figura 7.1 siguiente se representa una curva de presión cilindro en uno de los doce cilindros del motor para el estado de carga del cien por cien.

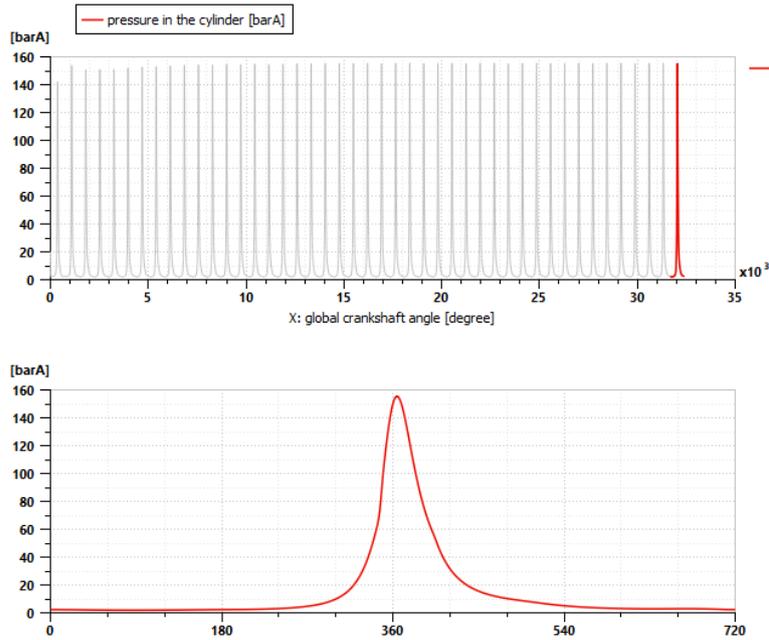


Figura 7.1. Diagrama presión-cilindro para el estado de carga del 100%.

De esta gráfica se puede obtener la presión máxima que se alcanza en los cilindros y se puede ver en qué momento empieza la combustión, pues se observa el cambio de curvatura. Este tipo de gráficos aporta información adicional que un modelo de valores medios no puede proporcionar. Por tanto, esta información que es capaz de proporcionar el modelo físico-fenomenológico es una ventaja clara respecto del modelo de valores medios. En la Figura 7.2 se presenta también el diagrama presión-volumen para el caso del cien por cien, siendo este diagrama bastante típico.

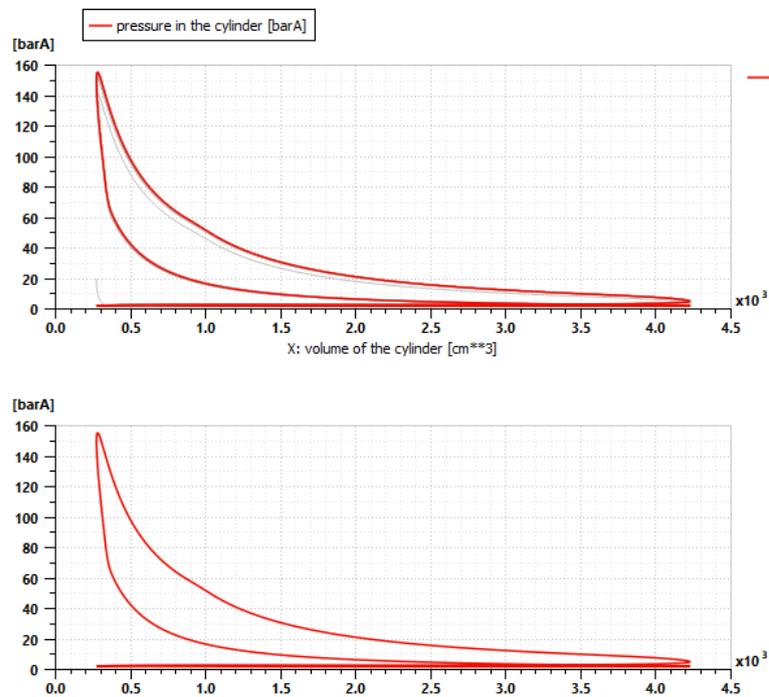


Figura 7.2. Diagrama presión-volumen para el estado de carga del 100%.

Además, como ya se ha comentado, en el modelo de valores medios no es posible observar el comportamiento real de cualquiera de las variables puesto que los valores están promediados en cada ciclo. Debido a esto existe cierta información útil que se pierde cuando se decide hacer un modelo de este tipo. Sin embargo, ello no implica que sean peores los modelos de valores medios, pues como bien se ha comentado en otros capítulos, la clave está en utilizar varios tipos de modelado de forma conjunta para así poder aprovechar las ventajas que presenta cada uno de ellos.

7.3. Conclusiones del capítulo 7

El objetivo de este capítulo ha sido comparar los dos tipos de modelado que se recogen en este trabajo. Para ello se han comparado en base a la dificultad de implementación, en el coste computacional, en el nivel de aproximación alcanzado y en la información que se puede obtener de cada uno.

Aunque ya se ha comentado, es importante recalcar que ambos tipos de modelos han de coexistir y que ninguno es mejor que el otro, pues ambos se complementan a la hora de proporcionar información al usuario.

Como resumen de la comparación hecha se puede decir lo siguiente:

- La implementación del modelo de valores medios es más sencilla, tardándose menos tiempo en montarlo y simular.
- El coste computacional del modelo de valores medios es bastante inferior al del modelo físico-fenomenológico, siendo capaz de simular cien segundos en poco menos de diez segundos reales.
- Aunque en ambos modelos los errores son bajos, es decir, los valores simulados se acercan bastante a los reales, el modelo de valores medios consigue acercarse ligeramente mejor en ciertos parámetros. Sin embargo, el modelo físico-fenomenológico se aproxima mejor en otros parámetros. La conclusión es que ambos proporcionan buenos resultados y no podría destacarse uno por encima del otro.
- El modelo físico-fenomenológico permite obtener información detallada del proceso interno de los cilindros, lo cual es una gran ventaja.

Capítulo 8. Conclusiones del trabajo.

8.1. Conclusiones

En el desarrollo de este Trabajo Fin de Máster se han conseguido los objetivos propuestos. Se han conseguido realizar un modelo de valores medios y otro físico-fenomenológico de un motor generador que, como ha podido comprobarse, funcionan bastante bien y son capaces de simular el comportamiento del motor en diferentes puntos de operación, incluyendo puntos en los que normalmente no va a trabajar nunca un motor de este tipo. Además, todo el proceso se ha descrito de la manera más clara posible, explicando parte por parte los diferentes subsistemas del motor y la forma de modelarlos y configurarlos en Simcenter Amesim. Esto permite cumplir con otro de los objetivos, que es recoger todo lo aprendido sobre el modelado de motores en Amesim para que cualquier usuario poco experimentado pueda comprender lo que se está realizando y de esta manera pueda conseguir modelar un motor si así lo desea. Para profundizar aún más en Amesim, en los anexos se recoge más información del programa para aprender a realizar algunas cosas más.

A continuación, se recogen las principales dificultades encontradas durante la realización de este trabajo, los puntos que se consideran críticos y los pasos futuros que permitirían continuar con el aprendizaje del modelado de motores, que no acaba con lo visto en este capítulo. Además, se explica cómo podría modelarse un motor diferente a partir de este modelo, cambiando los parámetros que definen el motor utilizado en este trabajo por los nuevos parámetros.

8.2. Modelado de otro motor distinto a partir de los modelos creados

En este trabajo, como ya se ha visto, se ha modelado un motor diésel industrial concreto de dos formas diferentes. Si en un momento dado se quisiera modelar un motor diferente, los modelos creados serían de gran utilidad, pues el esquema podría reutilizarse variando ligeramente algunos componentes en caso de tener más o menos cilindros o incluso turbocompresores. El usuario solamente tendría que introducir los nuevos parámetros que le permitirían generar un nuevo modelo de su motor. Los parámetros son los siguientes:

- Curvas de los turbocompresores, en caso de que el nuevo motor esté sobrealimentado.
- Propiedades del combustible.
- Geometría y número de cilindros.
- Tipología de cilindros.
- Volúmenes de los colectores.
- Parámetros de la combustión (comienzo de la inyección, duración de esta, apertura y cierre de válvulas...).
- Velocidad de giro del motor.
- Temperaturas y presiones de consigna o consideradas como condiciones de contorno en este modelo.
- Presión media de pérdidas mecánicas.
- Presión-cilindro.

Introduciendo los parámetros anteriores correspondientes al nuevo motor que se pretenda modelar y calibrando el modelo, el usuario contaría con un nuevo modelo de motor perfectamente funcional y del mismo estilo a los que se han visto en este trabajo. Por tanto, lo que se quiere hacer ver al lector con este trabajo es que, independientemente de que los modelos creados en este se hayan centrado en un caso concreto de motor generador industrial, el procedimiento para crear un modelo de motor es prácticamente el mismo sea

cual sea el tipo de motor. Así pues, cualquier persona que esté leyendo este trabajo y que esté interesada en crear su propio modelo de motor en Amesim puede partir sin ningún problema de estos modelos.

8.3. Dificultades encontradas

La dificultad principal a la hora de realizar este trabajo ha sido el enfrentarse al mundo del modelado de motores. Se trata de un ámbito de la ingeniería que no suele verse en las escuelas debido al poco tiempo disponible. Por tanto, para su realización se ha partido solamente de una base teórica de motores. No obstante, esta base teórica, como ya se sabe, ha sido muy importante porque gracias a ella se logran relacionar los conceptos nuevos que se van viendo mientras se aprende a modelar.

Una vez se supera ese obstáculo inicial de adquirir conocimientos de modelado y del propio programa, aparecen otros obstáculos a lo largo del camino, relacionados con el problema específico que se quiere resolver. Estos problemas aparecen por ejemplo a la hora de modelar los distintos subsistemas que componen el motor. Como ejemplo podría ponerse el sistema de inyección de combustible. Se trata de uno de los subsistemas más importantes del modelado, pues si no se introduce la cantidad de combustible adecuada y en el momento en que se requiere, el resultado final no va a ser el esperado. El modelado de este subsistema llevó varios días, pues en Amesim existen distintos tipos de inyectores que permiten introducir el combustible de distintas formas y había que ver cuál era el más adecuado para este caso que se estaba estudiando. Era evidente que, debido a que no se contaba con un sistema de medida muy detallado en banco de ensayos y no se disponía de un gran número de datos relacionados con la inyección, no debía utilizarse un componente que exigiera tanta información detallada. Por tanto, partiendo de los datos que se conocían (comienzo de la inyección, duración de la inyección y cantidad inyectada), se decidió utilizar un inyector que modelara la inyección mediante un trapecio. El trapecio se definió teniendo en cuenta que su área tenía que ser del mismo valor que la cantidad inyectada, y que la duración del pulso debía ser la que se había obtenido en banco. Así pues, se consiguió obtener una potencia a la salida más cercana a la que debía proporcionar este motor y se pudo observar cómo variaba al ir cambiándose los parámetros del trapecio, lo que aseguraba que el modelado era bastante bueno.

Otra de las dificultades que se encuentra uno a la hora de modelar llega cuando se han introducido todos los componentes del sistema con sus parámetros y llega el momento de calibrar el modelo para ajustar los valores simulados a la realidad. El calibrado se tiene que realizar con una serie de parámetros que a priori no pueden conocerse experimentalmente y han de obtenerse mediante prueba y error viendo cómo las simulaciones se van ajustando a los valores reales. Estos valores pueden ser por ejemplo los coeficientes de efecto de pulso de las turbinas, que ajustan las curvas y el rendimiento de la turbomáquina una vez montada en el motor. También se varían parámetros como los coeficientes de transmisión de calor en las paredes de los colectores de escape. Por tanto, se ha de “jugar” con parámetros de este tipo hasta ajustar los valores simulados, y esto también lleva un tiempo y entraña cierta dificultad.

8.4. Puntos críticos

Teniendo en cuenta las dificultades encontradas a lo largo del desarrollo de este trabajo fin de máster, los puntos críticos que se pueden extraer para la correcta realización del modelo son:

- Conocer bien qué componentes tiene Amesim y estudiarlos para poder discernir entre cuál de ellos será más adecuado.

- Partir de una buena base de datos del motor que se quiere modelar.
- Correcta elección del componente según los datos que han de introducirse y los datos de los que se parte.
- Definir de forma adecuada la inyección de combustible aportando una serie de datos mínimos que permitan conocer las características que definan mínimamente esta.
- Elegir adecuadamente los parámetros de calibrado e ir probando distintos valores, observando qué influencia tiene cada uno de ellos en las variables que se están utilizando para calibrar y validar el modelo.

8.5. Pasos futuros

Una vez completado el trabajo, y habiendo cumplido el objetivo principal, toca pensar qué sería conveniente realizar en un futuro como continuación a todo lo completado hasta ahora. Se ha podido ver que se ha modelado un motor generador y que los resultados obtenidos son bastante buenos. Para ello se han estudiado las diferentes cámaras de combustión con las que cuenta Amesim. De todas estas cámaras, ha habido dos que no se han implementado. Estas son la de Wiebe y la DFM.

La cámara de combustión de Wiebe puede merecer la pena desde el punto de vista académico, pues se trata de una modelización muy típica de la liberación de calor en el estudio de motores de combustión interna alternativa. En el caso de un motor diésel se modela con dos curvas, las cuales se definen con dos parámetros cada una (parámetro de forma y otro relacionado con la completitud de la combustión). Es por esto por lo que conviene implementar esta cámara en un modelo para aprender más sobre su funcionamiento.

La otra cámara de combustión que queda es la DFM (“Dual Flame Model”). Es una cámara parecida a la de “Chmela” con la salvedad de que precisa de mucha más información de banco de la que normalmente se dispone. La información disponible para realizar este trabajo se queda escasa, pues hacen falta muchos más puntos de operación. Esta cámara simula con gran lujo de detalle todo el proceso en el interior del cilindro, distinguiendo entre dos zonas: una de premezcla y otra de gases quemados. Esta cámara pues, es para usuarios más avanzados y cuyos conocimientos de modelado superan los académicos. Por tanto, son el objetivo más importante que se puede alcanzar para modelar los cilindros.

Por último, en este trabajo sólo se ha visto el modelado del proceso de combustión de motores. No obstante, el modelado de motores va mucho más allá, pudiendo modelar todo el sistema de refrigeración, el de lubricación o el de inyección de una forma mucho más detallada. De nuevo, la cantidad de información disponible no es la que se requiere para poder modelar estos subsistemas mencionados. No obstante, este debería ser el siguiente objetivo que podría plantearse para seguir adquiriendo conocimientos en este ámbito.

El modelado es un mundo muy complejo y por tanto muy útil para los ingenieros. Las empresas que se dedican a fabricar motores necesitan necesariamente de personal que tenga conocimientos de modelado, pues resulta conveniente tener todos los motores que se fabrican modelados. El hecho de tener los motores modelados con este tipo de programas permite a los ingenieros de diagnosis predecir fallas futuras, pudiendo resolver estas antes de que sucedan, ahorrando así mucho tiempo y mucho dinero.

Bibliografía.

1. José Hernández Grau, "Apuntes de asignaturas: Tecnología y Gestión Energéticas e Ingeniería Térmica." Universidad Politécnica de Cartagena.
2. Juan Melgarejo Otálora, "Preparación de un modelo termodinámico de un motor generador diesel rápido. Obtención de leyes de liberación de calor e implementación del modelo en AVL boost." PFC Ingeniería Industrial. ETSII UPCT. Curso 2014-15.
3. José Antonio Pagán Rubio, "Sistema de diagnóstico de motor diésel marino basado en modelo termodinámico y de inteligencia artificial.", Universidad Politécnica de Cartagena, 2017.
4. F. Payri, M. Muñoz, "Motores de combustión interna alternativos.", Universidad Politécnica de Valencia y Universidad Politécnica de Madrid, 2011.
5. Siemens Industry Software NV, "Simcenter Amesim 2019.1. Tutorial guide", Siemens, 2019.
6. Siemens Industry Software NV, "Simcenter Amesim 2019.1. IFP Engine Library. User's guide." Siemens, 2019.
7. Siemens Industry Software NV, "Simcenter Amesim 2019.1. IFP Engine Library. Methodology guide." Siemens, 2019.
8. Siemens Industry Software NV, "Simcenter Amesim 2019.1. 1D Mechanical Library. User's guide." Siemens, 2019.
9. Jerald A. Caton, "An introduction to thermodynamic cycle simulations for internal combustion engines." Wiley, 2016.
10. Colin R. Ferguson, Allan T. Kirkpatrick, "Internal combustion engines. Applied thermosciences. Third edition" Wiley, 2016.

Capítulo 9. Anexos

En este anexo se van a recoger los datos de partida necesarios para poder modelar el motor de combustión. Estos datos se obtienen en banco de ensayos y se recogen en una tabla. Por último, se recogerá un pequeño apéndice que permitirá al lector conocer aún más Amesim y ampliará sus conocimientos de dicho programa. Se trata de una pequeña guía.

9.1. Datos requeridos de banco de ensayos

El motor que se ha modelado en este trabajo es un motor generador industrial de combustible diésel y de cuatro tiempos. Se trata pues de un motor utilizado para generar electricidad. Es por ello por lo que el régimen de giro permanece siempre constante en un valor de 1800 rpm. El motor está sobrealimentado mediante un turbocompresor y la inyección de combustible es directa. La potencia nominal es de 1,2 MW.

En cuanto a las propiedades geométricas del motor se tiene:

- El motor cuenta con doce cilindros.
- La cilindrada unitaria es de aproximadamente cuatro litros.
- La disposición de los cilindros es en V, con un ángulo de 90°.
- Los cigüeñales comparten dos a dos el muñón de la biela.
- El diámetro del pistón es de 165 mm.
- La carrera del pistón es de 185 mm.
- La longitud de la biela es de 341 mm.
- La ratio de compresión es de 15,5.
- El colector de admisión tiene un volumen de 16,17 L.
- El colector de escape tiene un volumen de 11,61 L.

A continuación, se reflejan en una tabla los datos de partida. Estos datos corresponden a cinco puntos de carga diferentes: 10%, 25%, 50%, 75% y 100%. Para cada uno de los puntos de carga se obtuvieron los valores de presiones y temperaturas en puntos concretos tales como entradas y salidas de compresor y turbina, así como presiones medias indicadas y efectivas obtenidas a partir de la presión cilindro.

Datos experimentales	Unidades	Potencia teórica 1,2 MW				
		100	75	50	25	10
Puntos de carga	%	100	75	50	25	10
Presión ambiente	barA	0,9985	0,9950	0,9973	0,9980	0,9985
Temperatura ambiente	K	298,15	298,15	298,15	298,15	298,15
Velocidad del motor	rpm	1800,00	1800,00	1800,00	1800,00	1800,00
Torque indicado	Nm	7158,42	5884,05	3721,02	1958,83	642,86
Torque efectivo	Nm	6366,20	4774,65	3183,10	1591,55	636,62
Presión media indicada	bar	18,93	15,56	9,84	5,18	1,70
Presión media efectiva	bar	16,84	12,63	8,42	4,21	1,68
Torque de fricción	Nm	738,11	1064,70	509,96	352,64	3,12

Presión media de pérdidas mecánicas	bar	1,9519	2,8155	1,3486	0,9325	0,0082
Temperatura después del enfriador de aire	K	332,00	328,00	334,00	332,00	336,00
Temperatura antes de la turbina	K	898,00	844,00	783,00	684,00	587,00
Temperatura después de la turbina	K	817,00	788,00	740,00	651,00	550,00
Presión antes de la turbina	barA	2,000	1,875	1,375	1,250	1,050
Presión después del compresor	barA	2,53	1,93	1,49	1,21	1,09
Presión después de la turbina	barA	1,015	1,007	1,001	1,003	1,000
Temperatura de las paredes del cilindro	K	450,00	450,00	450,00	450,00	450,00
Gasto másico de aire	kg/h	5642,00	4450,00	3519,00	2733,00	2522,00
Comienzo de la inyección	°CA	21	21	21	21	21
Duración de la inyección	s	0,00577	0,00556	0,00392	0,00318	0,00678
Gasto másico de combustible	kg/h	254,00	196,10	131,60	82,90	49,10
Cantidad inyectada	mg/strk	1175,93	907,87	609,26	383,80	227,31
Cantidad inyectada	mg/ciclo	4703,70	3631,48	2437,04	1535,19	909,26
Cantidad inyectada por cilindro	kg/s/ciclo	0,067933	0,054429	0,051808	0,040230	0,011176
Temperatura del refrigerante	K	358,00	358,00	358,00	358,00	358,00
Relación aire-combustible	-	22,2126	22,6925	26,7401	32,9674	51,3646
Velocidad de la turbo	rpm	27525,00	23824,00	17769,00	8880,00	6827,00

Tabla 9.1. Datos requeridos para el modelo.

9.2. Guía de usuario

A lo largo del presente trabajo se ha ido detallando el procedimiento seguido para realizar los modelos. Sin embargo, no se han introducido detalles que pudieran sobrecargar el texto

demasiado. Para ello, en este apartado se recopilan una serie de procedimientos para ayudar al lector a utilizar Amesim.

9.2.1. Simulación de uno o varios casos a la vez

En primer lugar, lo más importante es explicar qué posibilidades se tienen a la hora de simular los modelos. Es decir, ¿es posible simular más de un punto de operación o sólo es posible hacerlo de uno en uno? Lógicamente, Amesim permite simular muchos casos a la vez, denominándose esta forma "Batch simulation". Sin embargo, se debe decir que esto es lógico realizarlo cuando el modelo que se tenga sea predictivo, pues de nada sirve hacerlo con un modelo específico para un determinado punto de operación. Esto ya se explicó en el capítulo seis cuando se detalló el modelo con la cámara de combustión 'BMF'. En efecto, se vio que este modelo no es predictivo y los puntos de carga debían simularse uno a uno e ir guardándose como experimentos diferentes.

Para el caso de modelos predictivos o cuando se quieran simular varios casos diferentes a la vez, en primer lugar, se debe establecer el parámetro que cambia de un caso a otro. En este caso, el parámetro que varía es el de carga. En la Figura 9.1 siguiente se observa dónde hay que pinchar para acceder a la ventana donde se asigna el parámetro a variar.

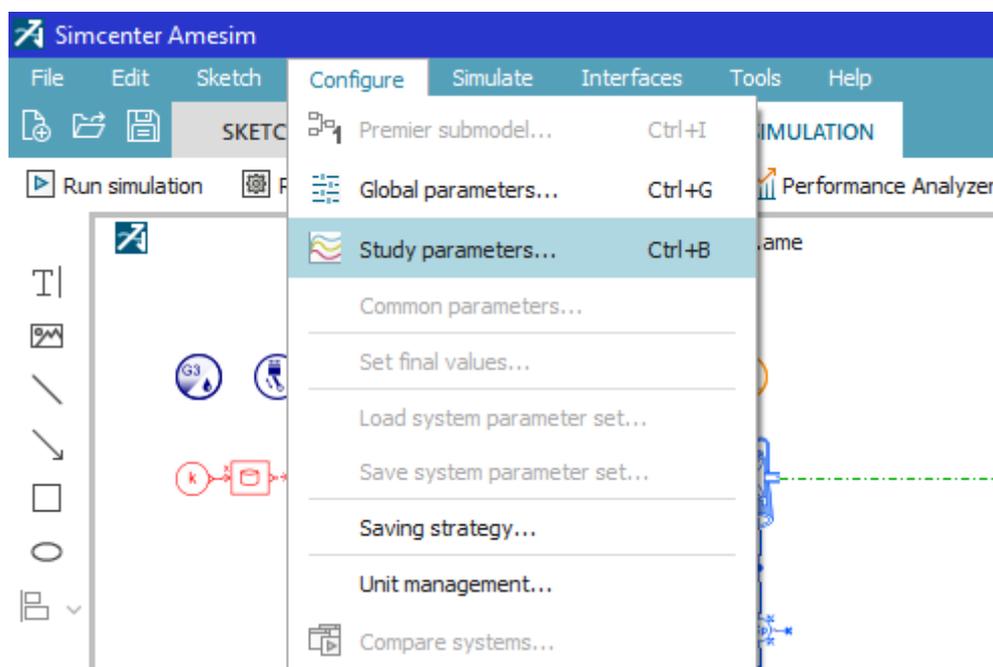


Figura 9.1. Cómo establecer un parámetro variable para simular varios casos.

La ventana donde se establecen los diferentes valores que va a adquirir el parámetro elegido puede verse en la Figura 9.2 siguiente.

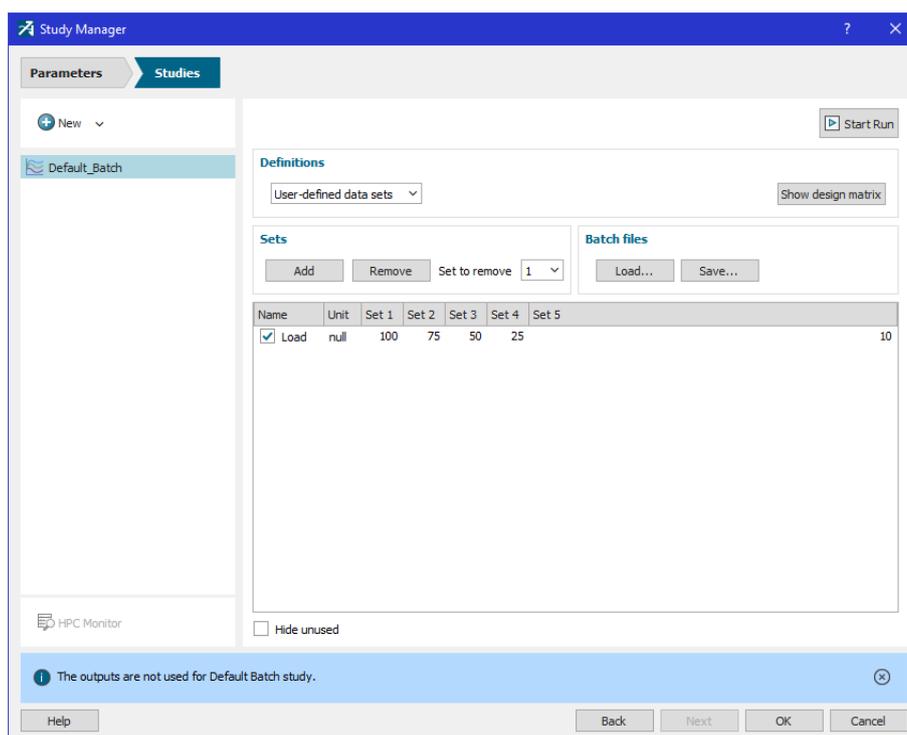


Figura 9.2. Ventana para establecer valores diferentes a un parámetro.

Como puede verse, al parámetro “Load” se le han dado cinco valores diferentes correspondientes a los estados de carga de banco de ensayos.

Por último, el lugar donde se establece si se quieren simular uno o varios casos es en el botón que se encuentra justo al lado del de simular y que tiene por nombre “Run parameters”. La Figura 9.3 muestra la ventana de este botón.

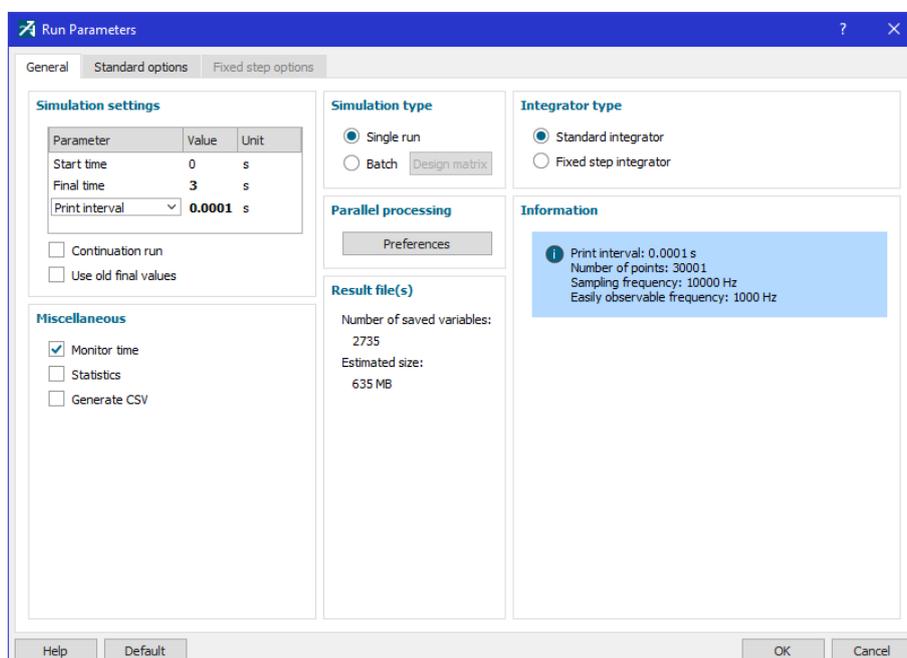


Figura 9.3. Parámetros de simulación.

En esta ventana se introduce el tiempo de simulación y el intervalo que se va a tener. Además, en el tipo de simulación se elige entre simulación sencilla o múltiple.

9.2.2. Preparación e introducción de tablas en el formato adecuado

Para la realización de los modelos se ha podido observar que han sido necesarias varias tablas diferentes para distintos componentes. Entre estas tablas se encuentran las de presión media de pérdidas mecánicas, las del efecto de pulso de la turbina o las de los levantamientos de válvulas, entre otras. Estas tablas se pueden preparar mediante un software externo y luego importarlas. Sin embargo, es más cómodo utilizar la herramienta de introducción de tablas que se encuentra en Amesim. De esta forma el usuario se asegura de que el formato utilizado es el adecuado para el programa. A continuación, se mostrará esta herramienta.

En la Figura 9.4 siguiente se puede ver dónde hay que pinchar para poder introducir datos en una tabla.

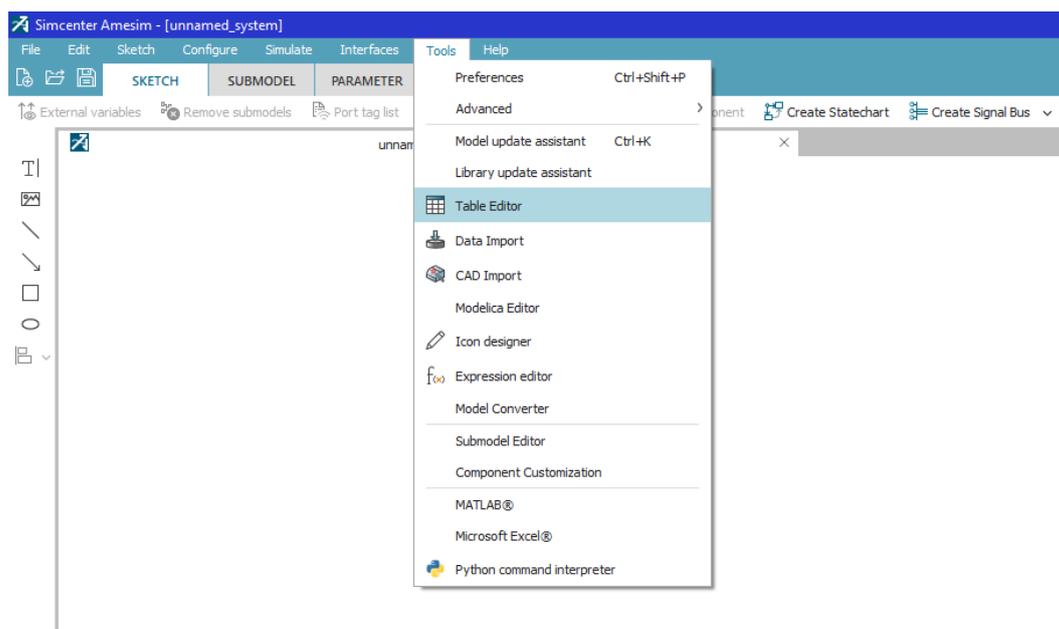


Figura 9.4. Cómo generar tablas en Amesim.

Cuando se hace clic en esa opción se abre la ventana que se muestra en la Figura 9.5 y en ella se pueden introducir los datos.

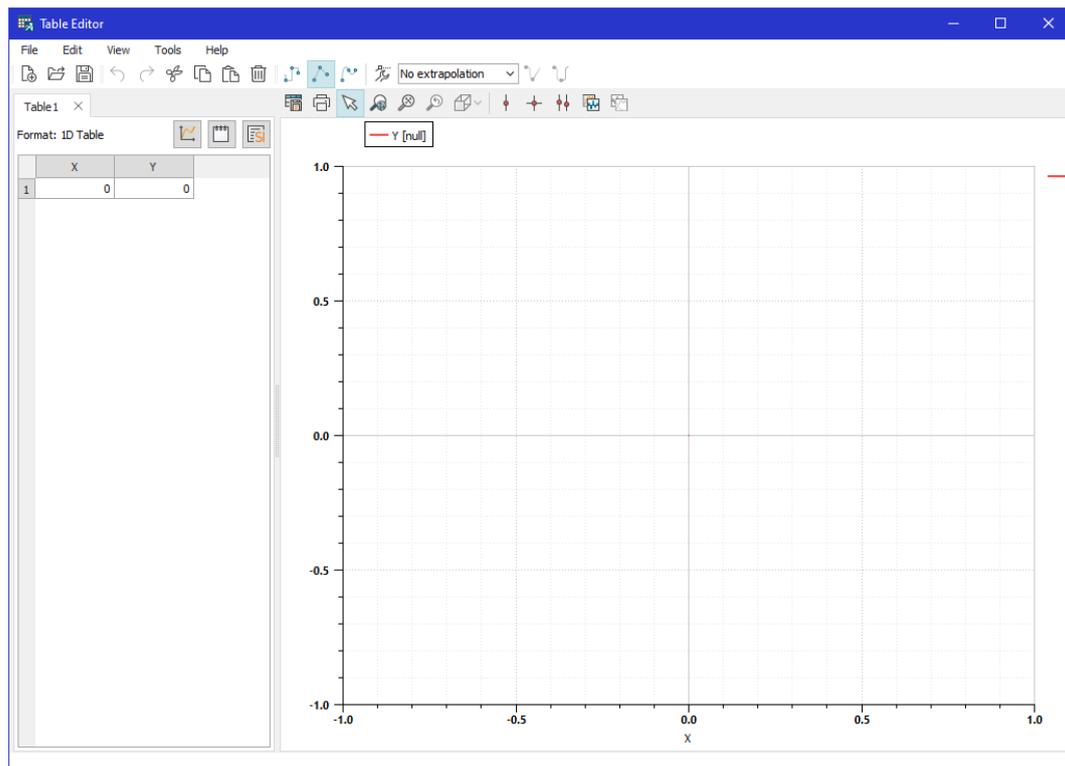


Figura 9.5. Editor de tablas de Amesim.

Por defecto la tabla tiene un formato de 1D, es decir, la variable que se quiere representar depende sólo de un parámetro. No obstante, si la variable que se quiere representar en esta gráfica depende de más de un parámetro, bastará con crear una nueva tabla y saldrá la siguiente opción de la Figura 9.6.

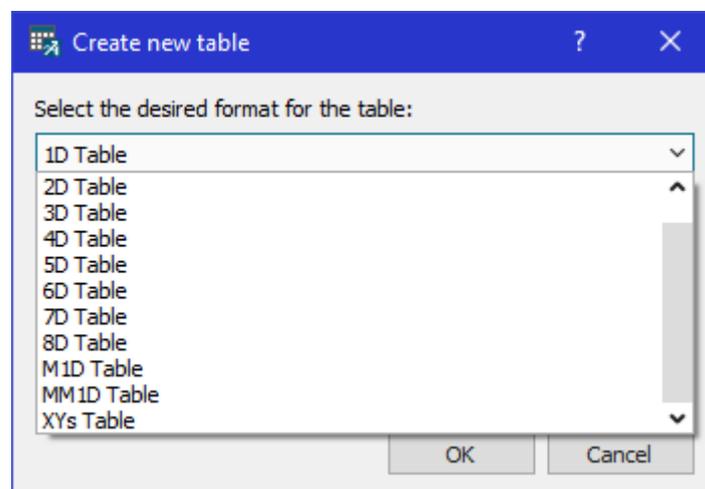


Figura 9.6. Tipos de tablas en Amesim.

En ocasiones ya se dispone de estos datos en otros formatos obtenidos con una herramienta externa. En este caso también es posible adecuarlos al formato de Amesim mediante la herramienta de importación de datos. A esta herramienta se accede de la forma mostrada en la Figura 9.7.

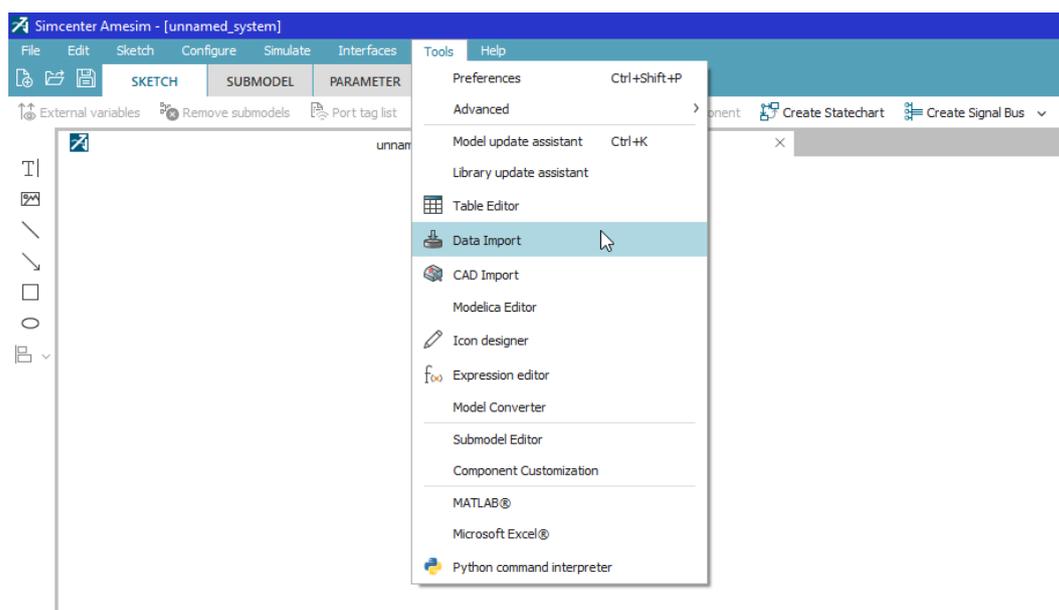


Figura 9.7. Cómo importar datos externos a Amesim.

En la Figura 9.8 se puede observar la ventana de la herramienta.

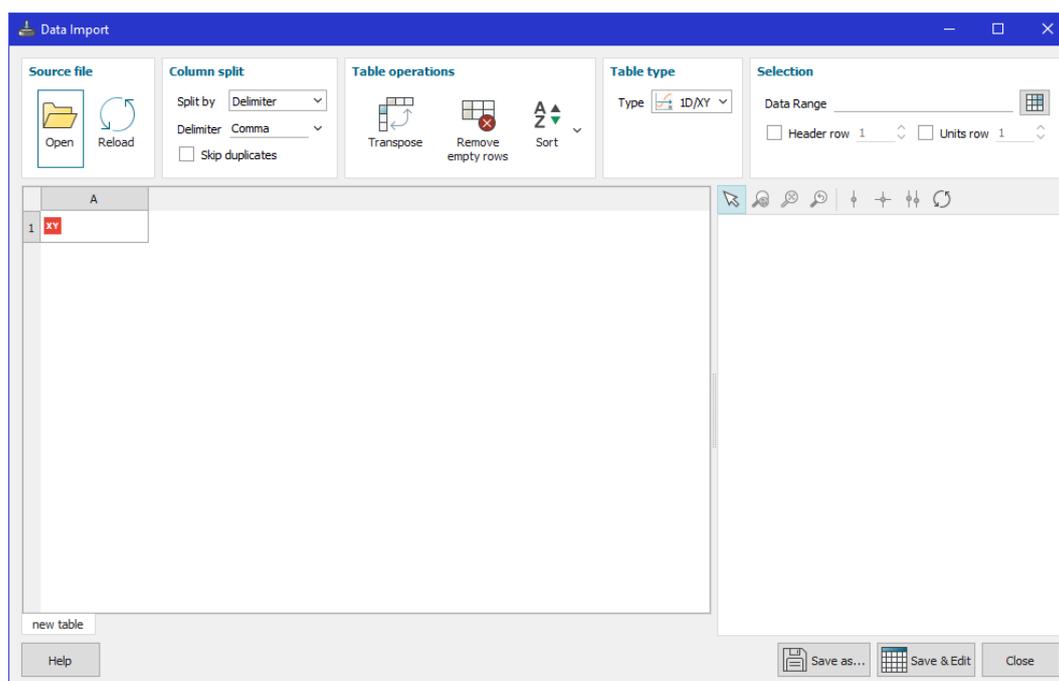


Figura 9.8. Importación de datos en Amesim.

Así pues, utilizando cualquiera de las dos herramientas según los datos iniciales, se pueden adecuar todos los datos necesarios para el modelo. En este trabajo se han utilizado estas herramientas a la hora de introducir los datos mencionados anteriormente.

9.2.3. Representación gráfica de las variables

En los temas dedicados al modelado del motor generador se han representado en gráficas diferentes comparaciones entre los valores simulados y los experimentales. En este

subapartado se va a explicar cómo se realiza un diagrama de barras para los diferentes estados de carga.

En la última pestaña de Amesim, la correspondiente a la simulación, se dispone de una ventana que por defecto aparece en la zona inferior de la interfaz de usuario que permite realizar análisis de postproceso. Basta con arrastrar cualquier variable del elemento que se quiera para analizarla en detalle. Entre una multitud de funciones, se puede integrar, derivar o buscar el valor máximo que alcanza la variable, así como el tiempo en el que lo alcanza. Una función muy utilizada en este trabajo es la de realizar la media de las variables. En el modelo físico-fenomenológico, puesto que los valores fluctúan siempre entre un rango (al contrario que en el de valores medios, donde son constantes), la función “media” permite obtener un valor constante.

Una vez se postprocesan las variables que resultan interesantes, si se quieren representar en diagramas de barras que recojan todos los puntos de operación examinados, es necesario crear las variables que en Amesim se conocen como “Cross result”. Por defecto esta ventana no aparece en el programa. Para ello se debe ir donde muestra la Figura 9.9.

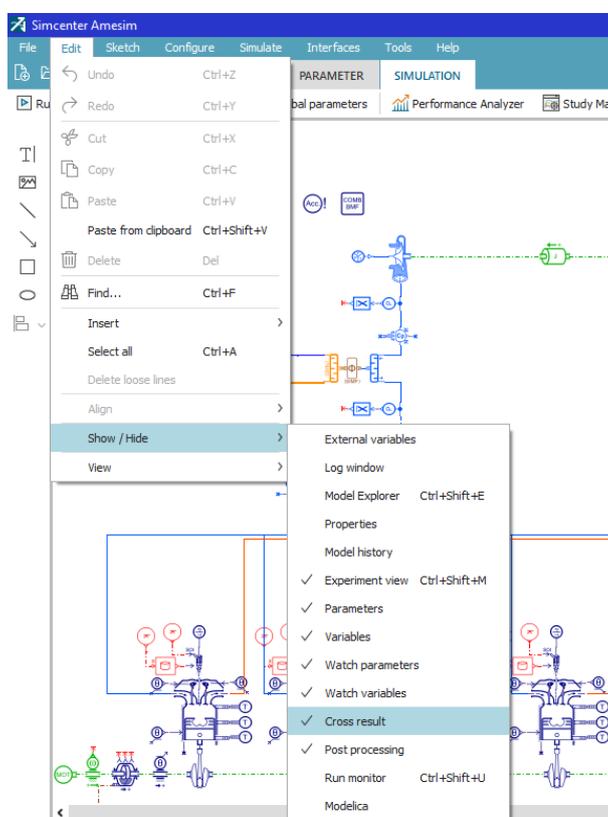


Figura 9.9. Activar variables “Cross result”.

Cuando se activa esta opción, aparece una nueva pestaña en la zona derecha de la interfaz de usuario del programa. Para convertir una variable en este tipo basta con arrastrarla a esa nueva ventana, bien desde un componente del esquema o bien desde la ventana de postproceso. Como ejemplo, en la Figura 9.10 se muestran las utilizadas en este trabajo.

Name	Title	X-axis	Y-axis
Test_Temp_After_CAC	Test temperature after CAC	[1-5]	u4@dynamic_x_table_14
Test_Effective_Torque	Test effective torque	[1-5]	u1@dynamic_x_table_14
Simu_Pres_After_CAC	Simulated pressure after CAC	[1-5]	Mean_Pres_After_CAC
Simu_Pres_After_Turb	Simulated pressure after turbine	[1-5]	Mean_Pres_After_Turb
Test_Pres_After_Turb	Test pressure after turbine	[1-5]	u9@dynamic_x_table_14
Simu_Temp_Before_Turb	Simulated temperature before turbine	[1-5]	Mean_Temp_Before_Turb
Simu_Temp_After_Turb	Simulated temperature after turbine	[1-5]	Mean_Temp_After_Turb
Simu_Pres_After_Comp	Simulated pressure after compressor	[1-5]	Mean_Pres_After_Comp
Test_Pres_After_CAC	Test pressure after CAC	[1-5]	u5@dynamic_x_table_14
Test_Temp_Before_Turb	Test temperature before turbine	[1-5]	u6@dynamic_x_table_14
Simu_Pres_Before_Turb	Simulated pressure before turbine	[1-5]	Mean_Pres_Before_Turb
Test_IMEP	Test indicated mean effective pressure	[1-5]	u2@dynamic_x_table_14
Simu_Effective_Torque	Simulated effective torque	[1-5]	Mean_torque
Test_Pres_Before_Turb	Test pressure before turbine	[1-5]	u8@dynamic_x_table_14
Test_Fuel_Mass_Flow_Rate	Test fuel mass flow rate	[1-5]	u13@dynamic_x_table_14
Simu_Air_Mass_Flow_Rate	Simulated air mass flow rate	[1-5]	Mean_Air_Mass_Flow_Rate
Test_Air_Mass_Flow_Rate	Test air mass flow rate	[1-5]	u12@dynamic_x_table_14
Test_Pres_After_Comp	Test pressure after compressor	[1-5]	u10@dynamic_x_table_14
Simu_IMEP	Simulated indicated mean effective pressure	[1-5]	imep@eng_fmep_stribeck

Figura 9.10. Ejemplo de variables “Cross result” utilizadas.

Según el número de puntos de operación simulados o los que se quieran representar, en la columna de “X-axis” se introducen los casos que se deseen. En este caso se han elegido los cinco casos ([1-5]) correspondientes al 100, 75, 50, 25 y 10%. Se le da un nombre a la variable para saber en todo momento qué se va a representar.

En cuanto a los valores experimentales, estos se introdujeron en ambos modelos con un componente de tipo tabla, separado del resto de componentes del modelo. A esta tabla entra el valor de carga y en función de este se tendrán los valores correspondientes de todas las variables de las cuales se dispone de datos experimentales. De la misma forma que se hace con las variables simuladas, las variables experimentales se arrastran a la ventana de la Figura 9.10.

Por último, se crea una gráfica en blanco y desde el gestor de gráficos (“Plot manager”) se introducen las variables a representar. En la Figura 9.11 se muestra esto.

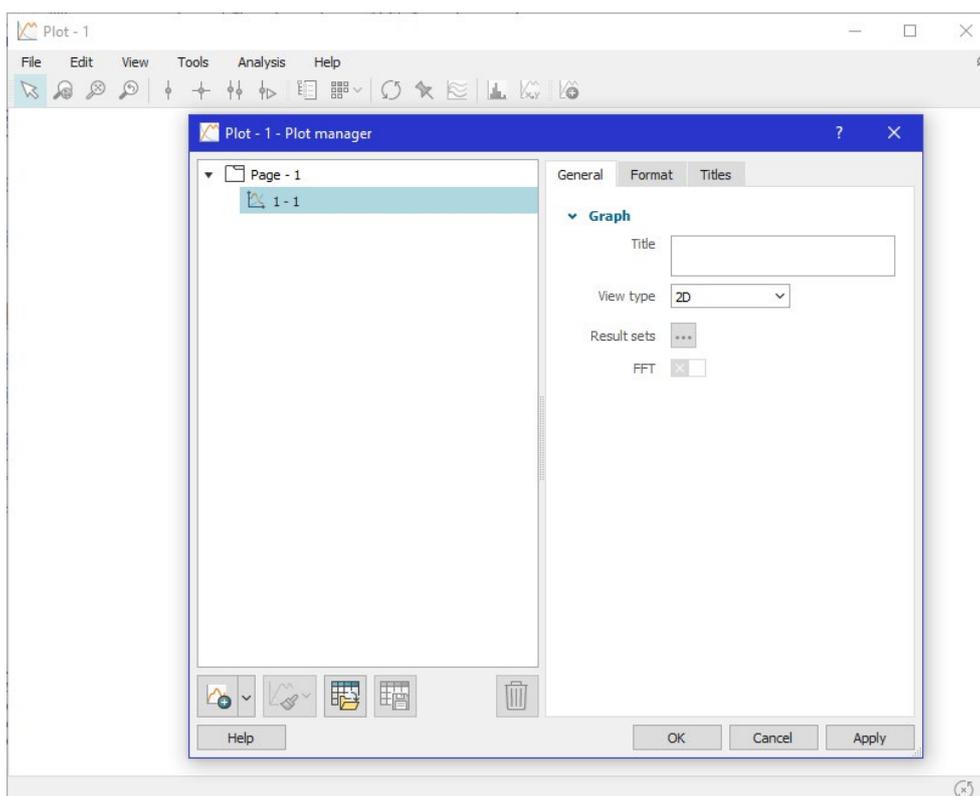


Figura 9.11. Creación de las gráficas.

Para ello se deben arrastrar a la ventana mostrada en la Figura 9.11 las variables que se deseen representar. En caso de querer mostrar una gráfica comparativa se deben arrastrar la variable simulada y la experimental a un mismo gráfico. En el caso mostrado se tiene una sola gráfica. Accediendo a edición es posible establecer un número de filas y columnas para poder introducir más gráficas en una sola hoja. Los números '1-1' indican que se trata de la fila uno y columna uno.

9.3. Gráficos de errores relativos de los parámetros obtenidos en los modelos

Con el fin de no saturar el trabajo con gráficas, en este apartado del anexo se recogen los gráficos que muestran los errores relativos obtenidos en cada modelo para los diferentes estados de carga y parámetros medidos.

9.3.1. Primer modelo de valores medios

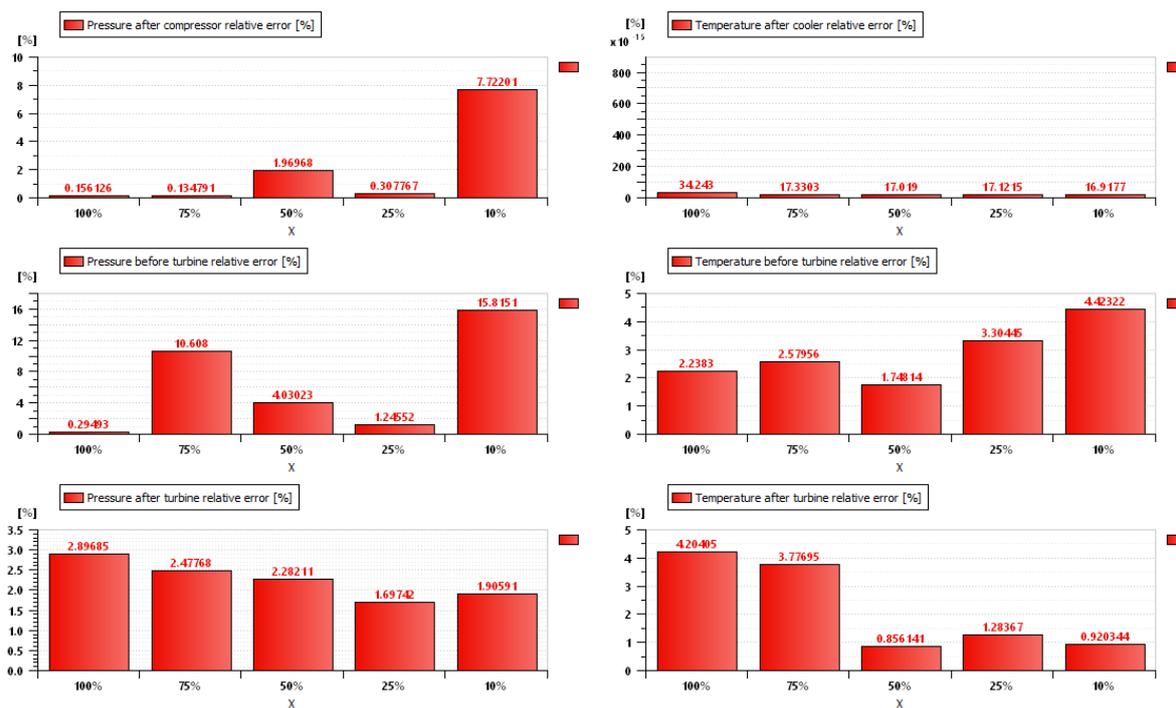


Figura 9.12. Errores relativos. Calibración. Presiones y temperaturas. Modelo 1 de valores medios.

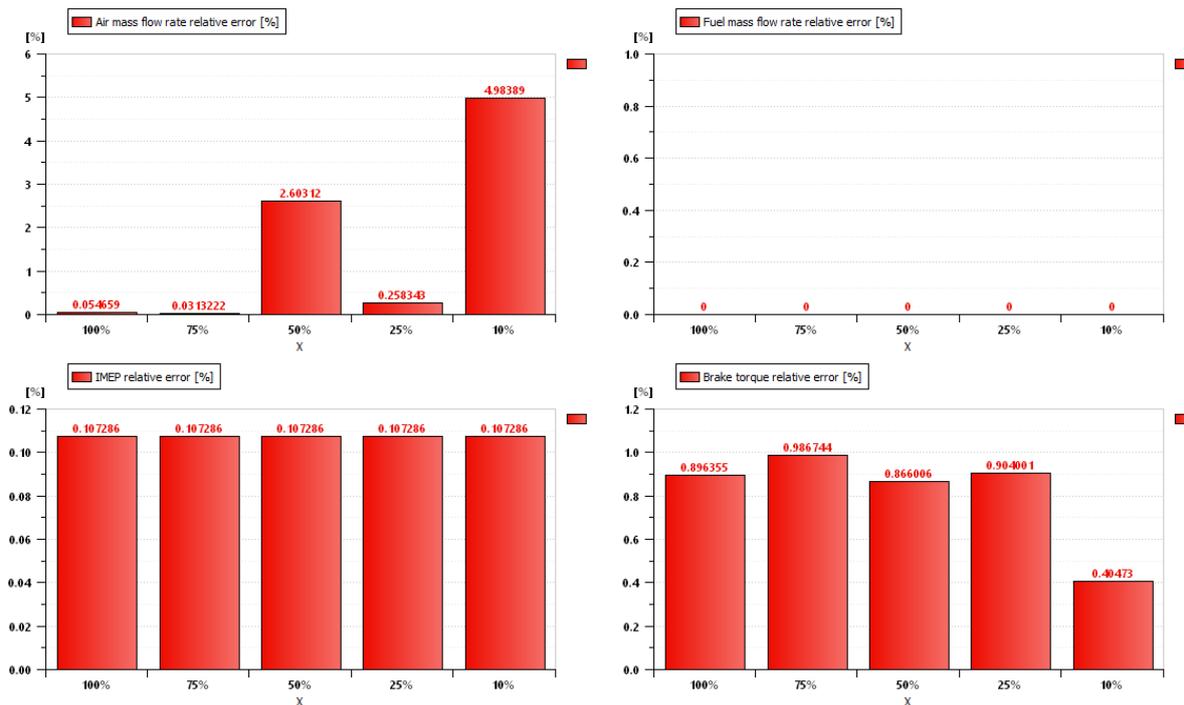


Figura 9.13. Errores relativos. Calibración. Gastos, PMI y par efectivo. Modelo 1 de valores medios.

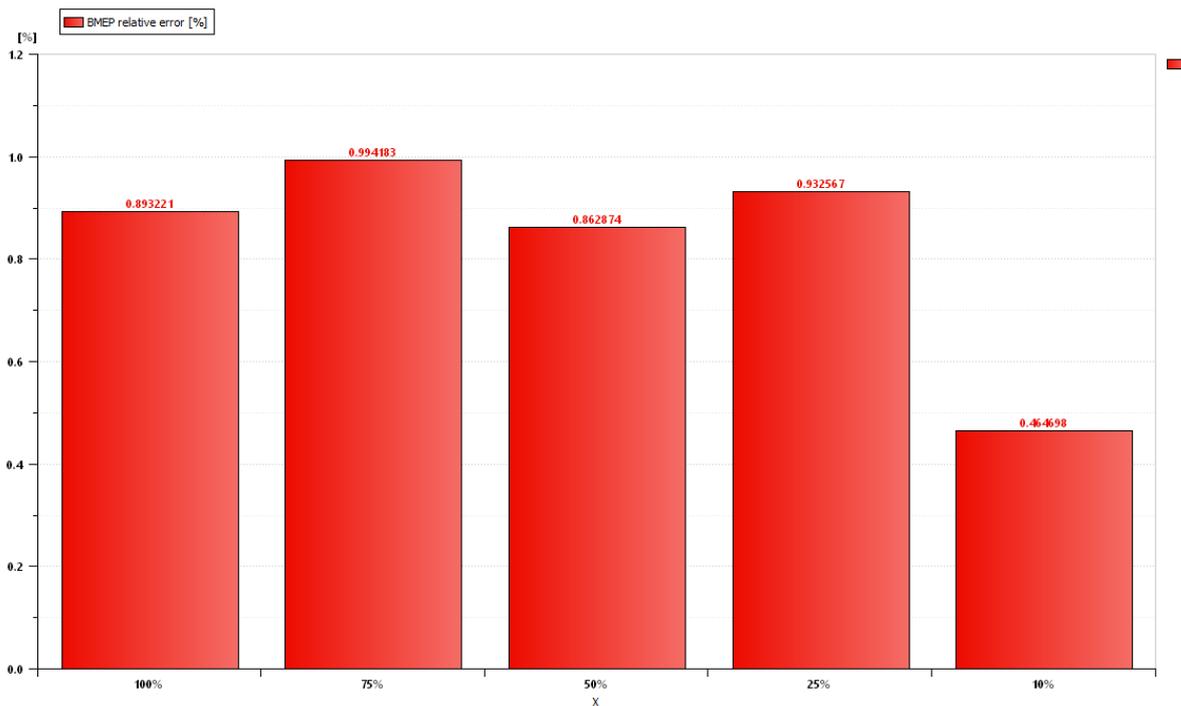


Figura 9.14. Errores relativos. Calibración. Presión media efectiva. Modelo 1 de valores medios.



Figura 9.15. Errores relativos. Validación. Presiones. Modelo 1 de valores medios.

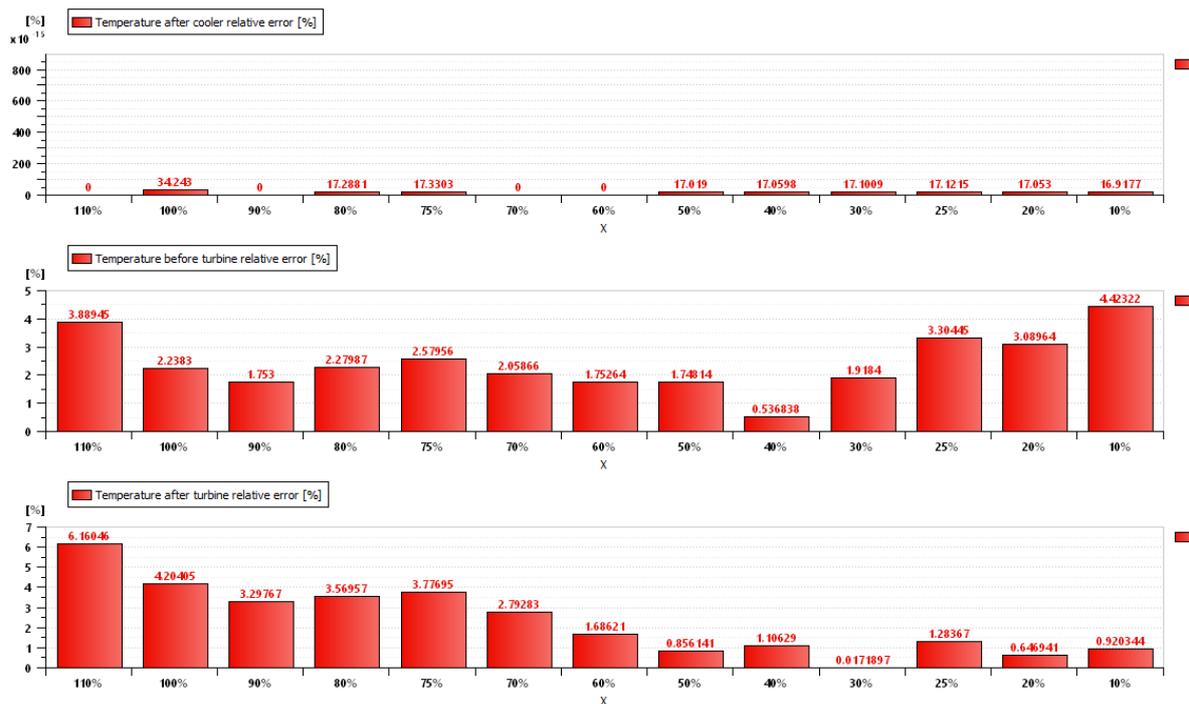


Figura 9.16. Errores relativos. Validación. Temperaturas. Modelo 1 de valores medios.

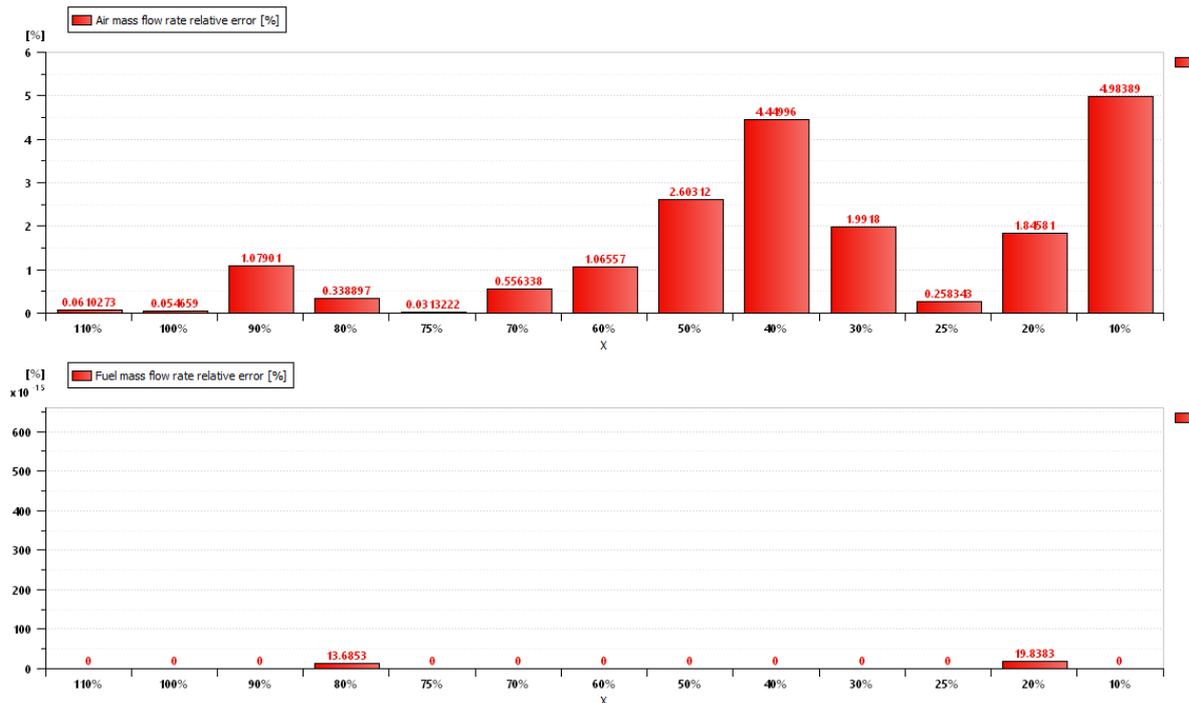


Figura 9.17. Errores relativos. Validación. Gastos. Modelo 1 de valores medios.

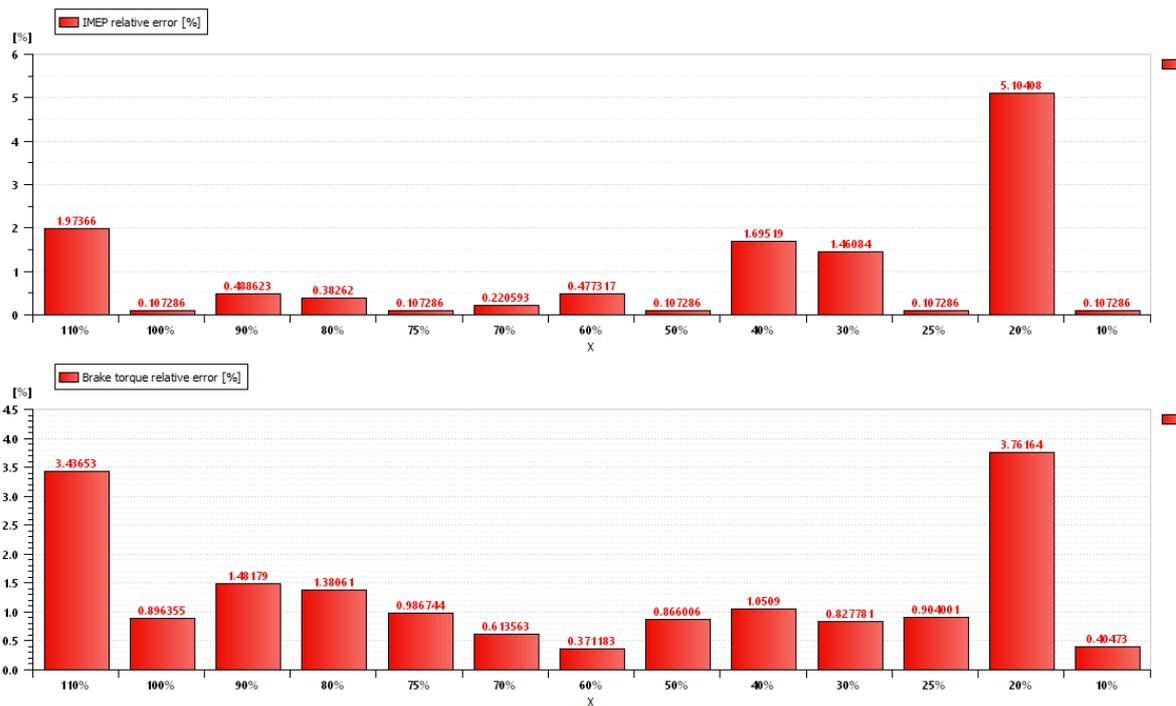


Figura 9.18. Errores relativos. Validación. PMI y par efectivo. Modelo 1 de valores medios.

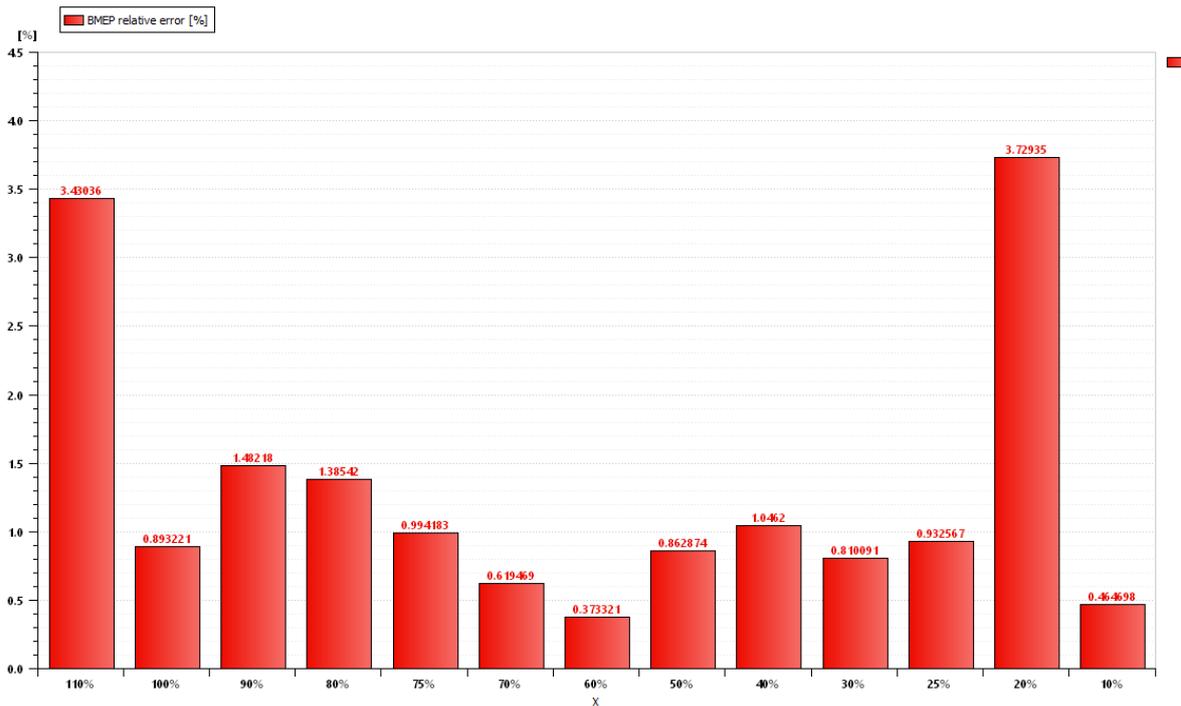


Figura 9.19. Errores relativos. Validación. Presión media efectiva. Modelo 1 de valores medios

9.3.2. Segundo modelo de valores medios

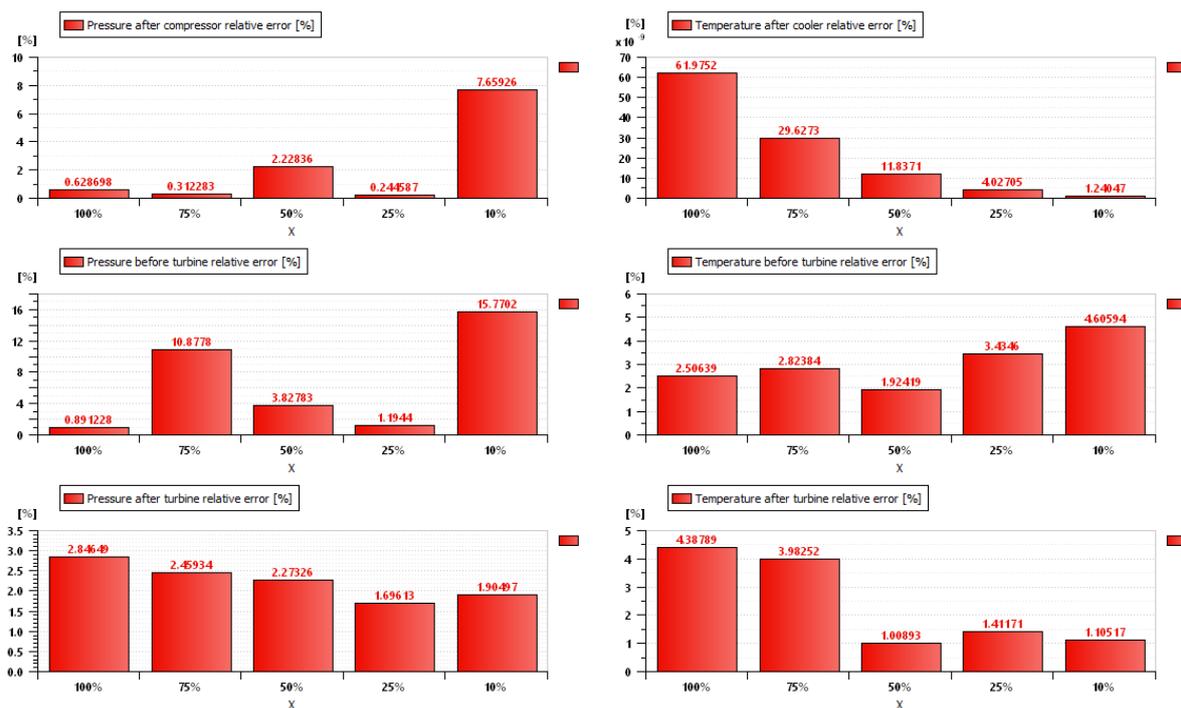


Figura 9.20. Errores relativos. Calibración. Presiones y temperaturas. Modelo 2 de valores medios.

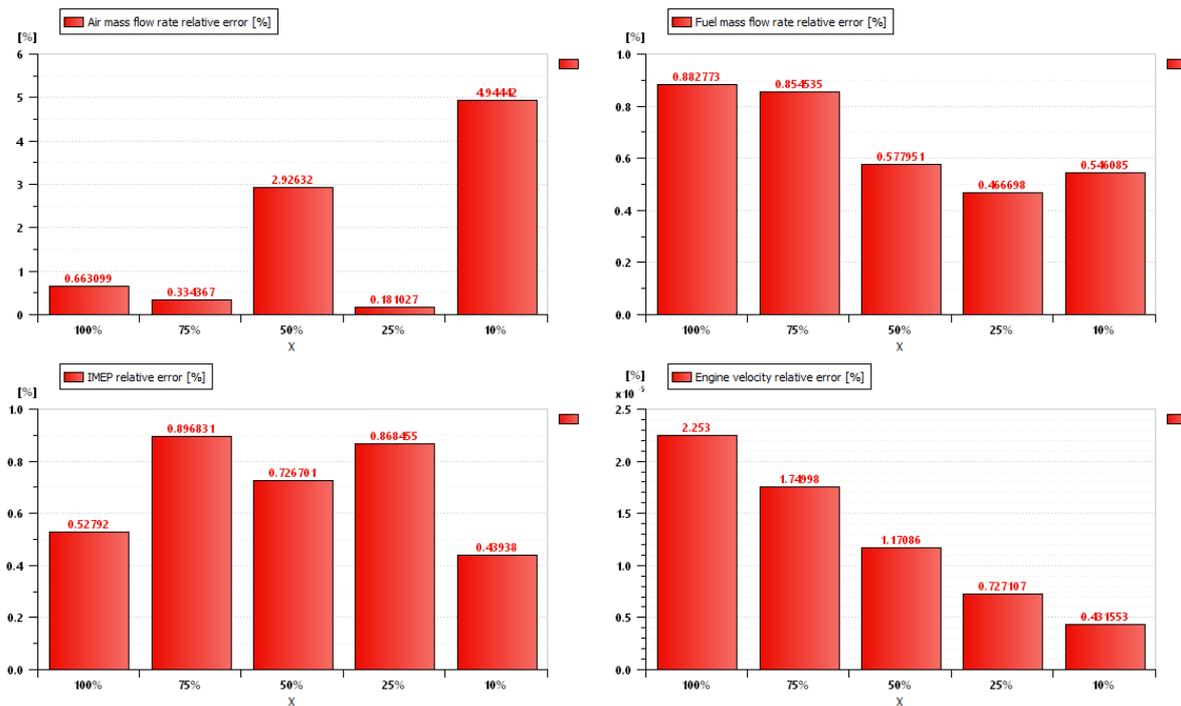


Figura 9.21. Errores relativos. Calibración. Gastos, PMI y par efectivo. Modelo 2 de valores medios.

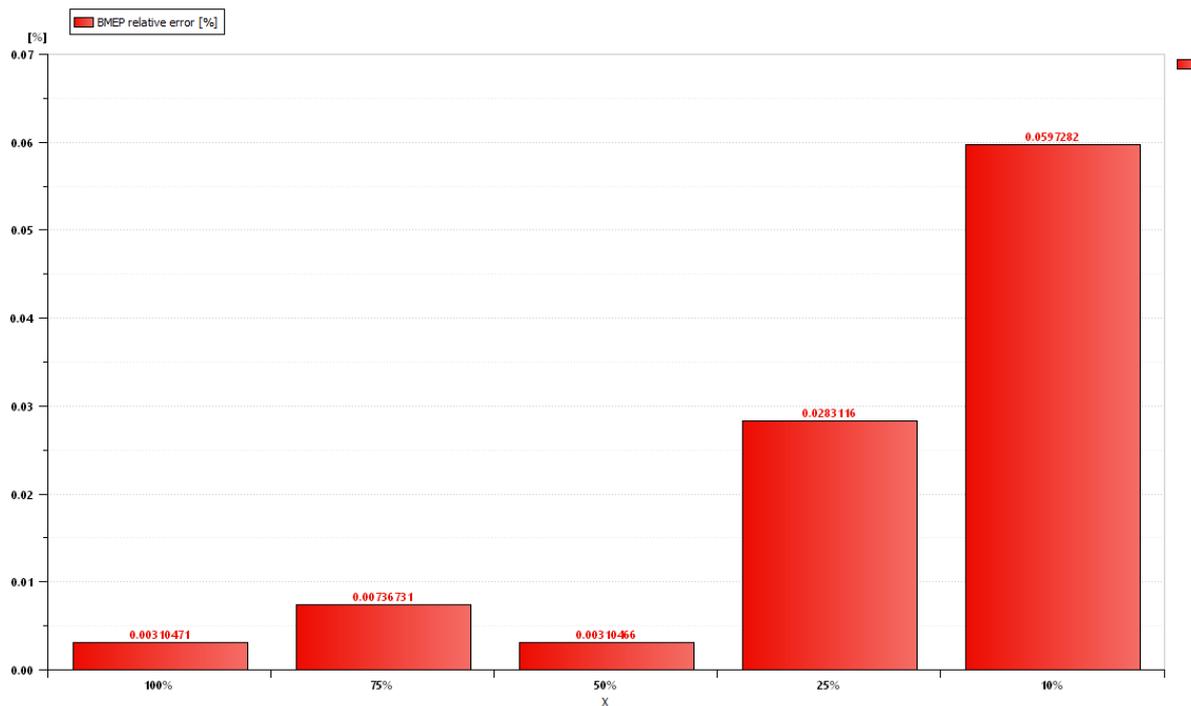


Figura 9.22. Errores relativos. Calibración. Presión media efectiva. Modelo 2 de valores medios.



Figura 9.23. Errores relativos. Validación. Presiones. Modelo 2 de valores medios.

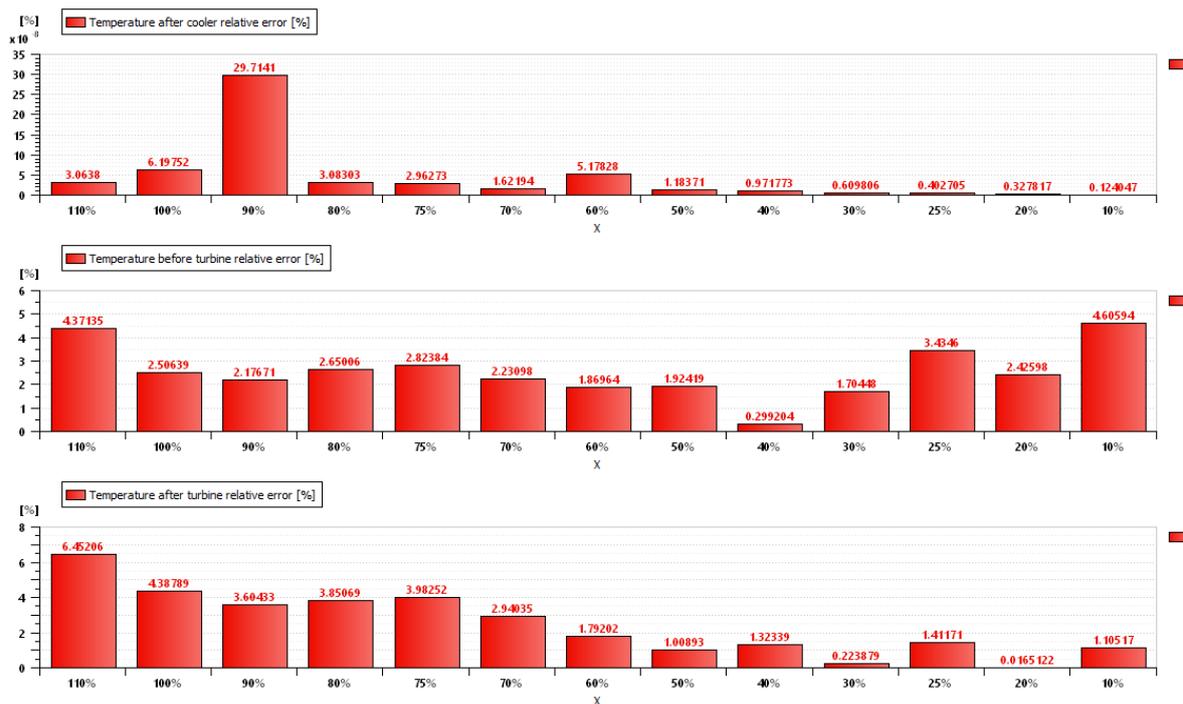


Figura 9.24. Errores relativos. Validación. Temperaturas. Modelo 2 de valores medios.

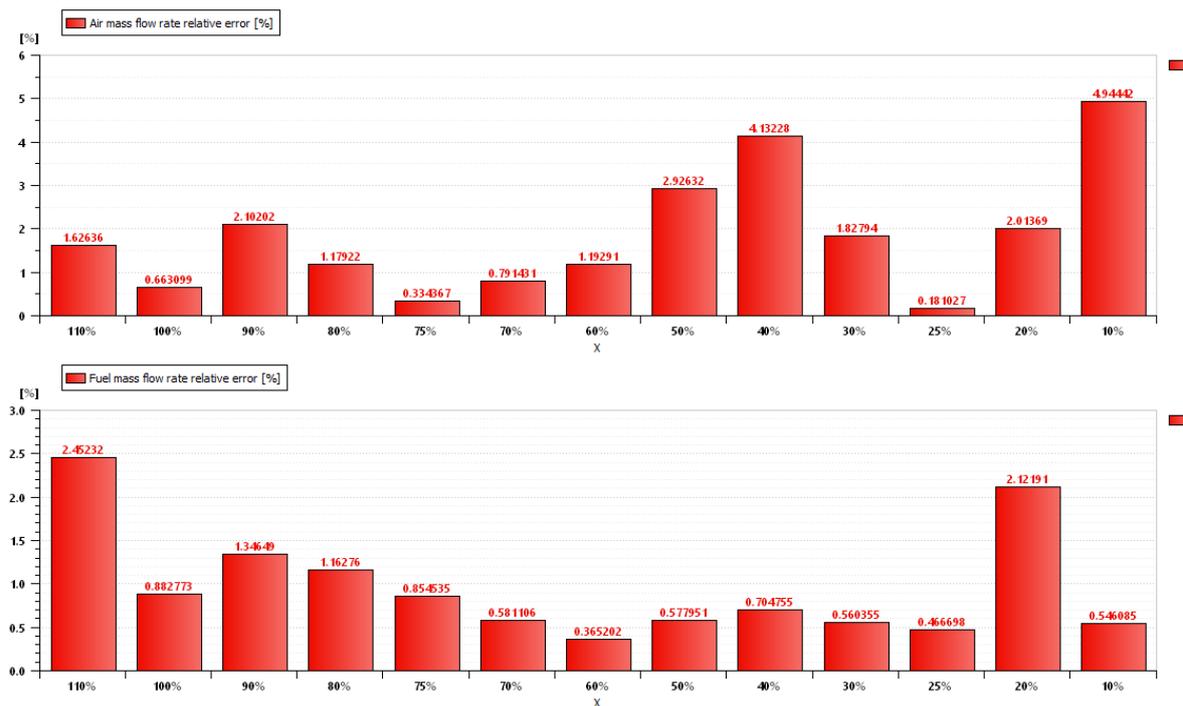


Figura 9.25. Errores relativos. Validación. Gastos. Modelo 2 de valores medios.

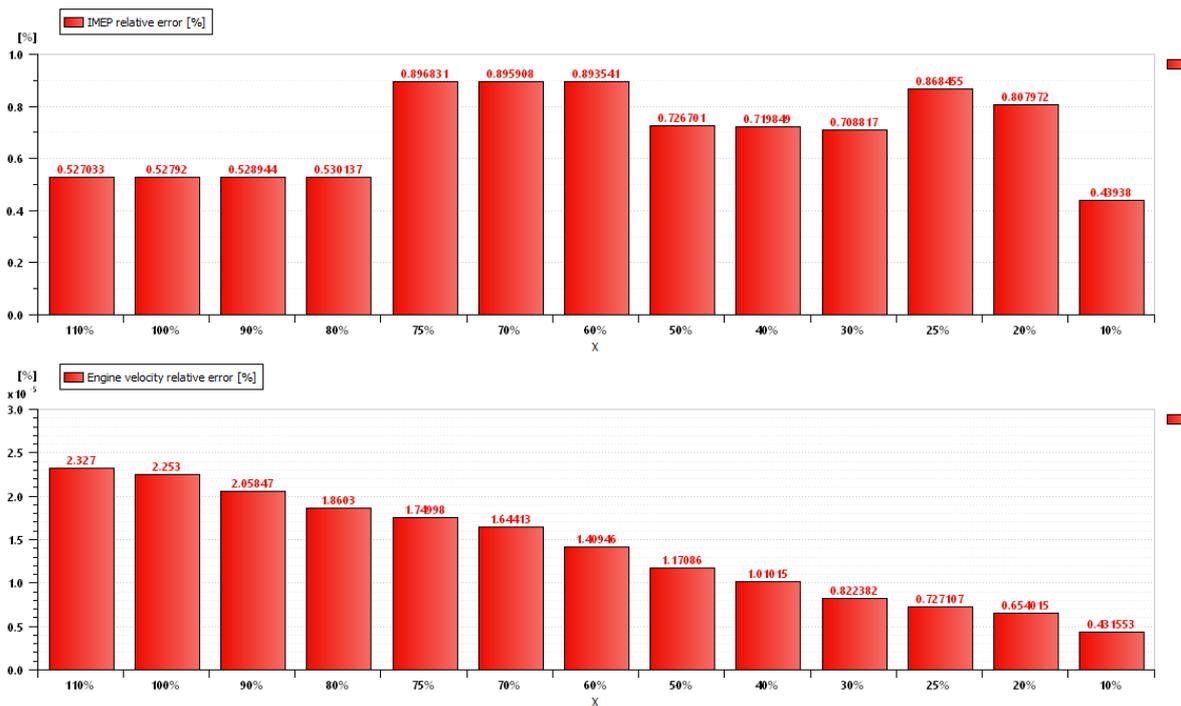


Figura 9.26. Errores relativos. Validación. PMI y par efectivo. Modelo 2 de valores medios.

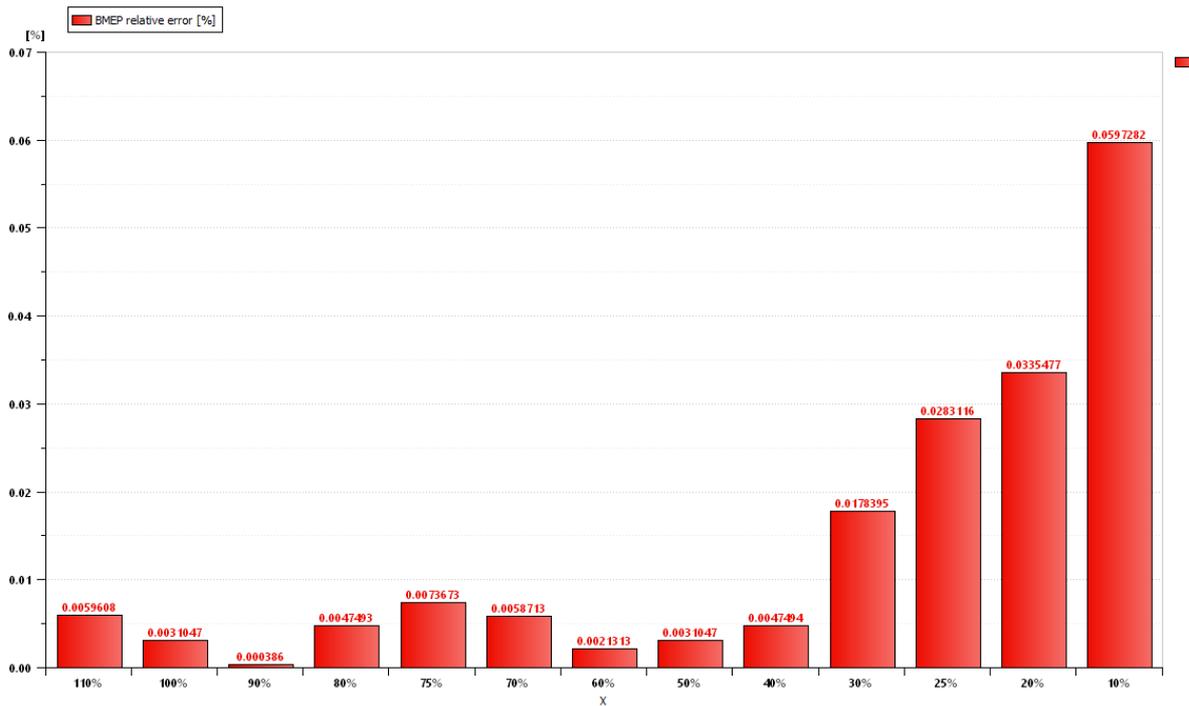


Figura 9.27. Errores relativos. Validación. Presión media efectiva. Modelo 2 de valores medios.

9.3.3. Modelo físico-fenomenológico 'Chmela'

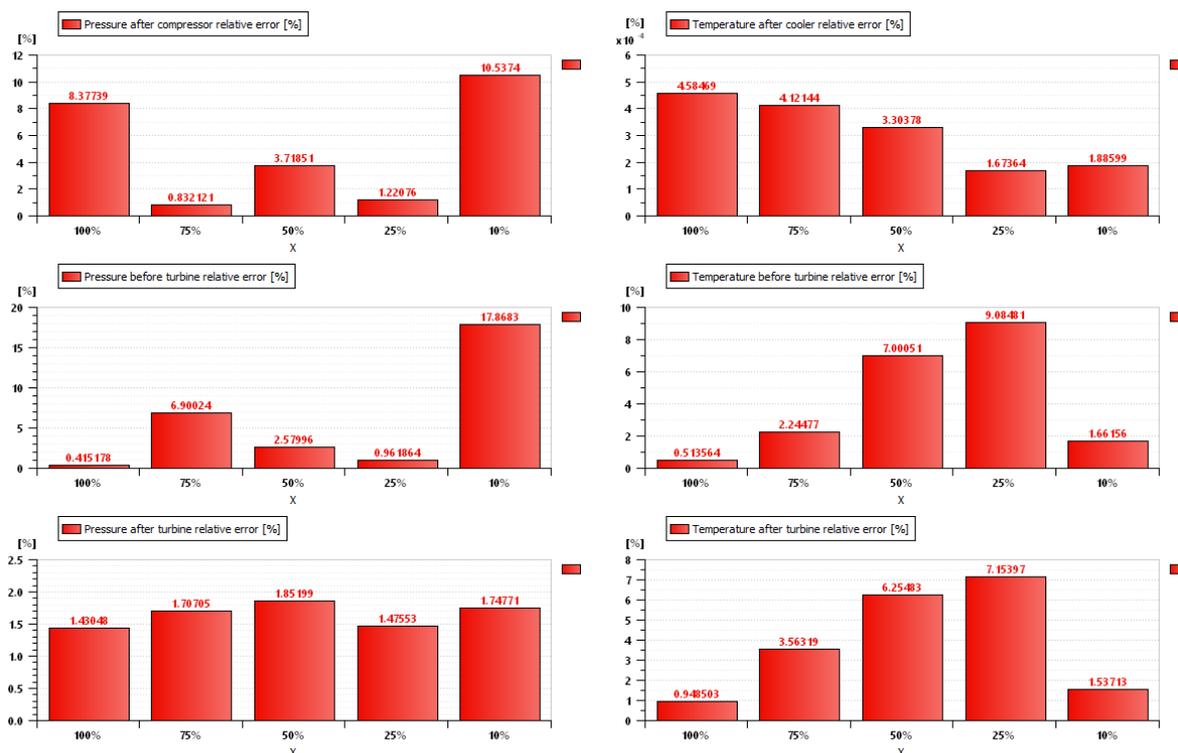


Figura 9.28. Errores relativos. Calibración. Presiones y temperaturas. Modelo 'Chmela'.

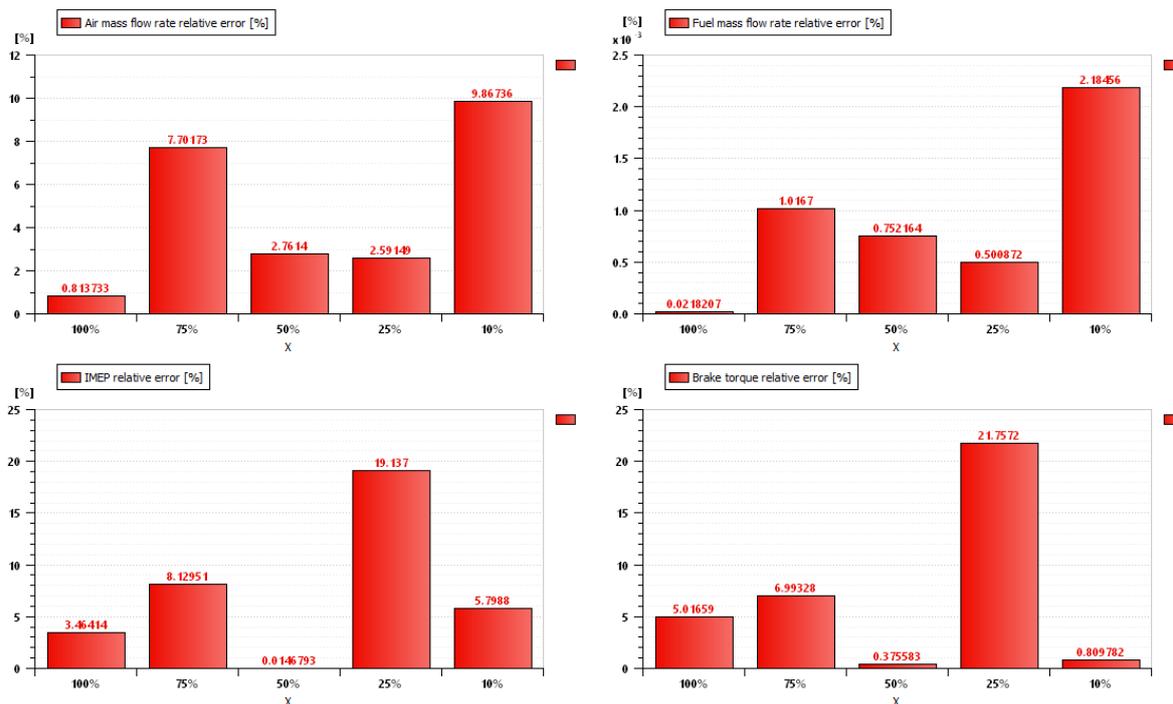


Figura 9.29. Errores relativos. Calibración. Gastos, PMI y par efectivo. Modelo 'Chmela'.

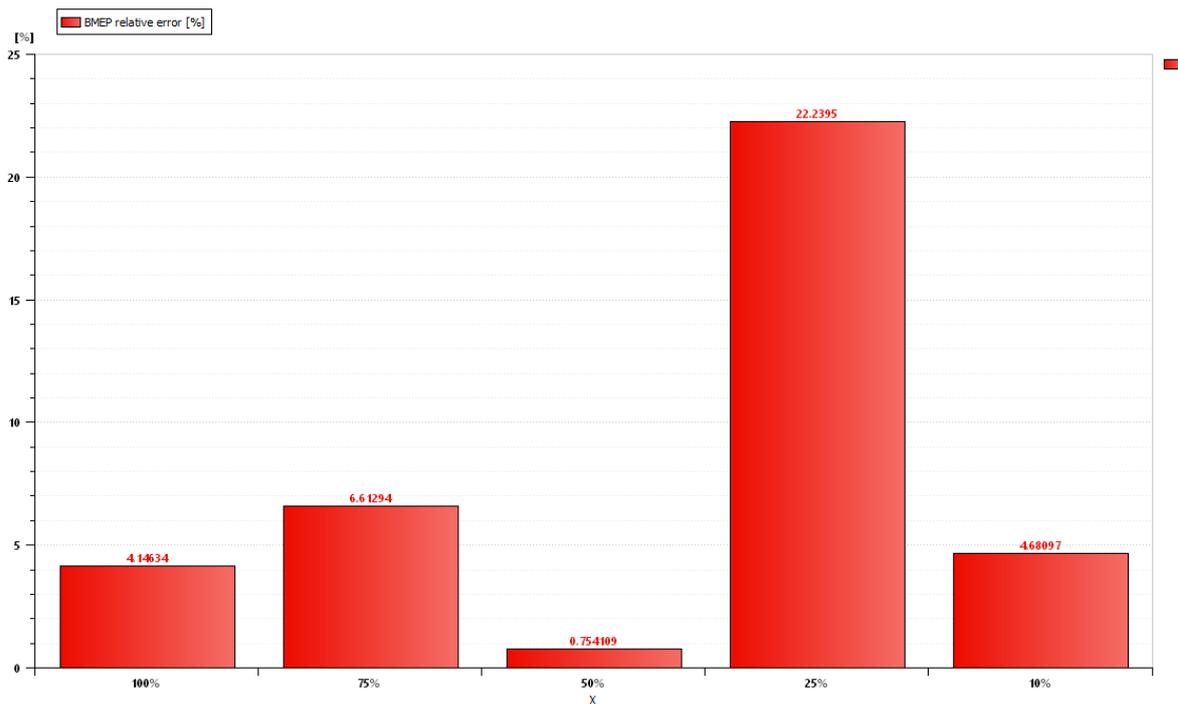


Figura 9.30. Errores relativos. Calibración. Presión media efectiva. Modelo 'Chmela'.



Figura 9.31. Errores relativos. Validación. Presiones. Modelo 'Chmela'.



Figura 9.32. Errores relativos. Validación. Temperaturas. Modelo 'Chmela'.

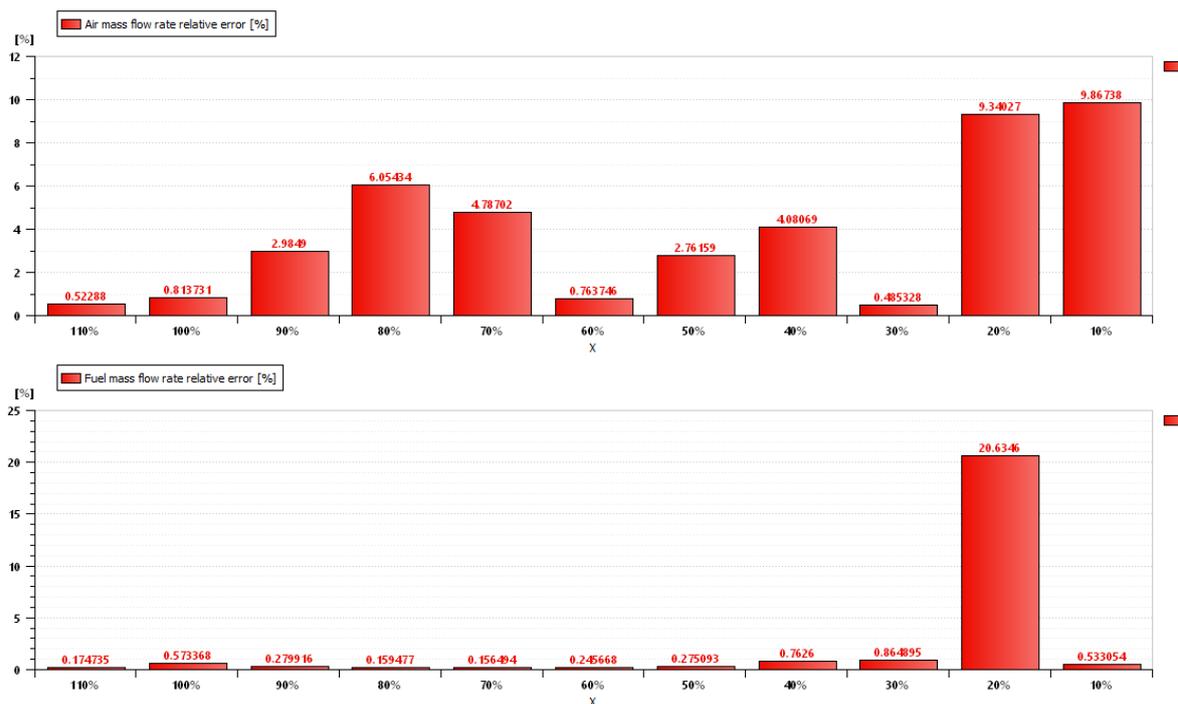


Figura 9.33. Errores relativos. Validación. Gastos. Modelo 'Chmela'.

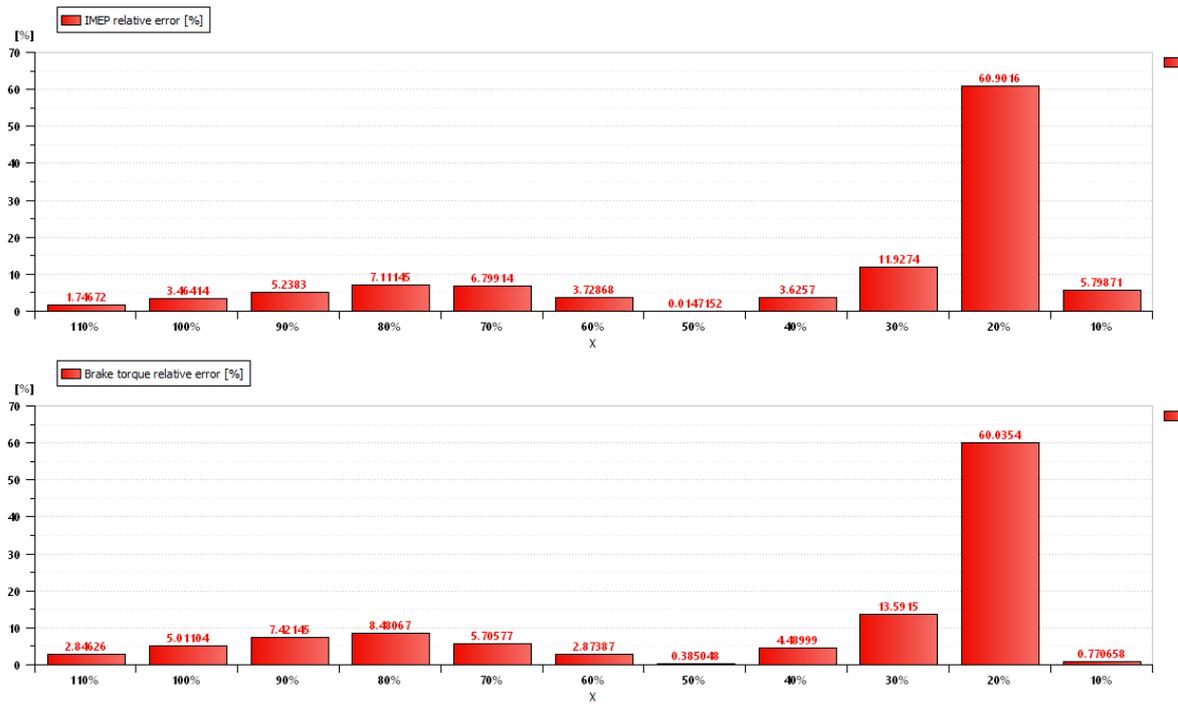


Figura 9.34. Errores relativos. Validación. PMI y par efectivo. Modelo 'Chmela'.

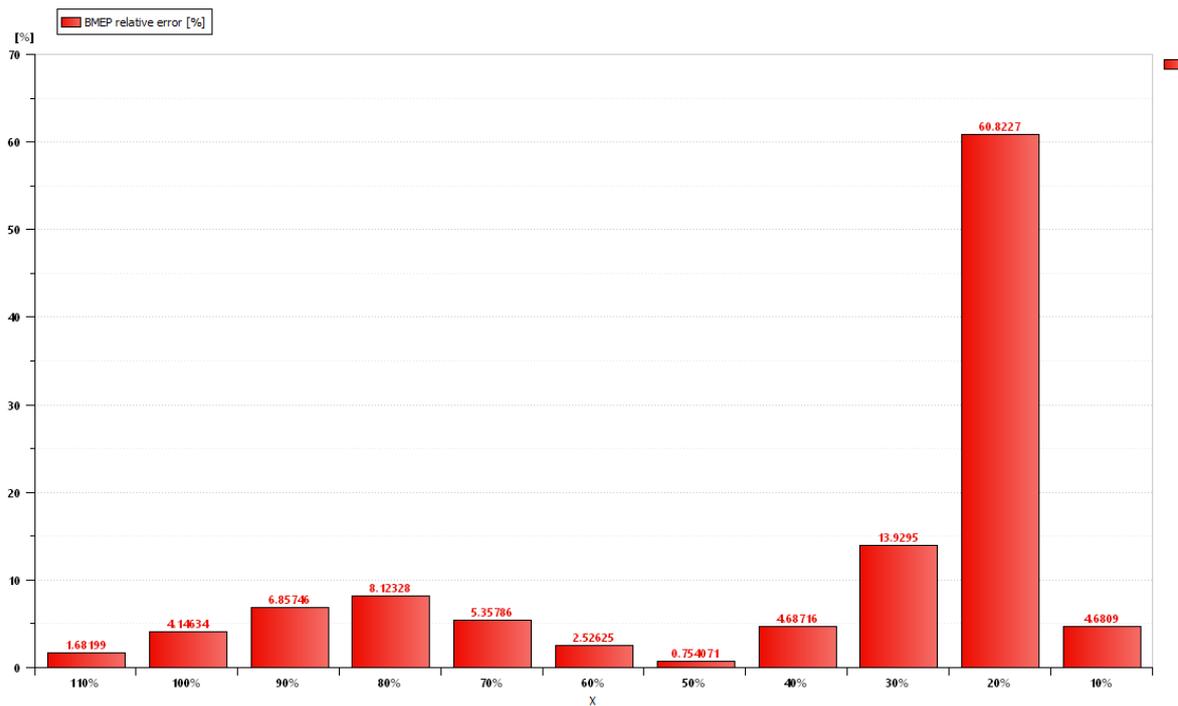


Figura 9.35. Errores relativos. Validación. Presión media efectiva. Modelo 'Chmela'.

9.3.4. Modelo 'BMF'

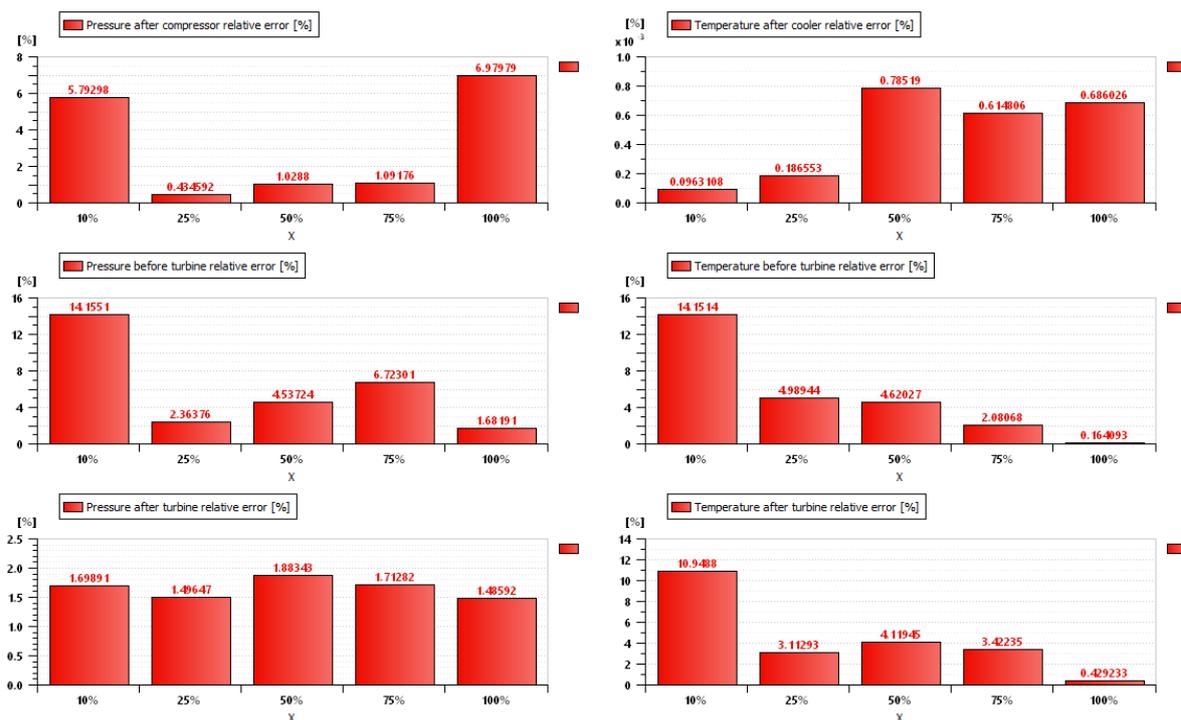


Figura 9.36. Errores relativos. Calibración. Presiones y temperaturas. Modelo 'BMF'.

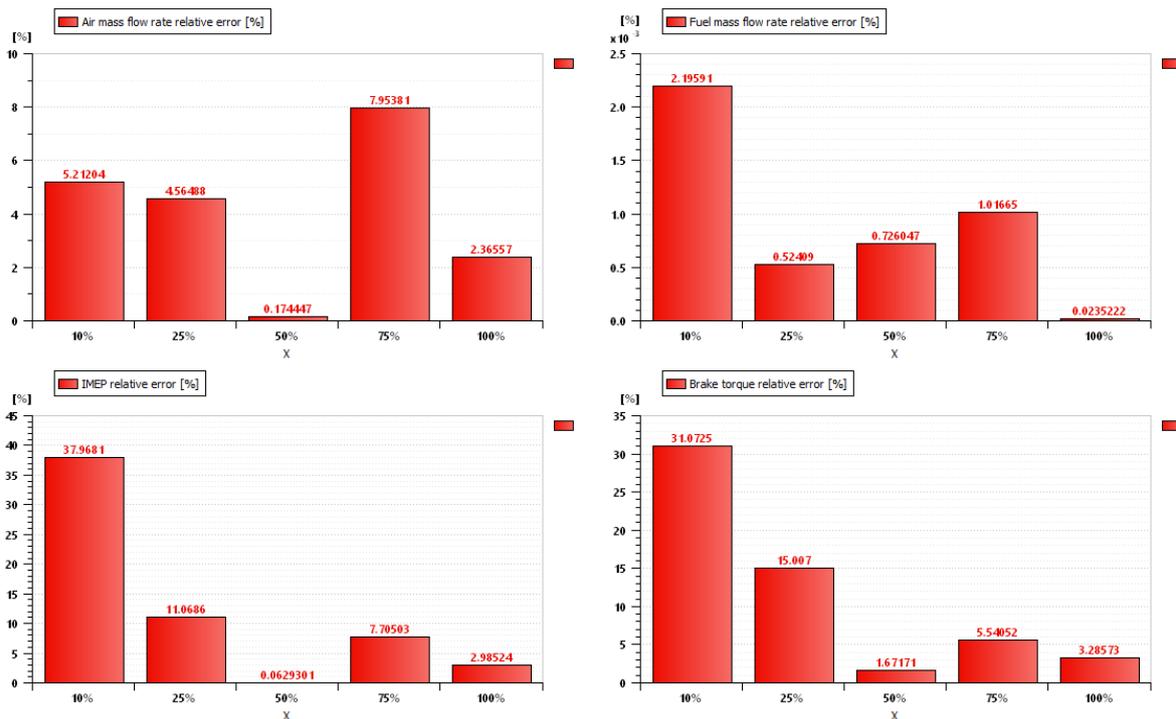


Figura 9.37. Errores relativos. Calibración. Gastos, PMI y par efectivo. Modelo 'BMF'.

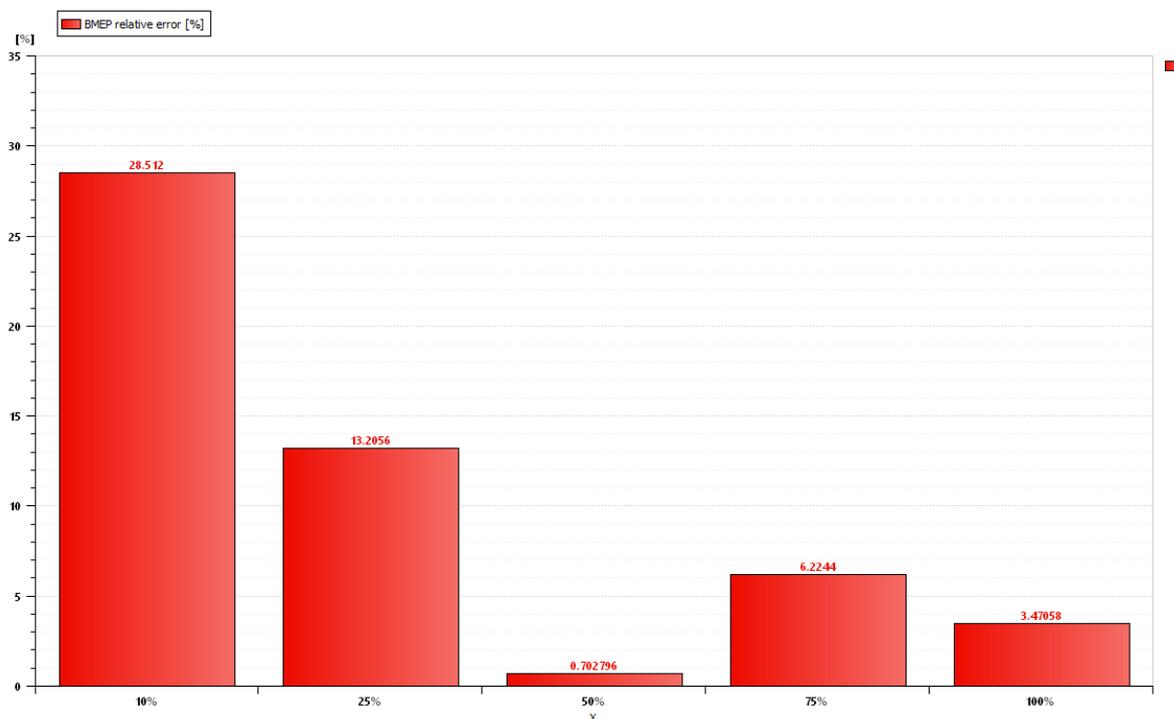


Figura 9.38. Errores relativos. Calibración. Presión media efectiva. Modelo 'BMF'.

9.4. Tablas de resultados de la validación de ambos modelos

En este apartado se recogen las tablas de errores relativos correspondientes a los puntos de validación.

110% de carga	Valor simulado	Valor experimental	Error relativo (%)
Presión después del compresor (bar)	2,76	2,77	0,43
Presión antes de la turbina (bar)	2,12	2,05	3,18
Presión después de la turbina (bar)	1,05	1,02	3,09
Temperatura antes de la turbina (K)	884,00	920,00	3,89
Temperatura después de la turbina (K)	778,00	829,00	6,16
Gasto másico de aire (kg/h)	6115,00	6119,00	0,06
Presión media indicada (bar)	20,70	20,30	1,97
Presión media efectiva (bar)	19,17	18,54	3,43
Par efectivo (Nm)	7243,00	7002,00	3,44

Tabla 9.2. Valores simulados vs experimentales. Carga del 110%. Modelo 1 de valores medios.

100% de carga	Valor simulado	Valor experimental	Error relativo (%)
Presión después del compresor (bar)	2,53	2,53	0,16
Presión antes de la turbina (bar)	1,99	2,00	0,29
Presión después de la turbina (bar)	1,04	1,02	2,90
Temperatura antes de la turbina (K)	877,90	898,00	2,24
Temperatura después de la turbina (K)	782,65	817,00	4,20
Gasto másico de aire (kg/h)	5645,08	5642,00	0,05
Presión media indicada (bar)	18,95	18,93	0,11
Presión media efectiva (bar)	17,00	16,85	0,89
Par efectivo (Nm)	6423,06	6366,00	0,90

Tabla 9.3. Valores simulados vs experimentales. Carga del 100%. Modelo 1 de valores medios.

90% de carga	Valor simulado	Valor experimental	Error relativo (%)
Presión después del compresor (bar)	2,26	2,29	1,29
Presión antes de la turbina (bar)	1,85	1,95	4,96
Presión después de la turbina (bar)	1,04	1,01	2,65
Temperatura antes de la turbina (K)	861,00	876,00	1,75
Temperatura después de la turbina (K)	779,00	805,00	3,30
Gasto másico de aire (kg/h)	5109,00	5165,00	1,08
Presión media indicada (bar)	17,70	17,60	0,49
Presión media efectiva (bar)	15,39	15,17	1,48
Par efectivo (Nm)	5815,00	5730,00	1,48

Tabla 9.4. Valores simulados vs experimentales. Carga del 90%. Modelo 1 de valores medios.

80% de carga	Valor simulado	Valor experimental	Error relativo (%)
Presión después del compresor (bar)	2,04	2,05	0,42
Presión antes de la turbina (bar)	1,73	1,90	8,73
Presión después de la turbina (bar)	1,03	1,01	2,53
Temperatura antes de la turbina (K)	835,00	855,00	2,28
Temperatura después de la turbina (K)	765,00	794,00	3,57
Gasto másico de aire (kg/h)	4673,00	4688,00	0,34
Presión media indicada (bar)	16,30	16,20	0,38
Presión media efectiva (bar)	13,67	13,48	1,39
Par efectivo (Nm)	5164,00	5093,00	1,38

Tabla 9.5. Valores simulados vs experimentales. Carga del 80%. Modelo 1 de valores medios.

70% de carga	Valor simulado	Valor experimental	Error relativo (%)
Presión después del compresor (bar)	1,83	1,84	0,70
Presión antes de la turbina (bar)	1,62	1,77	8,48
Presión después de la turbina (bar)	1,03	1,01	2,42
Temperatura antes de la turbina (K)	815,00	832,00	2,06
Temperatura después de la turbina (K)	757,00	778,00	2,79
Gasto másico de aire (kg/h)	4240,00	4264,00	0,56
Presión media indicada (bar)	14,40	14,40	0,22
Presión media efectiva (bar)	11,87	11,80	0,62
Par efectivo (Nm)	4484,00	4457,00	0,61

Tabla 9.6. Valores simulados vs experimentales. Carga del 70%. Modelo 1 de valores medios.

60% de carga	Valor simulado	Valor experimental	Error relativo (%)
Presión después del compresor (bar)	1,64	1,67	1,35
Presión antes de la turbina (bar)	1,53	1,57	2,96
Presión después de la turbina (bar)	1,03	1,00	2,34
Temperatura antes de la turbina (K)	793,00	807,00	1,75
Temperatura después de la turbina (K)	746,00	759,00	1,69
Gasto másico de aire (kg/h)	3850,00	3891,00	1,07
Presión media indicada (bar)	12,10	12,10	0,48
Presión media efectiva (bar)	10,15	10,11	0,37
Par efectivo (Nm)	3834,00	3820,00	0,37

Tabla 9.7. Valores simulados vs experimentales. Carga del 60%. Modelo 1 de valores medios.

50% de carga	Valor simulado	Valor experimental	Error relativo (%)
Presión después del compresor (bar)	1,46	1,49	1,97
Presión antes de la turbina (bar)	1,43	1,38	4,03
Presión después de la turbina (bar)	1,02	1,00	2,28
Temperatura antes de la turbina (K)	769,31	783,00	1,75
Temperatura después de la turbina (K)	733,67	740,00	0,86
Gasto másico de aire (kg/h)	3427,40	3519,00	2,60
Presión media indicada (bar)	9,85	9,84	0,11
Presión media efectiva (bar)	8,50	8,43	0,86
Par efectivo (Nm)	3210,56	3183,00	0,87

Tabla 9.8. Valores simulados vs experimentales. Carga del 50%. Modelo 1 de valores medios.

40% de carga	Valor simulado	Valor experimental	Error relativo (%)
Presión después del compresor (bar)	1,33	1,38	3,33
Presión antes de la turbina (bar)	1,35	1,32	1,85
Presión después de la turbina (bar)	1,02	1,00	1,99
Temperatura antes de la turbina (K)	739,00	743,00	0,54
Temperatura después de la turbina (K)	712,00	704,00	1,11
Gasto másico de aire (kg/h)	3062,00	3205,00	4,45
Presión media indicada (bar)	7,84	7,98	1,70
Presión media efectiva (bar)	6,67	6,74	1,05
Par efectivo (Nm)	2520,00	2547,00	1,05

Tabla 9.9. Valores simulados vs experimentales. Carga del 40%. Modelo 1 de valores medios.

30% de carga	Valor simulado	Valor experimental	Error relativo (%)
Presión después del compresor (bar)	1,25	1,27	1,40
Presión antes de la turbina (bar)	1,29	1,27	1,25
Presión después de la turbina (bar)	1,02	1,00	1,79
Temperatura antes de la turbina (K)	690,00	704,00	1,92
Temperatura después de la turbina (K)	669,00	669,00	0,02
Gasto másico de aire (kg/h)	2833,00	2890,00	1,99
Presión media indicada (bar)	6,02	6,11	1,46
Presión media efectiva (bar)	5,02	5,06	0,81
Par efectivo (Nm)	1894,00	1910,00	0,83

Tabla 9.10. Valores simulados vs experimentales. Carga del 30%. Modelo 1 de valores medios.

20% de carga	Valor simulado	Valor experimental	Error relativo (%)
Presión después del compresor (bar)	1,20	1,17	2,89
Presión antes de la turbina (bar)	1,25	1,18	5,67
Presión después de la turbina (bar)	1,02	1,00	1,77
Temperatura antes de la turbina (K)	632,00	652,00	3,09
Temperatura después de la turbina (K)	613,00	617,00	0,65
Gasto másico de aire (kg/h)	2712,00	2663,00	1,85
Presión media indicada (bar)	3,81	4,02	5,10
Presión media efectiva (bar)	3,25	3,37	3,73
Par efectivo (Nm)	1226,00	1274,00	3,76

Tabla 9.11. Valores simulados vs experimentales. Carga del 20%. Modelo 1 de valores medios.

10% de carga	Valor simulado	Valor experimental	Error relativo (%)
Presión después del compresor (bar)	1,17	1,09	7,72
Presión antes de la turbina (bar)	1,22	1,05	15,82
Presión después de la turbina (bar)	1,02	1,00	1,91
Temperatura antes de la turbina (K)	561,04	587,00	4,42
Temperatura después de la turbina (K)	544,94	550,00	0,92
Gasto másico de aire (kg/h)	2647,69	2522,00	4,98
Presión media indicada (bar)	1,70	1,70	0,11
Presión media efectiva (bar)	1,69	1,69	0,46
Par efectivo (Nm)	639,58	637,00	0,40

Tabla 9.12. Valores simulados vs experimentales. Carga del 10%. Modelo 1 de valores medios.

110% de carga	Valor simulado	Valor experimental	Error relativo (%)
Presión después del compresor (bar)	2,72	2,77	1,99
Presión antes de la turbina (bar)	2,09	2,05	1,81
Presión después de la turbina (bar)	1,05	1,02	2,96
Temperatura antes de la turbina (K)	879,40	920,00	4,37
Temperatura después de la turbina (K)	775,10	829,00	6,45
Gasto másico de aire (kg/h)	6019,00	6119,00	1,63
Presión media indicada (bar)	20,17	20,30	0,53
Presión media efectiva (bar)	18,54	18,54	0,01
Gasto másico de combustible (kg/h)	270,40	277,20	2,45

Tabla 9.13. Valores simulados vs experimentales. Carga del 110%. Modelo 2 de valores medios.

100% de carga	Valor simulado	Valor experimental	Error relativo (%)
Presión después del compresor (bar)	2,51	2,53	0,63
Presión antes de la turbina (bar)	1,98	2,00	0,89
Presión después de la turbina (bar)	1,04	1,02	2,85
Temperatura antes de la turbina (K)	875,49	898,00	2,51
Temperatura después de la turbina (K)	781,15	817,00	4,39
Gasto másico de aire (kg/h)	5604,59	5642,00	0,66
Presión media indicada (bar)	18,83	18,93	0,53
Presión media efectiva (bar)	16,85	16,85	0,00
Gasto másico de combustible (kg/h)	251,76	254,00	0,88

Tabla 9.14. Valores simulados vs experimentales. Carga del 100%. Modelo 2 de valores medios.

90% de carga	Valor simulado	Valor experimental	Error relativo (%)
Presión después del compresor (bar)	2,24	2,29	2,40
Presión antes de la turbina (bar)	1,84	1,95	5,74
Presión después de la turbina (bar)	1,04	1,01	2,59
Temperatura antes de la turbina (K)	857,30	876,00	2,18
Temperatura después de la turbina (K)	776,40	805,00	3,60
Gasto másico de aire (kg/h)	5057,00	5165,00	2,10
Presión media indicada (bar)	17,49	17,60	0,53
Presión media efectiva (bar)	15,17	15,17	1,34
Gasto másico de combustible (kg/h)	227,70	230,80	1,35

Tabla 9.15. Valores simulados vs experimentales. Carga del 90%. Modelo 2 de valores medios.

80% de carga	Valor simulado	Valor experimental	Error relativo (%)
Presión después del compresor (bar)	2,02	2,05	1,33
Presión antes de la turbina (bar)	1,72	1,90	9,31
Presión después de la turbina (bar)	1,03	1,01	2,48
Temperatura antes de la turbina (K)	832,10	855,00	2,65
Temperatura después de la turbina (K)	763,20	794,00	3,85
Gasto másico de aire (kg/h)	4633,00	4688,00	1,18
Presión media indicada (bar)	16,15	16,20	0,53
Presión media efectiva (bar)	13,48	13,48	0,00
Gasto másico de combustible (kg/h)	205,30	207,70	1,16

Tabla 9.16. Valores simulados vs experimentales. Carga del 80%. Modelo 2 de valores medios.

70% de carga	Valor simulado	Valor experimental	Error relativo (%)
Presión después del compresor (bar)	1,82	1,84	0,98
Presión antes de la turbina (bar)	1,62	1,77	8,65
Presión después de la turbina (bar)	1,03	1,01	2,41
Temperatura antes de la turbina (K)	813,20	832,00	2,23
Temperatura después de la turbina (K)	755,50	778,00	2,94
Gasto másico de aire (kg/h)	4230,00	4264,00	0,79
Presión media indicada (bar)	14,29	14,40	0,90
Presión media efectiva (bar)	11,80	11,80	0,01
Gasto másico de combustible (kg/h)	182,10	183,20	0,58

Tabla 9.17. Valores simulados vs experimentales. Carga del 70%. Modelo 2 de valores medios.

60% de carga	Valor simulado	Valor experimental	Error relativo (%)
Presión después del compresor (bar)	1,64	1,67	1,50
Presión antes de la turbina (bar)	1,53	1,57	3,06
Presión después de la turbina (bar)	1,03	1,00	2,34
Temperatura antes de la turbina (K)	792,30	807,00	1,87
Temperatura después de la turbina (K)	745,60	759,00	1,79
Gasto másico de aire (kg/h)	3845,00	3891,00	1,19
Presión media indicada (bar)	12,02	12,10	0,89
Presión media efectiva (bar)	10,11	10,11	0,00
Gasto másico de combustible (kg/h)	156,80	157,40	0,37

Tabla 9.18. Valores simulados vs experimentales. Carga del 60%. Modelo 2 de valores medios.

50% de carga	Valor simulado	Valor experimental	Error relativo (%)
Presión después del compresor (bar)	1,46	1,49	2,23
Presión antes de la turbina (bar)	1,43	1,38	3,83
Presión después de la turbina (bar)	1,02	1,00	2,27
Temperatura antes de la turbina (K)	767,93	783,00	1,92
Temperatura después de la turbina (K)	732,53	740,00	1,01
Gasto másico de aire (kg/h)	3416,02	3519,00	2,93
Presión media indicada (bar)	9,77	9,84	0,73
Presión media efectiva (bar)	8,43	8,43	0,01
Gasto másico de combustible (kg/h)	130,84	131,60	0,58

Tabla 9.19. Valores simulados vs experimentales. Carga del 50%. Modelo 2 de valores medios.

40% de carga	Valor simulado	Valor experimental	Error relativo (%)
Presión después del compresor (bar)	1,34	1,38	3,07
Presión antes de la turbina (bar)	1,35	1,32	2,04
Presión después de la turbina (bar)	1,02	1,00	2,00
Temperatura antes de la turbina (K)	741,20	743,00	0,30
Temperatura después de la turbina (K)	713,70	704,00	1,32
Gasto másico de aire (kg/h)	3072,00	3205,00	4,13
Presión media indicada (bar)	7,92	7,98	0,72
Presión media efectiva (bar)	6,74	6,74	0,01
Gasto másico de combustible (kg/h)	112,90	112,10	0,70

Tabla 9.20. Valores simulados vs experimentales. Carga del 40%. Modelo 2 de valores medios.

30% de carga	Valor simulado	Valor experimental	Error relativo (%)
Presión después del compresor (bar)	1,25	1,27	1,27
Presión antes de la turbina (bar)	1,29	1,27	1,36
Presión después de la turbina (bar)	1,02	1,00	1,79
Temperatura antes de la turbina (K)	691,80	704,00	1,70
Temperatura después de la turbina (K)	670,30	669,00	0,22
Gasto másico de aire (kg/h)	2837,00	2890,00	1,83
Presión media indicada (bar)	6,07	6,11	0,71
Presión media efectiva (bar)	5,06	5,06	0,02
Gasto másico de combustible (kg/h)	93,16	92,64	0,56

Tabla 9.21. Valores simulados vs experimentales. Carga del 30%. Modelo 2 de valores medios.

20% de carga	Valor simulado	Valor experimental	Error relativo (%)
Presión después del compresor (bar)	1,21	1,17	3,16
Presión antes de la turbina (bar)	1,25	1,18	5,86
Presión después de la turbina (bar)	1,02	1,00	1,77
Temperatura antes de la turbina (K)	635,90	652,00	2,43
Temperatura después de la turbina (K)	617,40	617,00	0,02
Gasto másico de aire (kg/h)	2716,00	2663,00	2,01
Presión media indicada (bar)	3,99	4,02	0,81
Presión media efectiva (bar)	3,37	3,37	0,03
Gasto másico de combustible (kg/h)	73,15	71,63	2,12

Tabla 9.22. Valores simulados vs experimentales. Carga del 20%. Modelo 2 de valores medios.

10% de carga	Valor simulado	Valor experimental	Error relativo (%)
Presión después del compresor (bar)	1,17	1,09	7,66
Presión antes de la turbina (bar)	1,22	1,05	15,77
Presión después de la turbina (bar)	1,02	1,00	1,90
Temperatura antes de la turbina (K)	559,96	587,00	4,61
Temperatura después de la turbina (K)	543,92	550,00	1,11
Gasto másico de aire (kg/h)	2646,70	2522,00	4,94
Presión media indicada (bar)	1,69	1,70	0,44
Presión media efectiva (bar)	1,69	1,69	0,06
Gasto másico de combustible (kg/h)	48,83	49,10	0,55

Tabla 9.23. Valores simulados vs experimentales. Carga del 10%. Modelo 2 de valores medios.

110% de carga	Valor simulado	Valor experimental	Error relativo (%)
Presión después del compresor (bar)	2,49	2,77	10,28
Presión antes de la turbina (bar)	2,13	2,05	3,76
Presión después de la turbina (bar)	1,03	1,02	1,38
Temperatura antes de la turbina (K)	916,20	920,00	0,37
Temperatura después de la turbina (K)	824,40	829,00	0,51
Gasto másico de aire (kg/h)	6087,00	6119,00	0,52
Presión media indicada (bar)	19,92	20,30	1,75
Presión media efectiva (bar)	18,23	18,54	1,68
Par efectivo (Nm)	6803,00	7002,00	2,85

Tabla 9.24. Valores simulados vs experimentales. Carga del 110%. Modelo 'Chmela'.

100% de carga	Valor simulado	Valor experimental	Error relativo (%)
Presión después del compresor (bar)	2,32	2,53	8,38
Presión antes de la turbina (bar)	2,01	2,00	0,42
Presión después de la turbina (bar)	1,03	1,02	1,43
Temperatura antes de la turbina (K)	893,39	898,00	0,51
Temperatura después de la turbina (K)	809,25	817,00	0,95
Gasto másico de aire (kg/h)	5687,91	5642,00	0,81
Presión media indicada (bar)	18,27	18,93	3,46
Presión media efectiva (bar)	16,15	16,85	4,15
Par efectivo (Nm)	6046,64	6366,00	5,01

Tabla 9.25. Valores simulados vs experimentales. Carga del 100%. Modelo 'Chmela'.

90% de carga	Valor simulado	Valor experimental	Error relativo (%)
Presión después del compresor (bar)	2,16	2,29	5,50
Presión antes de la turbina (bar)	1,90	1,95	2,64
Presión después de la turbina (bar)	1,03	1,01	1,52
Temperatura antes de la turbina (K)	867,60	876,00	1,01
Temperatura después de la turbina (K)	791,10	805,00	1,78
Gasto másico de aire (kg/h)	5319,00	5165,00	2,98
Presión media indicada (bar)	16,66	17,60	5,24
Presión media efectiva (bar)	14,13	15,17	6,86
Par efectivo (Nm)	5304,00	5730,00	7,42

Tabla 9.26. Valores simulados vs experimentales. Carga del 90%. Modelo 'Chmela'.

80% de carga	Valor simulado	Valor experimental	Error relativo (%)
Presión después del compresor (bar)	2,02	2,05	1,47
Presión antes de la turbina (bar)	1,80	1,90	5,46
Presión después de la turbina (bar)	1,03	1,01	1,64
Temperatura antes de la turbina (K)	839,20	855,00	1,82
Temperatura después de la turbina (K)	770,20	794,00	2,97
Gasto másico de aire (kg/h)	4972,00	4688,00	6,05
Presión media indicada (bar)	15,08	16,20	7,11
Presión media efectiva (bar)	12,39	13,48	8,12
Par efectivo (Nm)	4661,00	5093,00	8,48

Tabla 9.27. Valores simulados vs experimentales. Carga del 80%. Modelo 'Chmela'.

70% de carga	Valor simulado	Valor experimental	Error relativo (%)
Presión después del compresor (bar)	1,83	1,84	0,93
Presión antes de la turbina (bar)	1,66	1,77	6,24
Presión después de la turbina (bar)	1,02	1,01	1,69
Temperatura antes de la turbina (K)	809,00	832,00	2,74
Temperatura después de la turbina (K)	750,70	778,00	3,56
Gasto másico de aire (kg/h)	4468,00	4264,00	4,79
Presión media indicada (bar)	13,44	14,40	6,80
Presión media efectiva (bar)	11,17	11,80	5,36
Par efectivo (Nm)	4202,00	4457,00	5,71

Tabla 9.28. Valores simulados vs experimentales. Carga del 70%. Modelo 'Chmela'.

60% de carga	Valor simulado	Valor experimental	Error relativo (%)
Presión después del compresor (bar)	1,62	1,67	2,70
Presión antes de la turbina (bar)	1,53	1,57	3,01
Presión después de la turbina (bar)	1,02	1,00	1,75
Temperatura antes de la turbina (K)	769,90	807,00	4,64
Temperatura después de la turbina (K)	723,90	759,00	4,65
Gasto másico de aire (kg/h)	3921,00	3891,00	0,76
Presión media indicada (bar)	11,68	12,10	3,73
Presión media efectiva (bar)	9,86	10,11	2,53
Par efectivo (Nm)	3710,00	3820,00	2,87

Tabla 9.29. Valores simulados vs experimentales. Carga del 60%. Modelo 'Chmela'.

50% de carga	Valor simulado	Valor experimental	Error relativo (%)
Presión después del compresor (bar)	1,43	1,49	3,72
Presión antes de la turbina (bar)	1,41	1,38	2,58
Presión después de la turbina (bar)	1,02	1,00	1,85
Temperatura antes de la turbina (K)	728,19	783,00	7,00
Temperatura después de la turbina (K)	693,71	740,00	6,26
Gasto másico de aire (kg/h)	3421,83	3519,00	2,76
Presión media indicada (bar)	9,84	9,84	0,01
Presión media efectiva (bar)	8,49	8,43	0,75
Par efectivo (Nm)	3194,95	3183,00	0,39

Tabla 9.30. Valores simulados vs experimentales. Carga del 50%. Modelo 'Chmela'.

40% de carga	Valor simulado	Valor experimental	Error relativo (%)
Presión después del compresor (bar)	1,30	1,38	5,76
Presión antes de la turbina (bar)	1,33	1,32	0,56
Presión después de la turbina (bar)	1,02	1,00	1,68
Temperatura antes de la turbina (K)	690,60	743,00	7,10
Temperatura después de la turbina (K)	665,20	704,00	5,56
Gasto másico de aire (kg/h)	3074,00	3205,00	4,08
Presión media indicada (bar)	8,27	7,98	3,63
Presión media efectiva (bar)	7,06	6,74	4,69
Par efectivo (Nm)	2661,00	2547,00	4,49

Tabla 9.31. Valores simulados vs experimentales. Carga del 40%. Modelo 'Chmela'.

30% de carga	Valor simulado	Valor experimental	Error relativo (%)
Presión después del compresor (bar)	1,22	1,27	3,35
Presión antes de la turbina (bar)	1,28	1,27	0,54
Presión después de la turbina (bar)	1,02	1,00	1,54
Temperatura antes de la turbina (K)	644,90	704,00	8,37
Temperatura después de la turbina (K)	625,10	669,00	6,53
Gasto másico de aire (kg/h)	2876,00	2890,00	0,49
Presión media indicada (bar)	6,84	6,11	11,93
Presión media efectiva (bar)	5,76	5,06	13,93
Par efectivo (Nm)	2170,00	1910,00	13,59

Tabla 9.32. Valores simulados vs experimentales. Carga del 30%. Modelo 'Chmela'.

20% de carga	Valor simulado	Valor experimental	Error relativo (%)
Presión después del compresor (bar)	1,24	1,17	5,82
Presión antes de la turbina (bar)	1,29	1,18	8,75
Presión después de la turbina (bar)	1,02	1,00	1,61
Temperatura antes de la turbina (K)	646,40	652,00	0,81
Temperatura después de la turbina (K)	625,30	617,00	1,30
Gasto másico de aire (kg/h)	2911,00	2663,00	9,34
Presión media indicada (bar)	6,47	4,02	60,90
Presión media efectiva (bar)	5,42	3,37	60,82
Par efectivo (Nm)	2038,00	1274,00	60,04

Tabla 9.33. Valores simulados vs experimentales. Carga del 20%. Modelo 'Chmela'.

10% de carga	Valor simulado	Valor experimental	Error relativo (%)
Presión después del compresor (bar)	1,20	1,09	10,54
Presión antes de la turbina (bar)	1,24	1,05	17,87
Presión después de la turbina (bar)	1,02	1,00	1,75
Temperatura antes de la turbina (K)	577,25	587,00	1,66
Temperatura después de la turbina (K)	558,45	550,00	1,54
Gasto másico de aire (kg/h)	2770,85	2522,00	9,87
Presión media indicada (bar)	1,80	1,70	5,80
Presión media efectiva (bar)	1,76	1,69	4,68
Par efectivo (Nm)	631,84	637,00	0,77

Tabla 9.34. Valores simulados vs experimentales. Carga del 10%. Modelo 'Chmela'.

9.5. Esquemas de los modelos físico-fenomenológicos ampliados

Por último, debido a que los esquemas de las Figura 6.1 y Figura 6.21 son pequeños, se van a mostrar ampliados en este apartado.

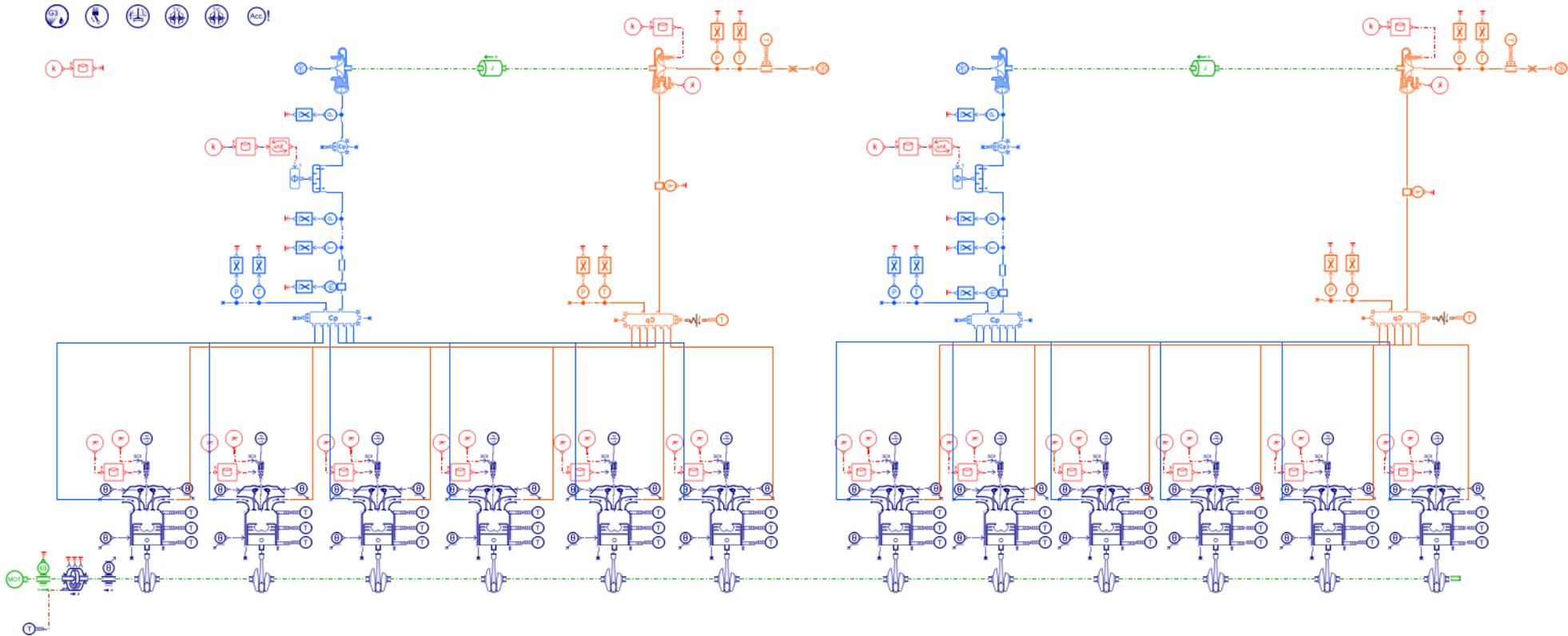


Figura 9.39. Modelo físico del motor generador con cámara de combustión 'Chmela'. Ampliada.

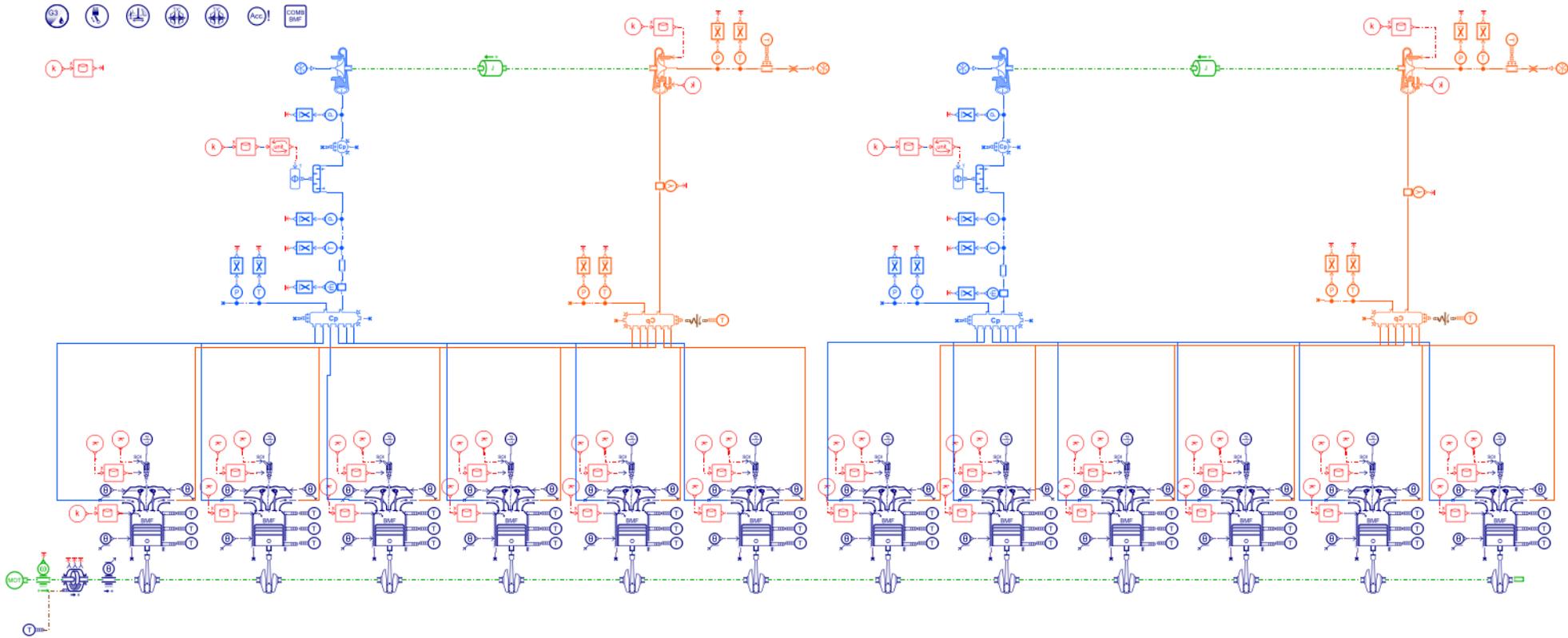


Figura 9.40. Modelo físico del motor generador con cámara de combustión 'BMF'. Ampliada.

