

Organiza:



V ENCUESTRO Ingeniería de la Energía

Patrocinadores:



Asociación Nacional
de Productores
de Energía Renovable



Cátedra
Takasago Industria y
Mantenimiento 4.0



CÁTEDRA DEL AGUA
Y LA SOSTENIBILIDAD



ACTAS DEL CONGRESO

V ENCUESTRO DE INGENIERÍA DE LA ENERGÍA DEL CAMPUS MARE NOSTRUM



Editores:

Mariano Alarcón García (Editor)

Manuel Seco Nicolás (Co-editor)

© Mariano Alarcón García

ISBN: 978-84-09-29971-3

Dirección web de congreso: V-EIECMN

Universidad de Murcia

Campus Mare Nostrum

Del 23 al 26 de
noviembre de 2020

Quinta edición del Encuentro orientado a servir de espacio de reunión para tratar las distintas facetas de las aplicaciones de la Energía en los ámbitos académico y profesional, así como de instituciones y empresas en el que compartir trabajos, se muestren avances creando un espacio virtual de debate y reflexión en el que plantear soluciones a los importantes retos que la Sociedad tiene en el ámbito de la Energía, englobado en el ODS-7, *Energía asequible y no contaminante*, desde una vocación tecnológica pero a la vez con sensibilidad social.





DESARROLLO DE UN MODELO DE VALORES MEDIOS Y DE UN MODELO FÍSICO DE UN MOTOR DIÉSEL INDUSTRIAL CON SIMCENTER AMESIM®

Javier Martínez Escondrillas ^(1*); Daniel Albaladejo Hernández ⁽¹⁾

Francisco Vera García ⁽²⁾; José Hernández Grau ⁽²⁾

jmartinezescondrillas@hotmail.com*

⁽¹⁾ Navantia S.A., Departamento de Ingeniería; Sección de Diagnóstico e I+D

⁽²⁾ Universidad Politécnica de Cartagena, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial, Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos

RESUMEN

En el presente trabajo se recoge el modelado de un motor diésel rápido de aplicación como generador eléctrico. Para ello se utiliza la herramienta de Siemens Simcenter Amesim. Dicho modelado se realiza de dos formas diferentes. La primera forma, más simple, se trata de un modelo de valores medios, mientras que la segunda es un modelo físico-fenomenológico que incorpora mayor detalle geométrico del motor. Ambos modelos se calibran utilizando cinco puntos de operación medidos en banco de ensayo y se validan con una serie de puntos distintos, asegurando de esta forma la bonanza del modelado. Por la forma en que se ha modelado el motor, ambos modelos permiten predecir el comportamiento de este en todo su rango de funcionamiento. El modelado de motores ha adquirido en los últimos años una importancia muy grande, pues permite llevar a cabo un mantenimiento predictivo de los mismos, así como realizar diversos estudios que bien serían imposibles de realizar en banco o resultarían extremadamente costosos. Este trabajo recoge una de las múltiples formas de afrontar un modelado, utilizando una herramienta comercial.

Palabras clave: Motor de combustión interna alternativa (MCIA), modelo de valores medios (MVEM), modelo físico-fenomenológico.



1. Introducción

El presente trabajo 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. Se trata de un Trabajo Fin de Máster del Máster Universitario en Ingeniería Industrial. Dicho trabajo ha partido de estudios previos sobre el mismo motor utilizando programas informáticos distintos al utilizado aquí. De esta forma se pueden comparar los resultados obtenidos con diferente software.

El modelado del motor 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.

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

1.1. Importancia del modelado en diagnosis

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. **Valor educativo.** Con el modelado de sistemas complejos, como un motor, se deben aclarar conceptos y entender los fundamentos básicos de los principios de funcionamiento. Esto permite al ingeniero conocer aún mejor los procesos termodinámicos, fluido mecánicos, de transferencia de calor o de la combustión. **Apoyo a la experimentación.** La experimentación es clave para el modelado correcto. Sin embargo, en muchas ocasiones requiere grandes inversiones de dinero, mano de obra y material. El uso correcto de los modelos permite ser eficiente y minimizar experimentos innecesarios, obteniendo mejor información de los experimentos clave de los sistemas. Un buen modelo permite disminuir el número de experimentos necesarios y reconducir otros por un camino donde se consigan obtener más y mejores resultados. La realimentación de los resultados experimentales con los modelos a su vez permite la mejora de conocimiento de los fenómenos físicos que tienen lugar en los sistemas complejos modelados. El hecho de poder simular el sistema bajo diversas condiciones diferentes es una gran ventaja de los modelos, permitiendo ahorrar en experimentación. **Estudio de parámetros.** Existen algunos parámetros que no se pueden estudiar mediante experimentación, bien porque es difícil acceder a ellos, porque el hecho de medirlos alteraría el valor o porque hay ocasiones en las que es imposible medirlos. La simulación permite estudiar estos parámetros y conocer cómo afectan al sistema. 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. **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. **Simulación 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.

2. Metodología del trabajo

El procedimiento seguido consta de tres etapas. 1. Se han realizado dos tipos de modelo con diferente grado de detalle (Modelo de valores medios y modelo físico-fenomenológico). 2. La calibración y validación de cada modelo. 3. Comparación de los resultados de ambos modelos.

La Figura 1 siguiente muestra el sistema a modelar.

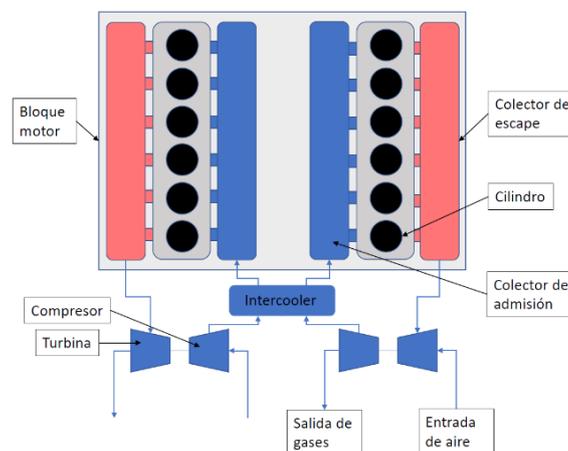


Figura 1: Sistema que se modela.

3. Resultados alcanzados

3.1. Modelo de valores medios

La característica más importante que tienen los modelos de valores medios (MVEM: Mean Value Engine Model) 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 todas las variables son constantes y no varían entre un rango de valores como sí ocurre en otro tipo de modelos.

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 como el del apartado siguiente.

El modelo realizado se descompone según los diferentes subsistemas del motor:

- Sistemas de admisión y de escape.

- Simulación del comportamiento de los cilindros mediante valores medios medidos.
- Sistema de inyección.
- Comportamiento de potencia al eje del motor.

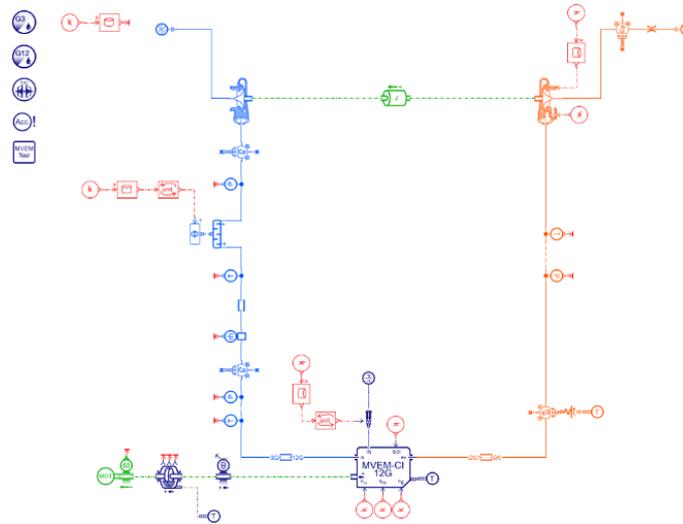


Figura 2: Modelo de valores medios.

En 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. 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.

Calibración y validación del modelo

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 enfriador de aire de carga (CAC).
- Temperatura antes de la turbina.
- Temperatura después de la turbina.
- Gasto másico de aire.
- Presión media indicada.
- Par efectivo.

Para realizar el 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.

Las Figuras 3-6 muestran los errores relativos de parámetros característicos del motor para los puntos de funcionamiento del 10% al 110% de carga, tomados como puntos de validación.



Figura 3: Errores relativos en las presiones.

Los valores en los errores relativos en puntos de baja carga son derivados del bajo valor del parámetro en esos puntos de funcionamiento y a posibles errores en la interpretación de las medidas tomadas en el caso de algunos parámetros.

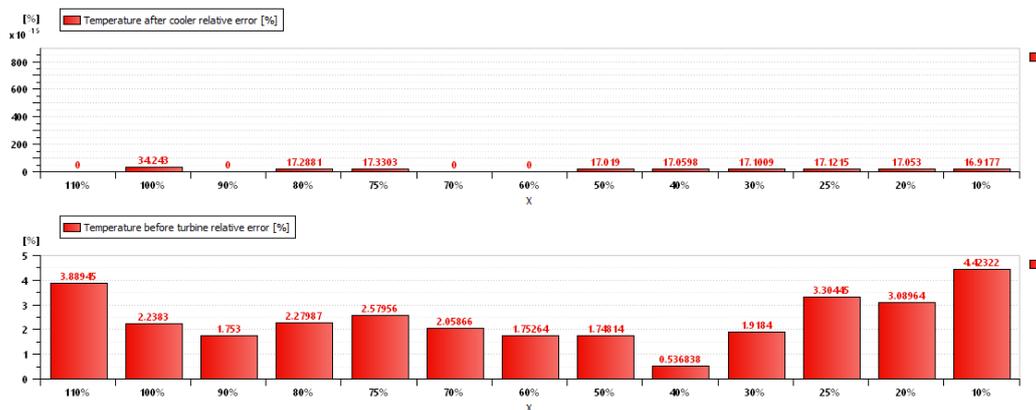


Figura 4: Errores relativos en las temperaturas.

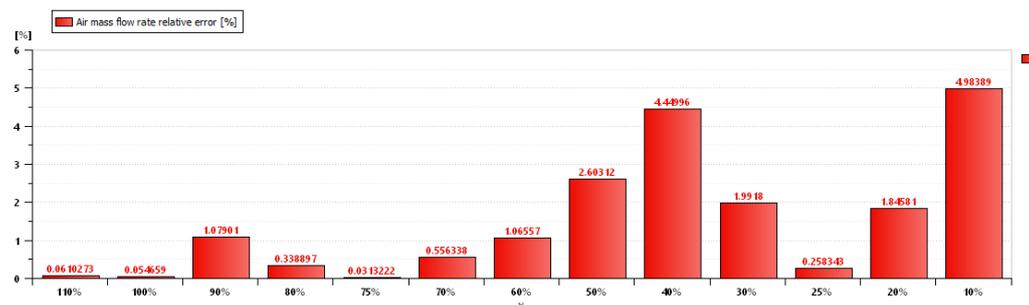


Figura 5: Errores relativos en el gasto másico de aire.

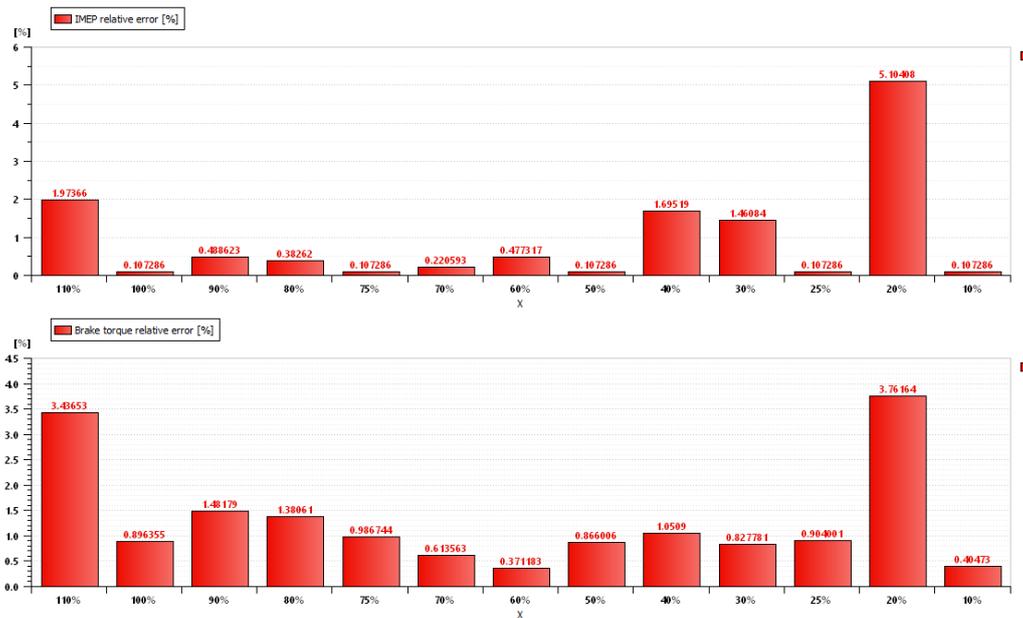


Figura 6: Errores relativos en presiones medias indicadas y par efectivo.

3.2. Modelo físico-fenomenológico

A diferencia del modelo anterior, los resultados obtenidos de la simulación de este tipo de modelos fenomenológicos no son constantes, sino que oscilan en función de los fenómenos físicos que se producen en cada sistema. 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. 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 tardar minutos e incluso horas dependiendo del nivel de detalle.

La Figura 7 muestra el modelo físico, donde 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.

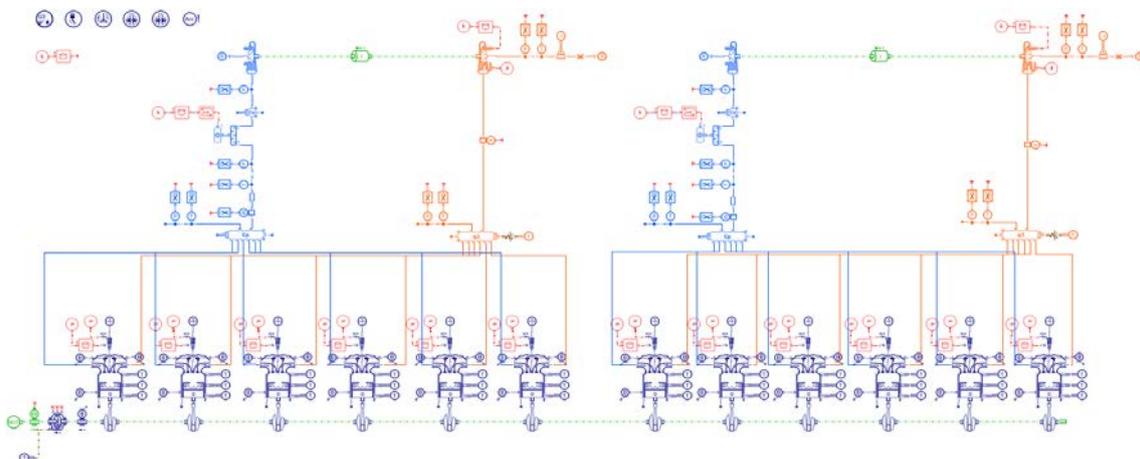


Figura 7: Modelo físico-fenomenológico.



Calibración y validación del modelo

El procedimiento es exactamente igual que para el modelo anterior. Para calibrar este modelo, aparte de los parámetros tocados en el modelo de valores medios, se ha introducido el comportamiento del parámetro de coeficiente de flujo a la salida de los cilindros del motor.

Las Figuras 8-11 muestran los errores relativos de los diferentes parámetros en los puntos de validación del motor.

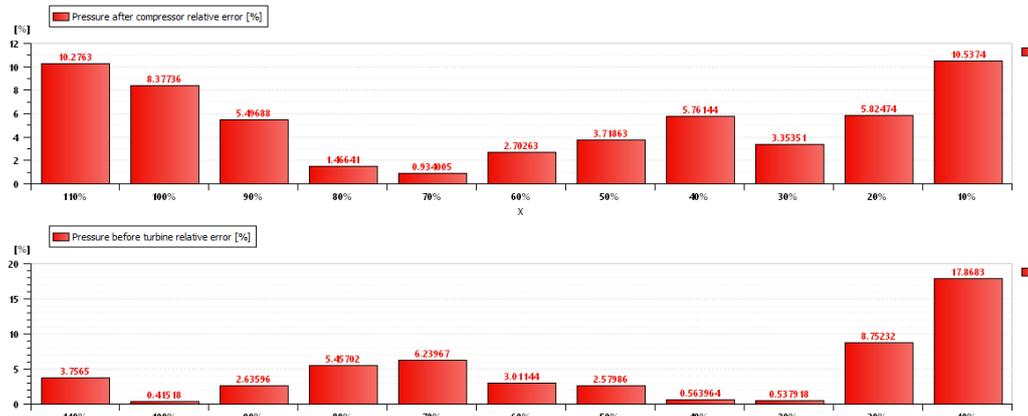


Figura 8: Errores relativos en las presiones.

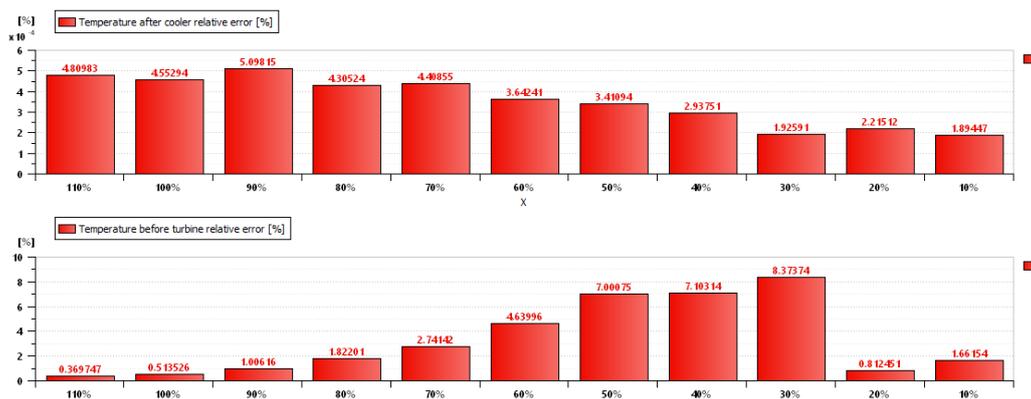


Figura 9: Errores relativos en las temperaturas.

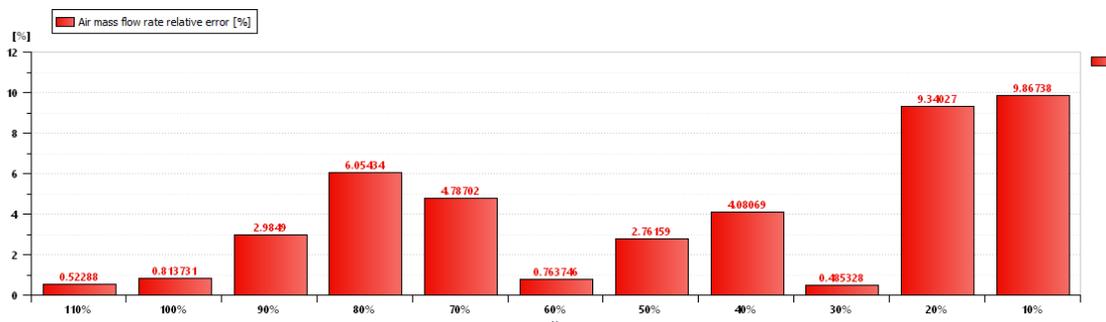


Figura 10: Errores relativos en el gasto másico de aire.

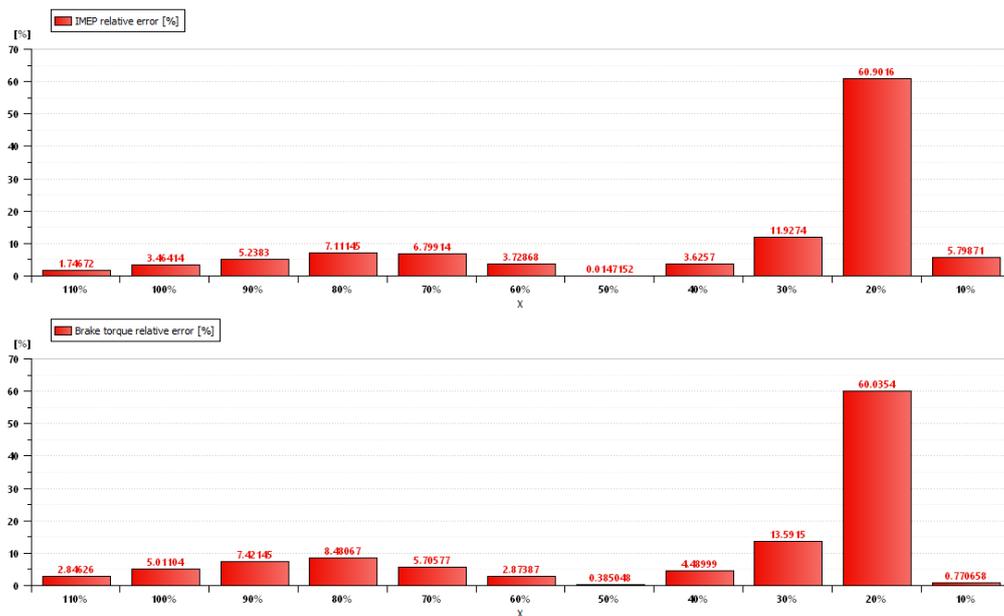


Figura 11: Errores relativos en presiones medias indicadas y par efectivo.

4. Conclusiones y consideraciones finales

En el presente trabajo se han conseguido realizar dos tipos de modelos (modelo de valores medios y modelo físico-fenomenológico) de un motor generador de alta cilindrada destinado a aplicaciones navales. Se ha podido comprobar que funcionan bien y que 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.

Los puntos críticos que se pueden extraer para la correcta realización del modelo son:

- Conocer bien qué componentes tiene la herramienta de modelado usada (Simcenter 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.

Además, se ha abierto un camino a la realización de varios trabajos futuros. 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. Este debería ser el siguiente objetivo que podría plantearse para seguir adquiriendo conocimientos en este ámbito.

El modelado es un mundo muy complejo y, a la vez, 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 modelados todos los motores que se fabrican. 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.



5. Agradecimientos

Especial agradecimiento a las siguientes personas:

- José Hernández Grau y Francisco Vera García, profesores de la Universidad Politécnica de Cartagena, por su apoyo.
- 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 en Cartagena.

6. Referencias

- [1] Colin R. Ferguson; Allan T. Kirkpatrick, *Internal combustion engines. Applied thermosciences. Third edition.* Wiley, 2016.
- [2] Francisco Payri González; Manuel Muñoz Torralbo. *Motores de combustión interna alternativos.* Universidad Politécnica de Valencia y Universidad Politécnica de Madrid, 2011 (Sección de publicaciones de la ETSII UPM)
- [3] Jerald A. Caton, *An introduction to thermodynamic cycle simulations for internal combustion engines.* Wiley, 2016.
- [4] José Hernández Grau. *Apuntes de asignaturas: Tecnología y Gestión Energéticas e Ingeniería Térmica.* Universidad Politécnica de Cartagena.
- [5] Siemens Industry Software. *Simcenter Amesim 2019.1. Tutorial guide.* Siemens, 2019.



Comités del V Congreso Encuentro de Ingeniería de la Energía del Campus Mare Nostrum

Comité organizador

Mariano Alarcón García (Presidente)
Manuel Seco Nicolás
Francisco del Cerro Velázquez
Juan Pedro Luna Abad
Alfonso P. Ramallo González
Fernando Lozano Rivas

Comité científico

Alfonso P. Ramallo González (UM)
Antonia Baeza Caracena (UM)
Antonio González Carpena (UM)
Antonio Urbina Yeregui (UPCT)
Antonio Viedma Robles (UPCT)
Félix Cesáreo Gómez de León Hijes (UM)
Fernando Illán Gómez (UPCT)
Francisco del Cerro Velázquez (UM)
Francisco Vera García (UPCT)
Gloria Alarcón García (UM)
Gloria Villora Cano (UM)
Joaquín Zueco Jordán (UPCT)
José A. Almendros Ibáñez (UCLM)
José Miguel Martínez Paz (UM)
José Ramón García Cascales (UPCT)
Juan Pedro Luna Abad (UPCT)
Juan Pedro Montávez Gómez (UM)
Manuel Lucas Miralles (UMH)
Manuel Seco Nicolás (UM)
Mariano Alarcón García (UM)
Miguel Ángel Zamora Izquierdo (UM)
Pedro J. Vicente Quiles (UMH)
Teresa Maria Navarro Caballero (UM)
Teresa Vicente Vicente (UM)

ley. Dirijase a CEDRO (Centro Español de Derechos Reprográficos, www.cedro.org) si necesita fotocopiar o escanear algún fragmento de esta obra.

**ACTAS DEL CONGRESO V ENCUENTRO DE
INGENIERÍA DE LA ENERGÍA DEL CAMPUS MARE
NOSTRUM**

**PROCEEDINGS OF THE V MEETING OF ENERGY ENGINEERING OF
CAMPUS MARE NOSTRUM**

Editor

Mariano Alarcón García

Co-editor

Manuel Seco Nicolás

Murcia 2021