

03-041

CFD and MEF analysis of the initial design of an EGR system

Vicente Labarta; Jesús Cuartero; Hugo Malón

Universidad de Zaragoza;

Pollution is an important issue and against which measures are constantly being taken to reduce or eliminate it. The engine exhaust gases have different contaminants that are eliminated in various stages. The NO_x generated by car engines are not eliminated by the catalyst, so they are sent to an exchanger that cools these gases and afterwards these gases are redirect to the combustion chamber.

This exchanger, called EGR (Exhaust Gas Recirculation), is the component to be analyzed in this study. In view of the objective, it is important to know the thermal maps in the EGR, because high temperatures are reached inside and it is possible that the structure is not able to withstand the stresses that appeared so evaluation studies are required.

This study show the numerical analysis carried out of an EGR, in order to obtain a correct design of these types of systems. Concretely, this study show the CFD analysis and FEM analysis carried out, which allow validated the initial design of an EGR system.

Keywords: EGR; CFD; FEM; analysis; initial design

Análisis CFD y MEF del diseño inicial de un sistema EGR

La contaminación es un tema importante y contra el cual se están tomando continuamente medidas para su reducción o eliminación. Los gases de combustión de los motores tienen diferentes contaminantes que son eliminados en distintas etapas. Los niveles de NO_x producidos por los motores de los automóviles no son eliminados por el catalizador, por lo que son enviados a un intercambiador para enfriar estos gases y recircularlos de nuevo a la cámara de combustión.

Este intercambiador, denominado EGR (Exhaust Gas Recirculation), es el componente a analizar en este estudio. Debido a su finalidad, es importante conocer los mapas térmicos que hay en el EGR, ya que se alcanzan altas temperaturas en su interior y es posible que la estructura no sea capaz de resistir las tensiones que estas provocan, por lo que es necesario realizar un análisis de este.

En este estudio se muestra el trabajo realizado del análisis numérico del funcionamiento de un EGR, necesario para el correcto diseño de este tipo de sistemas. En concreto se muestra el cálculo CFD (para el intercambio térmico) y el cálculo FEM (para el análisis estructural) realizados, los cuales permiten validar el diseño inicial de un sistema EGR.

Palabras clave: EGR; CFD; FEM; análisis; diseño inicial

Correspondencia: Hugo Malón hml@unizar.es



Este obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional. <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

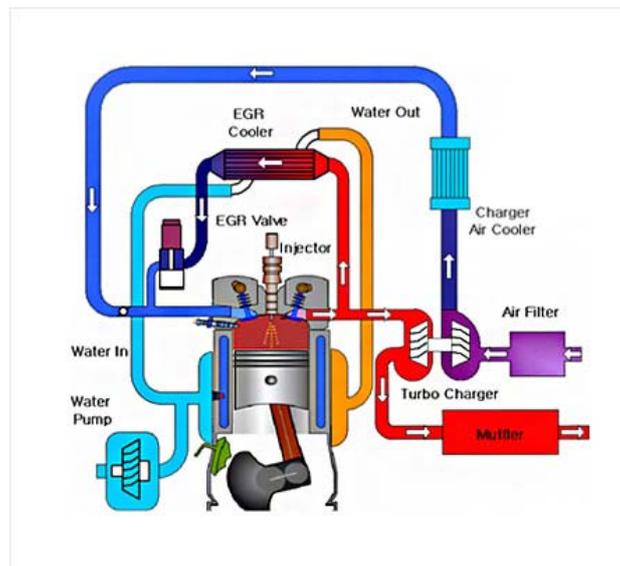
1. Introducción

Debido a la importancia de la conservación del medio ambiente y la reducción de la contaminación, se están diseñando y mejorando elementos que favorecen a esta disminución de contaminantes. En el sector de los automóviles, una pieza que favorece esta reducción de contaminantes se localiza a la salida de los gases de escape del motor: EGR

El EGR (Exhaust Gas Recirculation) es un intercambiador que reduce la concentración de NOx procedente de los gases de escape antes de ser enviados a la atmósfera. Dicha reducción se consigue mediante el enfriamiento de estos gases mediante un intercambio térmico con un refrigerante y la posterior recirculación de estos gases a la cámara de combustión. De esta manera se consigue una disminución de oxígeno y, por lo tanto, de NOx (Foad (2014)).

Este componente está sometido a elevadas temperaturas en su interior, teniendo que enfriar los gases que se encuentran en la entrada a temperaturas cercanas a 850°C. Es por ello que se genera un intercambio térmico en el interior con la parte del refrigerante para conseguir disminuir estas temperaturas. Para ello, existen distintos tipos de métodos que mejoran este intercambio en el interior de este componente, siendo el más importante la inclusión de unos perturbadores de flujo en el interior de la zona de los gases. De esta manera, se consigue que el flujo pierda su régimen laminar y se genere un mayor intercambio con el refrigerante (Joemer (2015)).

Figura 1. Posicionado (izquierda)



2. Objetivo

El principal objetivo del presente estudio es el análisis mecánico de un componente EGR, debido al intercambio térmico que se produce en el interior, mediante el Método de los Elementos Finitos (FEM).

Con el fin de alcanzar el objetivo global del trabajo, el proceso desarrollado en el estudio ha comenzado con la discretización de las mallas de los cuerpos internos del sólido para las simulaciones de los fluidos que interactúan con el intercambiador, para continuar con la simulación del intercambio térmico en el interior del EGR debido a los fluidos con el fin de obtener los mapas térmicos existentes en los componentes del EGR. El trabajo realizado finaliza con la discretización y cálculo termomecánico de la estructura del EGR.

El trabajo realizado en el estudio consiste en un problema multifísico donde se obtienen resultados finales gracias a una obtención de resultados intermedios, los cuales son empleados como inputs en cálculos posteriores. Es decir, se resuelven ecuaciones de intercambios térmicos y de flujos de fluidos para obtener unas soluciones térmicas, las cuales se emplearán como condición de contorno en el cálculo estructural. Todo esto se consigue gracias a un acople de simulación multifísica que realiza una simulación CFD en primer lugar para emplear dichos resultados en la simulación FEM.

Es por ello la complejidad del problema, ya que se han realizado anteriormente cálculos de intercambios térmicos en este tipo de componentes y cálculos estructurales (tensionales, de vibraciones, etc...), pero no se han encontrado documentos que relacionen ambos cálculos en un resultado final.

3. Modelo a analizar

3.1 Descripción

Con las constantes modificaciones realizadas en los reglamentos internacionales para el control de gases de escape en los motores de combustión, es necesario ir mejorando la reducción de los contaminantes.

El componente a analizar en este estudio es un EGR Cooler, figura 2, que se encuentra localizado a la salida de los gases de escape y permite la recirculación de parte de estos de nuevo al colector de admisión. De esta forma, se consigue un enfriamiento de estos gases, lo que conlleva una disminución del NO_x y una reducción de la contaminación de este proceso.

El modelo de EGR a analizar se trata de un intercambiador de un paso y con 10 tubos en su interior. Los gases circulan a lo largo de ellos y el refrigerante por el exterior, generándose el intercambio de calor en las zonas de contacto entre los tubos y el refrigerante (Usman (2011)).

Figura 2. Modelo real del EGR analizado



3.2 Funcionamiento e intercambio de calor

Tal y como se ha comentado, se trata de un intercambiador térmico entre el circuito de gas y la zona de refrigerante. La principal diferencia y complejidad que existe en este modelo se localiza en el interior de los tubos: los perturbadores.

Los perturbadores son piezas unidas al tubo por su zona interior que dificultan el paso de los gases a través de ellos. Mediante la inclusión de estas piezas se genera un cambio en el régimen del flujo, pasando de ser cuasi-laminar a turbulento, lo que provoca un mayor intercambio térmico con las paredes de los tubos y, finalmente, con el refrigerante.

4 Simulación numérica

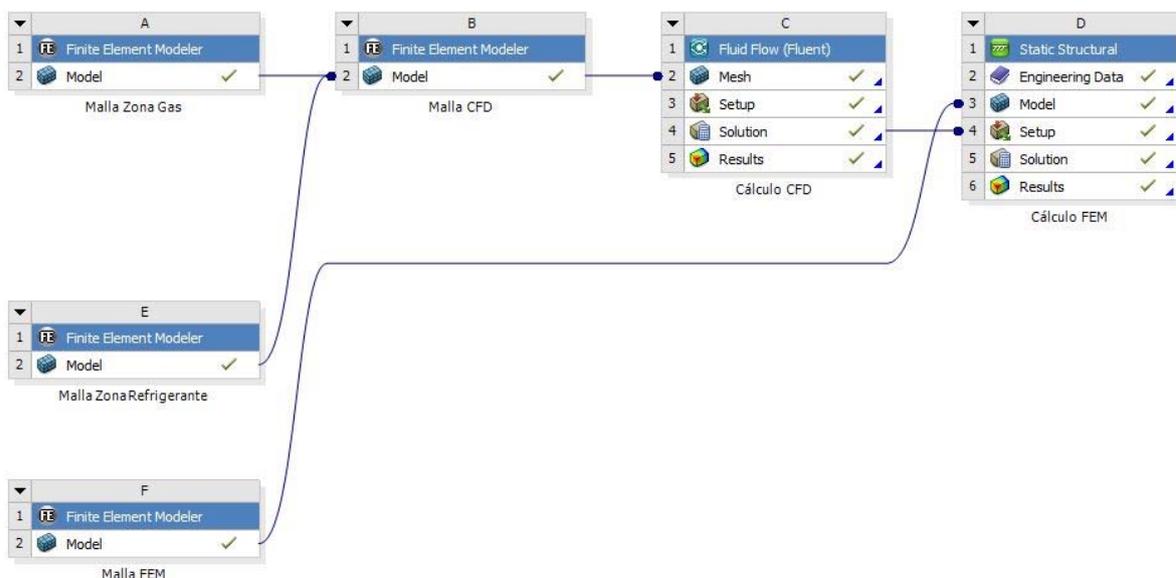
Como se ha definido anteriormente, el objetivo es el análisis mediante elementos finitos de las tensiones que se generan en el interior del EGR. Para ello, se definen las condiciones de contorno térmicas obtenidas a partir de un cálculo de dinámica de fluidos computacional (CFD). Ambos cálculos se han realizado mediante el software *Ansys*, concretamente desde su módulo *Ansys Workbench*. Este software ofrece diferentes módulos para distintos análisis, además de poder realizar conexiones entre ellos.

Los análisis de los flujos se han realizado mediante un módulo CFD y los cálculos mecánicos mediante un módulo FEM, ambos implementados dentro del entorno *Workbench*. De esta forma, se consigue la simulación multifísica, ya que los resultados obtenidos mediante el cálculo CFD de temperaturas (Hoseini (2016)), sirven como input de entrada a las condiciones de contorno para el cálculo mecánico de elementos finitos (Fontanesi (2013)).

Las mallas se importaron a otro módulo previo que se conecta con los mencionados anteriormente.

La estructura de árbol implementada en el módulo *Ansys Workbench* y empleada en los cálculos numéricos realizados en el estudio se muestra en la figura 3

Figura 3. Ansys Workbench



5. Análisis del flujo interno

5.1 Modelo

Para el cálculo de los flujos internos de los fluidos que realizan el intercambio térmico en el EGR, se empleó el módulo Ansys Fluent Rel. 16.0. Mediante Fluent, se pueden simular flujos de fluidos a través de una malla generada previamente sobre el modelo.

Por ello, lo primero que se obtuvo fue el sólido inverso del modelo a estudiar mediante un booleano de la geometría del EGR. De esta forma, se consiguieron los dos sólidos pertenecientes a las regiones de ambos flujos para ser malladas posteriormente.

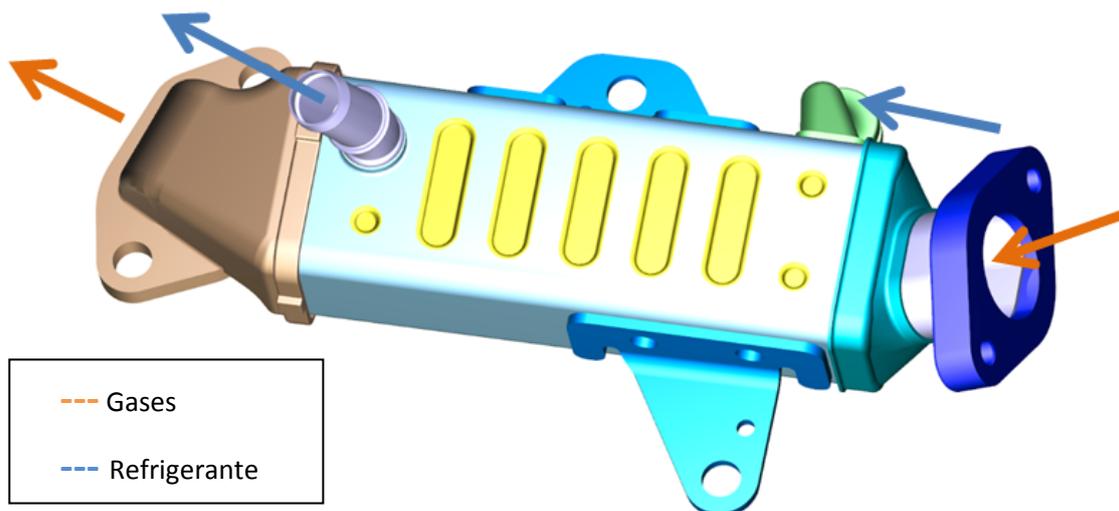
Estos sólidos son independientes y no presentan zonas comunes entre ellos, ya que el espacio entre ellos corresponde a la estructura del EGR.

Figura 4. Ensamblaje de los sólidos internos



Los sólidos obtenidos corresponden a cada uno de los dos fluidos que se encuentran en el interior del intercambiador. Por un lado se encuentra el refrigerante y, por otro lado, están los gases de escape que son enfriados mediante el intercambio térmico con el refrigerante. La figura 5 muestra el modelo del EGR desarrollado, así como las conexiones de entrada y salida de los gases de escape y del refrigerante en el modelo.

Figura 5. Zonas de circulación de flujos



5.2 Materiales

Los materiales empleados para las simulaciones son los siguientes:

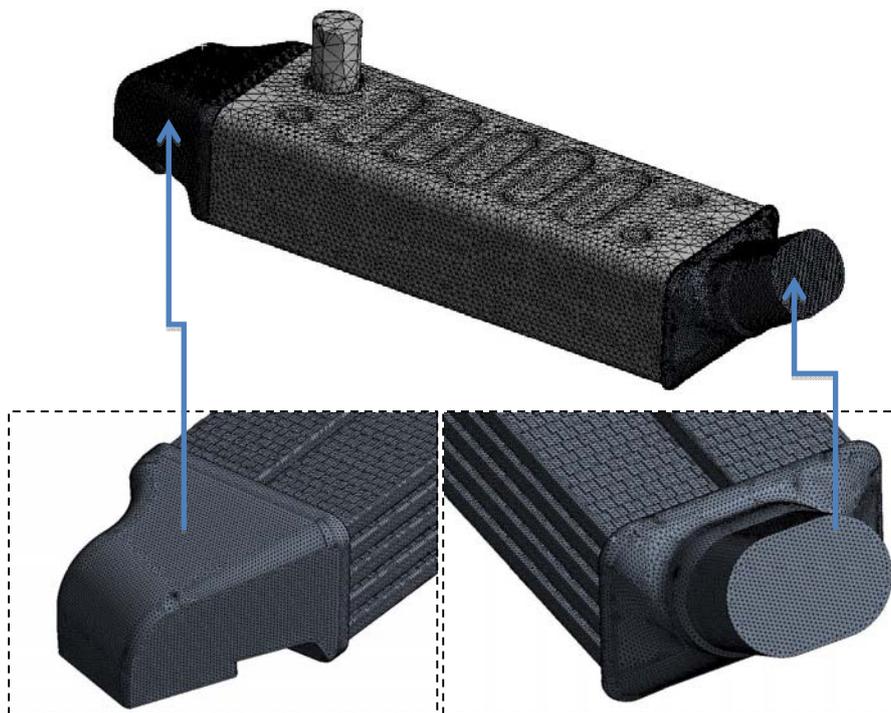
- Refrigerante: Se trata de una mezcla Agua/Glicol al 50%.
- Gases: Se trata de una mezcla que consta de un 97% de aire y un 3% de gases de combustión del propano. Para las simulaciones, se considerará aire como material a simular debido a su alto porcentaje en la composición.

A la totalidad de los componentes del EGR se les proporcionan propiedades del acero AISI 304L, componentes a través de los cuales se produce el intercambio térmico.

5.3 Mallado del modelo

Las mallas computacionales correspondientes a los dos sólidos han sido realizadas con el software Patran y de forma independiente cada una de ellas. Una vez realizadas estas mallas, se han introducido cada una en un módulo Finite Element Model para realizar un reconocimiento de la malla y asignarle una geometría mediante una reconstrucción del cuerpo. Tras tener ambas mallas, se ha realizado un ensamblaje de las dos, obteniendo dos mallas independientes pero comunes en el mismo modelo.

Figura 6. Mallas de ambas zonas con detalles en la zona Gas



Aunque Ansys posee un potente módulo de mallado, se obtuvieron los sólidos inversos y se exportaron a Patran. Esto fue debido a la imposibilidad de conseguir una malla con menos de 70.000.000 de elementos, lo que produciría unos tiempos de cálculo muy elevados e inaceptables (Paz (2013) ; Carrillo y Castillo (2011)). El tiempo de mallado del sólido ha sido muy elevado (cercano a 3 horas), lo que producía la dificultad de realizar modificaciones y tener que esperar a la creación de la nueva malla.

Las mallas resultantes, las cuales se muestran en la figura 6, consisten:

- Malla perteneciente a la zona de flujo de gas: malla no estructurada compuesta por 4,180,454 elementos tetraédricos. La dificultad de esta malla es debido a la zona donde se localizan los perturbadores en el interior de cada tubo. Al tener un espesor tan pequeño y un espacio entre ellos también pequeño, la malla resultante tiene un gran número de elementos para conseguir la correcta simulación del movimiento del fluido.
- Malla perteneciente a la zona de flujo de refrigerante: malla no estructurada compuesta por 186,010 elementos. Se realizaron pruebas independientes con esta malla y se obtuvieron buenos resultados de convergencia, por lo que se tomó por buena aun teniendo bajo número de elementos (en comparación con la malla del gas).

5.4 Condiciones de contorno y parámetros

Una vez se conecta la malla obtenida con el módulo *Fluent*, encargado de las simulaciones de ambos fluidos, se comienza a definir el modelo numérico apropiado para representar los fenómenos físicos que se producen en el intercambiador. (Ansys (2016) ; Juretic (2004)) Los parámetros definidos en el estudio son los siguientes:

- Solver: *Ansys Fluent Rel. 16.0*. Resolución de un modelo 3D con doble precisión. Algoritmos de resolución de ecuaciones basadas en la variable de presión.
- Modelo de turbulencia: *Viscous k - ϵ Realizable*, empleando ecuaciones de transporte para la resolución de las variables k (energía cinética) y ϵ (tasa de disipación). Mediante el término Realizable se consigue una mayor precisión con gradientes de presión.
- Esquemas de discretización espacial: De segundo orden para la presión, energía y cantidad de movimiento (mayor precisión). De primer orden para los términos relacionados con la turbulencia.
- Otros parámetros: Scheme SIMPLE, Hybrid Initialization, Under-Relaxation Factors...

Una vez definido el modelo matemático de cálculo, se definen las condiciones de contorno del modelo a analizar, las cuales han sido:

- Entrada Zona Gas (Mass Flow Inlet): Flujo másico de 22 g/s y una temperatura de 850 °C. Intensidad de turbulencia del 10% y Diámetro hidráulico de 29.15 mm.
- Entrada Zona Refrigerante (Mass Flow Inlet): Flujo másico de 0.5776 g/s y una temperatura de 94 °C. Intensidad de turbulencia del 10% y Diámetro hidráulico de 13.17 mm.
- Salida Zona Gas (Outlet): Sus propiedades serán calculadas en base al intercambio térmico producido en el interior.
- Salida Zona Refrigerante (Pressure Outlet): Presión Gauge de 0 a la salida (relativa a la atmosférica) y en caso de haber flujo reverso, este se produciría con una temperatura de 104°C.
- Interior de cada Zona (Interior): Se permite la circulación de flujo a través de ella.
- Pared Externa (Wall): No se permite la circulación de flujo a través de ella.
- Pared localizada entre ambas zonas: Zona localizada entre las dos mallas (definida esta zona de contacto) con opción de Coupled Wall (permitir intercambio térmico a través de ella).

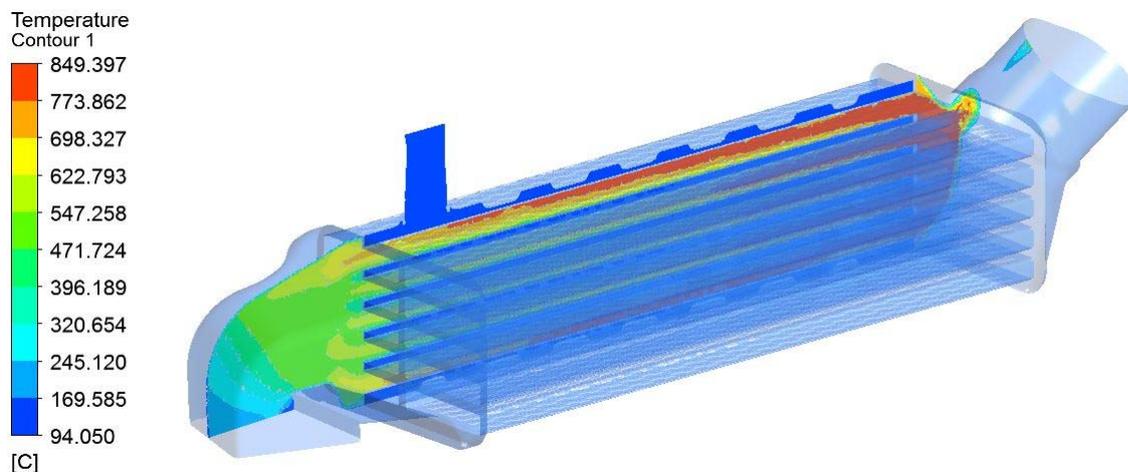
5.5 Resultados

La principal finalidad de este análisis es la obtención de los mapas térmicos a lo largo del interior del EGR. Como ejemplo de los resultados obtenidos, en la figura 7 se muestra las

temperaturas obtenidas en la simulación numérica realizada en un plano longitudinal a través de los cinco tubos de la derecha.

Al analizar las temperaturas de salida del gas y del refrigerante, en estas superficies la temperatura no es uniforme, si no que existen gradientes térmicos en las mismas. Por esta razón para analizar la temperatura de salida se calcula la temperatura media de los valores nodales obtenidos en cada nodo perteneciente a la superficie estudiada. Estos valores son los empleados para la comparación con los valores experimentales y han sido alcanzados tras ir realizando ajustes en los diferentes parámetros mencionados (principalmente en las variables de turbulencia y factores de relajación de residuales).

Figura 7. Temperaturas en plano longitudinal a través de los 5 tubos de la derecha



La correlación de los resultados obtenidos de forma numérica y experimental se muestra en la tabla 1. En ella se aprecia una gran correlación de resultados en el refrigerante, mientras que la correlación de temperaturas a la salida en los gases presenta una diferencia de temperaturas que puede ser considerada como aceptable. La diferencia entre los valores obtenidos en la salida de los gases es debida a que se ha definido un modelo numérico monofásico en la transferencia de calor entre ambos flujos.

Tabla 1: Comparativa numérico-experimental de temperaturas

	Gases	Refrigerante
Temperatura de entrada (común)	850 °C	94 °C
Temperatura de salida CFD	198 °C	103 °C
Temperatura de salida experimental	160 °C	104 °C

También han sido localizadas zonas en las cuales el refrigerante alcanza temperaturas superiores a su punto de ebullición, generándose este fenómeno en el y, por lo tanto, generando mayor intercambio térmico hacia el lado de los gases (Paz (2013)).

6. Análisis estructural

El objetivo final del proyecto, como se ha expuesto, consiste en el análisis estructural de un sistema EGR, razón por la cual se lleva a cabo el análisis estructural.

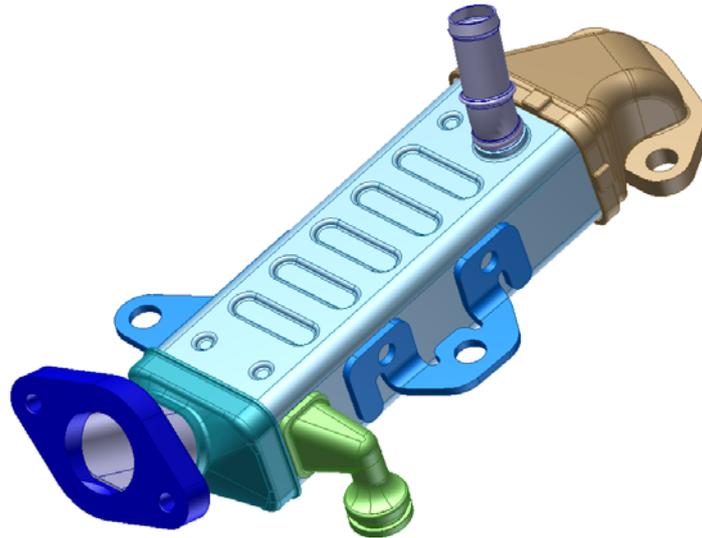
Mediante la conexión CFD-Mecánica proporcionada por *Ansys Workbench* y descrita anteriormente, los resultados de temperatura obtenidos en el análisis de flujo interno en las zonas de interés son exportados al cálculo mecánico.

A continuación se muestran los pasos llevados a cabo con el fin de realizar el análisis estructural del sistema EGR.

6.1 Elementos del modelo y material

Para realizar el análisis estructural, se utiliza el modelo original del EGR (y no los volúmenes del fluido empleados en el cálculo CFD) que contiene todas las partes que lo definen. El modelo es un ensamblaje de todas estas partes que lo componen, definiendo los contactos necesarios entre las zonas donde existen. El modelo empleado en el análisis estructural se muestra en la figura 8.

Figura 8. Modelo estructural del EGR



En el cálculo se aplica un material común para todas las los componentes, el cual es un aluminio AISI 304L. En la definición del material se tienen en cuenta la variación de las propiedades mecánicas en función de la temperatura.

6.2 Mallado del modelo

Al igual que en el mallado de los sólidos interiores, se realizó un mallado con el software Patran, el cual posteriormente se importó a *Ansys*. En el proceso de mallado se han empleado diferentes estrategias de mallado en función de las distintas partes del componente para conseguir una malla lo más estructurada posible en las zonas en las que se podía hacer (por ejemplo la virola) o definiendo diferentes parámetros (número de nodos en aristas, degradados Bias, etc...) en el resto de zonas.

Figura 9. Mallado del modelo estructural



El mallado final obtenido, el cual se muestra en la figura 9 está formado por diferentes tipos de elementos. Concretamente elementos tipo Shell han sido empleados en el mallado de los tubos. El resto del modelo ha sido discretizado con elementos hexaédricos, a excepción de las zonas en las cuales no ha sido posible, por ejemplo los tubos de gas, los cuales han sido mallados con elementos tetraédricos.

La malla final está compuesta por 780,486 elementos y 735,116 nodos.

Las uniones entre todos los componentes del sistema EGR se simulan mediante uniones rígidas, ya que en la realidad estos componentes están soldados.

6.3 Caso de carga y condiciones de contorno

Al tratarse de un análisis estructural ante las temperaturas que se generan en el intercambio térmico, las principales cargas establecidas son los mapas térmicos obtenidos en el análisis de flujo interno realizado previamente. Por ello, se importan los resultados anteriores como variable en el análisis, pasando a ser las cargas del estudio.

Como condiciones de contorno se define el empotramiento de la patas de fijación en la zona de unión y en la salida de los gases, así como una restricción del movimiento perpendicular en las superficies externas.

6.4 Resultados

Como resultado del estudio realizado se obtienen las tensiones equivalentes de Von Mises generadas por el efecto de la temperatura de trabajo del sistema EGR, las cuales se muestran en la figura 10. A fin de poder analizar los componentes del sistema, en la tabla 2 se muestran los valores de tensiones de Von Mises máximos obtenidos para cada uno de los componentes del sistema EGR.

Figura 10. Tensiones de Von Mises [MPa]

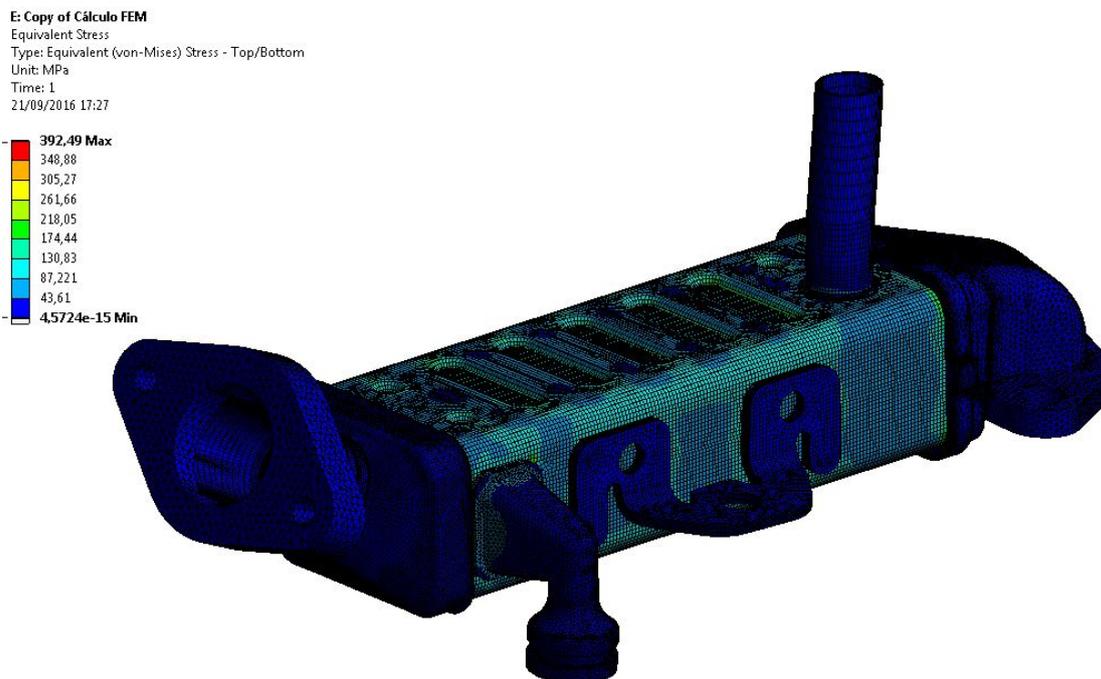


Tabla 2: Resultados del cálculo estructural

	Máxima Tensión de V.M. [MPa]	Máximo desplazamiento [mm]	Máxima deformación unitaria
Tubos	306.23	0.003	1.586e-3
Perturbadores	392.49	0.003	2.034e-3
Colectores	364.89	0.007	2.055e-3
Virola	280.00	0.052	1.682e-3
Entrada / Salida de gas	14.03	0.006	7.903e-5
Entrada de refrigerante	224.58	0.029	1.164e-3

Aunque hay zonas con un factor de seguridad inferior a 1, esto es debido a que el material plastifica en diversas zonas debido a la temperatura. Es normal en este tipo de piezas y no hay problema más allá del fallo a fatiga por rotura o agrietamiento.

Los máximos desplazamientos ocurren en la salida del refrigerante. Esto es debido a que en el modelo real va acoplado a una goma, lo cual impide su movimiento relativo con respecto a ella. Al tratarse de un primer análisis del componente, no están incluidas las uniones con otros elementos.

7. Conclusiones

El presente análisis ha sido realizado con la finalidad de obtener un modelo numérico apropiado para representar los fenómenos físicos que se producen en el intercambiador. Una vez obtenidos estos resultados, fueron empleados como variable de entrada en el cálculo estructural descrito.

Tras la realización del cálculo CFD del intercambio térmico, se observa que los resultados obtenidos en la zona del refrigerante (en términos de temperaturas) son muy cercanos a los ensayos experimentales. En cambio, los resultados en la zona de los gases difieren de los experimentales en un 20%. Esto es debido a que en el lado del refrigerante existen zonas con una temperatura superior a la temperatura de ebullición de este, generándose un modelo bifásico con líquido y gas en el mismo lado.

Al tratarse de un cambio de fase, se generaría un mayor intercambio térmico entre ambos flujos y se disminuirían las temperaturas en la salida de los gases de escape del EGR acercándose a los valores experimentales.

Dando por buenos estos resultados al tratarse de un estudio monofásico del intercambiador, se extrajeron los resultados de temperaturas en todas las superficies del modelo para la realización del análisis estructural. Tras ser aplicadas junto con las condiciones de contorno que hay, se observó que existen zonas en las que el material está por encima del límite elástico, produciéndose plastificación de bajo orden. Esto es causado a las elevadas temperaturas que hay en el interior del componente y que afectan al material, aunque el AISI 304L tiene un buen comportamiento térmico pero se tratan de temperaturas máximas de 850°C que provocan una expansión del material. Se ha observado que a 400 MPa se obtiene una vida infinita en el material analizado, el cual es el valor de tensión más alto que se ha generado en la estructura. Esto es debido a que el AISI 304L ha sido aleado para obtener una aleación ferrítica y obtiene unas propiedades superiores a las recogidas en su curva.

Para finalizar, las dos conclusiones del trabajo realizado en el estudio son :

- Se ha definido un modelo numérico que simula el intercambio térmico monofásico que ocurre en el interior de un intercambiador del tipo EGR, obteniéndose resultados válidos.
- Se ha realizado un análisis mecánico del componente ante las cargas térmicas, obteniéndose puntos de plastificación del material y altas tensiones en zonas de unión.

Referencias

- ANSYS, INC. ANSYS Academic Research, Release 16.0, (2016) Documentation and Training.
- Carrillo Sánchez, Jose María y Castillo Elsitdié, Luis Gerardo. (2011) Consideraciones del mallado aplicadas al cálculo de flujos bifásicos con las técnicas de dinámica de fluidos computacional. Jornada de Introducción a la Investigación de la UPCT. Fuente Álamo, España
- Foad Vashahi. (2014) Thermal and Strain Characteristics of EGR Cooler. School of Mechanical Engineering, Jeonju. Korea. Advanced Science and Technology Letters Vol.47 (Healthcare and Nursing 2014), pp.369-373
- Fontanesi, S. and Giacomini, M. (2013) Multiphase CFD-CHT optimization of the cooling jacket and FEM analysis of the engine head of a V6 diesel engine. *Applied Thermal Engineering*. Volume 52, Issue 2, 15 pp 293-303

- Hoseini, S. and Najafi, G. (2016) Experimental and numerical investigation of heat transfer and turbulent characteristics of a novel EGR cooler in diesel engine. *Applied Thermal Engineering*. Vol 108. pp 1344-1356
- Joemer. C. S. (2015) Optimization of Shell & Tube heat exchanger by baffle inclination & baffle cut. International Conference on Emerging Trends in Mechanical Engineering. Ernakulam, India
- Juretic, Franco. (2004) Error Analysis in Finite Volume CFD. Department of Mechanical Engineering. Thesis submitted for the Degree of Doctor of Philosophy of the University of London and Diploma of Imperial College
- Paz, M. C. (2013) CFD implementation and experimental validation of the Chen model for heat transfer in nucleate boiling. Escuela de Ingeniería Industrial de Vigo. WIT Transactions on Engineering Sciences. Vol. 79 pp.377-385
- Paz, M. C. (2013) CFD Transient simulation of fouling in an EGR Cooler in a Diesel exhaust environment. Proceedings of International Conference on Heat Exchanger Fouling and Cleaning 2013. Budapest
- Usman Ur Rehman. (2011) Heat Transfer Optimization of Shell-and-Tube Heat Exchanger through CFD Studies. Master's Thesis in Innovative and Sustainable Chemical Engineering Chalmers University of Technology