Análisis CFD de emisiones contaminantes en el motor diesel Wärtsilä 46. Evaluación de diversas modificaciones internas.

¹Carlos Gervasio Rodríguez Vidal, ²María Isabel Lamas Galdo. Departamento de Ingeniería Naval y Oceánica. Escuela Politécnica Superior. Campus de Esteiro. Mendizabal s/n. 15403. Ferrol. ¹c.rodriguez.vidal@udc.es, ²isabellamas@udc.es

En los últimos años, debido a los incrementos de polución atmosférica, han aparecido diversas medidas legislativas para tratar de ponerle control a las diferentes fuentes de contaminación, dentro de las cuales se encuentran los motores diesel. En lo referente a los motores marinos, la Environmental Protection Agency y la European Comisión limitan las emisiones contaminantes en los Estados Unidos y en la Unión Europea respectivamente. A nivel internacional. la International Maritime Organization (IMO) ha establecido y mantenido un marco normativo completo para la navegación. En 1973, la IMO adoptó Marpol 73/78, la convención internacional para prevenir la contaminación por los buques, con el fin de reducir la contaminación marina. Particularmente, el Anexo VI de Marpol sitúa los límites de SOx (óxidos de azufre) y NOx. Con el primero, se limita el contenido de azufre en los combustibles. Para el último, se establece una curva que indica el nivel de emisiones de NOx permitidos en función de las revoluciones del motor, área geográfica y fecha de fabricación.

Debido a la especial atención que la legislación pone en la emisión de NOx en motores marinos, en los últimos años se han desarrollado varios métodos para su reducción. Los principales factores que influyen en la formación de NOx son las concentraciones de oxígeno y nitrógeno, junto con las temperaturas localizadas en el proceso de combustión. Por lo tanto, las modificaciones internas del motor se centran en una reducción de las concentraciones de oxígeno y nitrógeno, picos de temperatura y la cantidad de tiempo en el cual los gases de la combustión se mantienen a altas temperaturas.

Una modificación muy común para reducir el NOx en motores marinos es adición de agua. Esta medida reduce la formación de NOx por dos razones. El calor específico de los gases dentro del cilindro es incrementado debido a que el agua posee un calor específico más elevado que el aire. Por otra parte, la concentración de oxígeno total es reducida. Los efectos de la adición de agua pueden variar dependiendo del tipo de motor, pero generalmente 1% de agua reduce las emisiones de NOx en un 1%, Woodyard (2009) [1].

Otro procedimiento muy utilizado para reducir las emisiones de NOx es la recirculación de gases de escape (EGR). Esta medida baja la temperatura de combustión, y en consecuencia, el NOx, por la recirculación de una porción de los gases de escape que pasan a mezclares con los gases frescos que entran en el cilindro por el conducto de admisión. Al igual que sucede con la adición de agua, el EGR reduce la formación de NOx debido a un incremento del calor específico en los gases dentro del cilindro y una disminución de la concentración de oxígeno total. Dínamo Técnica Nº14 **14**

Holtbecker, R., Geist, M., (1998) [2] obtuvieron una reducción de NOx del 22% con un 6% de EGR en el motor de pruebas Wärtsilä 4RTX54. Sin embargo, advirtieron que el EGR incrementaba la generación de humos, HC y CO. Millo, F., Bernardi, M.G. and Delneri, D., (2011) [3] analizaron el EGR combinado con otras modificaciones en un motor marino Wärtsilä W20 y obtuvieron reducciones de NOx superiores al 90%.

Otra vía para reducir el NOx es modificando el patrón de inyección. Una inyección retardada provoca, durante la combustión, picos de presión más bajos y, en consecuencia, menores temperaturas. Retardando los tiempos de inyección también se disminuye la cantidad de combustible quemado antes del pico de presión, esto reduce el tiempo de residencia. Okada et al. (2001) [4] aplicaron un retraso en la inyección de 7º (medido en ángulo de giro de cigüeñal) en el motor MAN B&W 4T50MX y obtuvieron una reducción de 7% en NOx. Li, K., Li, B. and Sun, P., (2010) [5] también analizó la influencia de la inyección de combustible en ángulo avanzado, observando reducción de emisiones de NOx. En otro estudio, Moreno Gutiérrez et al. (2006) [6], observaron el consumo de combustible y emisiones de NOx en varios motores marinos y con varios ajustes en los tiempos de inyección. Al-Sened y Karini (2001) [7], encontraron que la pre-inyección podía ser usada para acortar el periodo de retardo y por tanto disminuir la temperatura y presión durante las fases iniciales de la combustión, resultando en una reducción de NOx. Fankhauser y Heim (2001) [8] también observaron que estas pre-inyecciones reducían el NOx con un ligero incremento del consumo de combustible. Los autores estudiaron el motor Sulzer RT-Flex common rail, con triple inyección, inyectando la carga de combustible de forma separada en una sucesión de cortos sprays. Con la inyección secuencial, cada una de las tres toberas de inyección fue activada en momentos diferentes. Los resultados mostraron una reducción de alrededor del 30% en NOx con un incremento de consumo del 8% aproximadamente.

Adicionalmente a las técnicas que actúan en el interior del cilindro, existen otros métodos de limpieza de los gases de escape una vez salen del interior del cilindro, las cuales son muy utilizadas para eliminar el NOx y otros contaminantes. De acuerdo con Sulzer (1994), MAN B&W (1997), Caterpillar (2001) y Wärtsilä (2002), los catalizadores de reducción selectiva (SCR) pueden eliminar más del 90% del NOx. Los inconvenientes de utilizar convertidores catalíticos en los buques son bien conocidos. Se requieren agentes reductores y el reactor catalítico ocupa un espacio adicional, haciendo que los convertidores catalíticos sean poco adecuados para ser utilizados en motores diesel marinos. En consecuencia, introducir modificaciones internas en el motor

es la mejor opción para reducir la generación de contaminación en los motores marinos.

El propósito del presente trabajo es analizar el potencial de las modificaciones internas del motor diesel Wärtsilä 6 *L* 46 para reducir la emisión de NOx y otros contaminantes. Para este propósito ha sido empleado el software de mecánica de fluidos computacional (CFD) OpenFOAM, por ser un software de uso libre y que permite manipular las ecuaciones gobernantes del proceso de combustión en el interior del motor. El modelo numérico fue empleado para evaluar los efectos de las diferentes modificaciones internas del motor tales como; adición de agua, recirculación de gases de escape, y variación en los tiempos del solape de válvulas.

Como contribución principal, este artículo muestra el efecto de diversas modificaciones usando el mismo motor. Esto proporciona un criterio objetivo para evaluar cada medida de reducción de NOx. Además, este modelo es una herramienta rápida y barata para simular una amplia cantidad de posibles configuraciones. En contraste, implementar estas mismas pruebas experimentales con motores marinos son caras y laboriosas.

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente trabajo está basado en el motor diesel Wärtsilä 6L 46 mostrado en la figura 1 y con las características técnicas indicadas a continuación.

Se trata de un motor de cuatro tiempos diesel, con seis cilindros en línea y un único árbol de levas en culata con tres levas por cilindro, una para accionar la bomba de inyección y otra para las dos válvulas de admisión y otra para las dos de escape. Presenta un diámetro de 46 cm, carrera de 58 cm y cilindrada 96.400 cc. Cada cilindro tiene 4 válvulas, dos válvulas de admisión y dos de escape. El inyector de combustible se sitúa en el centro de la culata. El motor es capaz de desarrollar una potencia máxima continua de 5.430 kW, con una presión media efectiva de 22,5bar y a una velocidad de 500 rpm. El Wärtsilä 46 es un motor no reversible muy utilizado en aplicaciones marinas y en plantas de producción de energía eléctrica.



Figura 1: Sección lateral. Figura adaptada de Wärtsilä [9]

El modelo 3D del cilindro fue realizado con el software de CAD SolidEdge ST4, siendo la zona de sólido donde pasan los gases, el pistón y las válvulas se desplazan repitiendo el movimiento exactamente igual que en el motor real. El mallado de la geometría 3D, figura 2, ha sido realizado con el software Gambit 2.4, se han utilizado diferentes esquemas de mallado para optimizar el cálculo.

Para simular la combustión se ha utilizado el Software de CFD OpenFOAM (versión 2.2.2) [10], introduciendo las ecuaciones gobernantes del proceso de combustión y especificando las variables de contorno para simular el proceso de combustión de acuerdo con la realidad.



Figura 2: Malla computacional del motor Wärtsilä 46

El modelo numérico del ciclo de operación del motor Wärtsilä 46 fue analizado por Lamas, M. I.; Rodríguez, C. G. and Rebollido, J.M (2012) [11] y Lamas y Rodríguez (2013) [12], y comparado con datos experimentales obtenidos de un motor real en funcionamiento. La figura 3 representa los resultados de presión en el interior del cilindro para varios valores del ángulo de cigüeñal y la figura 4 los resultados de fracción másica de aire/gases para varias posiciones del ángulo de cigüeñal.



Figura 3: Presión en el interior del cilindro a diferentes ángulos de cigüeñal. Motor Wärtsilä 46.



de ángulo de cigüeñal. Motor Wärtsilä 46.

RESULTADOS Y DISCUSION

Una vez validado el modelo numérico, ha sido utilizado para estudiar diversas modificaciones internas tales como adición de agua, recirculación de gases de escape, modificación del solape de válvulas (también denominado cruce de válvulas) y variaciones en el diagrama de distribución de las válvulas del motor. Los resultados obtenidos se muestran a continuación.

Adición de agua

En aplicaciones prácticas, hay tres posibilidades para introducir agua dentro de la cámara de combustión. El agua puede ser introducida humidificando la carga de aire fresco que entra en el motor, otra forma es inyectando el agua directamente dentro del cilindro por medio de un inyector independiente o inyectando una emulsión de agua-combustible. En este trabajo la adición de agua-se ha simulado como una inyección de emulsión de agua-combustible. En la figura 5 se muestra los resultados de la adición de agua entre 0 y 100% y los resultados obtenidos en lo referente al NO_x, HC, CO y SFOC en función de la relación agua combustible.



Como se puede observar en la figura 5, la introducción de agua reduce el NOx pero incrementa el CO, HC y SFOC (consumo específico de combustible). El agua absorbe energía por evaporación, incrementando el calor específico de los gases en el cilindro y reduce la concentración total de oxígeno, lo cual supone un incremento en el número de moles de gases que debe ser elevado a temperaturas de combustión para hacer reaccionar una cantidad dada de oxígeno con el combustible. El agua también reduce la disponibilidad de oxígeno para la reacciones de formación de NOx. El incremento de HC y CO es causado por las temperaturas más bajas, lo cual provoca combustiones más lentas y combustión parcial. El SFOC también se ve incrementado debido al pico de presión mas bajo lo cual supone menos potencia generada.

EGR (Recirculación de gases de escape)

La EGR consiste en mezclar una porción de los gases de escape con los gases frescos de entrada al cilindro, constituyendo una mezcla de aire y gases inertes con una más baja concentración de oxígeno. Los resultados de NO_x, HC, CO y SFOC en función de la relación EGR se indican en la figura 6.



Como se puede observar en la figura 6, el EGR provoca que bajen las emisiones de NOx, pero incrementa HC, CO y SFOC. La recirculación de los gases de escape desplaza parte del el aire fresco que entra en la cámara de combustión. Como consecuencia de esto, hay menos cantidad de oxígeno disponible para la combustión, bajando la relación aire-combustible. Además la mezcla de gases de escape con el aire fresco hace que se incremente el calor específico en la mezcla entrante, lo cual da lugar a una reducción de la temperatura de la combustión. Por esta razón, la aparición de NOx se reduce muchísimo. El EGR es un método muy eficaz para control del NOx. Sin embargo las aplicaciones prácticas no suelen usar más del 50% de EGR debido a que las partículas de los gases de escape dañan el motor, Lamas y Rodríguez (2012).

El incremento de HC y CO con el EGR es causado por las temperaturas más bajas y la cantidad de oxígeno más reducida que está disponible para las reacciones de la combustión. Lo cual produce combustiones más lentas y combustiones parciales. El SFOC se ve incrementado debido a que las presiones máximas de combustión son menores, lo cual da lugar que la potencia producida por el motor sea menor.

Modificación del solape de válvulas (overlap timing)

El modelo CFD también ha sido empleado para analizar diferentes valores de solape de válvulas, este consiste en el intervalo de tiempo en el que las válvulas de admisión y escapa están abiertas al mismo tiempo (también denominado cruce de válvulas). Los resultados se muestran en la figura siguiente, se han analizado periodos de solape que van desde los 60° a 120°, medidos en ángulo de giro de cigüeñal.



Figura 7: SFOC, NO_v, HC y CO en función del periodo de solape.

Como se puede observar en la figura 7, las emisiones de NOx se incrementan al aumentar el periodo de solape de válvulas, mientras que CO, HC y SFOC disminuyen. El periodo de solape afecta al barrido de los gases de combustión. Periodos de solape pequeños retienen una alta cantidad de gases residuales en el interior del cilindro. Por esta razón, las emisiones de NOx son bajas para cortos periodos de solape de válvulas y son incrementados para periodos de solape de válvulas más largos. Por el contrario HC y CO aumentan al disminuir la duración del periodo de solape de válvulas, la combustión es pobre e incompleta debido a la alta concentración de gases residuales. Cuando el periodo de solape aumenta, el barrido es mucho mejor, quedando muy pocos gases residuales en el interior del cilindro para el siguiente ciclo de trabajo. En lo concerniente al SFCO este se disminuye para periodos de solape más largos debido a mayores presiones y temperaturas de combustión, dando lugar a más potencia en cada ciclo de trabajo.

CONCLUSIONES

En el presente artículo, se ha utilizado un modelo numérico con el fin de valorar el potencial de las diversas modificaciones internas de un motor diesel marino, para reducir las emisiones contaminantes. La motivación de este estudio está en la nueva normativa legislación obligatoria para motores marinos y que obliga a reducir enormemente las emisiones contaminantes, especialmente el NOx.

En resumen, los resultados de este estudio numérico convergen con las mediciones experimentales, y demuestran que una reducción en la temperatura de combustión reduce notablemente los óxidos de nitrógeno, pero aumenta el monóxido de carbono, hidrocarburos y el consumo específico de combustible. Utilizando el sistema EGR, con una relación EGR del 50% se obtuvo una reducción de NOx de de más del 50%, con una razonable penalización en consumo de combustible de entre un 2 y un 3%. La adición

de agua también ha llevado a una reducción de NOx importante, con una relación agua-combustible del 50% se obtuvo una reducción de NOx en torno al 30%, con una penalización de consumo de combustible de aproximadamente un 2,5 %. En lo referente a la modificación del periodo de solape de válvulas los efectos en la reducción de NOx son más pequeños, tendiendo a aumentar ligeramente al incrementar el periodo de solape, mientras que en esas misma condiciones el consumo específico de combustible disminuye también ligeramente.

Es importante mencionar que, en las aplicaciones prácticas, hay límites para hacer funcionar el motor con tasas de EGR muy altas, y lo mismo sucede con la adicción de agua, si se superan ciertos límites puede perjudicarse el buen funcionamiento del motor diesel, por lo que hay que tener en cuenta estos límites a la hora de realizar los análisis CFD para que los resultados se encuentren siempre dentro de parámetros de operación realistas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento al equipo de Technical Courses (www.technicalcourses.net), que nos ha cedido su cluster workstation de alto rendimiento, lo cual nos ha facilitado enormemente realizar los complejos análisis CFD correspondientes al modelo numérico del motor Wärtsilä 6L 46.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Woodyard, D., 2009. Pounder's marine diesel engines and gas turbines. 9th Edition. Oxford. Elsevier.

[2] Holtbecker, R., Geist, M., 1998. Emissions Technology. Sulzer RTA Series, Exhaust Emissions Reduction Technology for Sulzer Marine Diesel Engines. Wärtsilä NSD.

[3] Millo, F., Bernardi, M.G. and Delneri, D., 2011. Computational analysis of internal and external EGR strategies combined with Miller cycle concept for a two stage turbocharged medium speed marine diesel engine. SAE Paper 2011-01-1142.

[4] Okada, S., Hamaoka, S., Akimoto, S., Masakawa, S., Takeshita, K., Seki, M., Yoshikawa, S. and Yonezawa, T., 2001. The development of very low fuel consumption medium speed diesel engine. Proceedings of the 23rd CIMAC Congress, Hamburg, Germany.

[5] Li, K., Li, B. and Sun, P., 2010. Influence of fuel injection advance angle on nitrogen oxide emission from marine diesel engine. Journal of Dalian Maritime University, 36(3), pp. 87-89.

[6] Moreno Gutiérrez, J., Rodríguez Maestre, I., Shafik, T., Durán Grados, C.V. and Cubillas, P.R., 2006. The influence of injection timing over nitrogen oxides formation in marine diesel engines. Journal of Marine Environmental Engineering, 16, pp. 1-10.

[7] Al-Sened, A. and Karimi, E., 2001. Strategies for NOx reduction in heavy duty engines. Proceedings of the 23rd CIMAC Congress, Hamburg, Germany.

[8] Fankhauser, S. and Heim, K., 2001. The Sulzer RT-flex Launching the Era of Common Rail on Low Speed Engines. Proceedings of the 23rd CIMAC Congress, Hamburg, Germany.

[9] Wärtsilä 46, http://www.wartsila.com/en/engines/medium-speed-engines/ wartsila46

[10] OpenFOAM, http://www.openfoam.com

[11] Lamas, M. I.; Rodríguez, C. G. and Rebollido, J.M. Numerical model to study the valve overlap period in the Wärtsilä 6L 46 four-stroke marine engine. Polish Maritime Research, Vol. 19, pp. 31-37 (2012).

[12] Lamas, M. I. and Rodríguez, C. G. Numerical model to study the combustion process and emissions in the Wärtsila 6L 46 four-stroke marine engine. Submitted to Polish Maritime Research Vol. 29, pp. 33-39 2013.