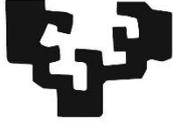
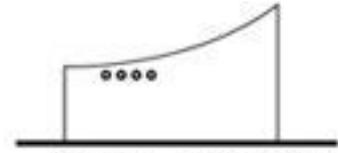


eman ta zabal zazu



Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea



Nautikako
eta Itsasontzi Makinetako
Goi-Eskola Teknikoa

Escuela Técnica Superior
de Náutica
y Máquinas Navales

TRABAJO DE FIN DE GRADO

GRADO EN MARINA

ESTUDIO DE LOS SISTEMAS DE REDUCCIÓN DE NOX Y ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA DE REDUCCIÓN CATÁLITICA SELECTIVA EN EL SIMULADOR MC90-V

Autor: Sergio Méndez Learreta

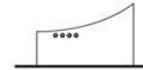
Director: Manuel Clemente de Miguel

Fecha: Septiembre del 2017

erren ta zabi: zeri.



Universidad del País Vasco Euskal Herriko Unibertsitatea



Nautikako eta Itsasontzi Makinetako Goi-Eskola Teknikoa Escuela Técnica Superior de Náutica y Máquinas Navales

INDICE

INTRODUCCIÓN Y ESTADO DEL ARTE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
----------------------	---

OBJETIVOS

2. OBJETIVOS	3
--------------------	---

FUNDAMENTOS TEORICOS

3. SISTEMAS DE MEDIDA DE GASES DE ESCAPE EN MOTORES DIESEL	5
3.2 METODO DE ANÁLISIS	7
3.2.1 INFRAROJOS NO DISPERSIVOS	8
3.2.2 ANALIZADORES POR QUIMIOLUMINISCENCIA.....	10
3.2.3 DETECTORES DE IONIZACIÓN DE LLAMA	13
3.2.3.1 HIDROCARBUROS.....	14
3.2.4 ESPECTROMETRIA INFRAROJA POR TRANSFORMADA DE FOURIER	15
3.2.4.1 ESPECTROSCOPIA ULTRAVIOLETA	16
3.2.5 CELULAS ELECTROQUÍMICAS	16
3.2.6 METODOS MAGNETICOS.....	18
4. NORMATIVA Y REGULACIONES; REGLAS PARA PREVENIR LA CONTAMINACIÓN ATMOSFERICA.....	19
4.1 EXCEPCIONES: REGLA 3.....	20
4.2 EQUIVALENCIAS: REGLA 4.....	21
4.3 RECONOCIMIENTOS Y INSPECCIONES: REGLA 5	21
4.4 OXIDOS DE NITROGENO: REGLA 13	23
4.5 LIMITES DE EMISIONES DE NO _x	23
4.5.1 TIER I	24
4.5.2 TIER II	25
4.5.3 TIER III	25
4.6 ZONAS DE CONTROL DE EMISIONES	27
4.7 CÓDIGO TECNICO DE LOS NO _x	28
4.7.1 GENERALIDADES	29
4.7.2 RECONOCIMIENTOS Y CERTIFICACION	29
4.7.3 PROCEDIMIENTOS PARA MEDIR LAS EMISIONES DE NO _x EN UN BANCO DE PRUEBAS	32
4.7.4 SISTEMAS DE MUESTREO Y ANALISIS	37

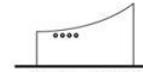
4.7.5	CALCULO DE LAS EMISIONES GASEOSAS	39
5.	PPROCESOS PARA REDUCIR LAS EMISIONES DE NOX.....	53
5.1	DESNITRURACIÓN DEL COMBUSTIBLE	54
5.2	COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS.....	55
5.2.1	DUAL-FUEL (DF)	55
5.2.2	BI-FUEL.....	56
5.2.3	GAS ENCENDIDO POR CHISPA.....	57
5.2.4	GAS-DIESEL (GD)	57
5.3	COMBUSTIBLE EMULSIONADO	58
5.4	MODIFICACION DE LA COMBUSTIÓN	60
5.4.1	INYECCIÓN.....	60
5.4.2	INYECTORES	62
5.4.3	MODIFICACIÓN DE LA RELACION DE COMPRESIÓN	63
5.5	MODIFICACIÓN DEL SISTEMA DE ADMISIÓN.....	64
5.5.2	SOBREALIMENTACIÓN MILLER.....	65
5.6	INYECCION DE AGUA.....	66
5.6.1	AIRE HUMEDO	69
5.7	RECIRCULACION DE GASES DE ESCAPE (EGR).....	71
	73
	73
5.8	REDUCCIÓN CATALÍTICA SELECTIVA.....	73
5.8.1	REDUCTORES Y REACCIONES CATALITICAS.....	74
5.8.2	TIPOS DE CATALIZADORES	76
5.8.3	PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LOS SISTEMAS DE REDUCCIÓN CATALÍTICA SELECTIVA ACTUALES.....	78

METODOLOGIA Y DESARROLLO

6.	SIMULACION SISTEMA DE REDUCCIÓN CATALÍTICA SELECTIVA MC90-V ..	82
6.1	PUESTA EN MARCHA Y CONTROL DEL SISTEMA RCS.....	85
6.2	ADAPTACIÓN DE LAS EMISIONES DE NOx DEL MC90 AL MARPOL.....	88
6.3	COMPORTAMIENTO Y RESULTADOS OBTENIDOS DEL SISTEMA RCS A DIFERENTES CARGAS DE MOTOR.....	89

CONCLUSIONES

7.	CONCLUSIONES.....	96
----	-------------------	----



BIBLIOGRAFIA

8. BIBLIOGRAFIA.....	98
----------------------	----

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo industrial y las necesidades de la actividad humana en la última década ha contribuido a una mayor contaminación. Esta contaminación afecta directamente a la capa de ozono, ecosistemas, al calentamiento global y a nuestra propia salud, a este fenómeno le hemos etiquetado con el nombre de Cambio Climático.

La preocupación por estos gases de efecto invernadero han ido creciendo, a la vez que sus efectos se iban evidenciando. Esta preocupación se refleja en el esfuerzo y compromiso de las autoridades y las organizaciones en marcar objetivos y directrices para reducir las emisiones.

Dentro de los principales causantes del Cambio Climático encontramos el transporte marino, que aun siendo el medio de transporte más eficiente en cuanto a emisiones de CO₂ por tonelada y kilómetro transportado, representa el 4,5% de los gases contaminantes que contribuyen al efecto invernadero. (M&G 2014) Estos gases contaminantes están formados por diferentes gases como el CO₂, los óxidos de nitrógeno, los monóxidos de carbono, hidrocarburos y otras partículas. Las emisiones de CO₂ en el medio marino están a día de hoy sin ser reguladas, si bien si existe una nueva normativa europea que entrara en vigor a partir de 2018, por la cual los barcos que visiten puertos europeos se verán obligados a seguir un seguimiento, dar notificación y obtener una verificación (SNV) por parte de las autoridades de la UE. Por lo tanto, a día de hoy, solo los NO_x y los SO_x están regulados en el ámbito marino. Los SO_x no presentan dificultad puesto que se limitan por la cantidad de azufre del propio combustible. Los NO_x en cambio, se producen por la reacción que se da a altas temperaturas y a altas presiones entre el oxígeno y el nitrógeno, gases que a priori, a diferencia del SO_x, no podemos evitar en la combustión. (Cortijo 2017)

La reducción del NOx en los gases de escape de los motores diésel marinos ha sido durante años objeto de investigación y regulación. Estas investigaciones han dado lugar a diferentes métodos para la reducción del mismo. Se conoce que la eficiencia energética y las emisiones de óxidos de nitrógeno tienen una relación directa, por la que los métodos de tratamiento postcombustión, se han llevado el protagonismo a día de hoy, más concretamente los RCS o reductores catalíticos selectivos, ya que no influyen en la gestión de la combustión para una mayor eficiencia.

Las regulaciones que se adoptan en este ámbito vienen de la Organización Marítima Internacional, del Anexo VI del Convenio para la regulación de la contaminación de los buques, MARPOL. La aplicación de este anexo entro en vigor el 19 de mayo de 2005. Después de la entrada en vigor, se adoptaron nuevas medidas las cuales entraron en vigor entre el 2008 y el 2016 donde se establecían nuevos límites de emisiones para los óxidos de nitrógeno y azufre. En esta regulación encontramos diferentes límites, en función de las velocidades de los motores diésel marinos.

El conocimiento y puesta en práctica de sistemas de RCS y sus regulaciones cobran vital importancia para futuros marinos, es por ello importante conocer cómo trabajan estos tipos de sistemas, sus características, problemas y la relación que existe entre el funcionamiento y la regulación del mismo para futuras inspecciones.

OBJETIVOS

2. OBJETIVOS

En el presente trabajo, se estudiarán los métodos y sistemas que se han ido adoptando para la reducción del NOx. Teniendo en cuenta la adaptación de estos métodos al medio marino, se hará un estudio para un acercamiento didáctico de los Reductores Catalíticos Selectivos teniendo en cuenta la normativa vigente hoy en día. Se hará uso del simulador MC90-V perteneciente a Kongsberg, para conocer la respuesta del sistema, a diferentes cargas del motor.

En un principio, se deberán conocer las técnicas de análisis existentes para gases nocivos en los motores de combustión interna, y más en concreto los utilizados para el control de los óxidos de nitrógeno. Las características de estos analizadores condicionaran la respuesta de los sistemas de reducción de emisiones.

Mediante el simulador se observará la respuesta del analizador de emisiones de NOx. La inyección de urea depende de la cantidad de emisiones de NOx que el analizador detecte. Por lo tanto, la respuesta del sistema dependerá en gran parte del tiempo de reacción del analizador.

Sera necesario conocer la normativa vigente para así conocer los límites de emisiones de NOx a los que los motores marinos deben adaptarse, así como los pasos que se deberán dar para certificarlos. Con el simulador se observará a cuál de los límites de emisiones establecidos es capaz de operar el MC90-V, y la dependencia de este a usar la reducción catalítica selectiva.

Otro de los objetivos es el estudio de los métodos de reducción de NOx existentes en la actualidad. Se hará un mayor acercamiento a los reductores catalíticos selectivos y a su aplicabilidad, teniendo en cuenta la capacidad de estos para la reducción de NOx y teniendo en cuenta también los límites a los que deberán de ceñirse los nuevos motores.

Esto se podrá ejemplificar con el simulador MC90-V. Mediante este simulador se comprobará el comportamiento del sistema de reducción catalítica selectiva, y la capacidad para la reducción de NOx a diferentes cargas de un motor lento de 2 tiempos. Será necesario conocer para ello la puesta en marcha del sistema de reducción catalítica selectiva en el MC90-V, para concluir con estos objetivos.

FUNDAMENTOS TEORICOS

3. SISTEMAS DE MEDIDA DE GASES DE ESCAPE EN MOTORES DIESEL

Los sistemas de muestreo de gases tienen como principal función la de suministrar una muestra de los gases de escape de un motor al analizador del mismo. Ha de ser una muestra que corresponda con las emisiones reales del motor según su prueba de ciclo. Cuando los caudales de ensayo no son muy grandes, estas muestras se recolectan en recipientes o bolsas de plástico para su posterior muestreo. (Uriondo, Gomez y Gutierrez 2012)

Los sistemas tradicionales de muestreo en los Motores Principales, se analizaban gravimétricamente, después de haber pasado la muestra por un filtro de muestreo. La muestra ha de acondicionarse según los requisitos del analizador, es por ello que es de esencial importancia filtrarlo. Existen nuevos analizadores de medida de emisiones sin filtro.

Otro tipo de analizadores son los analizadores Secos, los cuales tienen como principal característica el enfriado y secado de la muestra antes de analizarla. En este tipo de analizadores ha de tenerse en cuenta el arrastre de partículas a causa del proceso de condensado de vapor. Este arrastre puede hacer que la muestra que llegue al analizador no refleje las emisiones reales. Es por ello que se debe minimizar el arrastre. Existen detectores de ionización de llama y analizadores de quimioluminiscencia que minimizan la pérdida usando un gas caliente. De esta manera todo el sistema es calentado a 180-200°C. Los gases de escape en los muestreos de la mayoría de motores parte de gases diluidos. Mediante una mezcla turbulenta de aire y gases en un tubo de acero inoxidable pulido también llamado tubo de dilución. El gas de escape del motor entra en el túnel dilución donde tiene lugar la mezcla turbulenta. EL tamaño de estos túneles de dilución de flujo completo ha sido objeto de estudio puesto que su excesivo

tamaño y precio. Las investigaciones están dirigidas a túneles de dilución parcial en lugar de diluciones totales, en cargas transitorias.

El análisis de escape realizado a condición de régimen estacionario es realizado normalmente con la muestra de gas fluyendo continuamente a través de los instrumentos. El sistema de muestreo tiene que redistribuir la muestra a todos los analizadores con los caudales de flujo requeridos. Para el análisis en ciclos transitorios los gases de escape almacenan en bolsas plasticas de teflón para un análisis posterior en régimen estacionario, o se realizan medidas en continuo con analizadores de respuesta rápida.

Por otra parte, el muestreo a volumen constante es el utilizado por la mayoría de los países para las inspecciones. Los muestreos a volumen constante diluyen los gases de escape con aire para mantener un flujo total constante bajo cualquier condición de funcionamiento. Este flujo constante permite un cálculo sencillo y preciso de los factores de emisión basados en masa, según lo requerido por las regulaciones de emisiones, basándose en los valores de concentración medido por los analizadores.

La unidad de medición es una bomba de vacío que hace que el gas fluya a través de una tobera critica Venturi. El principio de funcionamiento consiste en que una vez que se alcanza la caída de presión determinada y se alcanza la velocidad del sonido en la garganta del Venturi, la velocidad no se incrementara con una reducción de presión mayor aguas abajo. Los gases recogidos bajo condiciones transitorias se mezclan con aire en un túnel de flujo total. Para el caso de medidas particulares, se extrae el aire y recoger las partículas en filtros. Las muestras para medidas de continuo de los gases se extraen del túnel de dilución primario. Las líneas de muestreo deben ser calentadas hasta unos 190°C para evitar condensaciones y perdidas de las muestras. Estas pérdidas se dan con mayor asiduidad con gases con un punto de ebullición alto. Este riesgo se sule con un análisis de hidrocarburos con analizadores calentados. Se emplea un

integrador para el analizador en continuo para analizar las emisiones acumuladas a lo largo del tiempo del ciclo. Para motores marinos, donde existen altas concentraciones de humedad, partículas en la muestra y las altas temperaturas de la muestra, no es sencillo evitar las pérdidas de carga por condensación o por la disolución de gases ácidos en el condensado, por ello se recurre a muestreos no diluidos. Son los métodos más adecuados para altos caudales en los gases de escape. (Uriondo, Gomez y Gutierrez 2012)

3.1 METODO DE ANÁLISIS

Los métodos de análisis vienen normalmente regulados por las regulaciones ya existentes. A la hora de medir contaminantes desde un punto de vista legal se deberán seguir los métodos de referencia establecidos. Para que un método se le considere como referencia deberá cumplir tres características principales:

- Precisión: Una Desviación estándar pequeña.
- Exactitud: Valor promedio determinado tras varias repeticiones de la medida muy cercano al valor real.
- Robustez: El resultado no se verá afectado por cualquier otro tipo de interacción con otros compuestos o especies, ni con la preparación de la muestra...

Existen diferentes organismos que adoptan diferentes tipos de métodos de referencia. Los más representativos son la UE (Unión Europea) y la EPA (Environmental Protection Agency de Estados Unidos). No existe gran diferencia en cuanto a los métodos de análisis de los principales grupos de gases contaminantes.

Para el análisis de emisiones gaseosas los métodos utilizados por ambos organismos son los siguientes:

- O₂: Análisis de Infrarrojo No Dispersivo (IND), Analizador Paramagnético, Célula Electroquímica.
- HC: Detector de Ionizador de Llama (DIL).
- NO_x: Análisis Químico luminiscente (CLD, Chemiluminescence Detector y HCLD Heated Chemiluminescence Detector)
- CO, CO₂: Análisis de Infrarrojos No Dispersivos (IND)
- O₃: Espectrometría UV

El Ozono, es el único de los métodos en los que los dos grandes organismos se diferencian, la Unión Europea establece como método de referencia la espectrometría UV y la EPA la reacción con el etileno y la quimioluminiscencia.

El material más común a emplear en células electroquímicas es el dióxido de zirconio (ZnO₂), para medidas de emisiones de CO, NO_x y O₂. Otras emisiones no reguladas se miden mediante métodos no estandarizados. (Uriondo, Gomez y Gutierrez 2012)

3.1.1 INFRARROJOS NO DISPERSIVOS

Este método se basa principalmente en aprovechar las propiedades de absorber la radiación que tienen ciertos gases, en diferentes longitudes de onda. Estos gases son gases formados por moléculas de al menos 2 átomos diferentes tales como el monóxido de carbono, monóxido de nitrógeno etc. Al absorber la radiación infrarroja convierten la energía lumínica en energía de rotación, es decir crea un movimiento en las partículas, pudiendo ser medido por el calor que el propio movimiento emana. Para este tipo de mediciones no se utilizan prismas o monocromadores para separar la luz, en lugar de eso, se trabaja en un rango de longitud de onda dado, que varía entre 0,75 y 30µm. (Uriondo, Gomez y Gutierrez 2012)

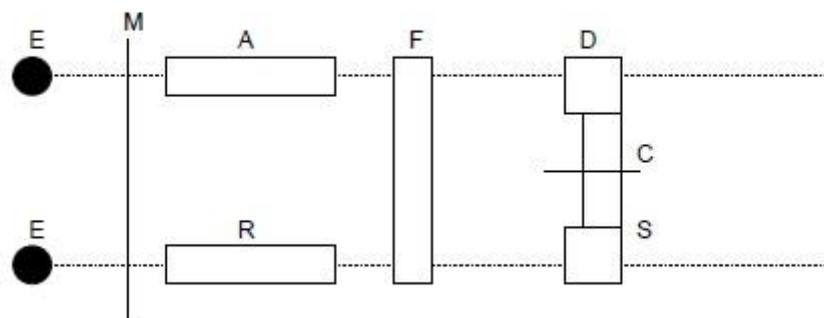


Figura 1. Analizador NDIR (Uriondo, Gómez y Gutiérrez 2012)

En la imagen se muestra un analizador NDIR. Cuenta con una célula de absorción A donde se contiene el gas que va ser analizado. La otra célula R es donde se contiene el gas de referencia. Para este tipo de analizadores se utiliza el N₂, pueden también usarse otro tipo de gas inerte. La célula F se la conoce como la célula de compensación donde. Después los dos conductos pasan a través de cámaras llenas del gas a ser medido. Estas dos cámaras están divididas por un diafragma C el cual se moverá en función de la diferencia de presión que recibamos entre los gases. Esta diferencia de presión a su vez creara una diferencia de calor. (Uriondo, Gomez y Gutierrez 2012) La presión será modulada por un “chopper” rotativo de 10Hz. La señal de salida de la célula representara la variación de la capacitancia del sistema. Las cámaras de los detectores en la mayoría de los sistemas estarán conectadas por un capilar para compensar los gradientes de temperatura (Nakamura et al. 2002).

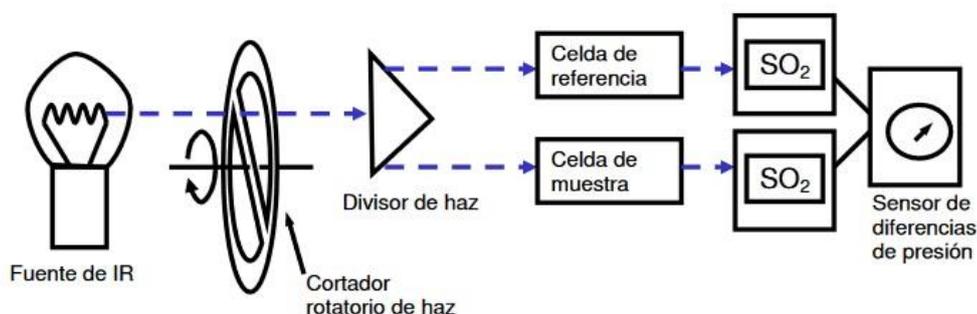


Figura 2. Diagrama del proceso de los analizadores NDIR (UPO 2016)

Estos sistemas de medición por infrarrojos son sensibles al vapor de agua ya que el agua es un gas absorbente, incluso los materiales por los que se constituye el analizador, tales como las tierras alcalinas halógenas son también sensibles al agua. Por lo tanto, es de gran importancia acondicionar las muestras de los gases antes de pasarlos por el analizador. En este caso los gases serán enfriados y secados.

Los analizadores infrarrojos no dispersivos pueden ser empleados para distintos gases, aunque para motores diésel su único uso sea el de la medición de carbono dióxido y monóxido de carbono.

3.1.2 ANALIZADORES POR QUIMIOLUMINISCENCIA

La quimioluminiscencia es la producción de luz a partir de una reacción química. Dos compuestos químicos reacción para formar un intermedio en estado excitado, y por consiguiente libera un fotón para des excitarse. Este fotón será el que emita la luz. Una vez des-excitado vuelve a su estado normal.

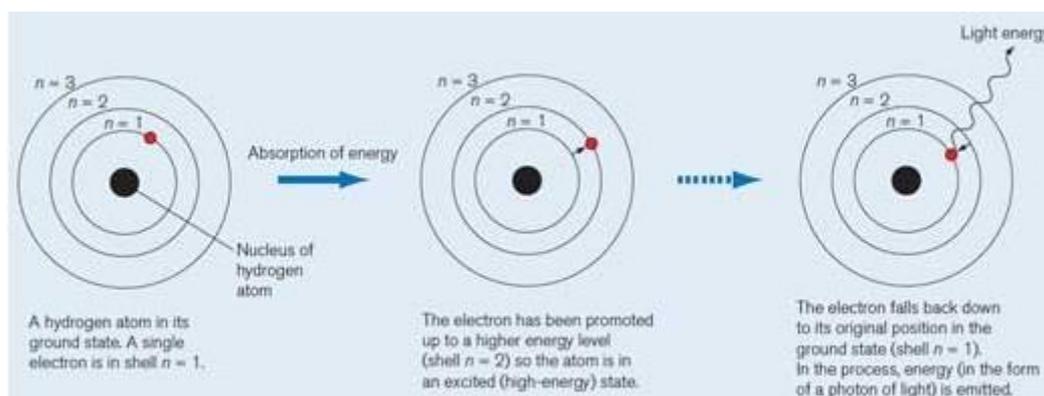


Figura 3. Liberación de energía de un átomo de hidrogeno(Douglas P 2010)

En la figura 3 se ve un átomo de hidrogeno es su estado fundamental. El átomo que se encuentra en la primera orbita es excitado y salta una segunda orbita liberando energía al ser excitado. El hecho de no ser su estado original o fundamental hace que el mismo vuelva a su órbita de origen. En el proceso se habrá liberado un fotón que será el que emane luz. A diferencia de otras

reacciones, la energía liberada en el proceso es luz en lugar de calor. Este proceso se da con distintos tipos de reacciones y se utiliza para distintas aplicaciones. En el caso de las aplicaciones marinas, encontramos los analizadores por quimioluminiscencia para comprobar el contenido en gases de tipo NO_x (Douglas P 2010).

El analizador por quimioluminiscencia emplea una reacción entre el óxido nítrico y el ozono. Esta reacción produce una radiación infrarroja con valores entre 500 y 300 nm. Para la producción de ozono en estos instrumentos dan descargas de alto voltaje en el oxígeno. El ozono tiene como función minimizar efectos de enfriamiento y asegurar una reacción completa.

Como se ha apuntado antes con el hidrogeno, la molécula de dióxido de nitrógeno en este caso retornara a su estado fundamental. El principio del analizador es medir la emisión de fotones en esta reacción teniendo en cuenta el caudal analizado. El control del caudal analizado cobra especial importancia puesto que este será proporcional a la emisión de fotones y por consiguiente a la cantidad de moléculas NO. La luz emanada en la reacción será filtrada para evitar interferencias con otros gases.

Estos analizadores únicamente miden la concentración del monóxido de nitrógeno por lo que será necesaria la instalación de un catalizador donde podamos reducir el dióxido de nitrógeno en monóxido de carbono para su posterior análisis. Una vez el catalizador reduzca la mezcla en un solo compuesto, este reaccionara con el ozono previamente producido para liberar fotones de luz roja de entre 500 y 300nm.

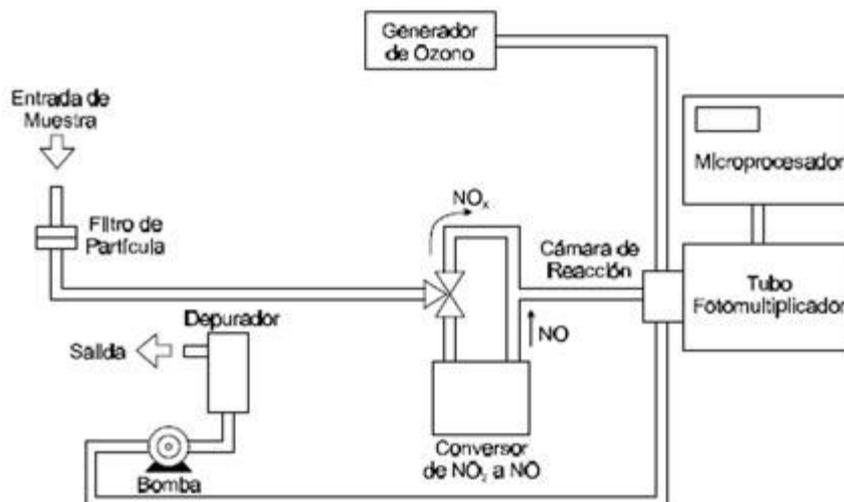


Figura 4. Analizador por quimioluminiscencia. (Calaire 2015)

El principio de funcionamiento para la lectura de las concentraciones de NO es el siguiente. Una primera muestra sin reducir, es decir, con partículas de NO₂ se hace pasar a la cámara donde reaccionara con el ozono y de donde obtendremos un resultado de la cantidad de NO presente en la muestra. El siguiente paso es el de reducir la muestra en un catalizador donde conseguiremos que el dióxido de nitrógeno se reduzca a NO. De aquí obtendremos un resultado que comparándolo con el anterior conoceremos la cantidad de NO₂ presente en los gases de escape.

3.1.2.1 OXIDOS DE NITRÓGENO

En la medida de los Óxidos de nitrógeno encontraremos muestras frías y secas por una parte o bien muestras en caliente. Estos serán los dos tipos o métodos de análisis que encontraremos para medida de óxidos de nitrógeno por quimioluminiscencia. Cuando hablamos de medidas con muestras frías y secas, se trata, de muestras donde evitaremos la condensación y la disolución del dióxido de nitrógeno, NO₂, en el condensado. Esta práctica es la menos usada en aplicaciones marinas donde es más frecuente el uso de muestras en caliente donde el dióxido de carbono es reducido a NO. La cantidad de dióxido de nitrógeno se calculará por la diferencia de la suma entre el NO₂ y el NO.

3.1.3 DETECTORES DE IONIZACIÓN DE LLAMA

En un detector de ionización de llama se añade gas de hidrógeno al gas portador que sale de la columna. A continuación, esta mezcla pasa a través del quemador y se mezcla con aire para que se produzca la combustión.

Los electrodos, a través de los que se mide la corriente, están formados por el quemador conectado a tierra y el colector. Se suele aplicar una diferencia de potencial de entre 100 y 300V entre estos electrodos, y los iones que se forman en la llama constituyen el medio a través del que la corriente fluye entre los electrodos. Esta corriente, fluye a través de una resistencia exterior, a lo largo de la cual existe una diferencia de potencial que se mide y registra. (Uriondo, Gomez y Gutierrez 2012)

Cuando hay otros materiales presentes en el gas portador que sale de la columna, el número de iones que se forman por la combustión de estos materiales cambia, y como resultado la corriente entre el colector y el quemador se ve alterada.

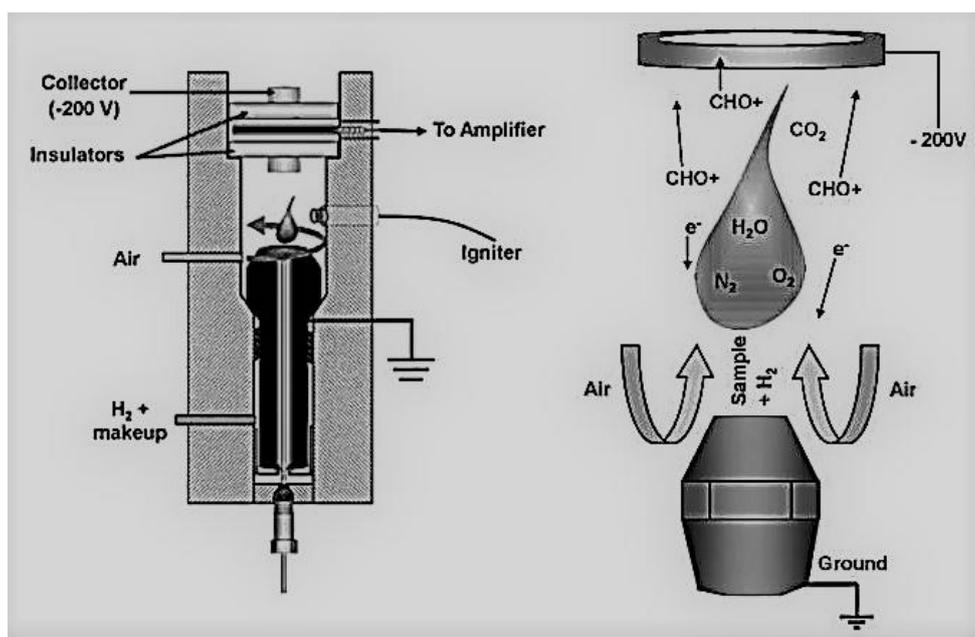


Figura 5 Detector de ionización de llama (Calaire 2015)

Este tipo de analizador es usado, para el análisis de cualquier tipo de compuesto que contenga carbono. Los resultados obtenidos por el analizador son una comparación con un hidrocarburo de referencia normalmente propano o hexano. Estos vienen dados en partes por millón. Las mezclas de las combustiones para analizadores de tipo DIL son un 40% de H₂ y 60% He. El uso de gases como el propano o el hexano hace que el analizador no se vea influenciado por el oxígeno presente. A diferencia de otro tipo de analizadores los DIL no presentan ninguna variación en la lectura si existe vapor de agua en la muestra de gas a analizar. A día de hoy, encontramos en el mercado nuevos analizadores DIL con un tamaño más reducido y con un tiempo de respuesta mucho menor. Son muy útiles para aplicaciones marinas donde ofrece la posibilidad de medir dentro de cilindros y colectores de gases de escape. (Uriondo, Gomez y Gutierrez 2012)

3.1.3.1 HIDROCARBUROS

Este método se usa principalmente en aplicaciones Marinas para la medida de gases de motores diésel, donde se debe emplear detectores de ionización de llama calentados para evitar condensaciones y pérdidas de los componentes pesados de los hidrocarburos. Los hidrocarburos sin metano o no metano HCNM son medidos por separación cromatografía y extracción del metano.

Históricamente, para la medida o análisis de los hidrocarburos se utilizaban los infrarrojos no dispersivos. Esta técnica quedó en desuso para el análisis de hidrocarburos puesto que no era lo suficientemente precisa con la entrada de otras técnicas como la de los DIL.

3.1.4 ESPECTROMETRIA INFRAROJA POR TRANSFORMADA DE FOURIER

Este tipo de analizadores generan interferogramas de dos haces de infrarrojos de caminos cambiantes. Los haces tienen un mismo origen, pero cada uno de ellos se ve reflejado en dos espejos diferentes, uno de ellos fijo y el otro móvil o vibratorio. Los interferogramas son creados cuando los haces se recombinan entre ellos y así queda recopilada toda la información de la distribución espectral de la fuente de radiación. (Uriondo, Gomez y Gutierrez 2012) Cuando la radiación se envía a la mezcla de gas, se absorban componentes espectrales que corresponden al espectro de absorción de los diferentes gases. La distribución de la intensidad de luz se ve regulada por la presencia de elementos químicos. Mediante transformadas de Fourier obtenemos la distribución de la intensidad como función de camino óptico. (Baronick 2001)

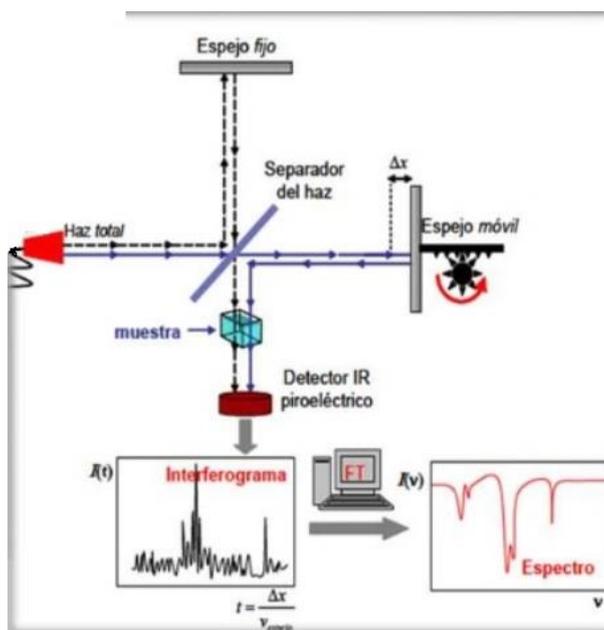


Figura 6 Espectrómetro infrarrojo por transformada de Laplace

Las concentraciones de los gases particulares se obtienen de la distribución de la intensidad partiendo de su espectro de absorción conocido. Se pueden hacer análisis selectivos con este tipo de analizador. Son útiles para medidas de óxidos de nitrógeno, hidrocarburos, óxidos del carbono, etc. Es posible hacer un análisis simultáneo de estos. Si bien es cierto que, aunque se puedan medir

hidrocarburos, en aplicaciones marinas no es aconsejado su uso puesto que no es muy adecuado para medidas de hidrocarburos con cadenas muy largas como pueda ser el que encontremos en los gases de escape de un motor diésel.

3.1.4.1 ESPECTROSCOPIA ULTRAVIOLETA

La técnica de análisis por espectrometría ultravioleta es otro método para la medida de NO_x. Recogen el espectro de todos los compuestos que atenúan energía dentro de una sección limitada del espectro electromagnético. Con equipos más simples y baratos que los de quimioluminiscencia podemos obtener mismos resultados y con menos ruido e interacción con el agua o el dióxido de carbono.

3.1.4.2 ESPECTROSCOPIA DE LOS NO_x

Es un método de análisis de los NO_x que está dando buenos resultados para su medida. El principio es parecido al de los analizadores de muestra en caliente por quimioluminiscencia, donde los óxidos de nitrógeno totales son calculados por la suma del dióxido de carbono y el monóxido de carbono. Ofrecen menos interferencia con el agua que los analizadores por quimioluminiscencia. (Escobar 2011)

3.1.5 CELULAS ELECTROQUÍMICAS

Se basa en el empleo de un electrolítico especial al que se le entiende por la célula, donde se encontrara la concentración electrolítica y esta será la que actuara como catalizador para ayudar al flujo de electrones. Dependerá del tipo de medida la selección del material que actúe como catalizador. Un uso frecuente para estos tipos de analizadores es el del análisis de oxígeno donde el

material utilizado será el óxido de circonio como base y una capa de platino que actué como electrolito que permita la transferencia de oxígeno a través de la celda. (Uriondo, Gomez y Gutierrez 2012)

Cuando el ZrO_2 es calentado a $850^\circ C$, los iones de oxígeno pueden migrar a través del material. La fina película de platino catalizara el proceso, permitiendo al oxígeno atravesar la estructura como iones de O^{2-} hasta alcanzar el otro lado. Esta migración ocurre porque los iones de circonio forman una estructura cristalina perfecta en el material donde los iones de O^{2-} no lo hacen, resultando en vacantes en la estructura. El calentar el óxido de circonio permite a las vacantes y a los iones O^{2-} moverse. Los iones de oxígeno migran al electrodo en el lado de la muestra de la celda liberan los electrones en el electrodo y emergen como moléculas de oxígeno. Este proceso continuara hasta que la concentración o las presiones parciales de oxígeno sean iguales en ambos lados de la celda, es decir, hasta que los potenciales químicos se igualen y el sistema quede en equilibrio. (Uriondo, Gomez y Gutierrez 2012)

En la práctica en realidad el lado de la muestra en la celda sufre renovación continua de carga no permitiendo que las concentraciones se igualen. Por ello, se dará un flujo continuo de electrones a través del resistor con el fin de lograr el equilibrio, esta fuerza electromotriz generada por el paso de electrones es la que posteriormente será medida. La precisión de las células electroquímicas depende directamente de la capacidad y calidad de producción del fabricante de las células electroquímicas, así como de la capacidad del sistema de eliminar interferencias por otros gases.

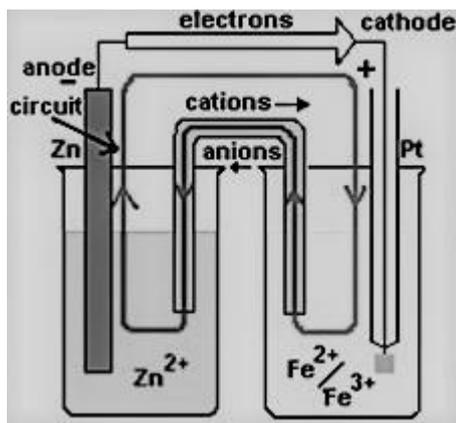


Figura 7 Células electroquímicas(Chavez 2015)

Estas células se usan básicamente para la medida de oxígeno por su estabilidad con el dióxido de zirconio y la capacidad de soportar altas temperaturas. Son instrumentos que necesitan de una gran precisión y calidad de construcción para que el sistema sea capaz de evitar interacción con otros gases. (Uriondo, Gomez y Gutierrez 2012)

3.1.6 MÉTODOS MAGNETICOS

Se basa en las propiedades de las moléculas, que podrán ser diamagnéticas o para magnéticas. La mayoría de las moléculas son diamagnéticas, es decir, son repelidas por los campos magnéticos. El paramagnetismo surge cuando una molécula contiene electrones impares. La mayoría de materiales tendrán electrones emparejados, esto es, en cada capa habrá un electrón girando en sentido contrario uno del otro.

La molécula de oxígeno por ejemplo es paramagnética y carece de electrones girando en sentido contrario. En este caso tiene dos electrones no emparejados que giran en la misma dirección, el cual le da a la molécula un magnetismo permanente. Cuando un gas como el oxígeno está sujeto a un campo magnético sufre una fuerza direccionada hacia el sentido creciente de los campos. Cuando la molécula se sitúa cerca del campo magnético esta será arrastrada, y los momentos magnéticos de los electrones se alinean en el campo. La fuerza

magnética generada servirá para el análisis de la concentración de oxígeno o gas paramagnético. (Uriondo, Gomez y Gutierrez 2012)

4. NORMATIVA Y REGULACIONES; REGLAS PARA PREVENIR LA CONTAMINACIÓN ATMOSFERICA

Las regulaciones a las que todo buque debe de ceñirse son a las impuestas por la organización internacional marítima OMI. Esta organización promueve la cooperación entre estados y la industria para mejorar la seguridad marítima y prevenir la contaminación. Los principales dos convenios son el SOLAS y el MARPOL, es en este último donde encontraremos la normativa internacional para prevenir la contaminación de los buques.

Las primeras regulaciones del convenio provienen de 1973 concretamente de la decimoséptima sesión de la asamblea de la Organización Marítima Internacional. Para la contaminación atmosférica en concreto decidieron establecer un anexo específico en el convenio, que fue llamado el MARPOL 73/78. Se desarrolló un borrador de un nuevo anexo por el Comité para la Protección del Medio Marino, para la regulación de la polución aérea provenientes de los buques.

Posteriormente en 1997, tras 5 años de debate, se adoptó un protocolo para corregir la convención para la prevención de la Polución de los Buques. En este protocolo se establece el anexo VI del convenio como las Regulaciones para la Prevención de la Polución provenientes de Buques y el Código Técnico para el control de las emisiones de NOx provenientes de motores diésel marinos.

En 2008, el Comité para la Protección de Medio Marino se volvió reunir en la reunión número 58, aquí se adoptó la resolución N.^a 176, corrigiendo el Convenio Internacional para la Prevención de la Polución de los Buques, y más concretamente el anexo VI y el código Técnico de los NOx. Estas regulaciones no entrarían en vigor hasta el 1 de enero de 2010.

El Anexo VI del Marpol destinado a la prevención de la contaminación atmosférica, consta de 18 regulaciones y 6 apéndices para la regulación de contaminantes atmosféricos provenientes de motores de motores diésel alternativos y de calderas, tomando como contaminantes los NOx y los SOx.

Estas regulaciones están divididas en tres capítulos. En el primer capítulo encontramos 4 regulaciones donde se definen conceptos del propio anexo. En el capítulo 2 están las regulaciones que abarcan la vigilancia, la certificación y los medios de control de los distintos tipos de contaminantes atmosféricos. Consta de 7 de regulaciones. Por último, en el tercer capítulo, encontramos las regulaciones del 11 al 18. En este último capítulo encontraremos los requisitos para el control de las emisiones de contaminantes atmosféricos.

4.1 EXCEPCIONES: REGLA 3

Las regulaciones presentes en el Anexo no se aplicarán en los siguientes casos:

- A las emisiones necesarias para proteger la seguridad del buque o salvar vidas en el mar.
- A las emisiones resultantes a las averías producidas por un buque o por su equipo:
 - Siempre que después de producirse la avería o de descubrirse la emisión se hayan tomado todas las precauciones razonables para prevenir o reducir al mínimo tal emisión.
 - Salvo que el propietario o el capitán hayan actuado ya sea con la intención de causar avería, o con imprudencia temeraria y a sabiendas de que probablemente se producirá una avería.
- En el caso de pruebas de investigación derivadas de la exploración del fondo marino en el caso de emisiones de hidrocarburos procedentes del fondo marino, quema de gases en la extracción marina, emisiones asociadas con el tratamiento de los minerales para el caso de motores diésel empleados solo para la explotación del fondo marino.

- En el caso de que se realicen pruebas de investigación en tecnologías para la reducción y control de las emisiones de contaminantes ambientales, las administraciones pueden emitir exenciones que tienen un periodo de vida limitado.

4.2 EQUIVALENCIAS: REGLA 4

La Administración puede autorizar a bordo de un buque accesorios, materiales, dispositivos o aparatos en lugar de los prescritos en el presente anexo, si tales accesorios, materiales dispositivos o aparatos son por lo menos tan eficaces como los prescritos en el presente anexo.

La Administración que autorice accesorios materiales, dispositivos o aparatos en lugar de los prescritos en el presente anexo comunicara a la Organización los pormenores de los mismos a fin de que esta los notifique a las partes en el presente Convenio para su información y para que tomen las medidas que puedan resultar oportunas.

4.3 RECONOCIMIENTOS Y INSPECCIONES: REGLA 5

Estarán obligados a pasar inspección todos los buques con arqueo bruto igual o superior a 400 y todas las torres de perforación y otras plataformas, fijas o flotantes, y serán objeto de los siguientes reconocimientos:

1. Un reconocimiento inicial antes de que el buque entre en servicio o de que se expida por primera vez el certificado prescrito en la Regla 6 del Anexo. Este reconocimiento se realizará de modo que garantice que el equipo, los sistemas, los accesorios, las instalaciones y los materiales cumplen plenamente las prescripciones aplicables al anexo.

2. Reconocimientos periódicos a intervalos especificados por la administración, pero que no excederán de cinco años, los cuales se realizarán de modo que garanticen que el equipo los sistemas, los accesorios, las instalaciones y los materiales cumplen plenamente las prescripciones aplicables al anexo.
3. Un reconocimiento intermedio, como mínimo, durante el periodo de validez del certificado, que se realizara de modo que garantice que el equipo y las instalaciones cumplen plenamente las prescripciones del Anexo. Cuando se efectuó solamente en reconocimiento intermedio durante uno de los periodos de validez del certificado, y cuando el periodo de validez del certificado sea superior a dos años y medio, dicho reconocimiento se efectuará no más de seis meses antes ni más de seis meses después de transcurrida la mitad del periodo de validez del certificado. Estos reconocimientos intermedios se consignarán en el certificado expedido en virtud de la regla 6 del anexo.

En el caso de buques con arqueo bruto inferior a 400, la Administración podrá establecer las medidas pertinentes para que se cumplan las disposiciones aplicables del Anexo.

La Administración podrá reservarse la opción de hacer inspecciones por los funcionarios designados por la propia administración durante el periodo de validez del certificado. Estas inspecciones garantizarán que el equipo sigue siendo satisfactorio en todos los aspectos durante el servicio y para el servicio que ha sido designado.

Estas inspecciones para el caso de los NOx se realizarán de acuerdo con lo establecido en el Código Técnico de los NOx 2008. En el caso de que en las inspecciones se detecten incumplimientos con las regulaciones del Anexo los inspectores pueden determinar acciones correctivas.

4.4 OXIDOS DE NITROGENO: REGLA 13

Esta regulación se aplica a:

- a) Todos los motores diésel con una potencia de salida superior a 130KW, instalado a bordo de un buque construido el 1 de enero del año 2000 o posteriormente.
- b) Todos los motores diésel con una potencia de salida superior a 130KW, que haya sido objeto de una transformación importantes el 1 de enero del año 2000 o posteriormente.

La regulación no se aplicará a:

- a) A los motores de emergencia, a los motores instalados a bordo de botes salvavidas ni a ningún dispositivo o equipo previsto para ser utilizado únicamente en caso de emergencia.
- b) A los motores instalados a bordo de buques que estén solamente destinados a realizar viajes dentro de las aguas sometidas a la soberanía o jurisdicción del estado cuyo pabellón están autorizados a enarbolar, a condición de que tales motores estén sometidos a otra medida de control de los NOx establecida por la administración.

4.5 LÍMITES DE EMISIONES DE NOx

Existen tres límites de emisiones dependiendo de la fecha de instalación del motor o de la fecha de la última conversión mayor del motor. Una conversión mayor será cuando:

- El motor se sustituya por un motor diésel nuevo o se monte un motor diésel adicional.
- Se realice una modificación sustancial de acuerdo con el Código Técnico de los NOx 2008.

- Se incremente la potencia máxima continua del motor más de un 10% en comparación a la condición original

Dependiendo de la fecha de modificación o instalación del motor, se deberán cumplir límites de emisiones distintos. A partir del 1 de enero del 2016 si se da una modificación deberá cumplir como mínimo con el nivel de emisiones Tier II.

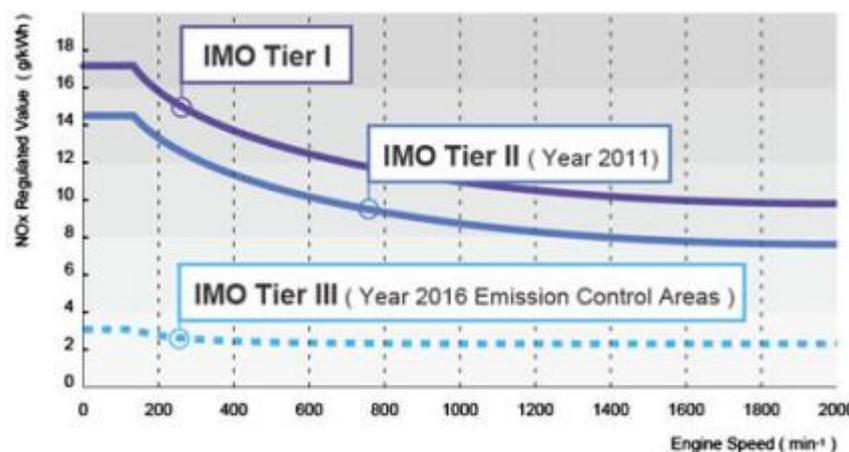


Tabla 1 Límites de emisiones de NOx (MARPOL)

4.5.1 TIER I

Se prohíbe el funcionamiento de todo motor diésel marino instalado en un buque construido (salvo en las excepciones antes mencionadas) entre el 1 de enero de 2000 y el 1 de enero 2011, a menos que la cantidad de óxidos de nitrógeno emitidos por el motor se encuentren dentro de los límites.

[n] es el régimen nominal del motor (revoluciones por minuto del cigüeñal)

1. 17 g/kWh si n es inferior a 130 rpm.
2. $45 \cdot n^{-0.2}$ si n es igual o superior a 130 rpm, pero inferior a 2000 rpm.
3. 9,8 g/kWh si n es igual o superior a 2000 rpm.

4.5.2 TIER II

Se prohíbe el funcionamiento de todo motor diésel marino instalado en un buque construido (salvo en las excepciones antes mencionadas) el 1 de enero 2011 o posteriormente, a menos que la cantidad de óxidos de nitrógeno emitidos por el motor se encuentren dentro de los límites.

*Nota [n] es el régimen nominal del motor (revoluciones por minuto del cigüeñal)

1. 14,4 g/kWh si n es inferior a 130 rpm.
2. $44 \cdot n^{-0.2}$ si n es igual o superior a 130 rpm, pero inferior a 2000 rpm.
3. 7,7 g/kWh si n es igual o superior a 2000 rpm.

4.5.3 TIER III

Si el buque está operando en un Área de Control de Emisiones, se prohíbe el funcionamiento de todo motor diésel marino instalado en un buque construido (salvo en las excepciones antes mencionadas) el 1 de enero 2016 o posteriormente, a menos que la cantidad de óxidos de nitrógeno emitidos por el motor se encuentren dentro de los límites.

1. 3,4 g/kWh si $\langle n \rangle$ es inferior a 130 rpm.
2. $9 \cdot n^{-0.2}$ si n es igual o superior a 130 rpm, pero inferior a 2000 rpm.
3. 2,0 g/kWh si n es igual o superior a 2000 rpm.

Si el buque opera fuera del área de control de emisiones deberá cumplir con lo establecido en el Tier II.

El MEPC 66 (abril de 2014), adoptó una serie de enmiendas a la regla 13 del Anexo VI del Convenio MARPOL con respecto a la fecha consignada en las normas relativas a los límites de emisión de NO_x correspondientes al nivel III.

En las enmiendas se prevé que las normas relativas a los límites de emisión de NO_x correspondientes al nivel III se aplicarán a un motor diésel marino instalado en un buque construido el 1 de enero de 2016, o posteriormente, que navegue en las zonas de control de las emisiones de Norteamérica o del mar Caribe de los Estados Unidos que están designadas para el control de las emisiones de NO_x.

Además, las prescripciones correspondientes al nivel III se aplicarán a los motores diésel marinos instalados cuando naveguen en las zonas de control de las emisiones que puedan designarse en el futuro para el control de los NO_x del nivel III. El nivel III se aplicaría a los buques que han sido construidos en la fecha de adopción de dicha zona de control de emisiones por el Comité de protección del medio marino, o posteriormente, o en una fecha posterior que se especifique en la enmienda mediante la cual se designe la zona de control de las emisiones de NO_x del nivel III.

Las prescripciones propias del nivel III no se aplican a un motor diésel marino instalado en un buque construido antes del 1 de enero 2021, de arqueo bruto inferior a 500 toneladas, de eslora igual o superior a 24 metros, que ha sido específicamente proyectado, y se utiliza exclusivamente, para fines recreativos. También se efectuaron revisiones de las reglas relativas a las sustancias que agotan la capa de ozono, los compuestos orgánicos volátiles, la incineración, las instalaciones de recepción y la calidad del fueloil, a las cuales se añadieron reglas sobre la disponibilidad del fueloil. Se espera que las disposiciones revisadas produzcan un notable beneficio para el medio atmosférico y la salud humana, especialmente para aquellas personas que viven en ciudades portuarias y comunidades costeras.

4.6 ZONAS DE CONTROL DE EMISIONES

Hoy día existen diferentes zonas designadas como Áreas de Control de emisiones (ECA), donde las administraciones de los estados miembro de ECA inspeccionan los barcos que naveguen en estas aguas. Estas áreas se subdividen en dos, donde se encuentran las áreas de control de emisiones derivadas del azufre contenido en el combustible (SECA) o bien de control de emisiones de NOx (NECA).

Como áreas de control de emisiones de NOx (NECA), únicamente están hoy día vigentes las áreas de la costa de los Estados Unidos, más concretamente los mares de América del Norte y el Mar Caribe. Es en estas aguas donde los buques construidos a partir del 1 de enero del 2016 deberán cumplir el límite de regulación TIER III.

La Unión Europea cuenta con un área de control de emisiones donde únicamente se regulan las emisiones de sulfuros, se trata de las áreas del mar del Norte y el mar Báltico. El pasado año se aprobó que los dos mares mencionados pasarían a ser también zonas de control de emisiones de derivados del nitrógeno (NECA). Esta norma no entrara en vigor hasta el 1 de enero de 2021.

Esto supondrá un gran impacto en la economía marítima de la unión europea, ha un encarecimiento de los fletes, debido a los costes que supondrá el acondicionar los buques a los límites Tier III. Aunque desde la unión europea se prevé que el futuro pasa por adaptarse a estos nuevos límites. Tarde o temprano el resto de países deberán pasar a ser también áreas de control de emisiones.

En la siguiente imagen se muestran las áreas de control de emisiones actuales y las posibles áreas en un futuro próximo. En el caso del mar mediterráneo, a

día de hoy no cuenta con ningún tipo de control, por ello diferentes organizaciones como BirdLife Malta, Cittadini per l'Aria, France Nature Environnement, Ecologistas en Acción and the German Nature y Biodiversity Conservation Union (NABU) se han estado reuniendo durante en Marzo de este mismo año 2017 para implementar limites y controles similares a los que hoy dia existen en las costas de los Estados Unidos.(Ships & Ports 2015)

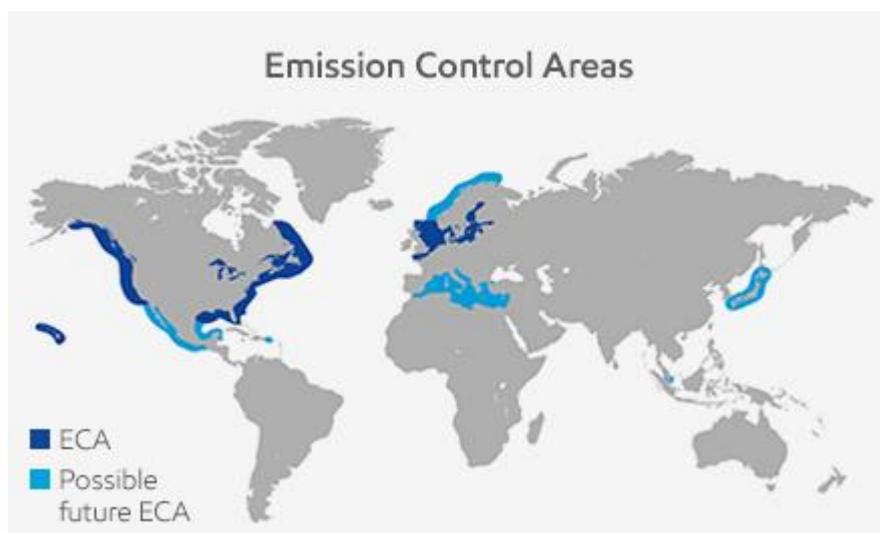


Figura 8 Zonas de control de emisiones actuales y futuras (Ships & Ports 2015)

4.7 CÓDIGO TECNICO DE LOS NO_x

El control de las emisiones de NO_x de los motores diésel se lleva a cabo mediante el cumplimiento de las prescripciones de reconocimiento y certificación que conducen a la expedición del Certificado internacional de prevención de la contaminación atmosférica para motores (EIAPP) y a la posterior demostración de cumplimiento durante el servicio, de acuerdo con las prescripciones obligatorias, a saber, reglas 13.8 y 5.3.2 respectivamente, del Código Técnico sobre los NO_x 2008 (resolución MEPC.177(58), enmendado por la resolución MEPC.251. (66)).

Este código se recomienda a las administraciones que comprueben las emisiones que producen los motores diésel de propulsión y auxiliares en un

barco de pruebas en el que puedan realizarse ensayos viables en condiciones controladas. Toda prueba ulterior que se realice a bordo del buque deberá deducir el comportamiento del motor desde el punto de vista de las emisiones y confirmar que se ha instalado, se utiliza y mantiene como el fabricante recomienda y que todos los ajustes o modificaciones no afectan a las características de emisiones del motor establecidas por las pruebas iniciales y el certificado expedido por el fabricante.

4.7.1 GENERALIDADES

Se aplica el Código Técnico de los NOx a todos los motores diésel marinos de potencia de salida superior a 130kw instalados, a bordo de cualquier buque regido por el Anexo VI al que se aplique la regla 13.

Se consideran emisiones de óxidos de nitrógeno a el cálculo de emisiones totales ponderadas de NO₂ y determinada mediante el uso de los ciclos de ensayo y métodos de medición que se especifican en el presente Código.

Se considerarán valores de funcionamiento a los datos relativos del motor, tales como la presión máxima del cilindro, la temperatura de los gases de escape etc. Que constan en el cuaderno de trabajo del motor y que están relacionados con el nivel de emisiones de NOx. Estos datos dependen de la carga.

4.7.2 RECONOCIMIENTOS Y CERTIFICACIÓN

Todos los motores diésel deberán ser objeto de los siguientes reconocimientos salvo que el código se permita expresamente:

- Reconocimiento de certificación previa que garantice que el motor, conforme a su proyecto y equipo, se ajusta al límite aplicable de emisiones de NO_x, indicado en la regla 13. Si el resultado de este reconocimiento confirma que el motor se ajusta a dichos límites, la administración expedirá un certificado EIAPP (Certificado internacional de prevención de la contaminación atmosférica para motores en relación a las emisiones de NO_x).
- Un reconocimiento inicial de certificación que se realizara a bordo del buque después de instalar el motor, pero antes de que este entre en servicio. Este reconocimiento garantiza que el motor, una vez instalado a bordo, con todos los ajustes o modificaciones efectuados desde la certificación previa, si procede, se ajusta al límite aplicable de emisión de NO_x de la regla 13. Este reconocimiento, como parte del reconocimiento inicial del buque, podrá conducir a la expedición del certificado IAPP (Certificado Internacional de prevención de la contaminación atmosférica) válido del buque, para que conste la instalación de un nuevo motor.
- Reconocimientos intermedios, anuales y de renovación, que se llevaran a cabo como parte de los reconocimientos del buque prescritos en la regla 5, a fin de garantizar que el motor sigue cumpliendo plenamente las prescripciones del presente Código.
- Un reconocimiento inicial de certificación del motor que se realizara a bordo cada vez que el motor sea objeto de una transformación importante, tal como se define en la regla 13, a fin de garantizar que el motor se ajusta al límite aplicable de emisiones de NO_x estipulado en la regla 13. Esto dará lugar a la expedición, si procede, de un Certificado EIAPP y a la modificación del Certificado IAPP.

Los fabricantes del motor, propietarios del buque o constructores del buque podrán escoger entre los siguientes métodos para realizar los cálculos, ensayos o verificaciones relativos a la emisión de NO_x del motor:

- Ensayo en banco de pruebas para el reconocimiento de certificación previa, de conformidad con el capítulo 5.

- Ensayo a bordo de un motor sin certificación previa para un reconocimiento combinado de certificación previa inicial, de conformidad con todas las prescripciones del capítulo 5 relativas a los ensayos en banco pruebas.
- Métodos de verificación a bordo, de los parámetros del motor, utilizando los datos de los elementos, los reglajes del motor y los datos de rendimiento del motor especificados en el expediente técnico, para confirmar el cumplimiento en los reconocimientos iniciales, intermedios, anuales y de renovación de los motores con certificación previa o de los motores cuyos elementos reglajes y valores de funcionamiento fundamentales desde el punto de vista de los NOx se hayan modificado o ajustado después del último reconocimiento.
- Método simplificado de medición a bordo para confirmar el cumplimiento en los reconocimientos intermedios anuales y de renovación, o la confirmación de motores con certificación previa en los reconocimientos de certificación inicial.
- Método directo de medición y vigilancia a bordo para confirmar el cumplimiento solo en los reconocimientos intermedios, anuales y de renovación.

En el siguiente diagrama se muestra el flujo para el procedimiento de una inspección inicial como de una inspección o renovación anual o intermedia o a bordo de un buque.

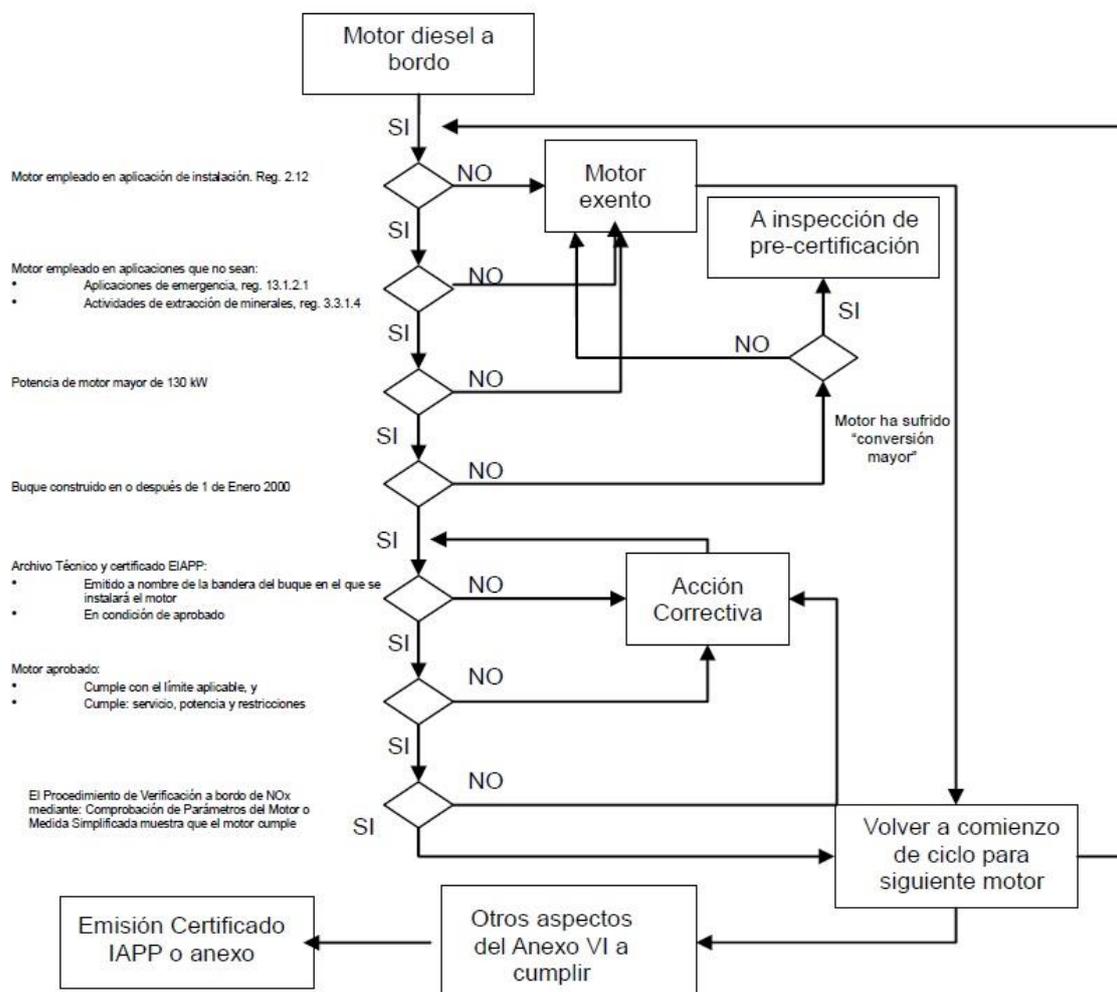


Figura 9 Flujo para el procedimiento de una inspección inicial como de una inspección o renovación anual o intermedia o a bordo de un buque (Código técnico de los NOx)

4.7.3 PROCEDIMIENTOS PARA MEDIR LAS EMISIONES DE NOx EN UN BANCO DE PRUEBAS

Para la medida de la concentración de NOx presente en los motores alternativos de combustión interna, se deberá seguir procedimientos exigidos por la norma. Todos los motores deberán para ello tener un régimen constante durante la prueba. Los procedimientos descritos constituyen una relación detallada de métodos de laboratorio, dado que la determinación del valor de las emisiones exige la realización de una compleja serie de mediciones particulares, más que

la obtención de una sola medida. Es por ello que los resultados obtenidos dependen del proceso de medición como del motor y del método de ensayo.

➤ Condiciones de ensayo

Las temperaturas absolutas del aire de admisión del motor se expresarán en grados Kelvin y la presión atmosférica (p_a) en KPa, se medirá del siguiente modo:

En el caso de los motores con aspiración natural y sobrealimentados, el parámetro f_a se determinará de acuerdo a la siguiente formula:

$$f_a = \left[\frac{99}{p_s} \right] \left[\frac{T_a}{298} \right]^{0,7} \quad (1)$$

En el caso de los motores turboalimentados, con o sin refrigeración del aire de admisión, el parámetro f_a se determina de acuerdo con la siguiente formula:

$$f_a = \left[\frac{99}{p_s} \right] \left[\frac{T_a}{298} \right]^{1,5} \quad (2)$$

Para que el parámetro sea aceptado deberá de estar entre los siguientes valores:

$$0,93 \leq f_a \leq 1,02 \quad (3)$$

➤ Motores con refrigeración de aire de carga

Los motores que se instalen a bordo deberán ser capaces de funcionar con los niveles de emisión de NOx permitidos, a una temperatura ambiente de agua de mar de 25°C. Esta temperatura de referencia será considerada de acuerdo al sistema de aire de alimentación aplicable a cada instalación individual.

Las instalaciones de refrigeración por agua serán:

- Refrigeración directa con agua salda del aire de admisión
- Refrigeración con agua dulce de alta temperatura del motor

- Refrigeración por medio de un intercambiador de calor que introduzca agua dulce.

➤ Potencia

Las emisiones del motor se medirán en base a la potencia en el freno del motor.

➤ Sistema de admisión de aire al motor

El sistema de admisión de aire deberá ser con una restricción en la entrada de ± 300 Pa del valor máximo especificado por el fabricante a régimen nominal y carga completa.

➤ Sistema de escape del motor

El sistema de escape presentara una contrapresión de ± 650 Pa del valor máximo especificado por el fabricante a régimen de potencia nominal y carga completa.

Si el sistema de escape cuenta con un dispositivo de tratamiento de gases de escape, el tubo de escape tendrá el mismo diámetro que en la realidad en una longitud mínima igual a cuatro veces el diámetro en dirección a la entrada del comienzo de la sección de expansión donde se encuentre el dispositivo de tratamiento.

4.7.3.1 FUELOILS DE ENSAYO

Es conocida la influencia que tienen los combustibles por su composición en las emisiones. Un alto contenido en Nitrógeno por parte del combustible conllevara una mayor cantidad de NOx en los gases de escape. Por ello, se deberán de conocer las características del combustible utilizado para el ensayo.

El tipo de combustible dependerá del objetivo del ensayo. Si no se dispone de fueloil de referencia apropiado se utilizarán combustibles de uso marino tipo DM especificado por la norma ISO 8217:2005, con propiedades adecuadas al tipo de motor que se trate. En el caso de no disponer este tipo se podrá utilizar el tipo RM especificado en la norma ISO 8217:2005. Se tomará una muestra de estos combustibles y se analizará el contenido en nitrógeno.

La temperatura del fueloil tiene que estar a la que el fabricante indique o recomiende. Esta temperatura se mide a la entrada de la bomba de inyección.

Los motores que utilicen combustibles mixtos que utilicen combustible líquido como combustible piloto deberán de probarse a la relación máxima entre combustible y líquido.

4.7.3.2 EQUIPOS DE MEDICION Y DATOS QUE DEBEN MEDIRSE

Para la medida de componentes gaseosos deberán usarse métodos descritos en el apéndice III del Código.

Se podrán usar otros sistemas o analizadores de medición, si la administración lo aprueba, proporcionando estos unos resultados equivalentes a los del equipo indicado.

Para introducir nuevos sistemas, la equivalencia será determinado calculando la repetibilidad y la reproducibilidad, de conformidad con la norma ISO 5725-1 e ISO 5725-2 o cualquier norma reconocida comparable.

4.7.3.3 DETERMINACIÓN DE LOS FLUJOS DE GASES

➤ Método de Medición Directa

Consiste en medir directamente el flujo de los gases de escape mediante una tobera medidora del caudal o un sistema de medición equivalente y será conforme con una norma internacional reconocida.

La medición directa del flujo de gases es una labor difícil. Conviene tomar precauciones para evitar errores de medición que puedan afectar a los valores de las emisiones.

➤ Método de Medición de Aire y del Combustible

Este método determina el flujo de gases de escape midiendo el aire y el combustible, se debe de hacer conforme con una norma internacional reconocida.

Se utilizarán caudalímetros de aire y combustible cuya precisión se ajuste a lo definido en el apéndice IV del Código técnico de los NOx.

El flujo de gases se medirá de la siguiente manera:

$$q_{mew} = q_{maw} + q_{ml} \quad (4)$$

➤ Flujo de Combustible y Método Equilibrado del Carbono

Este método calcula el caudal másico de los gases de escape a partir del consumo de combustible, de la composición del combustible y de las concentraciones de gases de escape utilizando el método de equilibrado del carbono, tal como se especifica en el apéndice VI del Código Técnico de los NOx

4.7.3.4 DIFERENCIAS ADMISIBLES DE LOS INSTRUMENTOS DE MEDICION DE LOS PARAMETROS DEL MOTOR Y OTROS PARAMETROS ESENCIALES

Todos los instrumentos de medición utilizados para definir el motor en cuanto a las emisiones de NOx, por ejemplo, la presión máxima del cilindro o del aire de carga, se realizará conforme a las normas reconocidas por la administración y se ajustará a las prescripciones del Apéndice IV del Código Técnico de los NOx.

4.7.3.5 ANALIZADORES PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS COMPONENTES GASEOSOS Y CALIBRACIÓN DE LOS INSTRUMENTOS

Los analizadores para determinar componentes gaseosos se ajustarán a las especificaciones del Apéndice III del Código Técnico de los NOx.

Los analizadores utilizados se para medir emisiones gaseosas de un motor se calibrarán conforme a las prescripciones presentes en el apéndice IV del Código Técnico de los NOx.

4.7.4 SISTEMAS DE MUESTREO Y ANÁLISIS

Dado que el muestreo y el análisis pueden obtenerse con diversas configuraciones y resultados equivalentes, no es necesario atenerse exactamente a las cifras indicadas. Podrán utilizarse elementos adicionales, tales como, instrumentos, válvulas, solenoides, bombas t conmutadores para obtener información adicional y coordinar las funciones de los sistemas integrantes. Los elementos que se consideren que no son necesarios para

mantener la precisión se podrán dejar de usar con el consentimiento de la administración, siendo su exclusión un juicio técnico correcto.

4.7.4.1 PRINCIPALES COMPONENTES DE LOS GASE DE ESCAPE QUE HAY QUE ANALIZAR

Los sistemas de análisis para determinar las emisiones de gases como monóxidos de carbono, dióxidos de carbono, óxidos de nitrógeno etc. Deberán basarse en el uso de los siguientes analizadores:

- DILC para la medición de hidrocarburos
- IND para la medición del monóxido de carbono y el dióxido de carbono
- HCLD para la medición de óxidos de nitrógeno
- PMD, ECS o ZRDO para la medición de oxígeno

Las sondas de muestreo de las emisiones gaseosas se colocarán a una distancia equivalente a 10 veces el diámetro del tubo de escape como mínimo después de la salida del motor, del turboalimentador o del último dispositivo de tratamiento, y a una distancia de mínimo 0,5 m o tres veces el diámetro del tubo de escape, si este valor es mayor, antes de la salida del sistema de gases.

Los gases de escape deben mantenerse a una temperatura de al menos 190°C en la sonda de muestreo de HC y de al menos 70°C en los otros gases medidos cuando éstos sean distintas a la sonda de muestreo.

Durante todas las modalidades de ensayo, tras el periodo inicial de transición el régimen específico se mantendrá $\pm 1\%$ del régimen nominal o a $\pm 3\% \text{ min}^{-1}$, si este último valor es mayor, excepto para la marcha en vacío lenta, que se deberá ajustar a las tolerancias establecidas por el fabricante. Se mantendrá el par

especificado de manera que la media durante el periodo en que se realizan las mediciones se situé en un + - 2% del par nominal al régimen nominal del motor.

En cuanto a la respuesta del analizador, los resultados indicados por los analizadores, tanto durante el ensayo como durante todas las verificaciones de respuesta 0 y de fondo de escala, se registrarán mediante un sistema de adquisición de datos o un registrador de papel continuo. EL periodo de régimen no puede ser mayor a 10 minutos cuando se analicen gases de escape ni a 3 minutos para cada verificación de respuesta 0 y de fondo de escala. Para los sistemas de adquisición de datos se empleará una frecuencia mínima de tres muestras por minuto. Los valores de NOx, HC y CO se consignarán en ppm, en un valor redondeado.

4.7.5 CÁLCULO DE LAS EMISIONES GASEOSAS

Se calcularán el promedio de las lecturas tomadas en los últimos 60 segundos de cada modalidad y las concentraciones medias de CO, CO₂, HC, NOx y O₂ durante cada modalidad se determinarán a partir de las lecturas medias de la gráfica y de los datos de calibrado correspondiente.

Para correcciones de la concentración en seco a la concentración en húmedo: si no se ha medido ya en húmedo, se convertirá a la concentración en húmedo, de acuerdo con las formulas siguientes.

$$C_w = K * C_d \quad (5)$$

Para gases de escape brutos:

En combustiones completas en las que el flujo de los gases de escape haya de determinarse de conformidad con el método de medición directa o el método de medición de aire y combustible, utilizara una de las dos fórmulas siguientes:

$$k_{wr1} = \left[1 - \frac{1,2442 * H_a + 111,9 * w_{alf} * \frac{q_{mf}}{q_{mad}}}{773,4 + 1,441 * H_a + \frac{q_{mf}}{q_{mad}} * f_w * 1000} \right] * 1,008 / \left[1 - \frac{p_r}{p_b} \right] \quad (6)$$

Con

$$f_w = 0,055594 * w_{alf} + 0,0080021 * W_{DEL} + 0,0070046 * W_{EPS} \quad (7)$$

H_a es la humedad absoluta del aire de admisión medido en g de agua por kg de aire seco. También puede ser derivada de la siguiente formula:

$$H_a = \frac{6,22 * p_a * R_a}{(p_b - 0,01 * R_a * p_a)} \quad (8)$$

Donde

P_a = presión de saturación del aire de admisión, en KPa

Con:

T_a = temperatura del aire de admisión en °C

P_b = presión barométrica total, en KPa

p_r = presión de vapor tras baño de refrigeración del analizador, en KPa

P_a = 0,76 KPa para baño de refrigeración de 3°C

Cuando el monóxido de carbono en 100ppm mas o el THC es mas de 100ppm en uno o más puntos de la operación se considerará que es una combustión incompleta. Cuando los gases de escape se determinan por medio del método de medida directa o mediante medición del aire y el combustible y en todos los casos en que se emplea el método del equilibrado del carbono se emplean las siguientes ecuaciones:

$$k_{wr2} = \frac{1}{1 + \alpha * 0,005 * (c_{CO2d} + c_{COd}) - 0,01 * C_{H2d} + k_{w2} - \frac{p_r}{p_b}} \quad (9)$$

Con

$$\alpha = 11,9164 * \frac{W_{ALF}}{W_{BET}} \quad (10)$$

$$C_{H2d} = \frac{0,5 * \alpha * C_{COd} * (C_{COd} + C_{CO2d})}{C_{COd} + 3 * C_{CO2d}} \quad (11)$$

$$K_{w2} = \frac{1,608 * H_a}{1000 + (1,608 * H_a)} \quad (12)$$

Las unidades para los porcentajes de CO y CO2 se en las formulas se darán en %.

Para el aire de admisión se empleará la fórmula:

$$k_w = 1 - k_{w2} \quad (13)$$

4.7.5.1 CORRECCIONES DE LOS NOx TENIENDO EN CUENTA LA HUMEDAD Y LA TEMPERATURA.

Las emisiones de NOx dependerán de las condiciones del aire, por ello, se debe corregir las concentraciones de NOx, teniendo en cuenta la temperatura y la humedad del aire ambiente, multiplicando los valores por factores dados por las siguientes formulas.

Los valores utilizados para el cálculo de la humedad 10,71g/kg a una temperatura de 25°C. Todo cambio de estos valores deberá ser justificado y aprobado por la administración.

Para los motores diésel en general se

utilizará la siguiente formula:

$$k_{hd} = \frac{1}{1 - 0,081 * (H_a - 10,71) + 0,045 * (T_a - 298)} \quad (14)$$

T_a = Temperatura de aire en K

H_a = Humedad absoluta del aire de admisión, g de agua por kg de aire seco

Para los motores diésel con enfriadores de aire intermedios:

$$k_{hd} = \frac{1}{1 - 0,012 * (H_a - 10,71) - 0,00275 * (T_a - 298) + 0,00285 * (T_{SD} - T_{SCref})} \quad (15)$$

T_{SC} = Temperatura del aire interenfriado

T_{SCref} = Temperatura de referencia del aire interenfriado correspondiente a una temperatura de agua del mar de 25°C. La T será especificada por el fabricante.

Para mantener la humedad del aire de carga se añade un factor:

H = Humedad de aire de carga, g de agua por kg de aire seco, donde:

$$H_{SC} = \frac{6,22 * p_{sc} * 100}{(p_c - p_{sc})} \quad (16)$$

Donde

P_{sc} = Presión de vapor de saturación de aire de carga

P_c = Presión de aire de carga

Si $H_a \geq H_{sc}$ se utilizara H_{sc} en lugar de H_a

4.7.5.2 CÁLCULO DE LOS CAUDALES MÁSICOS DE EMISION

Para el cálculo de las emisiones se utilizarán las siguientes formulas:

$$q_{mgas} = U_{gas} * C_{gas} * q_{mew} * k_{nd} \quad (\text{para los NOx}) \quad (17)$$

$$q_{mgas} = U_{gas} * C_{gas} * q_{mew} \quad (\text{para el resto de componentes}) \quad (18)$$

Donde

Q_{mgas} = flujo másico del componente individual, g/h

U_{gas} = relación entre la densidad del gas de escape y la densidad del componente

C_{gas} = concentración del componente respectivo en el gas de escape, ppm, húmedo

Q_{mew} = flujo másico del gas de escape, kg/h, húmedo

K_{hd} = factor de corrección de humedad del NOx

Las correcciones en porcentajes se transformarán de la siguiente manera:

1% = 10.000 ppm

GAS		NOx	CO	HC	CO ₂	O ₂
$\rho_{gas} [Kg/m^3]$		2,053	1,250	a	1,9636	1,4277
	ρ_c	Coeficiente U_{gas}				
Combustible	1,294	0,00158	0,00096	0,00047	0,00151	1,00110
e	3	6	6	9	7	3

Tabla 2 a) Dependiendo del combustible b) $\lambda=2$, aire húmedo 273K; 3KPa

4.7.5.3 CÁLCULO DE LAS EMISIONES ESPECIFICAS

Se calcularán para todos los componentes individuales con la siguiente formula:

$$g_{a_s_x} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (q_{m,gasi} * W_{fi})}{\sum_{i=1}^{i=n} (P_i * W_{Fi})} \quad (19)$$

Donde

$$P = P_m + P_{aux} \quad (20)$$

Y

q = Flujo másico de los componentes individuales

P = Potencia medida en cada momento individual

P = Potencia de los componentes auxiliares montados en el motor

En la siguiente tabla se indican los coeficientes de Ugas y los parámetros específicos del gas de escape bruto.

4.7.6 PROCEDIMIENTOS PARA DEMOSTRAR EL CUMPLIMIENTO DE LOS LIMITES DE NO_x A BORDO

Una vez un motor tiene la certificación previa a bordo de un buque, los motores diésel serán objeto de reconocimiento de verificación a bordo. Esta verificación se realizará siguiendo los siguientes métodos(ES 2011):

1. Método de verificación de los parámetros del motor, para confirmar que los componentes, reglajes y valores de funcionamiento de un motor no se han apartado de las especificaciones que figuran en el expediente técnico.
2. Método simplificado de conformidad con el punto 6.3 del Código Técnico de los NO_x
3. Método directo de medición y vigilancia de conformidad con el punto 6.4 del Código Técnico de los NO

4.7.6.1 MÉTODOS DE VERIFICACIÓN DE LOS PARAMETROS DEL MOTOR

El método de verificación de los parámetros del motor se podrá aplicar a:

1. Los motores que tengan una certificación previa en el banco de pruebas y aquellos que hayan recibido el certificado tras la realización de un reconocimiento inicial(EIAPP).
2. Los motores cuyos elementos específicos o características regulables se hayan modificado o ajustado desde que se realizó el ultimo reconocimiento.

El método de verificación de los parámetros del motor se usará para comprobar si el motor sigue funcionando dentro del límite aplicable de emisión de NOx. Los motores actuales están proyectados para que, durante su vida, mantengan sus límites de emisiones constantes, es decir, dentro de los límites establecidos. Cuando se aplican modificaciones estos valores pueden variar de ahí que sean necesarios verificaciones periódicas.

Las verificaciones de los elementos del motor, reglajes y valores de funcionamiento tienen por objeto ofrecer un medio fácil de deducción del nivel de emisiones del motor para confirmar que un motor que no ha sido objeto de modificaciones o ajustes, cumple el límite aplicable de emisión de NOx.

Cuando se utilizan sistemas electrónicos de regulación del motor, este se evaluará en función de los reglajes originales para cerciorarse de que los parámetros pertinentes siguen funcionando de acuerdo con los límites de fábrica.

No siempre será necesario medir las emisiones de NOx para determinar se es probable que un motor no equipado con un dispositivo de tratamiento se ajusta

al límite aplicable de emisiones de NOx. Si el estado actual en el momento de la verificación es la misma al estado del momento de la certificación inicial respecto a los elementos, calibración o el ajuste de los parámetros. Se podrá entonces verificar el motor sin necesidad de hacer ninguna prueba.

Cuando los motores equipados con sistemas de reducción de NOx será necesario verificar el funcionamiento de dicho dispositivo como parte del método de verificación de los parámetros.

4.7.6.2 PROCEDIMIENTO DE VERIFICACIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL MOTOR

Deberán seguirse los siguientes procedimientos para la verificación del motor:

- Se efectuará en un principio una inspección de la documentación relativa a los parámetros del motor y se verificara si estos se ajustan a los límites establecidos y admisibles en el expediente técnico del motor.
- En segundo lugar, se efectuará la inspección propiamente dicha de los elementos del motor y de sus características regulables, según sea necesario. A continuación, se verifican las características regulables del motor, si coinciden con el expediente técnico, teniendo en cuenta los resultados de la inspección de la documentación.

4.7.6.3 PARÁMETROS QUE INCIDEN EN LAS EMISIONES DE NOx

Dependiendo del motor, es posible hacer distintos ajustes y modificaciones que podrán afectar a las emisiones de NOx:

1. Regulación del avance a la inyección
2. Tobera de inyección

3. Bomba de inyección
4. Leva del combustible
5. Presión de inyección para sistemas comunes de inyección mecánica del combustible
6. Cámara de combustión
7. Relación de compresión
8. Construcción y tipo de turbosoplante
9. Enfriador de aire de carga, precalentado del aire de carga
10. Regulación de las válvulas
11. Equipo de reducción de NO_x, de inyección de agua
12. Equipo de reducción de NO_x, de combustible emulsionado (emulsión combustible agua)
13. Equipo de reducción de NO_x, de recirculación de gases de escape
14. Equipo Reductor de NO_x, de reducción catalítica selectiva
15. Otros parámetros especificados por la administración.

El motor podrá incluir, con arreglo a las recomendaciones del fabricante y con la aprobación de la administración, un número menor de elementos o parámetros que los referidos anteriormente, según el motor que se trate y su proyecto específico.

4.7.6.4 METODOS DE MEDICION SIMPLIFICADOS

Se aplicará únicamente a los ensayos confirmados a bordo para los reconocimientos intermedios y periódicos si procede. Todo ensayo inicial de un motor en el banco de pruebas se realizará de conformidad con el procedimiento especificado en el capítulo 5 del código técnico de los NO_x.

Para obtener resultados significativos se miden las concentraciones de NO_x y CO₂ de conformidad con el ciclo de ensayo adecuado. Se medirán el par y la velocidad del motor, pero, para simplificar el procedimiento las desviaciones admisibles de los instrumentos utilizados para medir los parámetros relacionados

con el motor durante la verificación a bordo son distintas de las desviaciones admisibles para el ensayo en el banco de pruebas. Podrá estimarse la potencia del freno por otros medios recomendados por el fabricante del motor y aprobados por la administración cuando la medición directa resulte difícil.

Se podrá incluso, tomar el consumo de combustible indicado por el fabricante, debido a que en muchas ocasiones es difícil calcular el consumo. En el caso del fuel oil se efectuará el cálculo del consumo de combustible teniendo en cuenta el error estimado correspondiente de acuerdo con el grado RM del ISO8217:2005. EL caudal de combustible tiene que estar relacionado con el combustible líquido usado durante el ensayo, la medición de q_{mf} en el banco de pruebas se corregirá para compensar cualquier diferencia entre los valores caloríficos netos del combustible utilizado en el banco de pruebas y del combustible utilizado en el ensayo. Las consecuencias de tal error sobre las emisiones finales se calcularán y se consignarán con los resultados de la medición de las emisiones. En la siguiente tabla se muestran los parámetros que se medirán a bordo durante el procedimiento de verificación a bordo.

Símbolo	Parámetro	Unidad
$q_{mf,i}$	Consumo de combustible (si es posible)(en la i-esima modalidad durante el ciclo)	Kg/h
H_a	Humedad absoluta (masa del contenido de agua en el aire de admisión del motor en relación con la masa del aire seco)	g/kg
$n_{d,i}$	Velocidad del motor (en la i-esima modalidad del ciclo)	min^{-1}
$n_{turb,i}$	Velocidad del turbosoplante (si procede) (en la i-esima modalidad durante el ciclo)	min^{-1}
P_b	Presión barométrica total (en ISO 3046-1, 1995: $p_x = P_x =$ presión ambiente total en el local)	kPa
$P_{c,i}$	Presión del aire después del enfriador del aire de carga (en la li-esima modalidad durante el ciclo)	kPa
P_i	Potencia al freno (en i-esima modalidad durante el ciclo)	KW

s_i	Posición del mando de alimentación del combustible (de cada cilindro, si procede)(en la i-esima modalidad durante el ciclo), cremallera	
T_a	Temperatura en la entrada de aire del motor (en ISO 3046-1, 1995: $T_x = T_{Tx}$ = temperatura termodinámica ambiente del aire local).	K
$T_{sc,i}$	Temperatura aire después del enfriador de carga (si procede)(en la i-esima modalidad durante el ciclo)	K
T_{cadin}	Temperatura del refrigerante en la entrada del enfriador del aire de carga	K
T_{cadout}	Temperatura del refrigerante en la salida del enfriador del aire de carga	K
$T_{exh,i}$	Temperatura de los gases de escape en el punto de muestreo (en la i-esima modalidad durante el ciclo)	K
T_{Fuel}	Temperatura del fueloil antes del motor	K
T_{sea}	Temperatura del agua de mar	K

Tabla 3 Parámetros del motor que se han de medir (código técnico NOx)

El valor más significativo a medir es la potencia en el freno. Si bien en el capítulo 5 del Código se examinan las cajas de engranajes con acoplamiento directo, en numerosos tipos de utilización, los motores, tal como están a bordo, pueden estar dispuestos de tal manera que la medición del par resulte imposible al faltar un eje libre. Tal es el caso, en particular, del grupo de los generadores, pero también se acoplan los motores a bombas, unidades hidráulicas, compresores, etc.

Los motores que accionan la maquinaria se habrán sometido a ensayo con freno hidráulico en la fase de fabricación, antes de conectarlos permanentemente a la unidad de consumo de potencia instalados a bordo. En el caso de los generadores, el uso de medición de tensión y amperaje junto con el rendimiento del generador declarado por el fabricante no debería presentar ningún problema. En el caso de los motores para mover la hélice del barco, podrá utilizarse una curva dada de potencia-velocidad, al mismo tiempo que se garantiza la

posibilidad de medir la velocidad del motor, desde un extremo del motor o como pueden ser el caso de medirlo por el árbol de levas.

La instalación a bordo de los motores se hace de manera que estos ensayos puedan efectuarse con seguridad e interviniendo lo menos posible en el motor. Se tomarán medidas adecuadas para el muestreo estándar accesible.

Pueden existir pequeñas diferencias durante un procedimiento simplificado de medición a bordo por ello se podrá aceptar un margen de error del 10% del límite aplicable.

Las emisiones de NO_x variaran dependiendo tanto del encendido como de la cantidad de nitrógeno en el combustible. Si la información del combustible durante los ensayos es insuficiente, y el índice de conversión del contenido de nitrógeno del combustible depende también del rendimiento del motor, se concede un margen de error de un 10% para las pruebas realizadas con fueloil de la clase RM dentro de la norma ISO8217 de 1996, esto no se concederá para las pruebas previas. Se analizará el fueloil utilizado a fin de determinar su contenido en carbono, hidrogeno, nitrógeno, azufre, y de cualquier otro componente que sea necesario para una especificación clara del combustible.

4.7.6.5 MÉTODOS DE MEDICIÓN DIRECTA Y MONITORIZACIÓN

Este tipo de procedimiento solamente se aplica a los ensayos de confirmación a bordo y para los reconocimientos intermedios, anuales y de renovación. Deberá incluir como mínimo la medición de emisiones de NO_x.

En la siguiente tabla se enumeran los parámetros de rendimiento del motor que se miden durante la vigilancia de NO_x a bordo:

Símbolo	Parámetro	Unidad
q_{mf}	Consumo de combustible	Kg/h
n_d	Velocidad del motor	min^{-1}
P_c	Presión del aire después del enfriador del aire de carga	KPa
P_i	Potencia al freno	KW
P_{aux}	Potencia de los equipos auxiliares	KW
T_{sc}	Temperatura aire después del enfriador de carga	K
T_{cadin}	Temperatura del refrigerante en la entrada del enfriador del aire de carga	K
T_{cadout}	Temperatura del refrigerante en la salida del enfriador del aire de carga	K
T_{sea}	Temperatura del agua de mar	K
H_a	Humedad absoluta (masa del contenido de agua en el aire de admisión del motor en relación con la masa del aire seco)	g/kg
P_b	Presión barométrica total (en ISO 3046-1, 1995: $p_x = P_x =$ presión ambiente total en el local)	KPa
T_a	Temperatura en la entrada de aire del motor (en ISO 3046-1, 1995: $T_x = TT_x =$ temperatura termodinámica ambiente del aire local).	K

Tabla 4 Parámetros de motor que han de ser medidos (Código técnico NOx)

Si la medida de la potencia de forma directa es complicada, la potencia al freno no corregida podrá calcularse por otros medios aprobados por la administración.

Los métodos posibles para determinar la potencia al freno son:

- Medición indirecta, bombas de inyección o cremalleras
- Medición por nomografías

Para el cálculo del flujo del fueloil:

- Medición directa
- Datos del banco de pruebas

La composición del combustible se obtendrá por medio de análisis de combustible, o en su defecto, por medio de los valores indicados en la siguiente tabla:

	Carbono	Hidrogeno	Nitrógeno	Oxígeno
	W_{BET}	W_{ALF}	W_{DEL}	W_{EPS}
Combustible destilado (ISO8217, grado DM)	86,2%	13,6%	0,0%	0,0%
Combustible residual (ISO8217, grado RM)	86,1%	10,9%	0,4%	0,0%

Tabla 5 Parámetros de combustible por defecto

Toda emisión que no se hayan medido ya en húmedo, las concentraciones gaseosas se convertirán en un valor húmedo mediante:

- Medida directa del agua
- Corrección de la concentración en seco a la concentración en húmedo:

$$Gas\ corregido = Gas_x * 0,9 \quad (21)$$

5. PPROCESOS PARA REDUCIR LAS EMISIONES DE NOX

Cuando se habla procesos y sistemas para la reducción de los NOx en los gases de escape es importante conocer los factores por los que se producen mayores concentraciones de NOx durante la combustión:

- NOx termales
- NOx Combustibles
- NOx Inmediatos

Los NOx termales se les denomina a los formados por la alta temperatura, por la oxidación que se encuentra en el comburente. Su velocidad de formación depende de la temperatura y del tiempo de permanencia de la misma.

Normalmente se forman cantidades significativas de NOx en condiciones de oxidación por encima de los 1204°C, aumentando de forma exponencial con la temperatura. El nitrógeno y el oxígeno se disocian y pasan a su estado atómico participando en una serie de reacciones, siendo uno de sus productos el NOx. Los NOx combustibles, son los procedentes del nitrógeno estructural contenido en el combustible, como parte de compuestos orgánicos en los carbones y aceites, se debe a la conversión del nitrógeno durante el proceso de la combustión.

Por último, los NOx inmediatos, son las emisiones que se forman a partir de nitrógeno contenido en el aire que al combinarse con el combustible en condiciones ricas en este producen óxidos de nitrógeno, de la misma manera que en los NOx combustibles.

Los NOx procedentes de los combustibles son los que en los que se podrán evitar en los métodos Pre-tratamiento:

- Desnitruración del combustible
- Combustibles alternativos

Los NOx termales, se dan en los procesos en los que la combustión está presente, es por ello que se podrán evitar mediante los métodos primarios, durante la combustión:

- Modificación de la combustión
- Modificación del sistema de admisión
- Inyección de agua

Por último, se encuentran los métodos secundarios, o de post-tratamiento, los cuales actúan directamente sobre los NOx:

- Recirculación de los gases de escape
- Reducción catalítica selectiva

5.1 DESNITRURACIÓN DEL COMBUSTIBLE

Si bien es cierto que la cantidad de nitrógeno que contiene el combustible termina reaccionando y convirtiéndose en NOx, a día de hoy, no existen tecnologías aplicables para eliminar el nitrógeno del mismo, como si existen plantas de desulfurado para evitar emisiones de sulfuros a la atmosfera.

Para los ensayos de emisiones a bordo es importante conocer el contenido de nitrógeno del combustible. Los combustibles pesados pueden llegar a tener hasta un 0,4% de nitrógeno lo que equivaldría a 2,4g/KWh, cifra que estaría muy lejos de límites exigidos. Los combustibles ligeros como el diésel tienen un porcentaje en nitrógeno del 1%.

Se han visto en distintos ensayos que cuando se usan combustibles desulfurados se obtienen menores cantidades de óxidos de nitrógeno, pero no se ha encontrado una relación entre ambos. (Fritz 2000)

5.2 COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS

A día de hoy, el mayor cambio obtenido ha sido por medio del gas natural, el cual, a diferencia del diésel contiene menos azufre y se pueden obtener reducciones importantes de NOx. Existen diferentes métodos para usar el gas natural:

- Operando con gas y líquido a la vez. Dual-fuel
- Operando con diésel y gas. Bi-fuel
- Operando con gas y encendido con chispa.
- Diésel Gas

5.2.1 DUAL-FUEL (DF)

Pueden operar con gas y fuel líquido. El encendido de la cámara se da por una inyección de fuel cerca del punto muerto superior. La mezcla de gas y fuel esta entre el 1%-5% de la cantidad de combustible total inyectado. Esta mezcla tan pobre en fuel produce una menor cantidad de emisiones tanto de óxidos de nitrógeno como de dióxidos de carbono.

En este tipo de motores normalmente no es necesaria la instalación de una planta pos-tratamiento para disminuir las emisiones de NOx. En figura 10 se muestra como el gas es inyectado por el conducto de aire de entrada al cilindro y una vez este es comprimido se inyecta el fuel para la ignición de la mezcla.(Helen 2015)

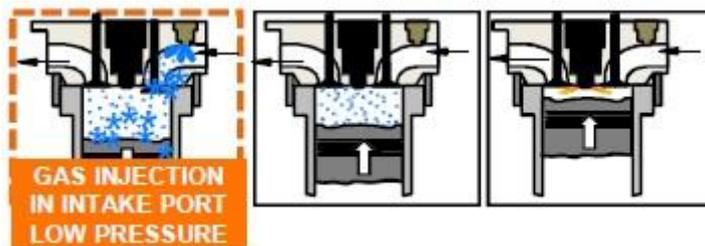


Figura 10 Encendido Dual-Fuel (Helen 2015)

5.2.2 BI-FUEL

Este tipo de motores son típicamente motores diésel convertidos en motores capaces de trabajar con gas. La mezcla entre ambos combustibles en este caso es más equilibrada, donde se llegan a alcanzar ratios de hasta un 50% de diésel en la mezcla como máximo y un 15% de diésel en la mezcla como mínimo.

Este ratio tan alto de diésel hace que las emisiones de NO_x como de CO₂ sean muy superiores a las del Dual-fuel. Por consiguiente, es necesario una planta de reducción de los NO_x, una planta post tratamiento de los gases de escape, para cumplir con el Código Técnico de los NO_x.

En la figura 11 se muestra como, el ciclo de ignición es muy parecido al de los Dual-fuel, pero las cantidades son diferentes.(Helen 2015)

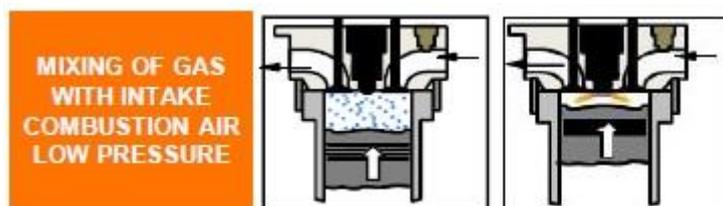


Figura 11 Encendido Bi-Fuel (Helen 2015)H

5.2.3 GAS ENCENDIDO POR CHISPA

Este tipo de motor opera únicamente con gas como combustible. Para el encendido de la mezcla cuenta con una bujía que enciende la mezcla de aire y gas. Esta mezcla de aire y gas se dará antes de la entrada a la cámara de combustión.

En cuanto a las emisiones, dependerá de la cantidad de gas introducida en la cámara, para mezclas pobres, no será necesario el post tratamiento de los gases de escape, debido a su bajo contenido de NOx y CO₂. Para mezclas con alto contenido en gas, las emisiones de NOx aumentan y será necesario un post tratamiento.(Helen 2015)

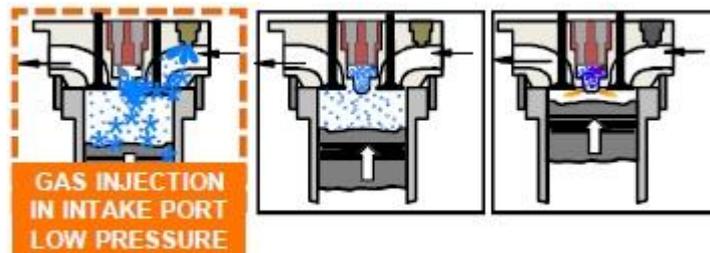


Figura 12 Encendido Gas por chispa (Helen 2015)

5.2.4 GAS-DIESEL (GD)

Este tipo de motores pueden operar de tres formas distintas:

- Mediante gas
- Mediante combustible ligero o pesado (diésel o fueloil)
- Mediante los dos combustibles simultáneamente

En el caso del gas funcionará como un motor dual fuel donde, será necesario inyectar un 5% de fuel líquido al final de la compresión para el encendido de la

mezcla. Es el único de los tres métodos donde las emisiones de NOx son relativamente bajas.

Cuando funciona únicamente con derivados del petróleo tendrá un uso convencional al de los motores convencionales. Con un alto nivel de emisiones de NOx.(Helen 2015)

Por último, se encuentra el uso simultaneo de los dos combustibles donde opera como se apunta en el punto 6.2.2, con ratios elevados de diésel y gas. Es importante en este tipo de motores mantener una alta presión de gas para el encendido de la mezcla, alrededor de 300-400 bar.(Papagiannakis y Hountalas 2004)

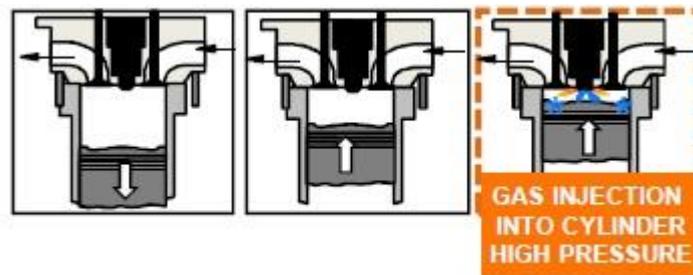


Figura 13 Encendido Diésel-Gas (Helen 2015)

5.3 COMBUSTIBLE EMULSIONADO

La tecnología de combustible emulsionado se presenta como una alternativa para mejorar la eficiencia y, por tanto, el impacto ambiental de los combustibles diésel.

Consiste en crear una emulsión altamente estable de un combustible con porcentajes variables de agua. Para mantener estable dicha emulsión, se añaden agentes activos de superficie o “surfactantes” que recubren las gotas de agua dispersas de forma microscópica durante toda la fase continua

(combustible) e impiden su unión y coalescencia. Dependiendo de su posterior aplicación, la composición de estas mezclas puede oscilar entre 6 % y 16 % por volumen de agua, menos de 2% de aditivos y el resto el diésel.

Cuando un diésel convencional se introduce en un motor, caldera u horno, se atomiza en forma de gotas con un tamaño de 20 a 100 micrones. Las gotas de combustible líquido de mayor tamaño no se queman completamente, generando un residuo carbonoso (hollín) que se acumula en las superficies de la cámara de combustión o se escapa como partículas a través de los gases de escape. El principio de funcionamiento de la tecnología del diésel emulsionado se basa en provocar una segunda atomización, adicional a la que experimenta el combustible convencional, en el interior del motor, horno o caldera. De este modo, cuando las gotas micrométricas del diésel emulsionado son sometidas a las altas temperaturas y presiones del interior de la cámara de combustión, se produce la violenta evaporación del agua contenida. Esta transformación de agua en vapor escinde el combustible que lo rodea en gotas mucho más pequeñas que ofrecen un área superficial mucho mayor, lo que mejora de manera significativa la eficiencia de la combustión. Asimismo, la generación de dicho vapor de agua reduce las máximas temperaturas alcanzadas en la combustión, lo que resulta en la menor formación de emisiones NOx.

Entre los beneficios que se atribuye al uso de combustibles emulsionados en motores diésel destacan los siguientes:

- Eficiencia Mejorada. Mediante pruebas se ha demostrado que la eficiencia del motor diésel puede incrementarse hasta un 10%.
- Beneficios ambientales. Dependiendo del tipo de motor y su estado, las emisiones de contaminantes pueden reducirse de forma significativa, especialmente en el caso de los NOx, (hasta un 30% menos), CO (hasta un 60 % menos), de partículas (hasta un 60 % menos) y humos (hasta un 80 % menos).
- Impide la acumulación de carbón en el interior del motor, reduciendo su desgaste.

Pese a ser de gran eficiencia el hecho de conseguir únicamente un 30% de reducción de los NOx no es una aplicación factible para el uso a bordo, al menos como único método para la reducción. Debería de estar complementada por otro tipo de tratamiento para lograr mayores porcentajes de reducción. (Dufour 2013)

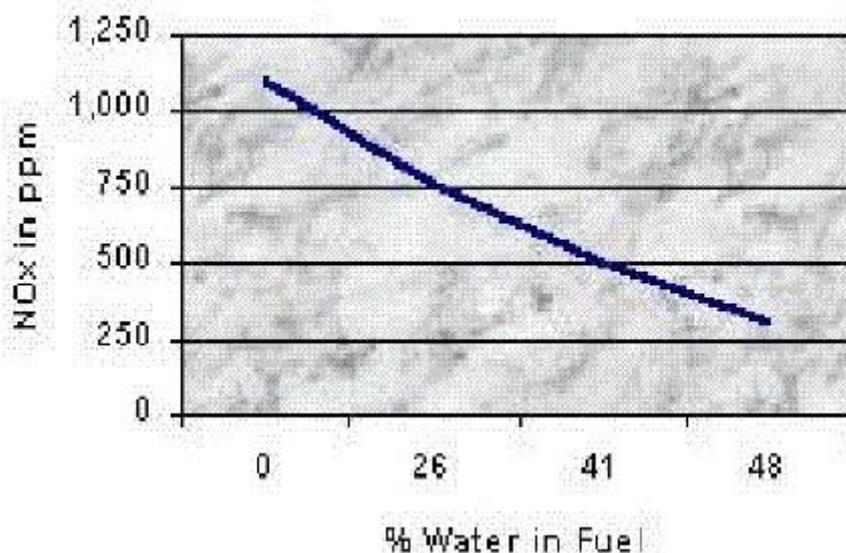


Tabla 6 Efecto del emulsionado de combustible en las emisiones de NOx (Dufour 2013)

Actualmente su comercialización y uso en tierra está muy poco extendido en Europa (tan sólo Italia y Francia se muestran favorables), en parte debido a la falta de estándares y a la poca aceptación por parte de los fabricantes de motores.

5.4 MODIFICACIÓN DE LA COMBUSTIÓN

5.4.1 INYECCIÓN

Uno de los factores más importantes para reducir las emisiones de NOx es la reducción de la temperatura máxima alcanzada durante la combustión. Para ello se modifica la inyección del combustible a la cámara de la siguiente manera:

1. Retrasar la inyección
2. Aumento de la presión de inyección
3. Modificar tiempo de inyección

Con un retraso en la inyección conseguimos reducir la presión máxima alcanzada y por consiguiente una menor temperatura pico. Se pueden lograr reducciones de hasta un 30% en las emisiones de NOx. Este sistema es antagónico a lo que normalmente se está acostumbrado puesto que, una reducción en la presión máxima, implica un mayor consumo específico del combustible, se estima que hasta un 5%(Su et al. 1995).

El aumento de la presión de inyección es fundamentalmente para contrarrestar el efecto del retraso a la inyección. El aumento de la presión de inyección en un principio, aumentaría la formación de NOx. Es por ello, que los dos métodos combinados deben combinarse. El aumento de la presión de inyección compensa el consumo específico de combustible y la generación de humo debido al retardo de la inyección, y el retardo a la inyección compensa el incremento de la formación de NOx, debido a la alta presión de inyección.

Ambos métodos no tendrán aplicación por separado puesto que presentan limitación por si solos. Sin la alta presión en la inyección producirá humo y partículas debido a que con el retardo el combustible seguirá entrando en la fase de descenso del pistón cuando la presión sea mucho menos. El aumento de la presión de inyección, se puede dar mediante la reducción del diámetro de los orificios del inyector, de esta manera conseguimos una mayor presión de inyección y una mayor pulverización del combustible. Esto supondrá una menor área de descarga por lo que el diseño de los orificios tendrá que ser el óptimo para aumentar dicha área.

Por último, podremos lograr reducciones sustanciales en las cantidades de NOx emitidas mediante el alargamiento del tiempo de inyección. Hay estudios que corroboran que aumentando el tiempo de inyección un 10% se podría lograr una

reducción del 5% en la cantidad de óxidos de nitrógeno en el escape. Se basa en el principio de una combustión progresiva donde, evitaremos la producción de humo provocado por el avance a la inyección. Las presiones que deben alcanzarse con el incremento de presión son mayores a las que los equipos convencionales pueden alcanzar. (Greeves y Tullis 1993)

5.4.2 INYECTORES

El tipo de inyector usado para los motores definirá la profundidad, la penetración y la localización del chorro. Estas tres características, serán las que influyan en la turbulencia evaporación, mezcla y combustión final.

En los últimos años han sido objeto de estudio los inyectores con toberas tipo deslizadera. Inicialmente fueron creadas por MAN con la idea de reducir el consumo de combustible. A la vez que lograron disminuirlo, se consiguió reducir las emisiones de NOx debido a que no creaban bolsas de combustible a la salida del inyector, lo que producida humo y combustiones incompletas. Se cambió el número de orificios el tamaño y el ángulo de entrada. Este cambio hizo que la temperatura pico alcanzada fuese mucho menor.

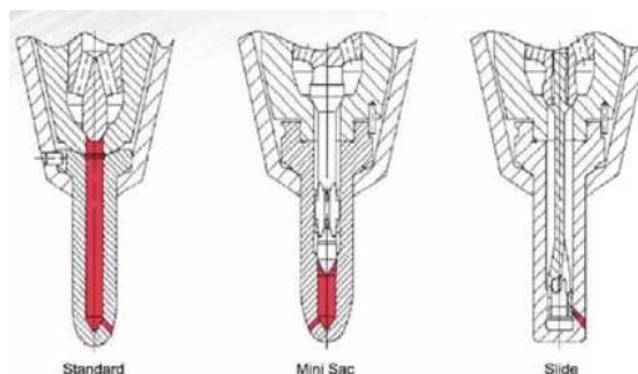


Figura 14 Comparación de tobera estándar con toberas con deslizadera o SLIDE (MAN 2017)

Las pruebas con este tipo de toberas han demostrado que es posible disminuir las emisiones de NOx hasta un 20%, con un aumento del combustible del 3,5%. Su principal aplicación eran los barcos con motores instalados antes del 1 de enero del 2000, los cuales tenían que cubrir la norma TIER I establecida en el Código Técnico de los NOx. Cambiando a este tipo de toberas son capaces de alcanzar la norma. (Uriondo, Gomez y Gutierrez 2012)

Existen investigaciones que afirman que el uso de dos inyectores para controlar mejor la inyección puede ayudar a una combustión más controlada. La desventaja de estos sistemas es que el coste es relativamente más alto puesto que las tuberías e inyectores se duplican. Por otra parte, es de difícil aplicación para motores de 4 tiempos debido a la necesidad de homogeneidad en el chorro en una cámara completamente plana y de diámetro/carrera relativamente bajo. Su aplicación es más adecuada a motores de dos tiempos donde la inyección lateral con 2 o tres toberas puede influenciar el proceso de combustión.

5.4.3 MODIFICACIÓN DE LA RELACION DE COMPRESIÓN

El aumentar la relación de compresión como tal es un aumento directo de las emisiones de NOx. Esta modificación no tendrá ningún efecto positivo en las emisiones si no se retarda a su vez la inyección. Cuando aumentamos la relación de compresión aumentamos la presión máxima y por consiguiente la temperatura máxima.

La idea es aumentar la relación de compresión sin aumentar la presión máxima de combustión y retardar la inyección. Para ello, el aumento de la relación de compresión deberá ser por medio de ajustes de válvulas o cambiando la geometría. Así obtendremos una combustión a presión constante reduciéndose la presión tras la combustión. Esto no podría hacerse sin el uso de cámaras de combustión abiertas que ayudan a que no se generen bolsas de aire y en consecuencia enfría la mezcla. Una cámara de combustión abierta es aquella en

la que el espacio de combustión no contiene restricciones suficientemente pequeñas como para producir diferencias grandes de presión entre partes diferentes de la cámara durante el proceso de combustión. (Matsson y Andersson 2002).

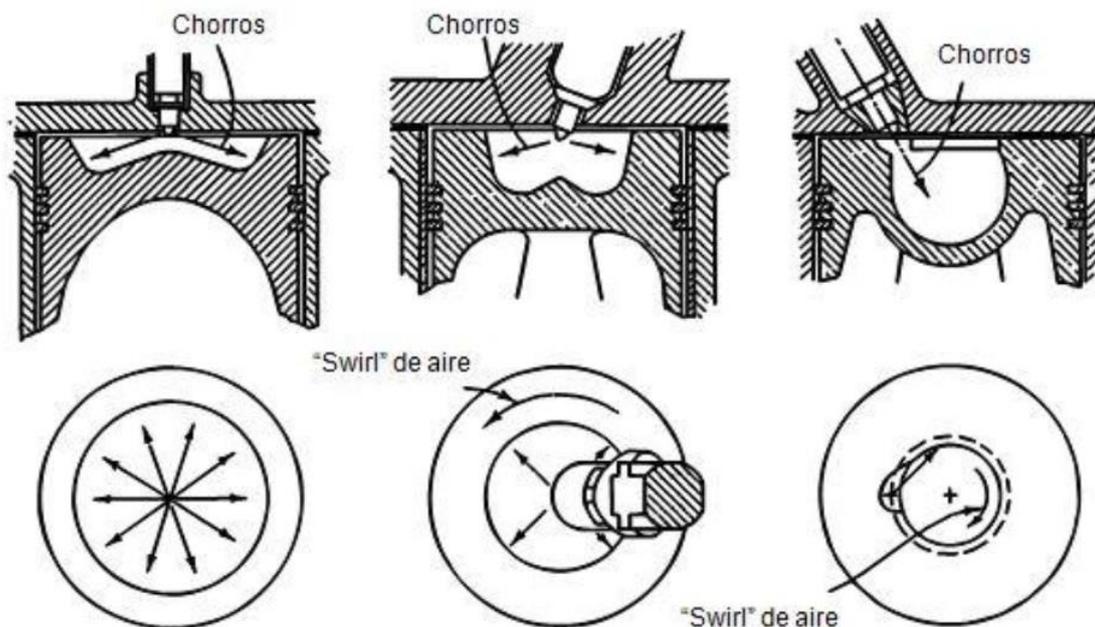


Figura 15 Cámara de combustión abierta en motores encendidos por compresión (Heywood)

Este cambio hizo que los motores que están dentro del límite TIER I pudiesen alcanzar los límites exigidos de emisiones de NOx. Con el tiempo se ha ido aumentando la relación de compresión en los motores. En la actualidad la relación de compresión puede rondar los 17. Y a su vez estos motores son capaces de cumplir las exigencias exigidas en el límite TIER II.

5.5 MODIFICACIÓN DEL SISTEMA DE ADMISION

5.5.1 ENFRIAMIENTO DEL AIRE DE BARRIDO

Las modificaciones en la admisión se basan principalmente en el enfriamiento de la cámara de combustión mediante el aire de barrido/sobrealimentación para

evitar temperaturas de combustión altas. Se pueden hacer reducciones de hasta un 14% reduciendo la temperatura del aire de 40°C a 25°C. A bordo, este dependerá de las aguas en las que naveguemos y de las condiciones ambientales presentes. Un sistema de aire de admisión mejorado conllevaría grandes cambios en el motor y su coste sería mucho mayor al convencional debido al tamaño del intercambiador. Uno de los puntos en contra es la condensación del ácido sulfúrico debido a las bajas temperaturas.

Para motores de baja y media velocidad el aire de barrido tiene una temperatura ya bastante baja, por lo que este método es aplicable únicamente a los motores de alta velocidad.

En cuanto a otros cambios en la admisión, para complementar los retrasos a la inyección, es posible incrementar el aire de barrido, con lo que conseguiríamos un menor consumo específico de combustible. Con estos dos métodos combinados se pueden lograr reducciones de hasta un 10-40%. (Uriondo, Gomez y Gutierrez 2012)

5.5.2 SOBREALIMENTACIÓN MILLER

Es un método desarrollado para motores de 4 tiempos. Su principal característica es el aumento de la sobrealimentación a una alta presión logrando una misma cantidad de aire en la cámara de combustión, pero con un tiempo mucho menor de apertura de las válvulas. Este cierre prematuro de las válvulas hace que la cámara de combustión se enfríe. Se estima que por cada 3°C de aire que se disminuya en la admisión el porcentaje de NOx se reducirá un 1%. Pues bien, una relación de expansión de 2 en el interior de la cámara de combustión puede disminuir la temperatura de 80°C a 17°C. Esta disminución de temperatura es equivalente a la que lograríamos si bajásemos la presión máxima a 80bar. Esta no es la única ventaja que ofrece este tipo de ciclos, a la vez que disminuimos la temperatura en el interior de la cámara de combustión, y por lo tanto menor

cantidad de óxidos de nitrógeno, también obtenemos una disminución del consumo específico de combustible.

No se trata de un ciclo experimental actualmente, desde los noventa se viene aplicando este tipo de ciclos, con un orden de un 5% de sobrealimentación superior a la normal, para poder entrar en los límites TIER I exigidos por el Código Técnico de los NOx.

Es cierto que, en motores actuales, para límites TIER II o TIER III, se puede llevar al extremo este tipo de ciclo con un aumento de un 20%. Dado que es un aumento muy significativo, a día de hoy, harían falta turbocompresores de relaciones de compresión de 5,5. Esto es algo que a priori, no es factible con una sola etapa de compresor y los gastos que supondría serían mucho más elevados a las de un motor con una sobrealimentación convencional. Se pueden llegar a alcanzar relaciones de compresión de incluso de 10, llegando a reducciones de emisiones de los NOx de hasta un 50%. Existe otro punto en contra, y son los regímenes bajos del motor donde con cierre tan prematuros de las válvulas el motor no respondería adecuadamente creando hollín y grandes cantidades de humo. Hoy día, estos problemas se pueden evitar con cierres variables electrónicamente de las válvulas para poder alargar los cierres en regímenes más bajos.

5.6 INYECCIÓN DE AGUA

Mediante este tipo de sistemas podemos lograr reducciones de hasta un 50%. El método consiste en la inyección de agua mediante una tobera a la cámara de combustión. Esto hará que la temperatura de llama disminuya. La eficacia de estos sistemas depende en gran parte del momento de la inyección del agua, la cual debe ser en el momento en el que mayor cantidad de NOx hay en el interior, para así reaccionar. La presión a la que se inyecta es muy alta de entorno a los 500 y los 250 bar dependiendo del sistema. El hecho de que sean presiones tan

altas es para que el instante de apertura de las toberas sea muy corto, para inyectar la cantidad de agua requerida. (tymoney,1975)

El uso de este sistema requiere de precisión por lo que será necesario el uso de sistemas de inyección electrónicos. Este tipo de sistemas asegura la inyección en momentos exactos del ciclo e incluso se podría inyectar en instantes distintos durante el ciclo. Las relaciones agua combustible introducidas son del orden de 0,8.

No todo son ventajas en este tipo de sistemas, donde las toberas de agua sufren un gran desgaste y el consumo de combustible específico aumenta lo cual no es a priori atractivo. El hecho de inyectar agua en la combustión puede acelerar procesos de oxidación, e incluso eliminar las capas de aceite lubricante de las paredes del cilindro.

En la siguiente imagen se muestra la gráfica donde la temperatura cae a la vez que las emisiones de NOx en el punto de temperatura más alto:

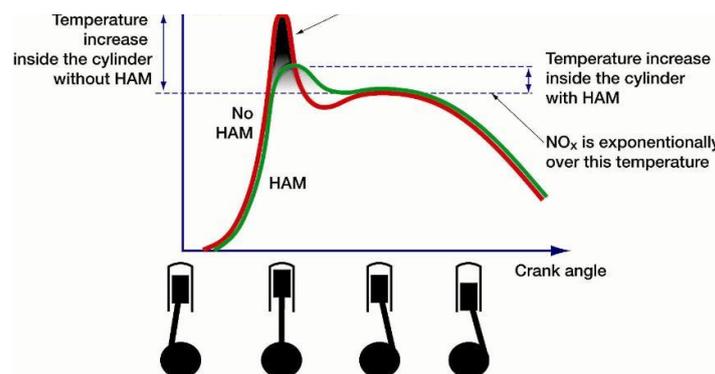


Tabla 7 Descenso de la temperatura mediante inyección de agua (Gonca 2014)

Se han investigado también los inyectores con el propósito de inyectar agua en el combustible. Esto supondría inyectar agua a través del mismo inyector utilizado para inyectar combustible. El control de este tipo de sistemas es más complejo al uso de los dos inyectores. Se ha probado que a un porcentaje de entre un 5% y 30% de agua emulsionada en combustible las emisiones de NOx disminuya, siendo la eficiencia térmica igual o superior que al uso de diésel puro. Las desventajas de estos sistemas son que el consumo específico de combustible aumenta igual que las cantidades de dióxidos de carbono.

Por último, existen nuevas investigaciones donde se utiliza el vapor sobrecalentado inyectado en la cámara en lugar del agua. En los estudios experimentales se muestra que el par motor y la potencia efectiva aumentan hasta un 2,5%. En cuanto a las emisiones NOx pueden reducirse un 22%, un valor que no es muy significativo. A diferencia de la inyección de agua funcionan bien a diferentes velocidades del motor. (Gonca 2014)

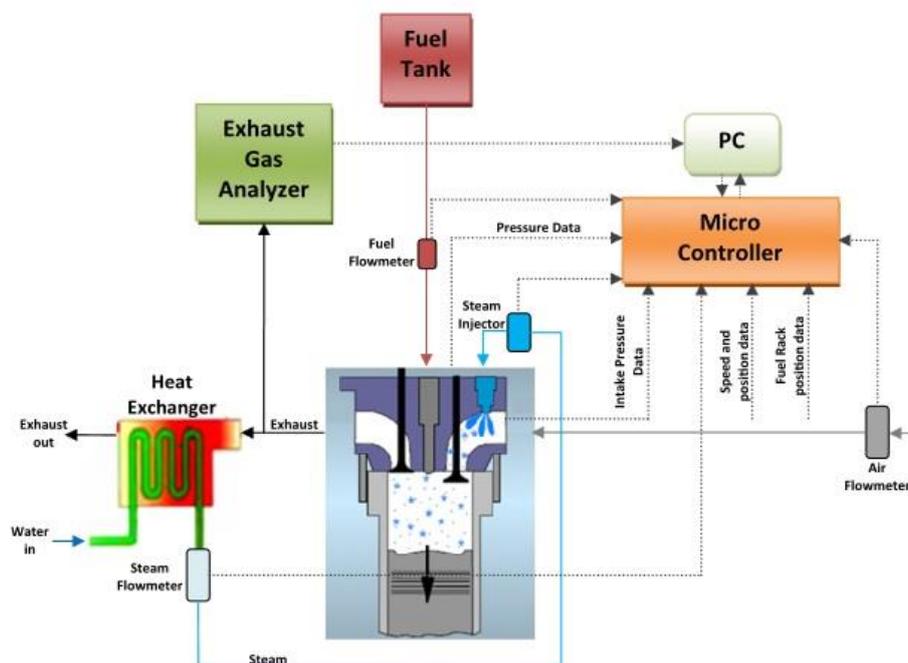


Figura 16 Inyección de vapor en cámara de combustión (Gonca 2014)

5.6.1 AIRE HUMEDO

Al igual que la inyección de agua su principal función es la reducción de la temperatura. La idea consiste en evaporar el agua e introducirla después del compresor para evitar problemas con este. Se introduciría por el colector de admisión. Esta tecnología es capaz de reducir la formación NO hasta un 65%(Rahai, Shamloo y Bonifacio 2011).

Esta tecnología ya se utiliza en motores MAN. La denominan tecnología HAM, donde el aire de combustión está saturado con vapor de agua producido en el buque con agua de mar. Esto reduce los picos de temperatura en la cámara.

Este tipo de tecnología se caracteriza por unos costes de explotación bajos debido al uso del agua de mar. Tiene unos costes en lubricante y mantenimiento bajos. Estos sistemas HAM, no solo utilizan el vapor de agua en la admisión, también emulsionan el agua en el combustible. (MAN 2017)

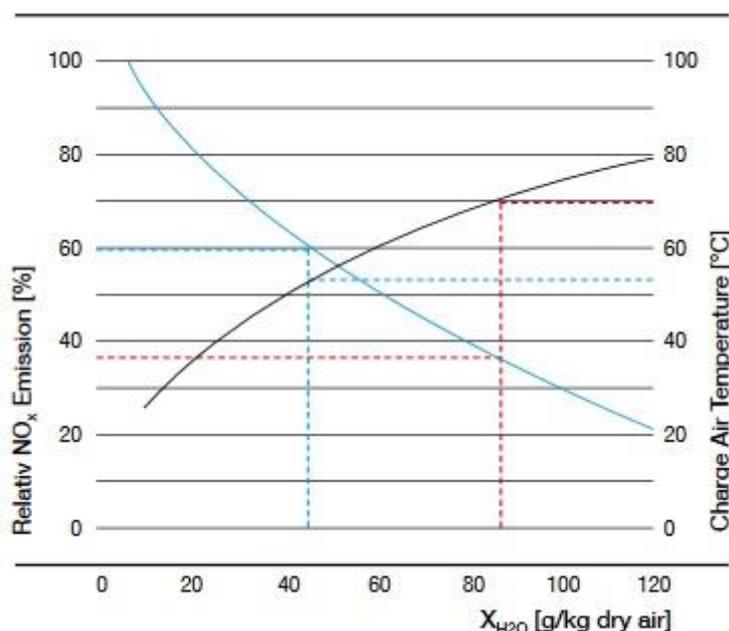


Tabla 8 Tendencia de la humedad y la formación de NO_x en sistemas HAM (MAN 2017)

Cuando el vapor saturado se mezcla con la mezcla de aire comprimida, conllevará:

- Un aumento del calor específico de la mezcla
- Dilución del aire de carga: el agua reemplaza al aire

La cantidad de agua que puede ser inyectada en la entrada de aire dependerá de la temperatura y de la presión de la mezcla.

Como se muestra en la tabla anterior la temperatura aumenta a la vez que aumenta la cantidad de agua que es posible vaporizar. Para evaporar este vapor se utiliza el mismo calor emanado por el motor, no es necesario el uso de energía externa. Además del calor del aire de carga después del compresor, se puede usar el calor del refrigerante y de los gases de escape para mejorar la absorción de humedad del aire de carga.

Se pueden lograr reducciones de NOx del 40% sin el uso del calor de los gases de escape o del refrigerante. Haciendo uso de ellos se logran reducciones de hasta un 60%.

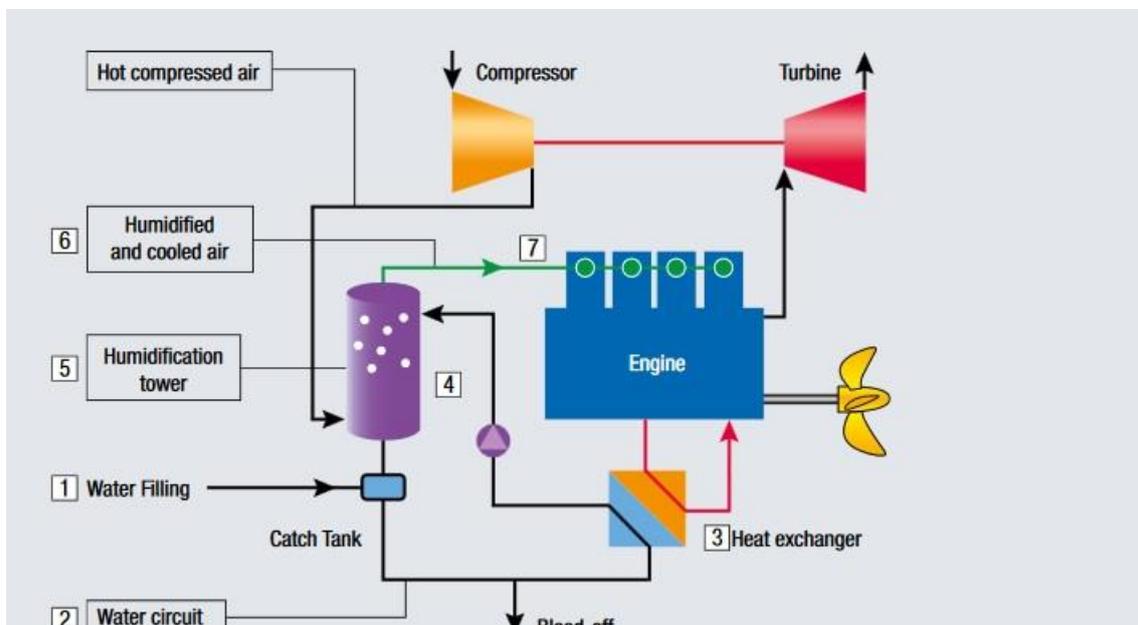


Figura 17 Esquema de motor funcionando con sistema HAM(MAN 2017)

5.7 RECIRCULACIÓN DE GASES DE ESCAPE (EGR)

La recirculación de gases de escape es una de las tecnologías de control de emisiones más usadas hoy en día, debido a la reducción significativa de las emisiones de NOx de la mayoría de los motores diésel. Esta tecnología se aplica a todos los motores, desde motores ligeros hasta aplicaciones en motores medios y pesados de baja y alta velocidad en medios marinos.

Hoy día, esta tecnología no solo se usa para reducir las emisiones de NOx, también tiene aplicaciones como:

- Reducir la necesidad de alta carga en los motores ayudando a la vaporización de combustibles líquidos ().
- Como activador de motores diésel de ciclo cerrado, para mejorar la calidad de encendido de los combustibles difíciles de inflamar en motores diésel
- Para mejorar el rendimiento de los sistemas SCR

El uso de este sistema supone también un coste adicional en otros aspectos tales como un consumo de combustible mayor, mayores emisiones de HC y CO, aparición del ácido sulfúrico condensado, mayor desgaste en el motor y por consiguiente la reducción de la durabilidad del motor. Por ello, los fabricantes han tenido que durante años abordar esto con diferentes soluciones:

- Reducciones en el consumo de aceite lubricante
- Aumentos en la presión de inyección
- Mayor uso de catalizadores de oxidación
- Aumentos de la presión de admisión

La reducción de las concentraciones de oxígeno en la cámara de combustión supone un incremento de la cantidad de gas en la cámara a calentar. Es por ello que la temperatura máxima disminuye considerablemente y en cambio la

temperatura media no se ve afectada. Esto hace que para porcentajes bajos de gas recirculado el motor no se vea afectado.

El principio es simple, si reducimos la cantidad de oxígeno en la cámara, habrá menos oxígeno para reaccionar con el nitrógeno y así crear los óxidos de nitrógeno. Se estima que por cada 15% del gas recirculado en la cámara se puede reducir un 3% la cantidad de oxígeno.

Otro factor que influye en la disminución de la temperatura pico es el aumento del calor específico del conjunto de gases. Esto se debe a que, los gases recirculados son componentes pesados de tres átomos con calores específicos superiores a los del oxígeno o el nitrógeno.

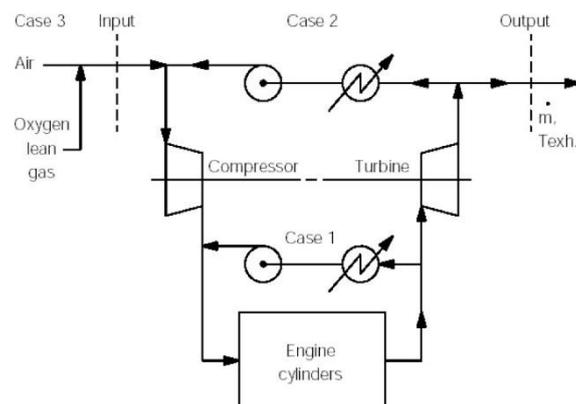


Figura 18 Instalación de sistema EGR convencional (Uriondo, Gomez y Gutierrez 2012)

La recirculación de gases, se puede plantear de dos maneras:

- Recircular el gas antes del turbocompresor
- Recircular el gas después del turbocompresor

Para la recirculación de los gases antes del turbocompresor, hay que tener en cuenta que los gases de escape cuentan con una presión inferior al del barrido

por lo que se debería comprimir el gas para poder conectarlos. Para el segundo caso las presiones después del turbo compresor succionarían el gas.

El problema es que los gases contienen componentes corrosivos los cuales pasan por la turbina del turbocompresor y el enfriador, esto deterioraría a ambos. La solución a esto es, como aparece en la siguiente figura 19, el uso de scrubbers para la limpieza de los contaminantes del gas. No supondría grandes costos económicos puesto que podría usarse agua de mar, útil para eliminar sulfuros debido a la basicidad de este. El problema reside en el tamaño de estos. (Uriondo, Gomez y Gutierrez 2012)

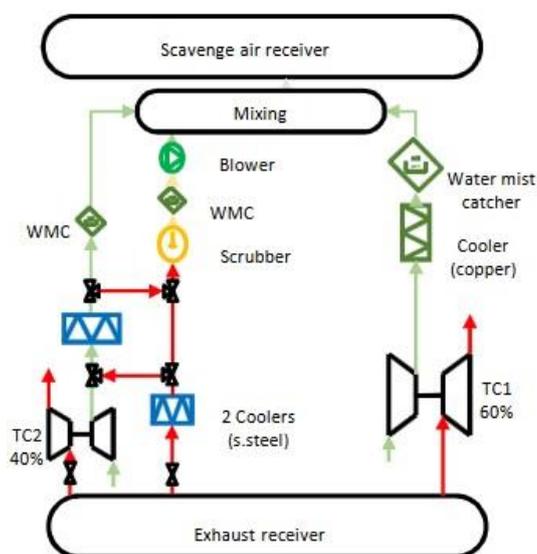


Figura 19 Esquema sistema HAM(MAN 2017)

5.8 REDUCCIÓN CATALÍTICA SELECTIVA

Los sistemas de reducción catalítica selectiva vienen usándose desde los años 70 en las industrias japonesas. No fue hasta mediados de los años 80 cuando se introdujo en Europa. En un principio se usaban únicamente en la industria. En los 90 se introdujo el sistema para la reducción de NOx en los Estados Unidos para las turbinas de gas. Este sistema se utiliza para cualquier tipo de fuel ya sea gas natural, fuel oil, diésel, carbón etc. Con la entrada del nuevo siglo se

fueron introduciendo a los motores marinos debido a las regulaciones impuestas por el MARPOL.

Los sistemas RSC son los únicos capaces de reducir las emisiones de NO_x, a los niveles requeridos por los estándares que el MARPOL exige, entre ellos, la norma más restrictiva, TIER III, para buques o motores instalados a partir del 1 de enero de 2016.

La duda con la reducción catalítica selectiva es, que se trata de un sistema post-combustión, lo cual, las autoridades no pueden asegurarse de un uso continuo del sistema. Es decir, el motor puede seguir funcionando, aunque la urea o el agente reductor no esté siendo inyectado.

5.8.1 REDUCTORES Y REACCIONES CATALÍTICAS

Existen dos formas para la reducción catalítica de los NO_x:

- Mediante amoníaco
- Mediante Urea (Amoníaco en estado acuoso)

El amoníaco o anhídrido de amoníaco es un compuesto tóxico, peligroso y requiere de tanques especiales y presurizados con tuberías especiales. El amoníaco acuoso es menos peligroso y no requiere de infraestructura especial.

Las siguientes reacciones son las que se darán cuando hacemos reaccionar el amoníaco con los óxidos de nitrógeno:

- $6\text{NO} + 4\text{NH}_3 \rightarrow 5\text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$
- $4\text{NO} + 4\text{NH}_3 + \text{O}_2 \rightarrow 4\text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$
- $6\text{NO}_2 + 8\text{NH}_3 \rightarrow 7\text{N}_2 + 12\text{H}_2\text{O}$
- $2\text{NO}_2 + 4\text{NH}_3 + \text{O}_2 \rightarrow 3\text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$
- $\text{NO} + \text{NO}_2 + 2\text{NH}_3 \rightarrow 2\text{N}_2 + 3\text{H}_2\text{O}$

Los procesos de inyección de amoniaco requieren un preciso control del caudal inyectado. Dependiendo del amoniaco que se inyecte variaran las emisiones de NOx. Cuando se inyectan altas cantidades de amoniaco, este no reaccionara totalmente, lo que conlleva a deslizamientos a la atmosfera. Dependerá de la relación estequiometria entre el NOx presente en los gases de escape y el amoniaco inyectado.

En la práctica esta relación varía entre un 0,9 y 1. Si esta relación cae las emisiones de NOx aumentaran. El deslizamiento de amoniaco disminuirá con el aumento de la temperatura, mientras que las reacciones del NOx, pueden incrementar o disminuir con la temperatura, dependiendo del rango de temperaturas y del sistema del catalizador. En la imagen se muestra como cuando aumentamos la relación de amoniaco con los oxidos de nitrógeno, aumenta el deslizamiento del amoniaco. En la práctica será importante mantener la relación entre ambos componentes.

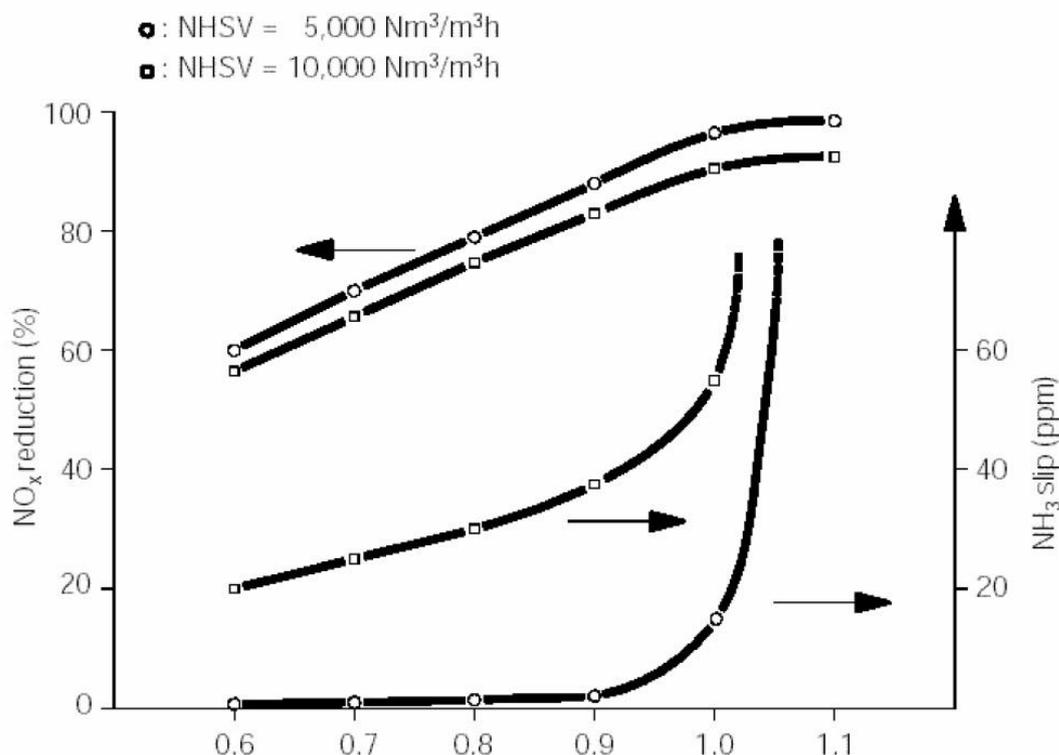
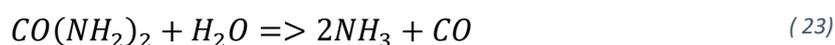


Tabla 9 Deslizamiento del amoniaco (Uriondo, Gomez y Gutierrez 2012)

Desde un punto de vista práctico, decido a la toxicidad y la seguridad en el transporte, el uso del amoniaco es poco viable. Técnicamente el reductor debería de ser un compuesto de descomposición rápida a amoniaco. Es por ello que se usa urea en lugar de amoniaco.

Bajo condiciones normales la urea es una sustancia sólida. La solubilidad de la urea en la práctica es de una concentración de 32,5% en peso. Las soluciones acuosas de urea son inyectadas en la corriente gaseosa del proceso. A temperaturas por encima de 160°C la urea comienza a descomponerse e hidrolizarse de acuerdo a las siguientes ecuaciones:



De esta manera el NH_2 podrá reaccionar con el NO:



5.8.2 TIPOS DE CATALIZADORES

5.8.2.1 CATALIZADORES DE PLATINO

Son de poco uso en la actualidad. Su selectividad solo funciona en una ventana de 225°C a 250°C lo que hace que sean poco usados este tipo de catalizadores. Es en esa franja donde se da la reacción con los óxidos de nitrógeno.

5.8.2.2 CATALIZADORES DE VANADIO

Se les considera catalizadores de media temperatura. Su rango de operación está entre los 260°C y los 450°. La ventana de operación es muy superior a la del platino. Sin embargo, este tipo de catalizador pierde mucha eficiencia de conversión una vez pierde la actividad. La selectividad de los catalizadores usados a día de hoy se extiende hasta los 500°C una cifra por encima de los catalizadores de vanadio.

5.8.2.3 CATALIZADORES DE ZEOLITA

Zeolitas son extremadamente útiles como catalizadores para muchas reacciones importantes con moléculas orgánicas. Las más importantes son craqueo, isomerización y síntesis de hidrocarburos. Las zeolitas pueden promover una serie de reacciones catalíticas incluyendo ácido-base y reacciones de metal inducido. Las zeolitas también pueden ser catalizadores de ácidos, pueden usarse como soporte para metales activos/reactivos.

Las zeolitas pueden ser catalizadores selectivos en cuanto a la forma, tanto por la selectividad del estado de transición o por exclusión de reactivos competidores en base al diámetro de la molécula. También se han utilizado como catalizadores de oxidación. Las reacciones tienen lugar dentro de los poros de la zeolita, que permite un mayor grado de control del producto.

En los catalizadores de RCS, sabemos que están compuestos de zeolitas, pero los fabricantes no informan de la composición precisa de sus catalizadores. Técnicamente son capaces de mantener una ventana donde el óxido de nitrógeno reaccione hasta los 600°C.

Los catalizadores de zeolitas se han combinado con cobre para mejorar los problemas con la alta temperatura logrando aumentar la ventana hasta los 650°C. Este tipo de compuesto es capaz de reducir las emisiones de NOx hasta un 90%. (Uriondo, Gomez y Gutierrez 2012)

5.8.3 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LOS SISTEMAS DE REDUCCIÓN CATALÍTICA SELECTIVA ACTUALES

Existen diferentes configuraciones para aplicar sistemas de reducción catalítica. En la actualidad, se debate el uso entre dos configuraciones distintas por las grandes marcas de motores marinos:

- RCS a alta presión o HP SCR systems (HIGH PRESURE SELECTIVE CATALYTIC REDUCTION)
- RCS a baja presión o LP SCR systems (LOW PRESURE SELECTIVE CATALYTIC REDUCTION)

Las configuraciones a bordo de los buques variaran dependiendo del año de construcción de estos. Con los años se han ido instalando mejores y variando el sistema. Estas dos configuraciones son posiblemente las que se instalaran hoy día, dependiendo de las características del motor, de estas características derivara la selección de un sistema u otro.

5.8.3.1 REDUCCIÓN CATALITICA SELECTIVA A ALTA PRESION

El uso de este sistema de reducción se basa principalmente en tratar los gases de escape una vez salen del colector de escape. Su nombre deriva de que el reactor se encuentra en la parte de alta presión de la turbina. Una vez salen los gases de escape entran en el circuito de reducción catalítica selectiva. En la siguiente imagen se muestra esquemáticamente el circuito de reducción a alta presión.

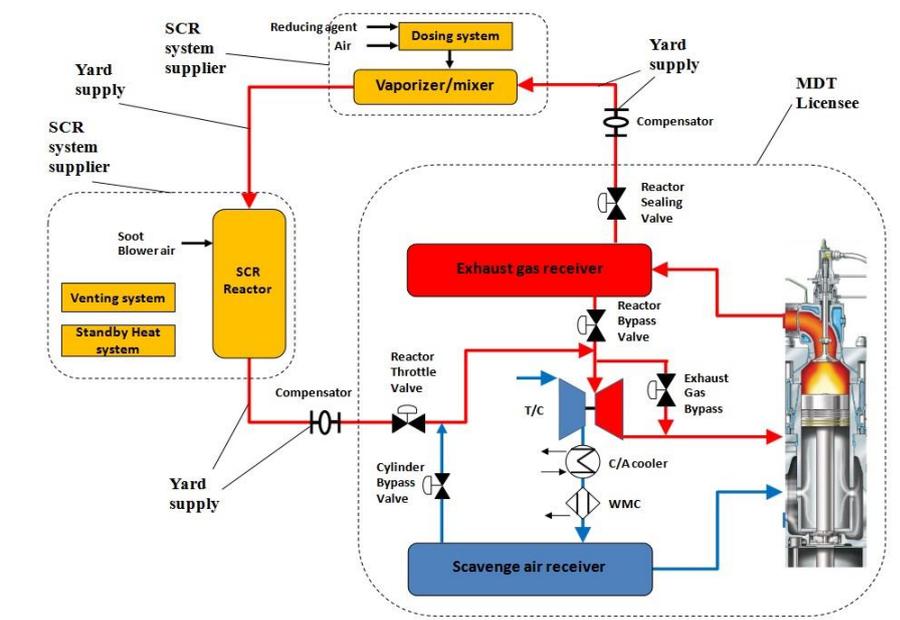


Figura 20 Circuito de alta presión RCS (MAN 2017)

1. Entra en un depósito donde los gases de escape se mezclan con una mezcla de urea vaporizada. En este punto la mezcla de urea debe de ser uniforme, para ello es inyectada por una tobera que atomiza la solución. Aquí la urea sufrirá lo que se denomina como hidrólisis, y se formarán moléculas de amoníaco.
2. Esta mezcla entra en el catalizador o reactor donde los óxidos de nitrógeno reaccionarán con el amoníaco creando partículas de nitrógeno y agua. En el reactor se acoplan sopladores para eliminar el hollín de los gases. Están equipados también cuentan con calentadores para que la temperatura en el reactor este dentro de la ventana de reacción del reactor.
3. Una vez los compuestos han reaccionado, mediante un conducto son redirigidos al turbocompresor. Donde dependiendo de las cargas el sistema actuara en consecuencia.

En motores lentos de 2 tiempos los gases de escape, puede que no alcancen la temperatura ideal debido a su alta eficiencia energética. Cuando el motor está quemando fuel-oíl la temperatura ideal en los gases de escape este entorno a los 330°C-350°C.

La virtud de estos nuevos sistemas es que, cuando las cargas sean inferiores al 50% será necesario el uso de un método para estas bajas cargas en motores lentos. El método consiste en aumentar la temperatura de los gases de escape. Para eso se introduce la válvula CBV (Cylinder Bypass Valve). Esta válvula reduce la masa de aire introducida en la cámara de combustión, a una cantidad fija de fuel. De esta manera se obtiene una mayor temperatura en los gases de escape. El caudal de aire que circula por la turbina y el compresor no variará y por lo tanto la presión en la admisión se mantendrá constante.

Durante el arranque del motor la turbina necesitara suficiente energía para alcanzar las revoluciones de trabajo por ello, este sistema deberá estar provisto de un control donde durante el arranque los gases de escape entren directamente en la turbina. Para la deceleración de la turbina se utilizará el mismo método. Este controlador se asegurará también de mantener una temperatura mínima de los gases de escape, un rápido calentamiento del sistema RCS y una ejecución adecuada del motor.

Para cargas bajas y cuando no necesita de la reducción de NOx, los gases de escape pasaran directamente a la turbina, por medio de un by-pass.

5.8.3.2 REDUCCIÓN CATALÍTICA SELECTIVA A BAJA PRESION

Este método sigue el mismo principio para la reducción, pero la configuración es diferente. En este caso, el reactor se encuentra en la parte de baja presión de la

turbina, es decir, los gases son tratados una vez han pasado por la turbina. En la siguiente imagen se muestra la configuración del sistema.

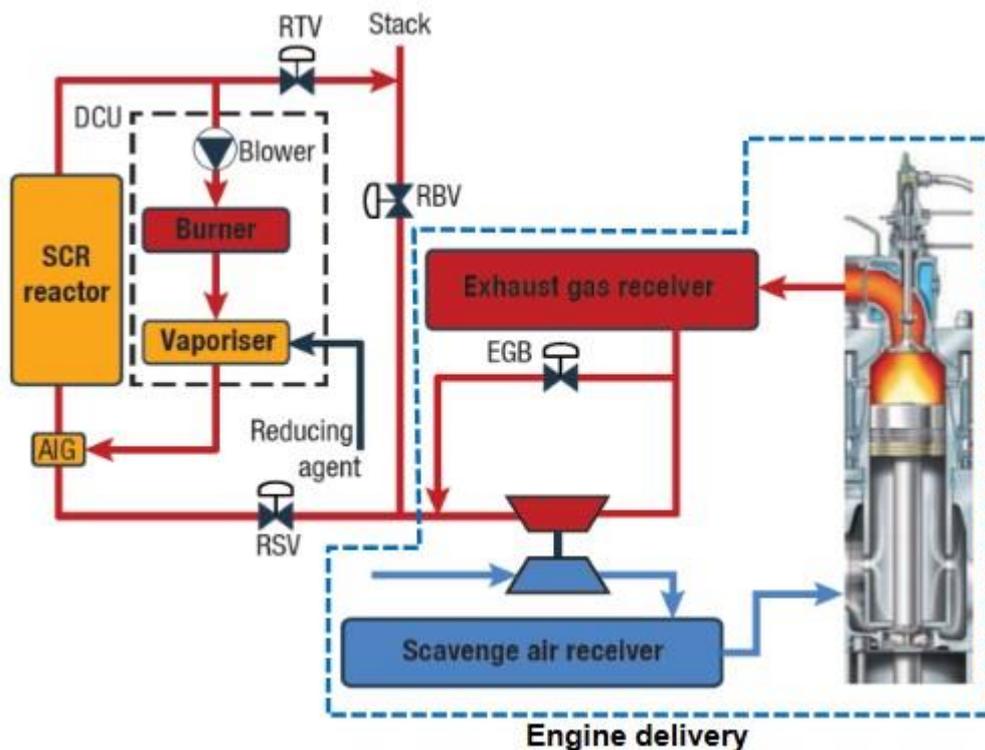


Figura 21 Circuito de baja presión RCS (MAN 2017)

La desventaja de esta configuración respecto a la de alta presión es para los motores lentos de dos tiempos donde si la temperatura de los gases de escape cae por debajo de los 330°C, los gases no reaccionarán y las emisiones serán insuficientemente reducidas. Este tipo de sistemas pese a poder instalarse en cualquier lugar del barco, necesitan de más espacio. Los sistemas de alta presión, pueden trabajar con distintos tipos de combustible a diferencia de los de baja, ya que se pueden combinar con scrubbers para reducir el contenido en azufre en el combustible.

Esta configuración por sus características está más destinada a motores medios o rápidos, debido a que en bajas cargas el motor puede mantener las temperaturas de la ventana de reacción del catalizador.

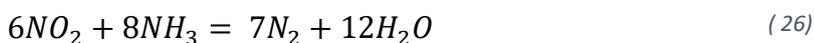
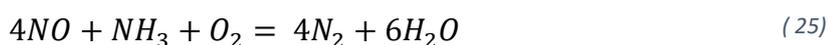
METODOLOGIA Y DESARROLLO

6. SIMULACIÓN SISTEMA DE REDUCCIÓN CATALÍTICA SELECTIVA MC90-V

El simulador perteneciente a la marca Kongsberg Norcontrol, simula un VLCC (Very Large Crude Carrier) provisto de un motor lento sobrealimentado MAN B&W 5L90MC como sistema de propulsión.

El simulador cuenta con sistema de tratamiento de gases post-combustión, mediante reducción catalítica selectiva. La función del sistema es minimizar el impacto ambiental, reduciendo las emisiones de NOx del motor principal.

Este sistema de RSC en concreto está instalada antes de la turbina del turbocompresor del motor principal. El principio de funcionamiento del sistema se basa en la inyección de amonnia a través de un catalizador a temperaturas comprendidas entre los 300°C y los 400°C. Ya en el catalizador la amonnia reacciona con los gases de escape de la siguiente manera:



El catalizador tendrá una ventana de temperaturas donde se podrá dar la reacción, si la temperatura mínima no se alcanza o se sobrepasa la máxima, los óxidos de nitrógeno no reaccionaran. Cuando la temperatura no llegue a los 250°C el rango de reacción será demasiado bajo y el catalizador se verá dañado. Si la temperatura supera los 490°C la amonnia se quemará y no podrá reaccionar con los óxidos de nitrógeno.

La inyección de amoníaco estará controlada dependiendo de la cantidad de NOx que haya en los gases de escape, de esta manera se evitara deslizamientos. Debido a que las reacciones pueden ser lentas, la potencia del motor también se utiliza como medida de control para la señal de salida del controlador.

Cuando el controlador este en automático, el controlador de NOx reducirá su punto de consigna cuando el deslizamiento este por debajo de lo requerido y la aumentará cuando esté por encima. Su principal labor por lo tanto será llevar el control de los aumentos y descensos de amoníaco. Los niveles tanto de amoníaco como de los niveles de NOx requeridos en el sistema son de 10ppm y de 5g/kWh respectivamente.

Es importante conocer el funcionamiento del controlador del RCS, así como los posibles “TRIP” o fallos que paren la panta de RCS.



Figura 22 Panel del controlador RCS
(Simulador Kongsberg MC90-V)

- STOPPED: Cuando el sistema no está funcionando
- ACTIVE: El sistema es funcionando. Todos los gases de escape pasan por catalizador.
- SHUTTING DOWN: El sistema está dejando de funcionar, pasando de ACTIVE a STOPPED. En este punto las válvulas que van al catalizador como las que comunican directamente con el turbocompresor están

abiertas durante 15 segundos, para que el turbocompresor no padezca ningún problema durante el cambio.

- **STARTING:** EL sistema está arrancando. Las válvulas que conectan directamente con el turbocompresor como la válvula que conecta con el catalizador están abiertas durante 30 segundos. De esta manera, evitamos problemas con el turbocompresor y calentamos el catalizador a su temperatura de trabajo.
- **STANDBY:** Cuando se arranca el sistema, y la temperatura del catalizador es muy baja, pasa un tiempo en standby para así lograr la temperatura requerida. Esta temperatura se puede variar manualmente en el mismo controlador. Por defecto el simulador, tiene una temperatura mínima de 250°C y una máxima de 490°C. No se aconseja el cambio de estos valores puesto que son el rango de temperaturas donde el NOx reaccionara con la ammonia.

Los posibles fallos de sistema son:

- **AMMONIA SUPPLY:** El piloto se encenderá y parará el sistema cuando el suministro de ammonia sea insuficiente, debido al nivel de los tanques.
- **AMMONIA PRESSURE:** Cuando la presión de ammonia esté por encima de los 2.5 bar parara el sistema. Este valor también se puede variar en el controlador
- **MIXING AIR SUPPLY:** Cuando el aire de admisión que gasifica la ammonia pierde presión.
- **EXCESSIVE AMMONIA SLIP:** Cuando la cantidad de ammonia introducida en el catalizador es excesiva y no reacción con los óxidos de nitrógeno. Esta cantidad será de 60ppm, y durante 30 segundos el sistema seguirá funcionando. Si el valor no baja el sistema parara. El valor de 60ppm es variable en el controlador
- **AMMONIA LEAKAGE:** Si se produce cualquier fuga en el circuito de ammonia se parará la planta de RCS, debido a que es inflamable y en grandes cantidades puede producir explosiones.

6.1 PUESTA EN MARCHA Y CONTROL DEL SISTEMA RCS

Para la puesta en marcha del circuito de reducción catalítica (MD14), el motor principal deberá estar a plena carga para asegurarnos de alcanzar las temperaturas requeridas por la ventana de temperaturas del reactor.

El procedimiento será el siguiente:

1. Abrir la válvula que conecta la admisión del motor principal con el llamado “static mixer”. Es aquí donde se mezcla la amoníaco con la corriente de aire.
2. B Abrir la válvula que conecta el tanque de amoníaco con el circuito de RCS.
3. En el controlador de emisiones de NO_x, introduciremos el valor de 5g/KWh.
4. Una vez tengamos los anteriores pasos completados, el control de RCS estará listo para ser arrancado.

En la imagen se muestran las valvulas y el setpoint del controlador indicados, aun sin introducir ni abrir.

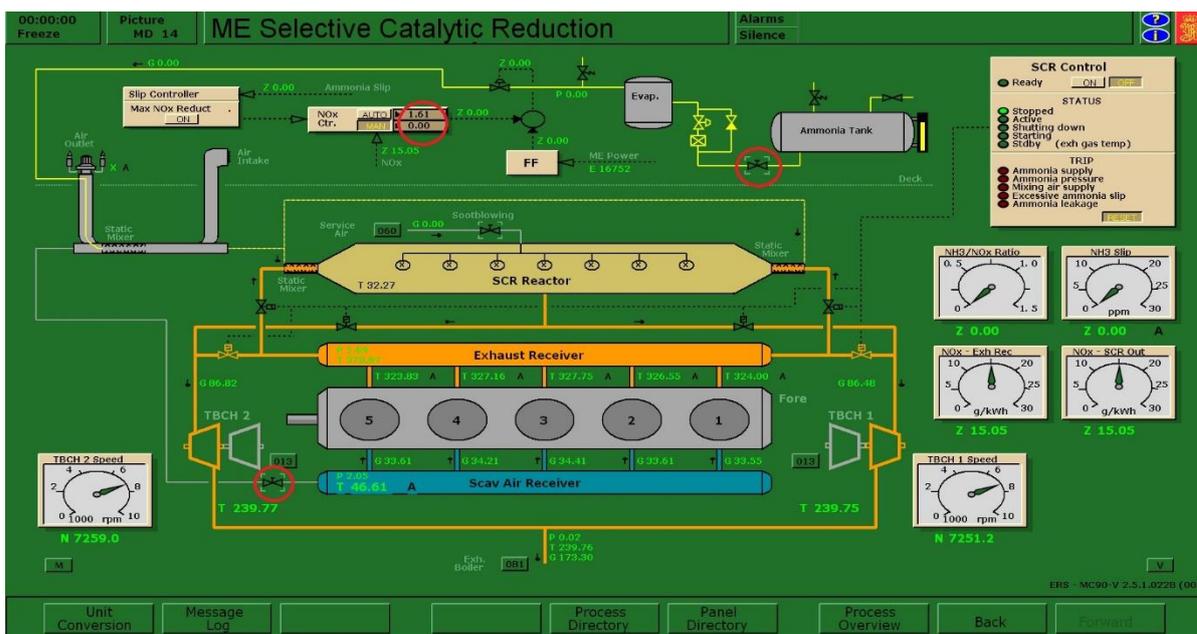


Figura 23 Arranque del sistema RCS (Simulador Kongsberg MC90-V)

EL sistema tardara en arrancar unos segundos, durante este tiempo las válvulas que conectan el colector de escape con el turbocompresor y las que conectan el colector de escape con el catalizador o reactor quedaran abiertas. Este periodo es necesario para que el catalizador eleve su temperatura a la de trabajo y para que el turbocompresor no se vea dañado por un cambio brusco.

Una vez que haya arrancado los valores NOx a la salida del reactor disminuirán hasta alcanzar el valor que previamente hemos introducido en el controlado. En la siguiente imagen se muestra la diferencia entre el contenido de óxidos de nitrógeno en el colector de escape y el contenido de nitrógeno una vez ha pasado por el catalizador.

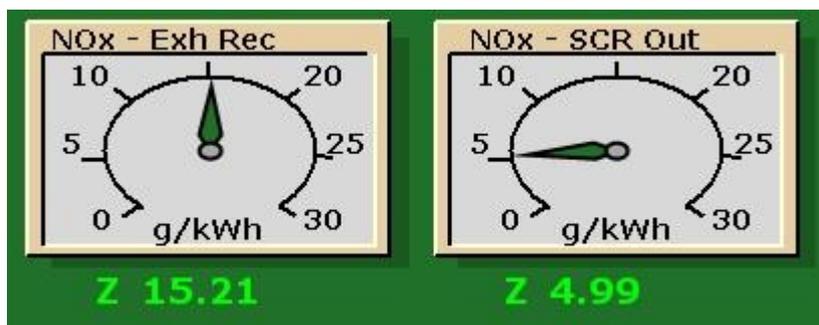


Figura 24 Diferencia de emisiones post-catalizador (Simulador Kongsberg MC90-V)

Una vez el sistema esté trabajando podremos cambiar el valor introducido en el controlador y reducirlo para minimizar las emisiones de NO_x a la atmosfera. De hecho, es aconsejable utilizar relaciones de NH₃/NO_x entre 0,9 y 1. Para este caso únicamente tenemos una relación de 0,69, de ahí el poco deslizamiento de NH₃, únicamente 1,01 ppm.

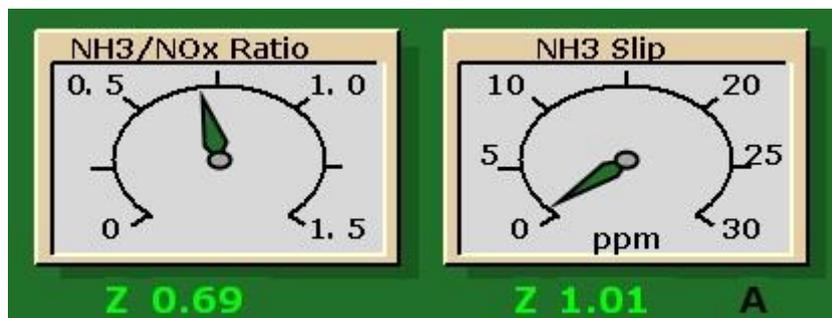


Figura 25 Relación NH₃/NO_x y deslizamiento de NH₃ (Simulador Kongsberg MC90-V)

Si disminuimos el valor de emisiones de NO_x a la salida del catalizador a 1,60 g/KWh, la relación de NH₃/NO_x aumentara hasta valores recomendados, para una mayor eliminación de los óxidos de nitrógeno, sin un gran aumento del deslizamiento de amoníaco. En la siguiente imagen se muestran los resultados obtenidos.



Figura 26 Relación de NH₃/NO_x ajustado (Simulador Kongsberg MC90-V)

6.2 ADAPTACIÓN DE LAS EMISIONES DE NO_x DEL MC90 AL MARPOL

Estos valores obtenidos deberán adaptarse a las normas vigentes dependiendo del contenido de NO_x a la salida de los gases de escape a la atmosfera. Dependiendo del año de instalación del motor en el buque deberá cumplir los siguientes límites.

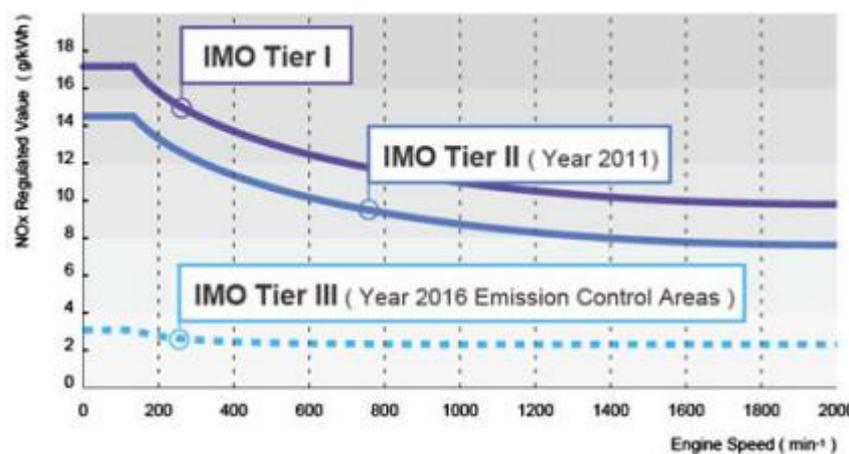


Tabla 10 Límites de emisiones de NO_x (MARPOL)

Si el motor

hubiese sido instalado entre el 1 de enero del 2000 y el 1 de enero de 2011 debería cumplir el límite TIER I. Lo que supondría para este motor la emisión de como máximo 17g/kWh de NO_x a la atmosfera. Teniendo en cuenta los datos anteriores, cumpliría la norma aun no usando el sistema de RCS. Puesto que con el sistema de RCS apagado el motor emite 15,21 g/kWh.

Ese valor será el valor máximo de emisiones de NO_x que obtendremos, debido a que está calculado con el motor con el 100% de carga, donde alcanzará las mayores temperaturas y por tanto mayor producción de NO_x.

Si el motor hubiese sido instalado después del 1 de enero de 2011 debería cumplir la norma TIER II. Lo que supondría para este motor la emisión de 14,4

g/kWh de NOx a la atmosfera. Teniendo en cuenta los datos obtenidos, únicamente cumpliría la norma con el sistema de RCS en funcionamiento.

Por último, la norma TIER III únicamente se debe cumplir para motores instalados a partir del 1 de enero de 2016 y en las zonas de control de emisiones establecidas en la actualidad. Esta norma exige la emisión de 2,0 g/kWh de NOx a la atmosfera. Como hemos visto en el punto anterior el sistema de RCS del MC90, con relaciones de NH₃/NOx de entre 0,9 y 1 es capaz de dar valores en el escape en torno a 0,84g/KWh de óxidos de nitrógeno. Por lo tanto, a plena carga el motor es capaz de entrar los límites TIER III.

6.3 COMPORTAMIENTO Y RESULTADOS OBTENIDOS DEL SISTEMA RCS A DIFERENTES CARGAS DE MOTOR.

Se ha visto que el MC90 es capaz de cumplir cualquiera de los límites exigidos por el MARPOL. El problema de los sistemas RCS y en concreto para motores lentos quemando fuel-oil reside en la baja temperatura en el escape para cargas pequeñas del motor. Para comprobar la respuesta del sistema RCS, se han variado las cargas de motor. Para ello en el simulador arrancaremos a plena carga y con el sistema de RCS apagado.

La secuencia será ir bajando la carga en porcentajes de 5. Para ello una vez carguemos el sistema en "FULL AHEAD LOADED", es decir, a plena carga, pasaremos el control del motor principal a el control de la máquina, puesto que el mando estará en el puente (MD104). En la imagen se muestra como el control ya está en la máquina, y el motor sigue a plena carga. Al hacer este cambio saltará la alarma de que el control deja de estar en el puente.

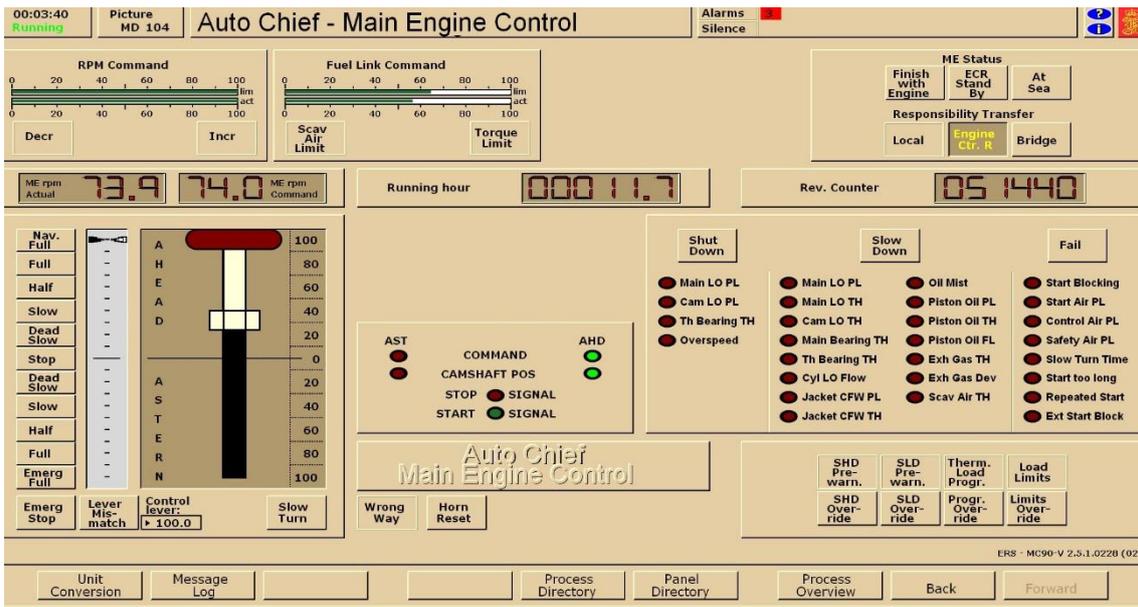


Figura 27 Cambio del mando a el control de la maquina (Simulador Kongsberg MC90-V)

Llegados a este punto se arranca el sistema de RCS como previamente se ha anotado.

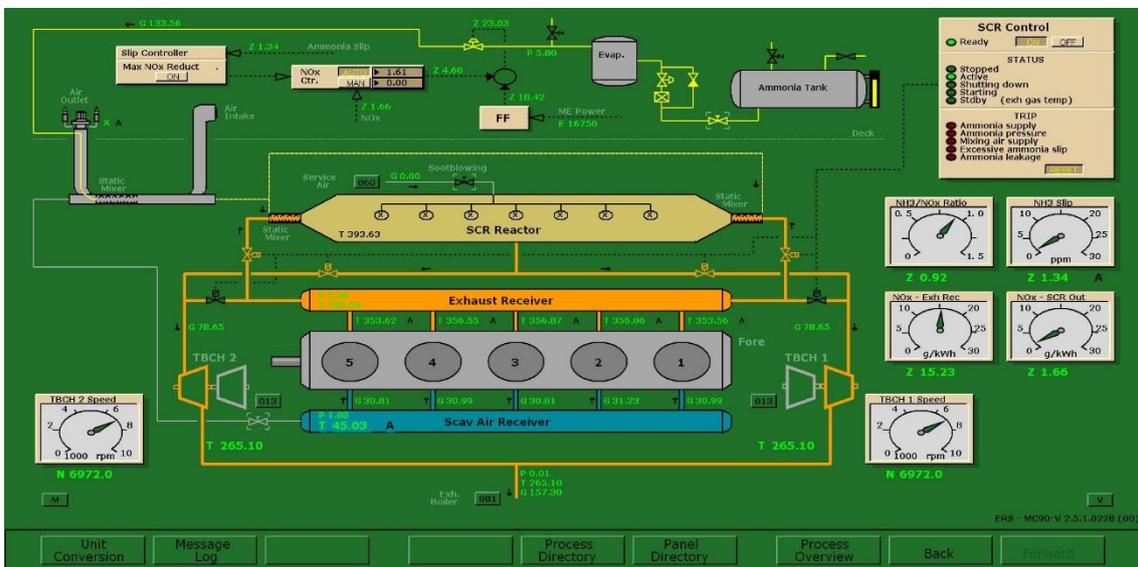


Figura 28 100% de carga (Simulador Kongsberg MC90-V)

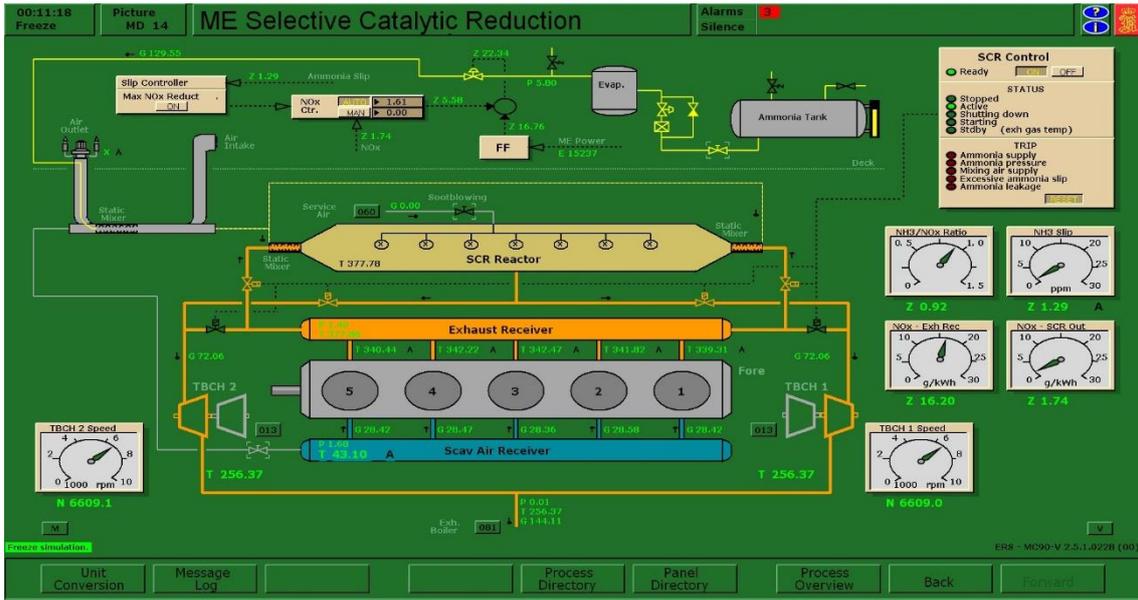


Figura 29 90% de carga (Simulador Kongsberg MC90-V)

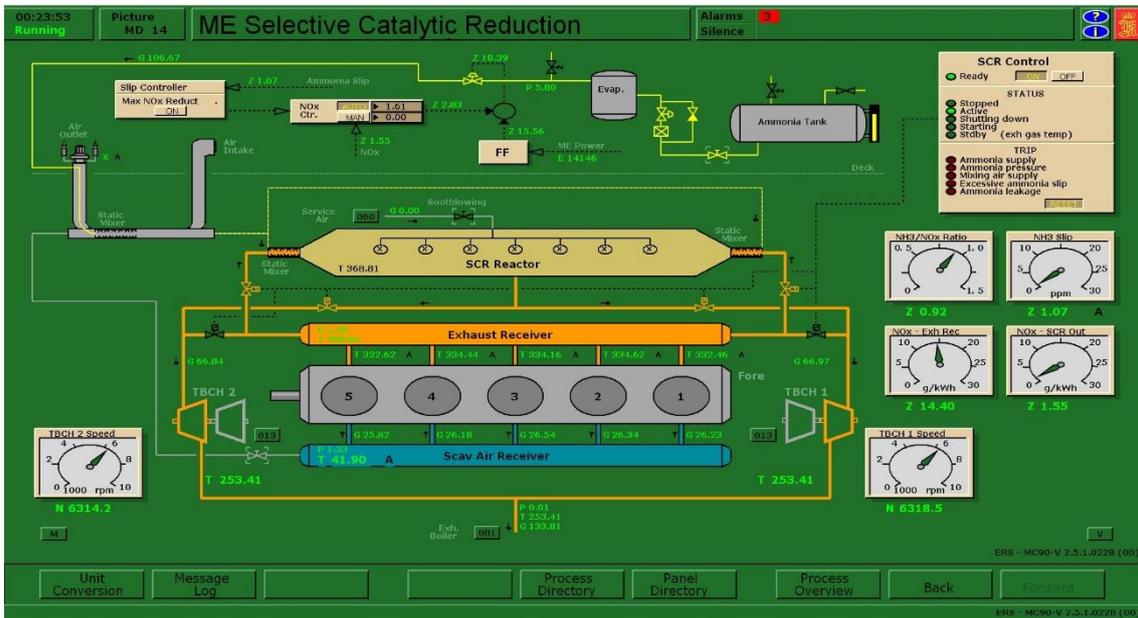


Figura 30 80% de carga (Simulador Kongsberg MC90-V)

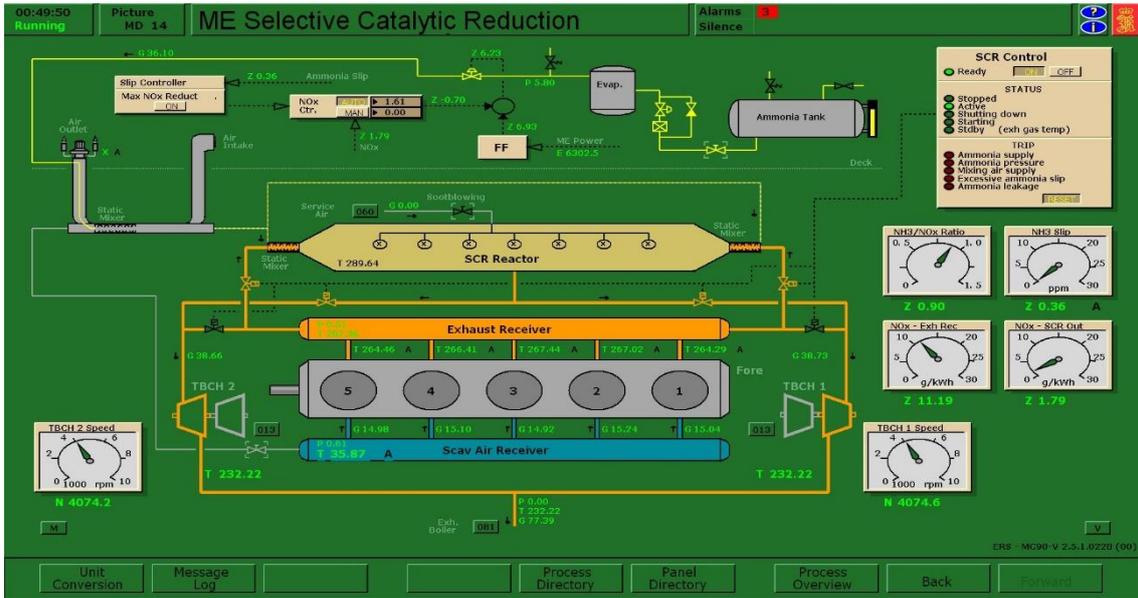


Figura 31 70% de carga (Simulador Kongsberg MC90-V)

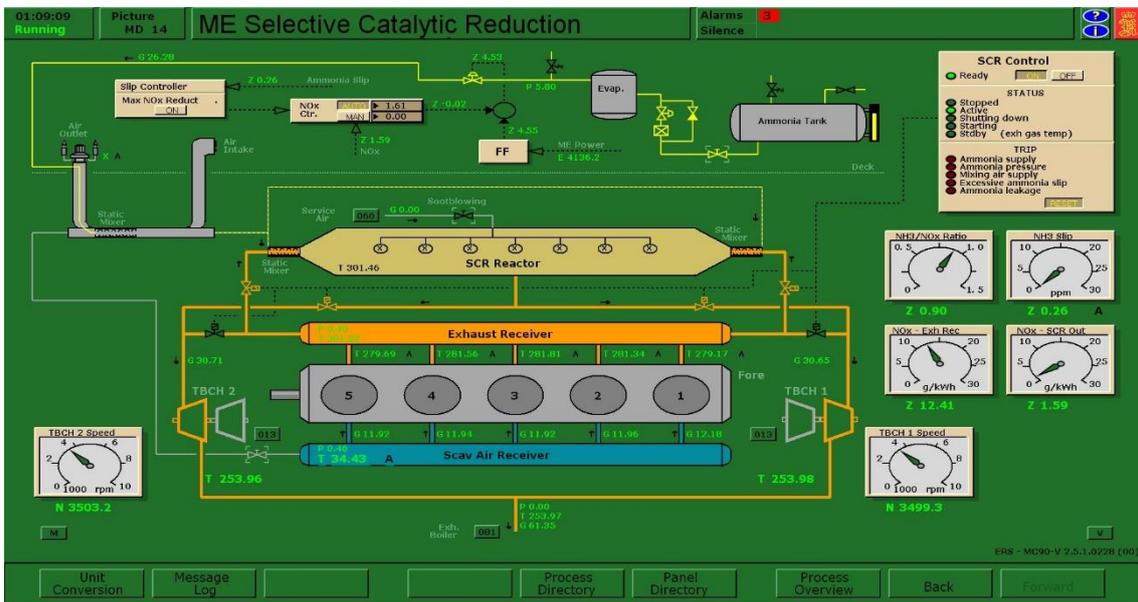


Figura 32 60% de carga (Simulador Kongsberg MC90-V)

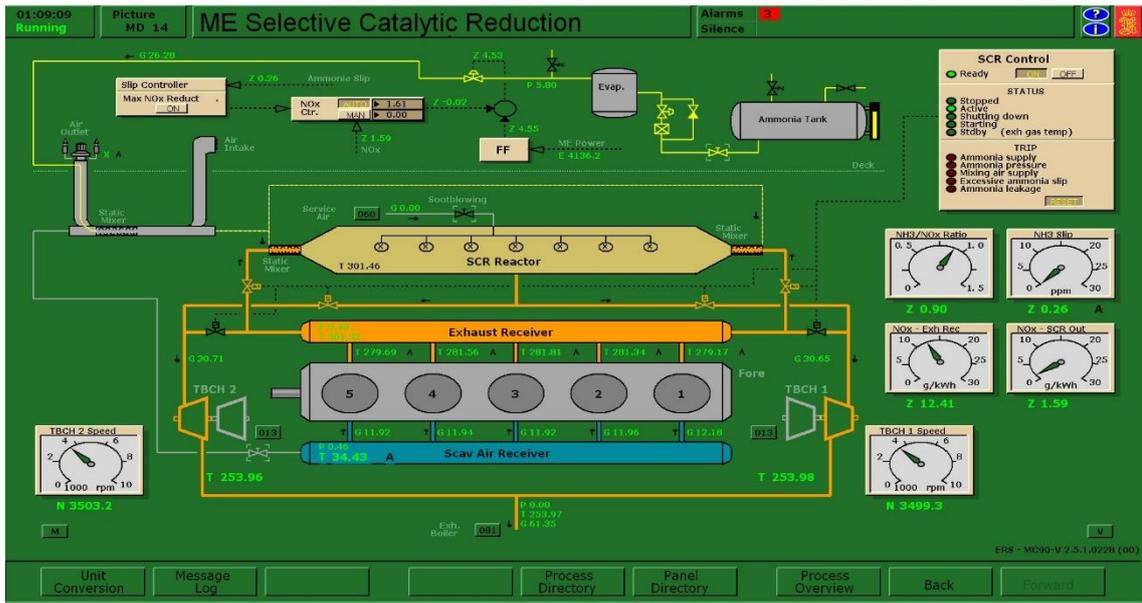


Figura 33 50% de carga (Simulador Kongsberg MC90-V)

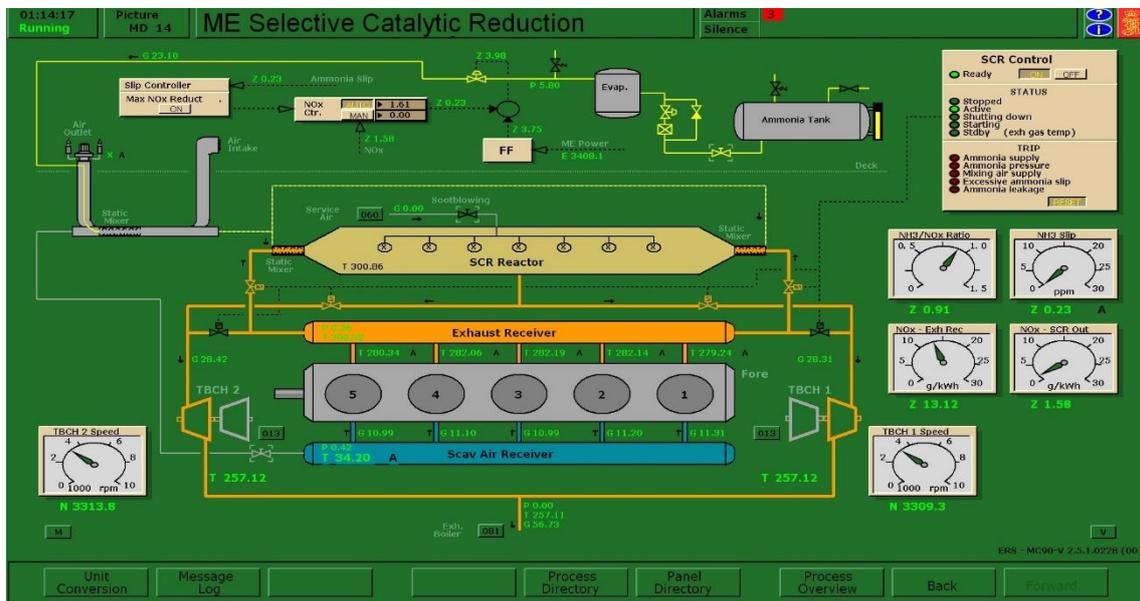


Figura 34 45% de carga (Simulador Kongsberg MC90-V)

Durante el proceso no solo se recogen datos que se muestran en las imágenes. Como se pueden ver en la tabla se han recogido datos intermedios para examinar mejor la evolución del sistema. Los resultados obtenidos son se muestran en la siguiente tabla:

	100 %	95 %	90 %	85 %	80 %	75 %	70 %	65 %	60 %	55 %	50 %	45 %
T _{Escape} s (°C)	346	345	342	339	335	323	307	295	266	275	278	283
T _{cataliza} d (°C)	384	383	378	373	369	357	338	323	289	299	301	302
NH ₃ /N Ox	0,9 3	0,9 3	0,9 1	0,9 1	0,9 2	0,8 9	0,8 8	0,8 8	0,8 8	0,8 8	0,9 0	0,9 1
NH ₃ slip (ppm)	1,3 3	1,3 4	1,2 3	1,1 2	1,0 7	0,6 9	0,5 7	0,4 5	0,3 7	0,3 2	0,2 6	0,2 3
NOx g/Kwh (esca pe)	1,5 9	1,5 8	1,7 4	1,6 4	1,6 2	1,5 9	1,5 9	1,6	1,6	1,5 8	1,5 8	1,5 8
NOx g/Kwh (colec tor)	15, 97	15, 82	15, 11	14, 82	14, 45	11, 37	11, 28	11, 16	11, 20	11, 62	12, 58	13, 21

Tabla 11 Resultados obtenidos a diferentes cargas

Durante la simulación se ha podido observar como al introducir los cambios de carga, cada vez que la carga era mayor, los picos de deslizamiento eran mayores. Una vez que la carga del motor era menor, el cambio de carga tenía que ser más progresivo con cambios muy leves. Los cambios deben de ser del orden de un 2% como máximo para evitar que los picos de deslizamiento paren el sistema.

A partir del 75% de carga los picos van aumentando. Es posible de manera progresiva alcanzar un 45% de carga, una vez que llegamos a este punto las temperaturas tanto en el catalizador como en el escape empiezan a oscilar. Llega un punto donde el sistema RCS para debido a la temperatura en el escape que llega a estar por debajo de los 250°C y vuelve a arrancar cuando sobrepasa esta temperatura. Durante el tiempo en el que vuelve a arrancar el sistema alcanza temperaturas de 350°C a las cuales el controlador no llega a responder, debido a los cambios bruscos donde el sensor no cuenta con una respuesta lo suficientemente rápida, con la consecuencia de un alto deslizamiento de amoníaco, llegando a los 150 ppm.

En cuanto a los datos obtenidos, las temperaturas van bajando progresivamente según la carga va disminuyendo. Durante todo el proceso el sistema es capaz de minimizar la cantidad de NOx impuesta al controlador de manera constante, en el caso de la simulación planteada a 1,6g/KWh, mientras las cargas no bajen del 50%. Es aquí donde el sistema empieza a ser inestable.

Se puede observar que las emisiones en los escapes, antes del tratamiento del sistema RCS, va disminuyendo, la razón es que, al disminuir la temperatura, la producción de NOx dentro de la cámara de combustión también disminuye. Cuando la carga llega al 50% deja de disminuir debido a las oscilaciones de la temperatura en el escape.

CONCLUSIONES

7. CONCLUSIONES

Todo indica que el futuro pasa por la reducción de las emisiones de gases nocivos a la atmosfera en todos los ámbitos de la industria y el transporte. Estas reducciones con el tiempo pasaran a ser más restrictivas e incluso, quizás en un futuro, nulas. En el ámbito marino en la actualidad existen ya diferentes limites a los que ceñirse dependiendo del año de construcción o instalación de los motores en este caso. Este, es un ejemplo entre muchos de que, con el tiempo, se estará obligado a cumplir mayores restricciones, y que motores y máquinas de nuestros tiempos quedaran obsoletos o fuera de la ley de no haber un cambio en ellos, es la caso los limites TIER III que únicamente se cumplen en zonas de emisión controladas.

Muchos de estos métodos son dependientes de los sistemas de análisis que encontramos en la actualidad. Estos cuentan con sensores como la quimioluminiscencia en el caso de los catalizadores selectivos, donde se obtienen buenos resultados, con respuestas rápidas del controlador como se ha podido observar en el simulador.

En cuanto a los métodos de reducción en un principio se han estudiado los cambios en los ciclos de trabajo de los motores alternativos de combustión interna, como son los retardos a la inyección, cambios en el diseño de los inyectores, enfriamientos del aire de barrido, ciclos Miller, inyección de agua, emulsión de combustible con agua etc. Todos estos métodos han sido capaces de reducir las emisiones de NOx, pero no por ello serán aplicables a nuevos motores como únicos sistemas de reducción, puesto que, no cuentan con reducciones suficientes de NOx para cumplir limites futuros por si solos.

Otro de los caminos que se podrá tomar en un futuro es el cambio de los combustibles utilizados. Se ha visto que para emisiones de NOx puede no ser necesario ningún otro tipo de sistema de tratamiento para los escapes. Quizás este sea el último paso que se dará, debido a que supone no solo un cambio en el funcionamiento de los motores y en el diseño de los buques, supone un cambio en la economía mundial y mientras los costes del petróleo no aumenten será difícil esta fractura.

Por ultimo encontramos, los sistemas de tratamiento que se basan en la reducción catalítica selectiva. Estos sistemas han demostrado la capacidad de reducir las emisiones de NOx a los limites exigidos TIER III. Con el MC90 se ha comprobado la estabilidad del sistema. Los resultados obtenidos son, que a bajas cargas del motor, donde la temperatura desciende, el sistema de reducción catalítica selectiva deja de responder y las temperaturas tanto en el escape como en el catalizador empiezan a oscilar. Esto ha supuesto un aumento del deslizamiento de amoniaco, con picos que han superado los 150ppm cuando los catalizadores están diseñados para trabajar con un máximo deslizamiento de 50 ppm. Lo que sugiere que si este sistema fuese instalado en la actualidad no cumpliría los límites en zonas de control de emisiones por sí solo, al no trabajar bien a bajas cargas.

Como solución a este problema se han diseñado nuevos métodos como el que presento MAN este mismo año 2017, donde mediante un sistema de reducción catalítica selectiva a altas presiones conseguimos hacer a funcionar motores lentos a regímenes bajos de motor con temperaturas más altas en los escapes, y, por lo tanto, entrar en los límites de las zonas de control de emisiones.

BIBLIOGRAFIA

8. BIBLIOGRAFIA

- BARONICK, J., 2001. *Evaluation of UV analyzer for NOx Vehicle Emission Measurement*. S.I.: s.n.
- CALAIRE, 2015. Analizadores y técnicas de análisis. [en línea]. Disponible en: <http://www.mambiente.munimadrid.es>.
- CHAVEZ, I., 2015. Celdas electroquímicas. [en línea]. Disponible en: <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia16/HTML/articulo04.htm>.
- CORTIJO, A.L., 2017. Transporte marítimo y cambio climático. [en línea]. 2017. Disponible en: www.blacktgreen.com.
- DOUGLAS P, G.M., 2010. Chemistry and light. [en línea]. Disponible en: www.chm.bris.ac.uk/webprojects2002/fleming/experimental.htm.
- DUFOUR, J., 2013. Reducción de contaminantes mediante combustibles emulsionados. [en línea]. Disponible en: www.madrimasd.org.
- ES, 2011. *Enmiendas al Código Técnico relativo al control de las emisiones de óxidos de nitrógeno de los motores diesel marinos (Código Técnico sobre los NOx 2008)*. 2011. S.I.: s.n.
- ESCOBAR, C.A., 2011. Caracterización mediante técnicas espectroscópicas in situ de catalizadores de Cu y Co sobre zeolitas utilizados en la eliminación de NOx por reducción catalítica selectiva (SCR). . S.I.:
- FRITZ, S.G., 2000. *Diesel fuel effects on locomotive exhaust emissions*. S.I.: Southwest Research Institute.
- GONCA, G., 2014. Investigation of the effects of steam injection on performance and NO emissions of a diesel engine running with ethanol--diesel blend. *Energy Conversion and Management*, vol. 77, pp. 450-457.
- GREEVES, G. y TULLIS, S., 1993. Contribution of EUI-200 and quiescent combustion system towards US94 emissions. . S.I.:
- HELEN, G., 2015. NOx Emissions of LNG Operated Engines. *Majos Gas Engines Technologies*. Shangai: s.n.,
- M&G, 2014. Transporte Marítimo y Cambio Climático: Efectos observados y emisiones del transporte marítimo internacional. [en línea]. 2014. Disponible en: marygerencia.com/2011/05/07/transporte-maritimo-y-cambio-climatico-efectos-observados-y-emisiones-del-transporte-maritimo-internacional/.
- MAN, 2017. MAN MARINE TECHNOLOGIES. [en línea]. Disponible en: marine.man.eu.
- MATSSON, A. y ANDERSSON, S., 2002. The Effect of Non-Circular Nozzle Holes on Combustion and Emission Formation in a Heavy Duty Diesel Engine. . S.I.:
- NAKAMURA, H., KIHARA, N., ADACHI, M. y ISHIDA, K., 2002. *Development of a Wet-based NDIR and Its Application to On-board Emission Measurement System* [en línea]. 2002. S.I.: SAE International . Disponible en: <http://dx.doi.org/10.4271/2002-01-0612>.

- OTHERS, 1975. *Method for the reduction of the concentration of NO in combustion effluents using ammonia*. 1975. S.I.: Google Patents.
- PAPAGIANNAKIS, R. y HOUNTALAS, D., 2004. Combustion and exhaust emission characteristics of a dual fuel compression ignition engine operated with pilot Diesel fuel and natural gas. *Energy Conversion and Management* [en línea], vol. 45, no. 18-19, pp. 2971-2987. [Consulta: 6 septiembre 2017]. ISSN 01968904. DOI 10.1016/j.enconman.2004.01.013. Disponible en: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0196890404000330>.
- RAHAI, H.R., SHAMLOO, E. y BONIFACIO, J.R., 2011. Investigation of the Effect of a Humid Air System on Diesel NOx and PM Emissions of a Small Diesel Engine. . S.I.:
- SHIPS & PORTS, 2015. 9 Reasons 2015 Was a Green Year in Shipping. [en línea]. Disponible en: <http://shipsandports.com.ng/9-reasons-2015-was-a-green-year-in-shipping/>.
- SU, T.F., CHANG, C.T., REITZ, R.D., FARRELL, P. V, PIERPONT, A.D. y TOW, T.C., 1995. Effects of injection pressure and nozzle geometry on spray SMD and DI emissions. . S.I.:
- UPO, 2016. *Medida de la Contaminacion atmosferica*. S.I.: s.n.
- URIONDO, Z. I, GOMEZ, L. martin y GUTIERREZ, J. moreno, 2012. *Desarrollo de un sistema predictivo de monitorización de emisiones para motores diesel marinos de cuatro tiempos de media velocidad*. S.I.: Univerisity of basque Country.