



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Estudio de las emisiones de buques de la Armada y viabilidad de
la implantación de catalizadores heterogéneos para reducir su
impacto ambiental*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Guillermo Talavera Cejudo

DIRECTORES: Rocío Maceiras Castro

Miguel Ángel Álvarez Feijoo

CURSO ACADÉMICO: 2018-2019

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Estudio de las emisiones de buques de la Armada y viabilidad de
la implantación de catalizadores heterogéneos para reducir su
impacto ambiental*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

UniversidadeVigo

RESUMEN

Las normativas, a las que deben adaptarse los buques en lo que a emisiones de compuestos contaminantes respecta, son cada vez más restrictivas. Esto ha derivado en múltiples líneas de investigación centradas en el estudio y desarrollo de motores más eficientes y sistemas adicionales que reduzcan las emisiones. La recirculación de gases de escape o catalizadores que emplean reducción catalítica selectiva, entre otros, son ejemplos de este tipo de sistemas adicionales de reducción de emisiones. Siendo el conjunto de los catalizadores para reducción de emisiones el más estudiado hoy en día, se han llegado a obtener, en algunos casos, una reducción de prácticamente la totalidad en óxidos de nitrógeno.

El papel de la Armada en este proceso de evolución es claro: la total incorporación de estas tecnologías a sus nuevos buques y la adaptación, en la medida de lo posible, de los ya existentes, dentro de este nuevo entorno marítimo sostenible. El estudio realizado en este trabajo pretende estudiar las diferentes alternativas existentes en esta materia, así como realizar mediciones de gases contaminantes (CO, CO₂, NO_x y SO₂) en diferentes buques de la Armada con el objetivo de seleccionar la tecnología que mejor se adapte. Todo ello, manteniendo las capacidades operativas del buque y, al mismo tiempo, tratando de alcanzar el denominado por la propia institución como *“buque de contaminación cero”*, proceso que ya está avanzado en otros campos como la eliminación del amianto en las instalaciones y la incorporación de fibras orgánicas sintéticas.

PALABRAS CLAVE

Gases de escape, reducción, emisiones contaminantes, buque, catalizador, Convenio Marpol.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar me gustaría agradecer el apoyo prestado por el núcleo de lanchas y los miembros de la dotación del Tabarca, destacando a su comandante el TN Álvarez Brasa por su total disponibilidad e igualmente a don César y don Darío que siempre consiguieron encontrar un hueco para atender los requerimientos de este trabajo.

En segundo lugar a mis dos tutores la Sra. Maceiras Castro y el Sr. Álvarez Feijoo por su comprensión a lo largo de estos meses de trabajo y por darle una oportunidad al estudio realizado durante su propuesta. También al Dr. José Quilez, por la ayuda prestada desde la Universidad de Granada.

En tercer lugar agradecer la predisposición de la dotación del BAM Furor durante su visita a la escuela y en concreto de su jefe de máquinas, el TN Sotomayor Andreu, gracias al cual este trabajo pudo contar con el análisis de la plataforma más moderna de la Armada.

Finalmente y más importante, a la hora de realizar un trabajo y extrapolándolo a estos cinco años de grado, es necesaria una motivación, un objetivo. Ese objetivo te lo dan las personas que día a día se preocupan por tí y velan por tu felicidad por muy lejos que estén. Esa motivación para mí nunca será otra más que personas con nombre y apellidos: Aurora Arnedo y mi familia.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	3
Índice de Tablas.....	5
1 Introducción y Objetivos	7
1.1 Introducción	7
1.2 Objetivos del estudio.....	9
1.3 Organización de la memoria	9
2 Estado del Arte	11
2.1 Normativa vigente.....	11
2.1.1 Convenio Marpol	11
2.1.2 Código Técnico sobre los NO _x	14
2.1.3 Requerimientos del diésel fuel marine (DFM)	16
2.1.4 Normativas europeas	17
2.1.5 Normativas nacionales.....	19
2.2 Técnicas de reducción de gases de escape contaminantes	21
2.2.1 Técnicas de pre-tratamiento.....	22
2.2.2 Técnicas de post-tratamiento	25
2.2.3 Reducción catalítica selectiva (SCR).....	26
3 Desarrollo del TFG.....	31
3.1 Plataformas a evaluar	31
3.1.1 Patrullero P-28 “Tabarca”	31
3.1.2 Lancha de instrucción GM Salas	34
3.1.3 Buque de acción marítima (BAM) P-46 “Furor”	37
3.1.4 Estudio del combustible de las plataformas.....	39
3.2 Aparato de medición empleado.....	42
3.2.1 Testo 340 Professional.....	42
3.2.2 Preparación previa del equipo.....	43
3.3 Proceso de medición	44
3.3.1 Medición en el patrullero P-28 Tabarca	44
3.3.2 Medición en la lancha GM Salas	46
3.3.3 Medición en el BAM P-46 Furor	47
4 Resultados	51
4.1 Patrullero P-28 “Tabarca”	51

4.1.1 Emisiones del motor principal (MP).....	51
4.1.2 Emisiones del motor auxiliar (MA).....	58
4.1.3 Cálculo del cumplimiento de la normativa de emisiones de NO _x	63
4.2 Lancha de instrucción GM Salas	65
4.2.1 Emisiones del motor principal al ralentí	65
4.2.2 Emisiones del motor principal con carga.....	66
4.2.1 Emisiones del motor principal en vacío.....	69
4.2.2 Cálculo del cumplimiento de la normativa de emisiones de NO _x	72
4.3 BAM P-46 “ <i>Furor</i> ”	74
4.3.1 Emisiones del motor principal de babor al ralentí	74
4.3.2 Emisiones del motor principal de babor	76
4.3.3 Emisiones del motor principal de estribor	78
4.3.4 Cálculo del cumplimiento de la normativa de emisiones de NO _x	80
4.4 Empleo de catalizadores como mecanismo reductor de emisiones	82
4.4.1 Catalizador NO _x Reducer (NOR)	82
4.4.2 Presupuesto del proyecto	83
5 Conclusiones y Líneas Futuras	87
5.1 Conclusiones obtenidas.....	87
5.2 Líneas futuras de investigación.....	89
5.2.1 Solución al problema del arranque en frío.....	89
5.2.2 Solución al problema de la emisión de hollín.....	90
6 Bibliografía.....	91
7 Anexo I: Características Generales del Equipo de Medición	95
8 Anexo II: Medición en la Lancha GM Chereguini.....	97

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Emisiones de gases por sectores 2017 (a) y según el tipo de gas (b)	8
Figura 1-2 Emisiones en el ámbito del transporte [3]	8
Figura 2-1 Sistema EGR externo [25]	22
Figura 2-2 Análisis dinámico de fluidos computacional (CFD) en un sistema con y sin DWI [26]23	
Figura 2-3 Proceso de emulsión de agua en la combustión [28]	24
Figura 2-4 Efecto de la tecnología HAM en motores de combustión [30]	24
Figura 2-5 Lavador de gases [32]	25
Figura 2-6 Adsorción [33]	26
Figura 2-7 Catalizador SCR [35]	27
Figura 2-8 Procedimiento Topsoe para la eliminación de NOx empleando NH3 [31]	28
Figura 2-9 Catalizador de tres vías convencional [38]	29
Figura 3-1 Patrullero P-28 Tabarca	31
Figura 3-2 Esquema de la cámara de máquinas de la plataforma	32
Figura 3-3 Elementos de la chimenea del P-28 Tabarca	33
Figura 3-4 Proceso de arranque y parada del motor auxiliar durante una salida a la mar	34
Figura 3-5 Lanchas de instrucción en puerto	34
Figura 3-6 Cámara de máquinas de las lanchas de instrucción	35
Figura 3-7 Punto de medición de la lancha de instrucción	36
Figura 3-8 Motor marino Caterpillar C 18 [47]	36
Figura 3-9 BAM P-46 Furor	37
Figura 3-10 Cámara de máquinas BAM Furor	38
Figura 3-11 Punto de medición BAM (motor de babor)	39
Figura 3-12 Testo 340	42
Figura 3-13 Recorrido realizado durante la toma de mediciones en el patrullero Tabarca	45
Figura 3-14 Toma de mediciones en la chimenea del P-28 Tabarca	45
Figura 3-15 Toma de medidas en la GM Salas	46
Figura 3-16 Recorrido realizado durante la toma de mediciones en la lancha GM Salas	47
Figura 3-17 Proceso de medición en el BAM en motor de babor (a) y motor de estribor (b)	48
Figura 3-18 Recorrido realizado durante la toma de mediciones en el BAM Furor	49
Figura 4-1 Emisiones del MP del Tabarca durante arranque y desatracada	52
Figura 4-2 Emisiones del MP del Tabarca a velocidades constantes	55
Figura 4-3 Emisiones del MP del Tabarca a revoluciones constantes	58
Figura 4-4 Emisiones del MA del Tabarca a velocidades constantes	60

Figura 4-5 Emisiones del MA del Tabarca a revoluciones constantes.....	63
Figura 4-6 Emisiones del motor principal de la GM Salas al ralentí	66
Figura 4-7 Emisiones del motor principal de la GM Salas	69
Figura 4-8 Emisiones del motor principal en vacío de la GM Salas	72
Figura 4-9 Emisiones del motor principal de babor del BAM al ralentí	75
Figura 4-10 Emisiones del motor principal de babor del BAM P-46 Furor.....	78
Figura 4-11 Emisiones del motor principal de estribor del BAM P-46 Furor.....	80
Figura 4-12 Integración del sistema NOR en un motor [49].....	83
Figura 5-1 PrO_x 3DOM (a), PrO_x (b), CeO_2 3DOM (c), CeO_2 (d) [51]	90
Figura 8-1 Emisiones del motor principal de la GM Chereguini	98

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Niveles de control de emisiones de NOx [5]	13
Tabla 2-2 Niveles de azufre máximos estándar y en ZCE [5].....	14
Tabla 2-3 Ciclos de ensayo para motores principales y auxiliares a régimen constante [13]	15
Tabla 2-4 Limitaciones en las características del combustible [15].....	17
Tabla 2-5 Limitaciones en la emisión de SO2 en la Unión Europea.....	19
Tabla 2-6 Compromisos de reducción de emisiones comparado con el año 2005 [21]	20
Tabla 2-7 Especificaciones del gasóleo B [22]	21
Tabla 2-8 Resumen de los procesos catalíticos	29
Tabla 3-1 Especificaciones gasóleo mar e+ [45].....	40
Tabla 3-2 Resultado de análisis gasóleo B.....	41
Tabla 3-3 Resultado análisis DFM.....	42
Tabla 3-4 Resumen de los ajustes previos a la medición	43
Tabla 4-1 Emisiones MP Tabarca a ralentí	51
Tabla 4-2 Emisiones MP Tabarca atrás mínima.....	52
Tabla 4-3 Emisiones MP Tabarca en avante 2,5 nudos.....	53
Tabla 4-4 Emisiones MP Tabarca en avante 4 nudos.....	53
Tabla 4-5 Emisiones MP Tabarca en avante 6 nudos.....	53
Tabla 4-6 Emisiones MP Tabarca en avante 8 nudos.....	54
Tabla 4-7 Emisiones MP Tabarca en avante 10 nudos.....	54
Tabla 4-8 Correcciones por temperatura y humedad MP (I).....	55
Tabla 4-9 Emisiones MP Tabarca a 800 rpm	55
Tabla 4-10 Emisiones MP Tabarca a 900 rpm	56
Tabla 4-11 Emisiones MP Tabarca a 1000 rpm	56
Tabla 4-12 Emisiones MP Tabarca a 1100 rpm	56
Tabla 4-13 Emisiones MP Tabarca a 1200 rpm	57
Tabla 4-14 Correcciones por temperatura y humedad MP (II)	57
Tabla 4-15 Emisiones MA Tabarca con MP en avante 2,5 nudos	58
Tabla 4-16 Emisiones MA Tabarca con MP en avante 4 nudos	59
Tabla 4-17 Emisiones MA Tabarca con MP en avante 6 nudos	59
Tabla 4-18 Emisiones MA Tabarca con MP en avante 8 nudos	59
Tabla 4-19 Emisiones MA Tabarca con MP en avante 10 nudos	60
Tabla 4-20 Correcciones por temperatura y humedad MA (I).....	60
Tabla 4-21 Emisiones MA Tabarca con MP en avante 800 rpm	61

Tabla 4-22 Emisiones MA Tabarca con MP en avante 900 rpm	61
Tabla 4-23 Emisiones MA Tabarca con MP en avante 1000 rpm	61
Tabla 4-24 Emisiones MA Tabarca con MP en avante 1100 rpm	62
Tabla 4-25 Emisiones MA Tabarca con MP en avante 1200 rpm	62
Tabla 4-26 Correcciones por temperatura y humedad MA (II).....	62
Tabla 4-27 Medición del motor principal de la GM Salas al ralentí	65
Tabla 4-28 Emisiones del motor principal de la GM Salas a 600 rpm	66
Tabla 4-29 Emisiones del motor principal de la GM Salas a 800 rpm	67
Tabla 4-30 Emisiones del motor principal de la GM Salas a 1000 rpm	67
Tabla 4-31 Emisiones del motor principal de la GM Salas a 1200 rpm	67
Tabla 4-32 Emisiones del motor principal de la GM Salas a 1400 rpm	68
Tabla 4-33 Emisiones del motor principal de la GM Salas a 1600 rpm	68
Tabla 4-34 Emisiones del motor principal en vacío de la GM Salas a 600 rpm	69
Tabla 4-35 Emisiones del motor principal en vacío de la GM Salas a 800 rpm	70
Tabla 4-36 Emisiones del motor principal en vacío de la GM Salas a 1000 rpm	70
Tabla 4-37 Emisiones del motor principal en vacío de la GM Salas a 1200 rpm	70
Tabla 4-38 Emisiones del motor principal en vacío de la GM Salas a 1400 rpm	71
Tabla 4-39 Emisiones del motor principal en vacío de la GM Salas a 1600 rpm	71
Tabla 4-40 Valores nominales de emisiones del motor Caterpillar C 18 [49]	72
Tabla 4-41 Medición motor principal de babor del BAM al ralentí.....	75
Tabla 4-42 Emisiones motor principal de babor del BAM, en avante palanca 2	76
Tabla 4-43 Emisiones motor principal de babor del BAM, en avante palanca 4	76
Tabla 4-44 Emisiones motor principal de babor del BAM, en avante palanca 6	77
Tabla 4-45 Emisiones motor principal de babor del BAM, en avante palanca 7	77
Tabla 4-46 Emisiones motor principal de estribor del BAM, en avante palanca 2	78
Tabla 4-47 Emisiones motor principal de estribor del BAM, en avante palanca 4	79
Tabla 4-48 Emisiones motor principal de estribor del BAM, en avante palanca 6	79
Tabla 4-49 Emisiones motor principal de estribor del BAM, en avante palanca 7	79
Tabla 4-50 Cuadro de precios descompuestos	84
Tabla 4-51 Presupuesto de montaje.....	84
Tabla 4-52 Presupuesto total de obras.....	85
Tabla 7-1 Rangos de medición y exactitudes (I)	95
Tabla 7-2 Rangos de medición y exactitudes (II).....	96
Tabla 7-3 Otros datos técnicos del instrumento	96
Tabla 8-1 Mediciones en el motor principal de la GM Chereguini.....	97

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

La inquietud por el medio ambiente, que de forma creciente está en la agenda del día de todos los países y empresas, es evidenciada por asociaciones internacionales como la ONU, que buscan objetivos cada vez más estrictos en cuanto a emisiones y vertidos contaminantes. El Protocolo de Kioto es uno de los proyectos de mejora enfocados en esa dirección que obliga a dichos países y, por tanto, a sus empresas a implantar políticas e iniciativas anticontaminantes cada vez más restrictivas lo que implica un gran esfuerzo económico y de personal entre otros. Como valor añadido, la reducción de las emisiones y, por consiguiente, mejora del concepto de desarrollo sostenible provoca un impacto muy positivo en la sociedad, lo cual es de alto interés para ambos.

En 1997 se firmó el citado Protocolo de Kioto, en el que España se comprometió, junto con otros países, a cumplir una serie de objetivos para el desarrollo sostenible, en concreto a la reducción de las emisiones de gases de origen antropogénico que provocasen el efecto invernadero. Todos los países de la Unión Europea se comprometieron a reducir estas emisiones en un 8 % con respecto al año base acordado (1990/1995), empleando un sistema desarrollado en el artículo 4 de dicho protocolo en el que a cada país se le asignó un peso conforme a una serie de parámetros de referencia en función del nivel de emisiones, teniendo que alcanzar dicho objetivo dentro del período de 2008-2012.

En el año 2006 se comenzó a pensar en la necesidad de una continuación del protocolo con posterioridad a 2012, año en el que finalizaba el período en el cual la reducción de emisiones debería de cumplirse. De esta manera en la Cumbre de Doha en ese mismo año, se prolongó el Protocolo de Kioto en base a una serie de enmiendas que entrarían en vigor el 1 de enero de 2013 [1].

En España, la concienciación y, por tanto, las medidas tomadas para la protección del medio ambiente, tiene una especial influencia en el ámbito del transporte. Según el informe del avance de emisiones de gases de efecto invernadero correspondiente al año 2017 de la Secretaría de Estado de Medioambiente (realizado en julio de 2018), el transporte es el sector con mayores emisiones con un 27 % del total de las mismas [2].

Con respecto al tipo de gases, se puede observar en la Figura 1-1, con datos pertenecientes a dicho informe, una clara predominancia del dióxido de carbono (CO_2) proveniente principalmente del sector industrial y de transporte seguido del metano (CH_4) siendo generado en mayor medida en este caso por el sector de la agricultura y ganadería.

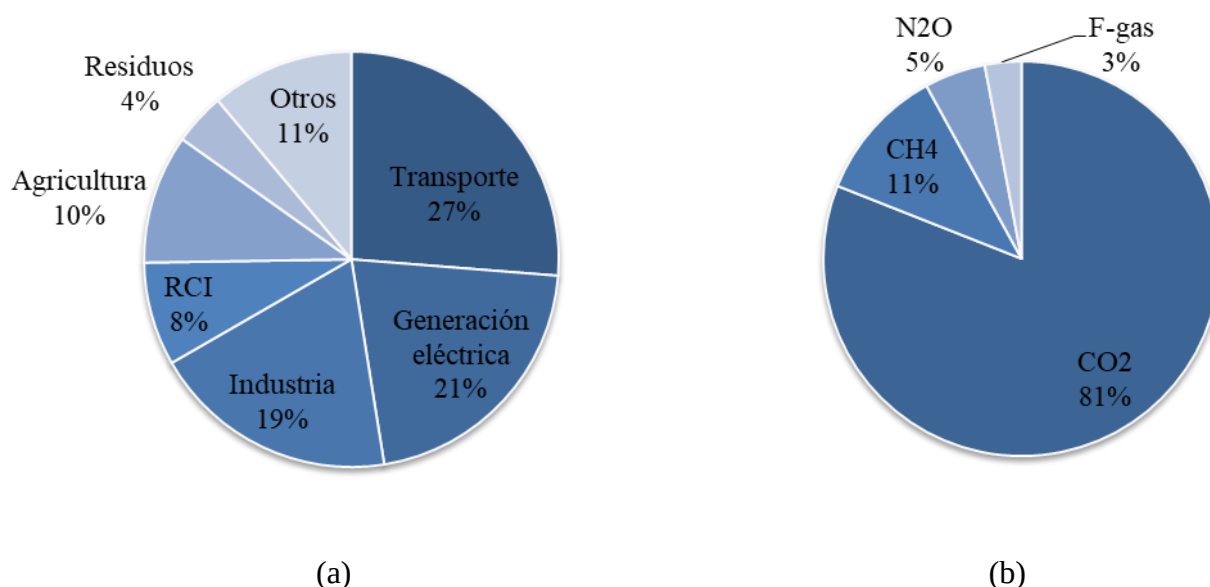


Figura 1-1 Emisiones de gases por sectores 2017 (a) y según el tipo de gas (b)

En global, este informe asegura que se ha producido un aumento del 4,4 % del total de emisiones con respecto al año anterior lo que equivale a 338,8 toneladas de CO₂, de lo cual se puede intuir que las medidas llevadas a cabo puede que no sean suficientes y haya que realizar un esfuerzo mayor para cumplir con los acuerdos con los que España se ha comprometido.

Dentro del ámbito de los transportes se vuelve a producir una división en las emisiones de gases contaminantes. Como se puede apreciar en Figura 1-2, en un estudio realizado por la Agencia Internacional de Energía, la mayor fuente de emisiones es la producida en las carreteras, ya sea procedente de vehículos particulares, camiones, autobuses o transporte urbano con un 73,2 % [3].

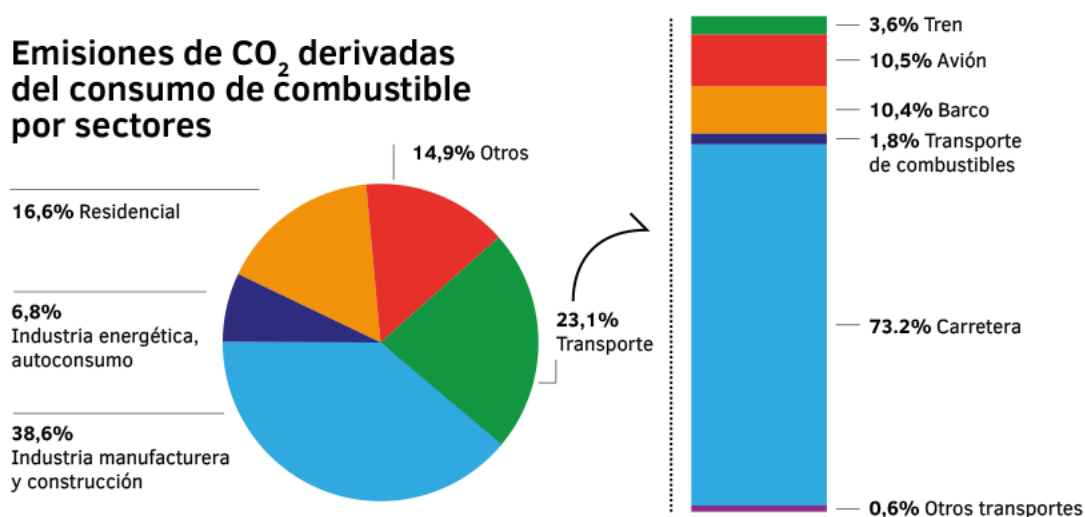


Figura 1-2 Emisiones en el ámbito del transporte [3]

La influencia del transporte marítimo en las emisiones de gases contaminantes comparte un segundo lugar con las emisiones producidas por las aeronaves dentro de nuestro país dentro del ámbito del transporte. Para este trabajo es de especial relevancia el dato del 10,4 % del total de las emisiones de transporte (23%) que suponen las emisiones de barcos, ya que muestra un campo en el que se podrían hacer avances en la mejora de los sistemas de reducción de emisiones en buques.

Dentro del ámbito marino, el Convenio Marpol es uno de los principales acuerdos internacionales que establece las regulaciones medioambientales que debe llevar a cabo cada buque. En concreto, es el

artículo VI el que regula los límites de las emisiones de gases contaminantes en función del tipo de motor y de su año de fabricación. Este artículo estipula los límites de las emisiones de cada gas contaminante destacando los óxidos de nitrógeno, los óxidos de azufre, y los clorofluorocarbonos (CFC) entre otros.

El compendio de todos estos datos hace que la Armada, estando comprometida con el medioambiente, se preocupe por la mejora continua y la investigación y desarrollo de sistemas que respeten nuestro entorno. Cabe destacar que el apartado 3 del ámbito de aplicación del Convenio Marpol afirma que los buques de guerra así como las unidades auxiliares, al estar al servicio del Estado están exentos de su cumplimiento [4]. Pese a todo la Armada persevera en su labor de respeto del medioambiente y desarrollo sostenible en tiempo de paz y es por ello que siempre satisfará en la medida de lo posible el convenio internacional a no ser que el propio desarrollo de la misión haga imposible su cumplimiento.

Este trabajo tratará esta necesidad de la Armada de adaptar su flota actual y los futuros buques que se construyan a que sean respetuosos con el medioambiente y se ajusten a las exigencias crecientes a nivel internacional, las cuales se mencionaban al principio de este apartado.

1.2 Objetivos del estudio

El conjunto de objetivos que delimitarán el alcance del trabajo realizado, son los que se detallan a continuación:

- Analizar el Convenio Marpol y otras normativas nacionales e internacionales para conocer cuáles son los límites de emisiones contaminantes a los que la Armada debe ajustarse.
- Medir las emisiones realizadas en diversos buques de la Armada y comprobar si cumplen con los requisitos establecidos en las normativas.
- Investigar sobre los diferentes métodos y técnicas actuales para reducción de emisiones en buques.
- Realizar un estudio y propuesta del catalizador heterogéneo más adecuado para ajustar las emisiones de los buques de la Armada a las exigencias del Convenio Marpol y el resto de normativas.

1.3 Organización de la memoria

La memoria será estructurada siguiendo un orden lógico, desarrollando todos los objetivos citados anteriormente.

En primer lugar se realizará una Introducción en la que se marcarán todos los objetivos a cumplir así como una puesta en contexto de la situación que se quiere abordar comenzando por lo general (convenios y acuerdos internacionales) y acabando por lo particular (intereses de la Armada).

El segundo punto será el Estado del Arte. En él se expondrán las diferentes normativas que regulan las emisiones de buques en la actualidad, además de trabajos, tesis o investigaciones realizadas hasta el momento en el campo en el que nos encontramos. En concreto se mostrarán trabajos con catalizadores heterogéneos a la vez que otras posibles soluciones para reducir las emisiones contaminantes.

En el siguiente punto se recoge el Desarrollo del TFG, en el que se realizará un estudio de las plataformas a estudiar: el Patrullero P-28 Tabarca, las lanchas de instrucción (AI's) y el buque de acción marítima Furor, seguido de la exposición de los datos obtenidos durante las mediciones de gases contaminantes realizadas en diferentes puntos y/o situaciones para cada buque. Asimismo, se mostrará un análisis del combustible que emplean, ayudando así a explicar la aparición de gases contaminantes.

En cuarto lugar se presentarán los Resultados, viendo si se ajustan o no a las exigencias del Convenio Marpol. Se interpretarán los resultados obtenidos acorde con la normativa nacional e internacional y se estudiará el empleo de la catálisis heterogénea como solución al problema. Para ello, se presentará un presupuesto de la implantación de un catalizador comercial en una fragata tipo F-100, con el objetivo de comprender la magnitud de la instalación.

En el último apartado se mostrarán las Conclusiones a las que se ha llegado con el estudio, definiendo así la viabilidad del empleo de catalizadores heterogéneos para la reducción de las emisiones en los buques de la Armada. Además, se presentarán las últimas investigaciones en materia de reducción catalítica y su posible incorporación para uso en buques.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Normativa vigente

Siendo consciente la comunidad internacional de que era necesario reaccionar ante el crecimiento en lo que a emisiones perjudiciales para el medio ambiente se refiere, se decidió plasmar esa preocupación en un conjunto de normativas para controlar dichas emisiones de forma global. En este apartado se comentará, en primer lugar, la normativa para el control de la contaminación más importante, el Convenio Marpol, para posteriormente analizar el código técnico del NO_x, el cual trata de los procedimientos necesarios para realizar las mediciones.

Finalmente, se estudiarán las normativas que siguen los combustibles de los buques, las normativas europeas y las nacionales en lo que a emisiones respecta. Todas y cada una de ellas, son normativas que debe cumplir todo buque mercante en la mar y por tanto también la Armada siempre que la situación lo permita.

2.1.1 Convenio Marpol

La creciente preocupación de la comunidad internacional por la contaminación marina generada en su mayor parte por los buques, se materializó en el año 1973 con el acuerdo de crear un convenio para prevenirla, el Convenio Marpol [5].

2.1.1.1 Preámbulos

El Convenio Marpol fue modificado por el protocolo de Londres de 1978 y firmado por España en mayo de 1979 [4]. A dicho Convenio, le han sido añadidos anexos, que hacen referencia a los diversos campos en lo que a la polución marina respecta. Dentro de estos campos podemos destacar la contaminación marina generada por hidrocarburos, la producida por sustancias nocivas líquidas transportadas a granel, la originada por aguas sucias o la ocasionada por las emisiones de gases contaminantes. Cada uno de estos ámbitos hace referencia a cuatro de los seis anexos en vigor actualmente.

El contorno de referencia de este trabajo es el de las emisiones de gases contaminantes, a las cuales se hace referencia en el anexo VI del presente convenio. El anexo fue aprobado en 1997 y establece todas las limitaciones que deben cumplir los buques con respecto a emisiones de gases contaminantes [5]. En las próximas líneas se hará referencia a las distintas reglas a las que debe ajustarse todo buque en la mar en este aspecto.

2.1.1.2 *Ámbito de aplicación*

En primer lugar el conjunto de normas y limitaciones que a continuación se reseñan son de obligado cumplimiento para todo tipo de buques con las limitaciones de tonelaje, potencia del motor y año de construcción del mismo, indicado en cada sección.

No obstante, el convenio afirma que las reglas no serán aplicables a buques cuyas emisiones sean fruto de una avería o siempre que las mismas hayan sido generadas para garantizar íntegramente la seguridad del buque en caso de emergencia en la mar [5].

Asimismo, ningún buque de la Armada, al ser un buque de estado, tiene obligado el cumplimiento de dichas reglas.

Estas reglas, recogidas en el anexo del Convenio Marpol, se encuentran clasificadas según el tipo de compuesto a emitir.

2.1.1.3 *Sustancias que agotan la capa de ozono*

En la actualidad, el Protocolo de Montreal (1987) es el acuerdo internacional aún vigente para reducir y descartar el uso de sustancias que deterioran la capa de ozono en los diferentes sectores de la sociedad [6].

En Europa en concreto, su uso se encuentra regulado por el Reglamento (CE) nº 1005/2009, según el cual se definen 6 principales elementos perjudiciales para la capa de ozono: clorofluorocarbonos (CFC's), hidroclorofluorocarbonos, halones, tetracloruro de carbono, hidrobromofluorocarbonos y bromuro de metilo [7]. De todos ellos, los más preocupantes en el ámbito de las actividades marítimas son los CFC's y los halones ya que suelen ser sustancias empleadas en espumas (CFC's) y sistemas de extinción de incendios (halones) ya que no dañan los equipos y no son tóxicos.

La vigente regla del Convenio Marpol prohíbe toda emisión deliberada de este tipo de sustancias, incluyéndose las producidas durante labores de mantenimiento. Al mismo tiempo, imposibilita su emanación, a excepción de los hidrofluorocarbonos, para plataformas construidas a partir del 19 de mayo de 2005. En buques fabricados a partir del 1 de enero de 2020 se restringen por completo todas ellas incluyendo los hidroclorofluorocarbonos [5].

2.1.1.4 *Óxidos de nitrógeno*

Los óxidos de nitrógeno, principalmente el monóxido de nitrógeno (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO₂), son sustancias gaseosas bien conocidas que generan un gran problema toxicológico, afectando especialmente a la capacidad pulmonar. Por otra parte, compuestos como el NO₂ reaccionan con el vapor de agua presente en la atmósfera dando como resultado la formación de ácido nítrico (HNO₃), precursor de la lluvia ácida. El NO por su parte, al ser expulsado como gas de escape reacciona con el ozono de la atmósfera para dar como resultado NO₂, que al mismo tiempo genera efectos negativos sobre el clima [8].

En lo que respecta a su regulación por el presente convenio, cabe destacar que los buques que únicamente vayan a realizar trayectos por aguas de jurisdicción nacional, no están obligados a cumplir esta regulación. Esto interesa a la Armada en el rango de la fuerza de acción marítima, constituida esencialmente por patrulleros con navegaciones de vigilancia costera por territorio nacional [5].

El acuerdo realiza una división en tres niveles, conocidos como "*Tier*", en función del año de construcción del buque y dentro de cada nivel se establece un límite de emisiones según las revoluciones del motor. Dicha división se muestra a continuación:

Nivel 1	Para buques contruidos hasta el 1 de enero de 2011
17 g/kWh	Si n es inferior a 130 rpm
$45 \cdot n^{-0,2}$ g/kWh	si n se encuentra entre 130 y 2000 rpm
9,8 g/kWh	si n es mayor o igual de 2000 rpm
Nivel 2	Para buques contruidos a partir del 1 de enero de 2011
14,4 g/kWh	Si n es inferior a 130 rpm
$44 \cdot n^{-0,23}$ g/kWh	si n se encuentra entre 130 y 2000 rpm
7,7 g/kWh	si n es mayor o igual de 2000 rpm
Nivel 3	Para buques contruidos a partir del 1 de enero de 2016
3,4 g/kWh	Si n es inferior a 130 rpm
$9 \cdot n^{-0,2}$ g/kWh	si n se encuentra entre 130 y 2000 rpm
2,0 g/kWh	si n es mayor o igual de 2000 rpm

Tabla 2-1 Niveles de control de emisiones de NOx [5]

Donde n representa el régimen nominal del motor, es decir, las revoluciones por minuto del cigüeñal. Las plataformas con las que se ha trabajado poseen un motor que en todo momento trabaja entre 130 y 2000 rpm. Por tanto, esa será la franja de valores empleada para su cálculo.

Un aspecto importante, es que el citado nivel 3, en último lugar, sólo es aplicable para buques contruidos a partir del año indicado y que naveguen en el interior de las denominadas zonas de control de emisiones (ZCE), las cuales serán descritas en el siguiente punto.

2.1.1.5 Óxidos de azufre

La emisión de este tipo de contaminante, además de ser altamente perjudicial para la salud humana, reacciona de la misma manera que los óxidos de nitrógeno con el ozono atmosférico, dando lugar a la lluvia ácida. Del mismo modo, parte de dichos óxidos regresan a la superficie terrestre en un proceso denominado deposición seca, que daña la vegetación de la zona, alterando su crecimiento y acelerando su debilitamiento [9].

Las limitaciones establecidas para los combustibles diésel marinos según el presente convenio en función del año de construcción del buque se recogen en la Tabla 2-2.

En este apartado se muestran las denominadas zonas de control de emisiones (ZCE), que se definen como regiones del planeta en las cuales es preciso un mayor control de las emisiones de óxidos de nitrógeno y óxidos de azufre debido a los efectos de la lluvia ácida y por consiguiente, tendrán limitaciones más estrictas de lo usual. Si bien las limitaciones de los óxidos de nitrógeno dependen de cada zona, la cantidad de azufre en el combustible viene claramente definida como se muestra en la parte inferior de la Tabla 2-2.

Nivel de azufre	Valores de referencia
4,5% en masa	Antes del 1 de enero de 2012
3,5% en masa	Del 1 de enero de 2012 en adelante
0,5% en masa	Del 1 de enero de 2020 en adelante
Nivel de azufre en ZCE	Valores de referencia
1,5% en masa	Antes del 1 de julio de 2010
1,0% en masa	Del 1 de julio de 2010 en adelante
0,1% en masa	Del 1 de enero de 2015 en adelante

Tabla 2-2 Niveles de azufre máximos estándar y en ZCE [5]

Estas superficies marítimas se encuentran en la zona del mar Báltico y del mar del Norte pero también son susceptibles de ser nombradas zonas de control de emisiones cualquier porción marítima, incluyendo las portuarias, aprobada por la OMI [10].

2.1.1.6 Compuestos orgánicos volátiles (COV)

Según el Ministerio para la Transición Ecológica (Gobierno de España), los COV son hidrocarburos que se encuentran en estado gaseoso a temperatura ambiente. Con respecto a su origen se pueden clasificar de la siguiente manera [11]:

- Compuestos peligrosos para la salud como el benceno
- Compuestos clase A, que pueden causar un gran deterioro del medio ambiente como por ejemplo el acetaldehído.
- Compuestos clase B, los cuales no tienen un impacto tan grave en el medio ambiente como la acetona.

En este aspecto, el Convenio Marpol muestra las directrices de control de estos compuestos. En primer lugar, en lo que respecta a los buques tanque, deberán tener sistemas de control y recogida de vapores; y deberán cumplir la normativa portuaria (que a su vez deberá ajustarse a lo dispuesto en el Convenio Marpol).

Los buques que transporten petróleo crudo deberán tener un plan de gestión de los COV determinado para cada buque en el que se establece una serie de términos que debe cumplir como elaborar procedimientos que reduzcan las emisiones de COV durante la carga, navegación y descarga. La misma regla es aplicable a los gaseros si existe riesgo de emisión.

2.1.2 Código Técnico sobre los NO_x

El denominado Código Técnico sobre los NO_x, adoptado en el año 2008 y aprobado por España el 10 de octubre de ese mismo año [12], es un reglamento íntimamente relacionado con el anexo VI del Convenio Marpol analizado previamente. Su principal finalidad es mostrar detalladamente todos los procedimientos y métodos de medición de emisiones en los buques de forma práctica e intuitiva, para asegurar que un motor está en disposición de cumplir con los límites establecidos en la regla 13 del Convenio Marpol, relativa a las emisiones de óxidos de nitrógeno. Como resultado de las respectivas pruebas y comprobaciones realizadas al motor en este aspecto, el buque en cuestión obtendrá un certificado oficial [13].

2.1.2.1 Métodos de medición

El presente Código establece tres métodos para el cálculo de las emisiones de óxidos de nitrógeno:

- Método de verificación de los parámetros del motor, para comprobar que las especificaciones coinciden con las que se muestran en el expediente técnico del mismo.
- Método simplificado de medición.

- Método directo de medición.

Para que el motor obtenga la certificación correspondiente es imprescindible que emplee uno de los tres métodos presentados, pudiendo elegir libremente siempre y cuando cuente con la conformidad de la entidad que emite el certificado.

De los tres métodos posibles, el empleado para este trabajo ha sido el método simplificado, debido a la falta de medios para analizar el motor en profundidad. De esta manera y como se presenta en el código, se deben realizar mediciones de las concentraciones de las emanaciones gaseosas de NO_x, así como de CO₂, O₂, y CO (en el caso propio de este trabajo se evaluará la concentración de SO₂ del mismo modo, para analizar el global de las emisiones). Es indispensable aplicar las correcciones por temperatura y humedad a los valores obtenidos de óxidos de nitrógeno que serán mostradas más adelante.

2.1.2.2 Ciclos de medición

En lo que a procedimientos se refiere, el código establece un conjunto de ciclos de ensayo, según si el motor es principal o auxiliar, tipo de carga y dependiendo igualmente de si dicho motor es de régimen constante o se adapta a la demanda de la hélice. Cabe destacar que los motores objeto de este estudio son únicamente de régimen constante y por ello, para los cálculos realizados, se emplearán los grupos de ensayo mostrados a continuación:

Propulsión principal de régimen constante						
Tipo de ciclo de ensayo E2	Régimen	100%	100%	100%	100%	-
	Potencia	100%	75%	50%	25%	-
	Factor de ponderación	0,2	0,5	0,15	0,15	-
Motores auxiliares de régimen constante						
Tipo de ciclo de ensayo D2	Régimen	100%	100%	100%	100%	100%
	Potencia	100%	75%	50%	25%	10%
	Factor de ponderación	0,05	0,25	0,3	0,3	0,1

Tabla 2-3 Ciclos de ensayo para motores principales y auxiliares a régimen constante [13]

Como se puede observar en la Tabla 2-3, existen una serie de ponderaciones en función de la potencia obtenida por el motor, para que la medida final de las emisiones sea lo más parecida posible a la realidad al no estar un buque demandando la misma potencia en todo momento. La letra y número que representan a cada tipo de ciclo de ensayo, no es más que una referencia para su distinción, al ser los mostrados únicamente dos de ellos.

2.1.2.3 Condiciones de ensayo y método de cálculo

En primer lugar, las condiciones de referencia que el Código afirma que se deben de tener son 273 K (0° C) y 101,3 kPa. En base a ellas se aplicará la corrección por temperatura y humedad, que consiste en un factor por el cual se multiplicarán las emisiones obtenidas de concentración y caudal de NO_x y se obtendrá empleando la siguiente fórmula, para motores de encendido por compresión:

$$\frac{1}{1 - 0,0182 \cdot (H_a - 10,71) + 0,0045 \cdot (T_a - 298)} \quad \text{Ecuación 2-1}$$

Siendo H_a la humedad específica del aire (g agua/kg aire seco) en el momento de la medición y T_a la temperatura de entrada de aire en el motor (K). Para el cálculo del caudal másico de emisión de NO_x se empleará la siguiente fórmula:

$$q_{mgas} = u_{gas} \cdot c_{gas} \cdot q_{mem} \cdot k_{hd} \quad \text{Ecuación 2-2}$$

Siendo q_{mgas} el caudal de NO_x en g/h, u_{gas} (adimensional) la relación de densidad entre el componente a medir y los gases de escape, c_{gas} la concentración de NO_x en los gases de escape medida en ppm, q_{mem} el caudal total de gases en kg/h y k_{hd} la corrección por humedad y temperatura (adimensional). Destacar que la u_{gas} del NO_x es de 0,001586 (adimensional), en base a la Tabla 5 del apartado 5.12.5 del presente Código.

2.1.3 Requerimientos del diésel fuel marine (DFM)

Esta normativa internacional (ISO-8217-2017), existente desde 1987, tiene como principal propósito definir los requerimientos que deben cumplir todos los combustibles para que puedan ser empleados en motores diésel marinos o calderas necesitando de un tratamiento previo adecuado [14].

Las especificaciones que los combustibles deben alcanzar, son revisadas de forma periódica para adaptarse a la transformaciones de la tecnología diésel marina, el proceso de refinado del petróleo y la las nuevas políticas de protección medioambiental. De todas ellas, las más importantes para asegurar el correcto funcionamiento del motor son las siguientes:

- Límite máximo de densidad: Importante para el proceso de filtrado y asegurar una calidad de combustión satisfactoria.
- Cantidad máxima de aluminio y silicio: Estas partículas generan un daño abrasivo en el motor por lo que es necesario su control dentro del propio sistema de propulsión mediante un mecanismo de limpieza adecuado.
- Límite máximo de envejecimiento del sedimento: Puede causar problemas de purificación del combustible y obstrucción del filtro.

La propia norma en sí, establece de forma detallada todos los límites para el combustible destilado como se puede apreciar en la Tabla 2-4.

Características	Unidad	Límite	DMX	DMA	DFA	DMZ	DFZ	DMB	DFB
Viscosidad cinemática a 40 °C	mm ² /s	Máx	5,5	6,0		6,0		11,0	
		Mín	1,4	2,0		3,0		2,0	
Densidad a 15 °C	kg/m ³	Mín	-	890,0		890,0		900,0	
Índice de cetano	-	Mín	45,0	40,0		40,0		35,0	
Contenido de azufre	% masa	Máx	1,0	1,0		1,0		1,5	
Punto de inflamación	°C	Mín	43,0	60,0		60,0		60,0	
Sulfuro de hidrógeno	mg/kg	Máx	2,0	2,0		2,0		2,0	
Número ácido	mg KOH/g	Máx	0,5	0,5		0,5		0,5	
Sedimentación total por filtración en caliente	% masa	Máx	-	-		-		-	
Estabilidad a la oxidación	g/m ³	Máx	25,0	25,0		25,0		25,0	
Ácido graso de metil éster									
Residuo carbonoso (10% final de destilación)	% masa	Máx	0,3	0,3		0,3		-	
Punto de obstrucción del filtro frío	Invierno	°C	Máx	-	informar	informar		-	
	Verano	°C	Máx	-	-	-		-	
Punto de enturbiamiento	Invierno	°C	Máx	-16,0	informar	informar		-	
	Verano	°C	Máx	-16,0	-	-		-	
Aspecto			Claro y brillante						
Contaminación por agua	% volumen	Máx	-	-		-		0,3	
Contenido en cenizas	% masa	Máx	0,01	0,01		0,01		0,01	
Lubricidad	µm	Máx	520,0	520,0		520,0		520,0	

Tabla 2-4 Limitaciones en las características del combustible [15]

Del mismo modo, existen unos límites para los combustibles marinos residuales, los cuales no son objeto de estudio, debido a su empleo en buques mercantes de gran entidad. Resaltar que las diferentes categorías anteriormente reseñadas hacen referencia a la división americana, de donde la “D” significa *diesel*, la “M” *marine* y ambas letras se disponen acompañadas de una tercera, que indicará la categoría pudiendo ser: X, A, B, Z o B. La Tabla 2-4 por tanto hace referencia a los distintos tipos de combustible marino, de más ligero (DMX) a más pesado (DMB), siendo el DMX un combustible altamente destilado, sin trazas de azufre de ningún tipo mientras que el DMB es un combustible más pesado y por consiguiente con un cierto porcentaje de azufre.

En cuanto al empleo, cada tipo de diésel será utilizado en un motor u otro en función de la cilindrada del mismo, de este modo el DMX es empleado en motores auxiliares únicamente y el DMB por otro lado, es para motores cuyos cilindros tengan una capacidad de entre cinco y treinta litros [16].

2.1.4 Normativas europeas

El marco europeo reconoce el Convenio Marpol previamente descrito con todas las limitaciones en cuanto a emisiones expuestas en su anexo VI. Sin embargo, la propia Unión Europea en aras de proteger de la polución sus aguas territoriales establece una serie de reglamentos más restrictivos con ese cometido, manteniendo el Convenio Marpol siempre como base.

2.1.4.1 Estrategia de la Unión Europea para reducir las emisiones atmosféricas de los buques de navegación marítima

El presente comunicado, elaborado en el año 2002, tiene como objetivo principal establecer, de una forma clara, el grado de degradación del medioambiente generado por el tráfico marítimo y crear, en base a ellos, una serie de medidas y recomendaciones que prosigan la mejora continua en este ámbito, que por parte de la Unión Europea se ha llevado a cabo en los últimos años. Por consiguiente, no es un conjunto de medidas detalladas sino una muestra de los objetivos a cumplir.

En primer lugar hace referencia a los compuestos derivados del azufre remitiéndose a la Directiva 1999/32 relativa al contenido de azufre en determinados combustibles líquidos la cual se expone posteriormente.

En segundo lugar menciona el Reglamento 2037/00 en el cual se prohíbe la comercialización y uso de las sustancias que agotan la capa de ozono en los sistemas de protección contra incendios que se encuentra a bordo de los buques para todo buque construido a partir de julio de 1994 [17]. Sin embargo existen una serie de excepciones mostradas en el anexo VII de este reglamento para usos críticos de estas sustancias. Este documento obliga a realizar una revisión anual de otras alternativas posibles a los sistemas que emplean estos compuestos perjudiciales siguiendo una serie de procedimientos.

En tercer lugar en lo que respecta a las emisiones de NO_x se remite al anexo VI del Convenio Marpol anunciando sin embargo, un bloque de medidas futuras que limitarán aún en mayor nivel las emisiones de este compuesto para motores construidos a partir de 2004 y 2006 que deberán estar acorde con el desarrollo de las tecnologías de reducción de emisiones y con la postura de la OMI en este ámbito.

En lo que respecta a los objetivos de la Unión Europea, para comenzar expone los diferentes problemas que encontramos en el entorno marítimo en cuanto a acidificación y eutrofización a modo de justificación de los objetivos propuestos. Seguidamente muestra dichos objetivos, que fundamentalmente se centran en reducción del SO₂, NO_x, CO₂, compuestos orgánicos volátiles (COV), y sustancias que agotan la capa de ozono.

En base a estos objetivos, este comunicado establece las líneas de actuación previstas; entre las que destacan la acción internacional de la OMI encaminada a que un mayor número de países firme el anexo VI del Convenio Marpol y futuras propuestas de enmiendas al anexo VI del Convenio Marpol por parte de la Unión Europea [18].

2.1.4.2 Reglamento del Parlamento Europeo para el control y seguimiento de las emisiones de CO₂

Esta normativa sólo es aplicable a buques con un arqueo bruto superior a cinco mil toneladas, peso muy superior al de las plataformas a evaluar, recordando además que se encuentran excluidos los buques de guerra. Aun así, conviene señalar este conjunto de procedimientos debido a que afecta a otros buques de mayor porte de la Armada, ya que como se ha expresado previamente aún sin estar obligados se tratará de cumplir la normativa cuando la situación lo permita.

Esta normativa exige el seguimiento y la notificación exhaustiva de las emisiones de CO₂ resultantes de la combustión, para buques tanto en la mar como atracados, y enfocado especialmente a aquellos con trayectos de larga distancia, para comprobar la variación en su nivel de emisiones y sus emisiones totales. Sus informes deberán ser en todo momento coherentes y comparables empleando de manera recursiva el mismo método en cada medición [19].

El presente reglamento establece cuatro métodos de medición de CO₂ los cuales serán descritos a continuación:

1. El primero de ellos consiste en medir la cantidad de combustible consumido de forma periódica en base además a las notificaciones de entrega del combustible. Para medir el combustible consumido se realizan mediciones antes y después del trayecto y se multiplica el resultado obtenido por el factor de emisión de CO₂ propio del motor.
2. El segundo se basa en realizar un seguimiento continuo de las emisiones efectuando lecturas diarias del nivel de combustible a bordo y aplicando el factor de emisión refrescando así el valor de las emisiones con una frecuencia mayor.
3. El tercero se fundamenta en observar el caudal de combustible consumido a bordo determinando de esta manera el consumo de combustible total en un período de tiempo y aplicar posteriormente el factor.
4. Finalmente el cuarto no es más que una medición directa del caudal de CO₂ generado por todos los equipos a la salida de las chimeneas normalmente empleado en puertos y aguas bajo jurisdicción del Estado.

En base a los resultados se deberá elaborar un informe especificado en este reglamento en el cual se mostrarán los resultados del análisis y deberá ser presentado a la Comisión Europea antes del 30 de abril de cada año [19].

2.1.4.3 Directiva 1999/32 relativa al contenido de azufre en determinados combustibles líquidos

Esta directiva restringe aún más las limitaciones establecidas por el Convenio Marpol dentro del ámbito de las emisiones de SO₂ para las aguas pertenecientes al entorno marítimo de la Unión Europea. Las nuevas restricciones son las mostradas en la Tabla 2-5.

Emisiones de SO₂

0,20% en masa	Del 1 de julio del 2000 en adelante
0,10% en masa	Del 1 de enero de 2008 en adelante

Tabla 2-5 Limitaciones en la emisión de SO₂ en la Unión Europea

La restricción al igual que en el Convenio Marpol continúa siendo en función del año de construcción del buque. Cabe destacar que las islas u archipiélagos que posean cada uno de los países miembros estarán sometidos a las normativas nacionales sin necesidad de cumplir las mostradas en este reglamento.

En lo que atañe a las zonas de control de emisiones (ZCE), la directiva establece que ningún buque podrá navegar por dichas regiones marítimas con un contenido de azufre superior al 1,5% en masa [20] independientemente del año de construcción, de su pabellón y de si su navegación ha comenzado fuera de aguas de la Unión Europea. Igualmente los estados miembros prohibirán la venta de combustible con fines marítimos cuyo porcentaje en masa de azufre supere el indicado.

En el caso de buques de navegación interior, el documento acotó el contenido en azufre en masa en un 0,1% a partir del 1 de enero de 2010 [20], incluyendo buques atracados en puertos comunitarios.

2.1.5 Normativas nacionales

Para finalizar esta presentación de la normativa en la que se ha fundamentado el trabajo, España establece un techo máximo de emisiones siguiendo las pautas que le indica la Unión Europea. A continuación se muestran los objetivos que España pretende cumplir en los próximos años hasta 2030 y a partir de 2030.

2.1.5.1 Real Decreto 818/2018

Su objetivo consiste establecer medidas para la reducción de las emisiones nacionales de determinados contaminantes atmosféricos, mejorando así la calidad del aire dentro del territorio nacional y reduciendo las emisiones de gases contaminantes a la vez que se adapta a las vías de mejora establecidas por la Unión Europea y elaborando asimismo un plan de seguimiento de los mencionados gases.

Para conseguirlo se establecerá una red de seguimiento en las zonas naturales y hábitats forestales entre otras, en la cual sus encargados administrativos tendrán que facilitar al Ministerio para la Transición ecológica la ubicación de los lugares de seguimiento y los resultados del mismo.

El techo nacional que está marcado como objetivo para los próximos años es el que se muestra en la Tabla 2-6.

Contaminante	Reducción entre 2020 y 2029	Reducción a partir de 2030
NO _x	41%	62%
COV (no metálicos)	22%	39%
SO _x	67%	88%
NH ₃	3%	16%
Partículas finas	15%	50%

Tabla 2-6 Compromisos de reducción de emisiones comparado con el año 2005 [21]

Los objetivos marcados son por tanto correspondientes a todos los sectores de la sociedad, no obstante, como se mostró en el apartado de Introducción, el sector marítimo juega un papel muy importante y es imprescindible el advenimiento de nuevas tecnologías que reduzcan el nivel de las emisiones.

2.1.5.2 Real Decreto 1088/2010

El presente Real Decreto con fecha del 3 de septiembre de 2010, posee un artículo único cuya finalidad es derogar el Real Decreto 61/2006 y establecer las especificaciones técnicas y contenido en azufre que deben de cumplir las gasolinas, el gasóleo de automoción (gasóleo A), el gasóleo de uso agrícola y marítimo (gasóleo B), el gasóleo de calefacción (gasóleo C) y biocombustibles como el bioetanol [22].

A lo largo de ese artículo único, este Decreto informa detalladamente de los cambios que posteriormente se reflejarán en los respectivos anexos, haciendo referencia a ellos permanentemente. De esta manera los requerimientos se ven modificados y simplificados en tres tablas correspondientes a los tres anexos, el primero sobre gasolinas, el segundo sobre el rebasamiento de la presión de la gasolina que contenga bioetanol y finalmente el tercero para gasóleo A, B y C.

El que responde a la necesidad de este trabajo es el gasóleo marítimo (clase B) cuyas limitaciones vienen reseñadas en la Tabla 2-7.

Características		Unidad	Límite	Gasóleo B
Densidad a 15°C		kg/m ³	Max Min	880 820
Color		-	-	Rojo
Azufre		mg/kg	Max	1000
Índice de cetano		-	Min	46
Número de cetano		-	Min	49
	65% recogido	°C	Min	250
	80% recogido	°C	Max	-
	85% recogido	°C	Max	350
	95% recogido	°C	Max	370
Viscosidad cinemática a 40 °C		mm ² /s	Min Max	2 4,5
Punto de inflamación		°C	Min	60
Punto de obstrucción del filtro frío	Invierno	°C	Max	-10
	Verano	°C	Max	0
Punto de enturbiamiento	Invierno	°C	Max	-
	Verano	°C	Max	-
Residuo carbonoso (10% final destilación)		% m/m	Max	0,3
Contenido en agua y sedimentos		% v/v	Max	-
Contenido en agua		mg/kg	Max	200
Contaminación total (partículas sólidas)		mg/kg	Max	24
Contenido de cenizas		% m/m	Max	0,01
Corrosión lámina de cobre (3 horas a 50 °C)		Escala	Max	Clase 1
Transparencia y brillo		-	-	Cumple
Estabilidad a la oxidación		g/m ³	Max	25

Tabla 2-7 Especificaciones del gasóleo B [22]

Por consiguiente, todo combustible marino sin excepción deberá cumplir los valores reflejados en la tabla, y es responsabilidad del proveedor de combustible aplicar al mismo los tratamientos necesarios para hacer cumplir con la normativa.

2.2 Técnicas de reducción de gases de escape contaminantes

En la actualidad existen una gran variedad de avances en el ámbito de la reducción de gases de escape contaminantes, adaptados a los diferentes medios de transporte. Estos métodos de reducción se pueden clasificar en dos grandes vertientes:

- Tecnologías de pre-tratamiento, en las que se trata de evitar la formación de compuestos perjudiciales para el medioambiente.
- Tecnologías de post-tratamiento, en las cuales lo que se busca es, tras la combustión, evitar el vertido de los gases a la atmósfera.

En ambas técnicas es necesario tener en cuenta los condicionantes meteorológicos (como la temperatura), ya que pueden afectar a la eficiencia del sistema a emplear [23].

En las siguientes líneas se expondrán las diferentes técnicas empleadas en la actualidad para reducción de gases contaminantes y en particular, la catálisis heterogénea, que es la empleada en este estudio.

2.2.1 Técnicas de pre-tratamiento

Estos métodos, para tratar de evitar la formación de gases contaminantes, normalmente implican un cambio en el diseño del motor y de sus componentes. Las más conocidas son las reseñadas a continuación.

2.2.1.1 Recirculación de gases (EGR)

El sistema EGR (Exhaust Gas Recirculation) es un método de eliminación de óxidos de nitrógeno mediante recirculación de gases de escape, que traslada dichos gases de vuelta al colector de admisión consiguiendo que descienda el oxígeno del aire de admisión y, por tanto, una reducción de la temperatura en la cámara de combustión, lo que se refleja en una disminución de la cantidad de NO_x generados en la combustión. Suele ser empleado de forma conjunta con un catalizador u otro sistema de post-tratamiento para eliminar el resto de gases perjudiciales para el medio ambiente. Se divide en EGR externo o interno según si la recirculación de los gases se hace directamente desde el escape o desde válvulas interiores que atrapan los gases residuales [24].

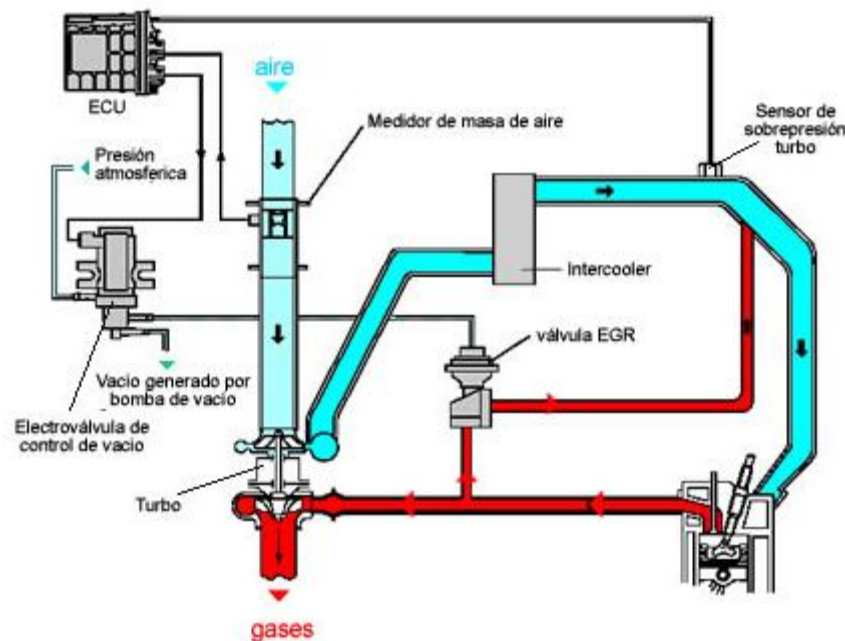


Figura 2-1 Sistema EGR externo [25]

El sistema consiste en una unidad de control cuya función es controlar el aire de admisión, la cantidad de combustible inyectado, la temperatura y la presión atmosférica. En función del conjunto de esos valores, el sistema decidirá si accionar o no la válvula EGR y así recircular una mayor o menor cantidad de gases de escape. Estas válvulas EGR, pueden ser activadas por vacío (neumáticas) o controladas de forma automática con un instrumento de mando (eléctricas).

La implantación de este mecanismo, por consiguiente, reducirá la contaminación de los gases de escape y además reducirá el consumo en revoluciones medias y altas. Por el contrario, puede generar problemas de acumulación de residuos en el conducto de admisión debido a la recirculación de dichos gases, a la vez que aumenta el consumo para revoluciones medias y bajas y se reduce la potencia del motor.

2.2.1.2 Inyección directa de agua en la cámara de combustión (DWI)

Como su propio nombre indica, este proceso consiste en introducir agua a alta presión (200-300 bar) directamente en la cámara de combustión de forma previa a la inyección del combustible para enfriar el espacio donde se producirá la combustión (Direct Water Injection, DWI). Es por tanto un

sistema que permite reducir las emisiones de NO_x entre un 50% y un 60% a costa de aumentar el consumo de combustible ligeramente.

En la Figura 2-2 puede apreciarse una comparativa entre una cámara de combustión a la que se le ha aplicado este mecanismo y otra en la que no. Se puede apreciar que, sin este sistema, la concentración de NO es mucho mayor (color rojo) que en el caso de si disponer de él, observando una clara reducción en la concentración de NO (color verde y amarillo).

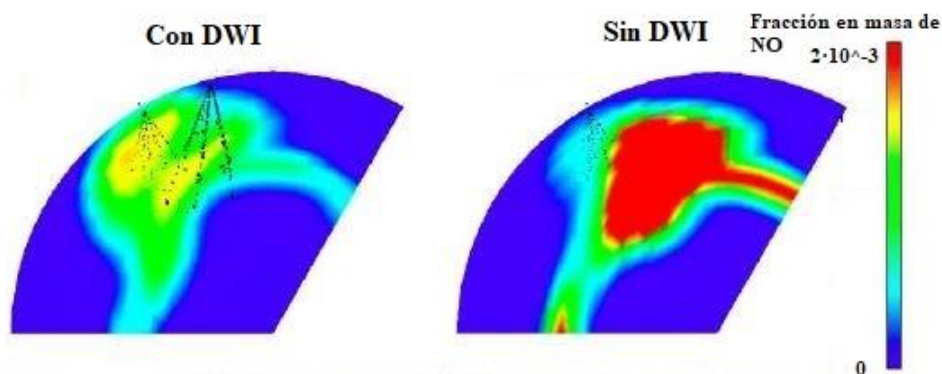


Figura 2-2 Análisis dinámico de fluidos computacional (CFD) en un sistema con y sin DWI [26]

Como se ha expresado en líneas anteriores, para este tipo de sistemas se necesita rediseñar el motor, de manera que posea un elemento clave que en este caso es una aguja inyectora que pueda introducir agua y combustible por el mismo conducto. Una válvula reguladora de presión controlará que ésta se inserte con la presión adecuada, estando el sistema de inyección de agua en sí dirigido por un equipo de inyección electrónica fácilmente ajustable desde un ordenador exterior. Por consiguiente, la cantidad de agua será regulada en función del tiempo durante el cual se esté inyectando.

Finalmente, este sistema está diseñado de forma premeditada para su posible combinación con otros procesos de regulación de emisiones como el EGR, estudiado en el apartado anterior [27].

2.2.1.3 Emulsión de agua en combustible

A diferencia del anterior, en este método de reducción de emisiones de gases de escape, el agua es introducida en el tanque de combustible de forma previa a la inyección, generando una mezcla inmiscible de aproximadamente un 30% de agua y un 70% de combustible [28]. De este modo, cuando la mezcla se inyecta en la cámara de combustión se produce un fenómeno llamado “*micro explosión*” [29], por el cual el agua presente en el combustible se evapora drásticamente, reduciendo la temperatura de combustión y favoreciendo la turbulencia del combustible con el objetivo de obtener una combustión más completa, evitando así el bien conocido humo negro emanado de las chimeneas y reduciendo la cantidad de CO.

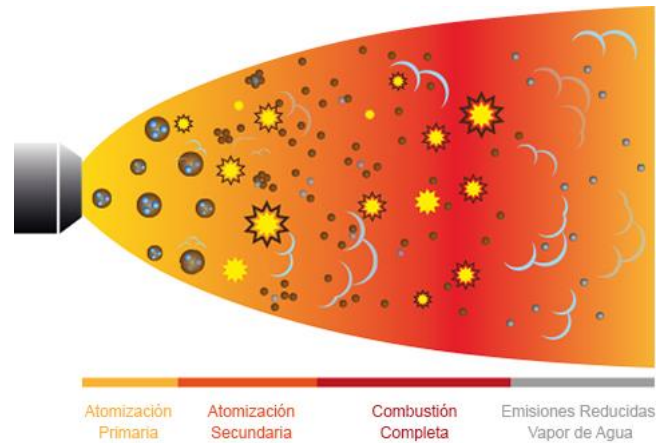


Figura 2-3 Proceso de emulsión de agua en la combustión [28]

Empleando este método se puede reducir la emisión de NO_x en un 40 %, la de CO_2 entre un 5 y un 10% y las partículas en suspensión pueden verse atenuadas hasta en un 90% [29]. De la misma manera se produce un ahorro de combustible de aproximadamente un 5% con lo cual no sólo se protege el medio ambiente, sino que además es un sistema beneficioso para el motor, y por tanto para la empresa que lo implante

2.2.1.4 Inyección de agua en el aire de admisión

El objetivo de este sistema, al igual que los presentados anteriormente, es reducir la temperatura a la que se produce la combustión para mejorar así la calidad de las emisiones de escape. Sin embargo, el método empleado es claramente diferente. El proceso denominado como HAM (Humid Air Motor) consiste en saturar el aire que se introduce en la cámara de combustión con vapor de agua que es generado en el propio buque empleando agua de mar y el calor del motor, consiguiendo de esta manera el efecto deseado de reducir la temperatura de la cámara de combustión.

Este sistema destaca por su reducido coste al utilizar para su funcionamiento agua de mar, su escaso consumo de aceite de lubricación y sus limitados costes de mantenimiento entre otros. Este proceso permite reducir la producción de NO_x en los gases de escape hasta un 65% [30], como se observa en la Figura 2-4.

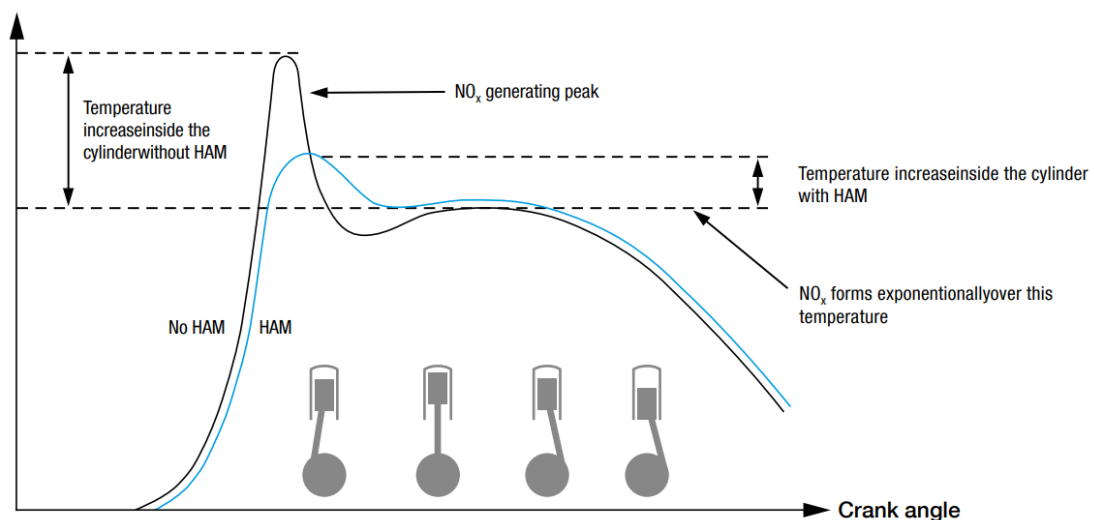


Figura 2-4 Efecto de la tecnología HAM en motores de combustión [30]

La explicación se debe a que el 90% del NO_x generado resulta de los picos de temperatura durante el proceso de combustión. El empleo del agua para reducir la temperatura de combustión se explota de

la misma manera que con el sistema de emulsión de agua en el combustible, aunque en este caso la cantidad de agua añadida es mucho mayor y el calor empleado para la vaporización del agua se toma del aire comprimido después del turbocompresor u otras fuentes de calor del motor.

2.2.2 Técnicas de post-tratamiento

Las tecnologías de post-tratamiento de gases de escape son aquellas que buscan solucionar el problema de la emisión de contaminantes mediante el empleo de sistemas que eliminan dichas sustancias en el propio escape del motor, en otras palabras, el objetivo en este caso no consiste en tratar de generar menos compuestos perjudiciales, sino de eliminar en la mayor medida posible los producidos durante todo el proceso de combustión del motor. Los ejemplos más llamativos son los lavadores de gases, la adsorción de sólidos porosos y los catalizadores heterogéneos.

2.2.2.1 Scrubber (Lavador de gases)

El “scrubber”, o lavador de gases, es un método basado en la absorción de gases implementado en las chimeneas de los barcos y empleado principalmente para reducir la producción de SO_x a la salida del motor [31]. La tecnología en todos los sistemas que utilizan el lavador de gases coincide; cuando los gases de escape entran en el sistema son rociados con agua. De esta manera, el agua reacciona con el SO_x produciendo ácido sulfúrico (H_2SO_4).

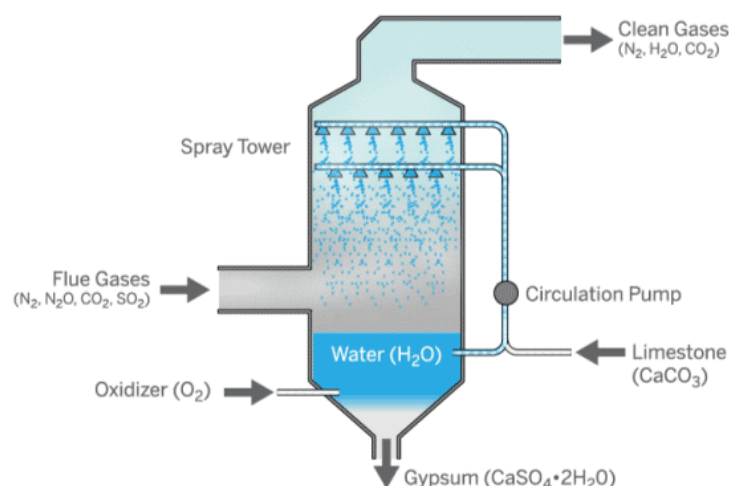


Figura 2-5 Lavador de gases [32]

En la Figura 2-5 se aprecia que el dispositivo es similar a una torre de lavado de los gases de escape. Existen dos modelos de sistemas lavadores de gases: abierto (open loop) y cerrado (closed loop).

Si el modelo es un sistema abierto, se emplea agua de mar para neutralizar los óxidos en azufre en tres niveles diferentes a lo largo del escape del motor y la inherente alcalinidad del agua salada neutraliza el ácido sin dar problemas y sin necesidad de otros productos químicos. El agua empleada para el tratamiento de los gases es tratada después de su uso y vertida al mar cumpliendo con los reglamentos medioambientales pertinentes. Pruebas realizadas a bordo del petrolero MT Suula aseguran una reducción del SO_x superior al 99%, del NO_x de un 5 a un 11% y de partículas sólidas en suspensión de un 30 a un 60%.

En un sistema cerrado, el agua únicamente circula por dentro del conducto de lavado y tan sólo una pequeña cantidad de agua de mar entra en el proceso. Debido a ello, es perceptivo el uso de compuestos como el hidróxido de sodio (NaOH) para regular el ácido sulfúrico resultante del proceso. El agua es bombeada desde el tanque de almacenamiento circulando a través del enfriador hasta la

parte más elevada del lavador donde comienza el rociado. Conjuntamente se rocía la parte media del escape para aumentar así la eficiencia del sistema. Los resultados en este modelo son prácticamente similares [27].

2.2.2.2 Adsorción

En la naturaleza existen una serie de elementos sólidos que gracias a su porosidad tienen una gran capacidad de adsorción de ciertos gases. Este es el caso de los hidruros metálicos, que son capaces de adsorber una gran cantidad de hidrógeno molecular para liberarlo posteriormente. Al material que realiza la adsorción se le denomina adsorbente, y al gas adsorbido, adsorbato, como se observa en la Figura 2-6 [33].

El sólido empleado debe ser adecuado al gas que se pretende adsorber, en el caso del NO_x suele emplearse una suspensión de cal en polvo y amoníaco acuoso en el interior de la chimenea, obteniéndose mediante este procedimiento una reducción en la emisión de un 60% [31].

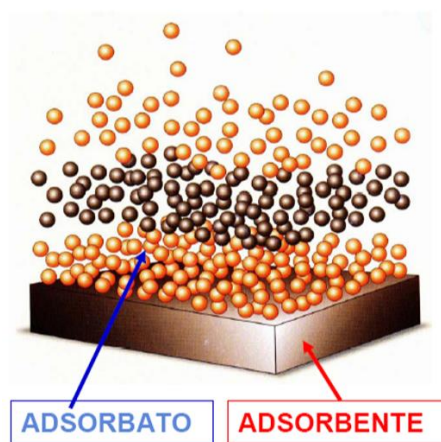


Figura 2-6 Adsorción [33]

2.2.2.3 Catalizadores heterogéneos

Los sistemas de reducción catalítica llevan empleándose desde la década de los 70 en ciertas industrias de origen japonés y es un método empleado en todo tipo de combustible como gas natural, fuel oil, diésel y carbón entre otros [34]. Con la aparición de las regulaciones llevadas a cabo por el Convenio Marpol, estos procesos se introdujeron en los motores marinos con el objeto de adaptarse a esa nueva normativa.

La catálisis heterogénea se caracteriza porque el catalizador en sí se encuentra en una fase diferente a la de los reactivos. Debido a ello, es la más empleada en los procesos de reducción de emisiones ya que en todo momento el catalizador a emplear se encuentra en estado sólido. En el siguiente apartado se detallará el contexto de las tecnologías reducción catalítica que constituyen el principal foco de estudio del presente trabajo.

2.2.3 Reducción catalítica selectiva (SCR)

La reducción catalítica selectiva (SCR) es actualmente el único proceso de catálisis capaz de tratar los gases de escape y cumplir con la normativa de nivel 3 en cuanto a emisiones de óxidos de nitrógeno [34]. Durante el proceso, el catalizador adsorberá los gases de escape empleando un agente reductor, que suele ser amoníaco o urea, como se observa en la Figura 2-7, aunque también existen otros métodos menos empleados que utilizan los hidrocarburos como reductor.

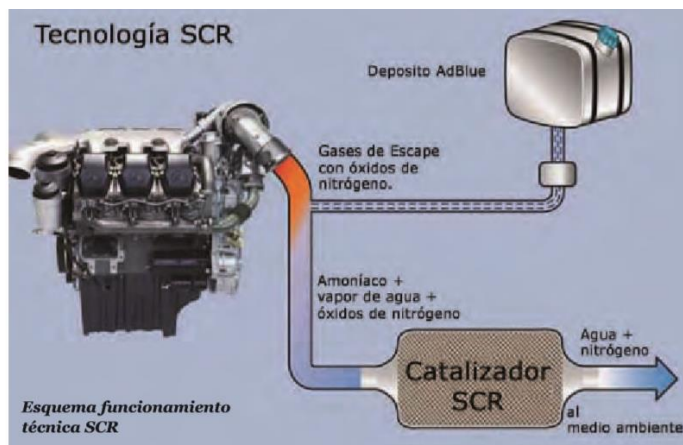


Figura 2-7 Catalizador SCR [35]

Es de destacar que los catalizadores de este tipo tienen una determinada vida operativa y por tanto a la hora de decidir su instalación es un factor importante a tener en cuenta. Se estima que para plantas de carbón su vida útil acaba entre los 6 y los 10 años, mientras que para sistemas que trabajen con fuel oil y gas la previsión se sitúa entre los 8 y los 12 años aumentando notablemente [36].

Uno de los principales inconvenientes de su empleo se fundamenta en que, al ser una técnica de post-tratamiento, no se puede asegurar que el sistema funcione de forma continua con el mismo rendimiento ya que el motor seguirá funcionando, aunque el agente reductor se haya agotado. A continuación, se desarrollarán los diferentes tipos de catalizadores y seguidamente, los diferentes procesos catalíticos empleados en la actualidad.

2.2.3.1 Tipos de catalizadores

Los principales procesos de catálisis selectiva son tres, claramente diferenciados entre ellos según el rango de temperaturas de trabajo.

El primer grupo de ellos son los catalizadores de metales preciosos como el platino, de escaso uso en motores actualmente. Esto es debido a la ventana de temperaturas a la cual trabajan que suele encontrarse entre los 225 °C y los 250 °C. Por consiguiente, sólo podrán reaccionar con los NO_x dentro de ese rango de temperaturas. Aun así su uso es reseñable en las llamadas “*reacciones de acoplamiento*” empleadas en la actualidad para la síntesis de ciertos compuestos químicos [37].

El siguiente conjunto es el de los catalizadores de metales pesados como el vanadio, considerados como catalizadores de temperatura intermedia, situando su rango de operación ente los 260 °C y 450 °C pudiendo apreciarse que es ampliamente superior al del platino. Sin embargo, actualmente las temperaturas de funcionamiento se encuentran en gran cantidad de ocasiones en torno a los 500 °C por lo que siguen sin ser suficientes.

Finalmente, encontramos el grupo de catalizadores de zeolita, utilizado para una gran cantidad de reacciones con moléculas orgánicas entre las que destacan el craqueo, isomerización y síntesis de hidrocarburos. Se caracterizan por ser selectivos según el estado en el que se encuentre la molécula, pero también según su diámetro, destacando que las reacciones tienen lugar en los poros del mineral lo que permite un mayor control. Las zeolitas son el mineral más utilizado para conformar los catalizadores SCR debido a que son capaces de soportar temperaturas de 600 °C llegando a aguantar hasta los 650 °C si se realiza una aleación del mismo con cobre.

2.2.3.2 Reducción catalítica selectiva empleando amoníaco como reductor.

Es el procedimiento más empleado a nivel industrial para reducción de NO_x . Como se aprecia en la Figura 2-8, el amoníaco, el cual se encuentra almacenado en un tanque, se introduce junto con el gas a tratar habiendo sido previamente diluido en aire. El amoníaco se mezcla con los gases en el interior del

reactor catalítico, el cual suele tener dos capas de catalizadores. Como resultado de este proceso, los óxidos de nitrógeno obtenidos durante la combustión, reaccionarán con el amoníaco, dando como productos nitrógeno molecular, que es un gas inerte, y agua en forma de vapor.

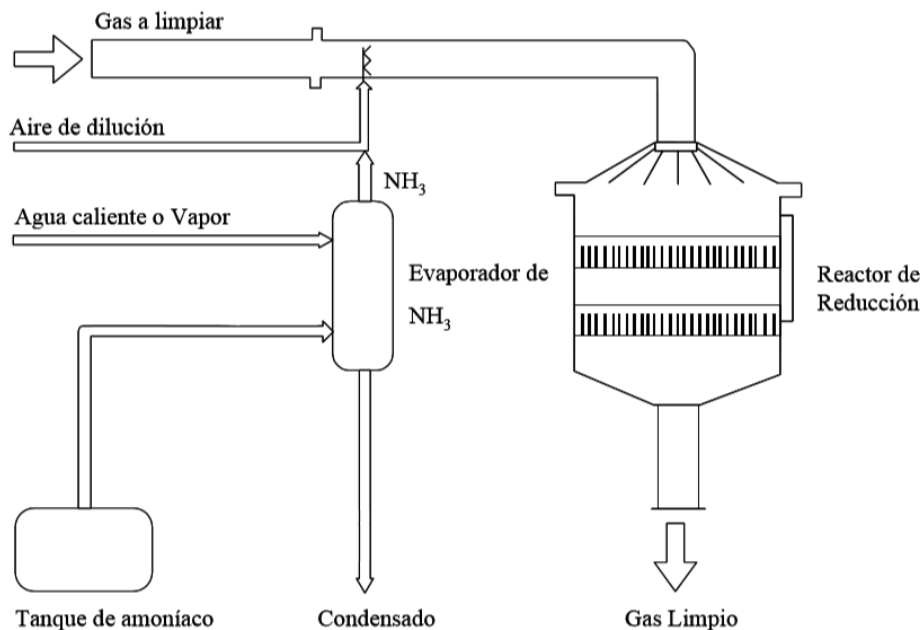


Figura 2-8 Procedimiento Topsoe para la eliminación de NOx empleando NH3 [31]

Con este sistema se logra una erradicación del 95% [31] de óxidos de nitrógeno y no se forman contaminantes secundarios. A este proceso de catálisis se le denomina como selectiva ya que el amoníaco reacciona únicamente con el NO_x y no con el O_2 . Por el contrario, es un proceso generalmente menos económico que los de pre-tratamiento y necesita de una eliminación previa de los compuestos de azufre, ya que dichas sustancias reaccionarían con el agua produciendo ácido sulfúrico, lo que favorecería el proceso de deterioro del sistema. Asimismo, necesita de un sistema de inyección de amoníaco y un tanque para su almacenamiento.

2.2.3.3 Descomposición directa de los óxidos de nitrógeno.

Esta es una de las opciones que permite disociar los óxidos de nitrógeno sin empleo de ningún tipo de reductor adicional que permita la reacción. El principal inconveniente de este sistema es que únicamente es favorable a temperaturas superiores de $1000\text{ }^\circ\text{C}$, lo cual lo hace prácticamente inviable, tan sólo a efectos de investigación [31].

2.2.3.4 Empleo de catalizadores de tres vías.

Este tipo de catalizadores es especialmente empleado en motores de combustión y, por ello, será el foco principal de este trabajo. En primer lugar, este tipo de catalizador es denominado de tres vías debido a los tres compuestos que es capaz de restringir: NO_x , CO e hidrocarburos (HC). Para que el módulo funcione adecuadamente, es preceptivo que la mezcla de aire y combustible inyectada tenga la composición adecuada (1 kilogramo de gasolina por 14,7 kilogramos de aire [31]). Existe un dispositivo que es capaz de realizar correcciones constantes para regular el exceso o el defecto en la mezcla del sistema de forma continua. Este dispositivo se denomina sonda lambda, y es el responsable del correcto funcionamiento del catalizador. En la Figura 2-9 se puede visualizar gráficamente la forma del equipo así como los productos y reactivos de las reacciones que en su interior tienen lugar.

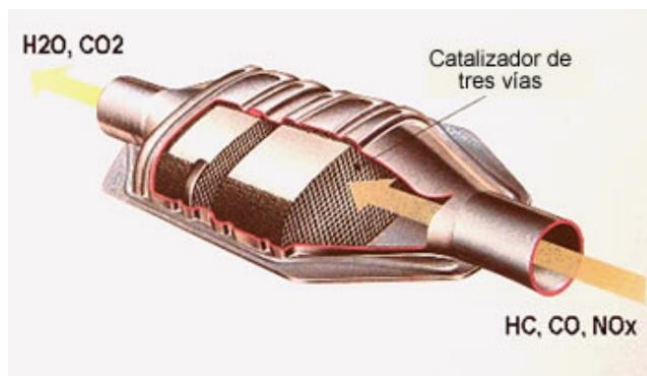


Figura 2-9 Catalizador de tres vías convencional [38]

Los catalizadores de tres vías suelen ser usualmente del tipo de metales preciosos como el paladio o el rodio mezclados con Al_2O_3 . Durante su utilización, además de lo mostrado previamente, se necesita vigilar la temperatura de funcionamiento ya que si dicha temperatura es inferior a los $300\text{ }^\circ\text{C}$, el rendimiento del mismo disminuirá drásticamente, mientras que si la temperatura sube por encima de los $800\text{ }^\circ\text{C}$ se produce el fenómeno de sinterización de los metales preciosos generando una reducción notable de la superficie útil del catalizador. Adicionalmente, el carburante debe estar exento de plomo ya que las partículas de este metal se depositan en los poros del catalizador, disminuyendo del mismo modo su superficie [39].

2.2.3.5 Reducción catalítica selectiva empleando hidrocarburos como reductores.

El empleo de compuestos orgánicos como los alcanos o alquenos a modo de reductores para descomponer los NO_x ha despertado un gran interés hoy en día. El uso de este tipo de sustancias, sobre todo aquellas con una menor masa molecular como el metano o el etano, poseen considerables beneficios frente al uso del amoníaco como agente reductor, entre los que destacan su gran manejabilidad y que dichos hidrocarburos en bastantes ocasiones coinciden con los gases a tratar lo que nos permite ahorrar en su proceso de adición. Los tipos de catalizadores más utilizados en este proceso son los óxidos como el Al_2O_3 y zeolitas intercambiadas con diversos metales.

Los diferentes procesos de catálisis mostrados, pueden quedar resumidos en la Tabla 2-8.

Proceso	Agente empleado	Observaciones
Reducción catalítica selectiva empleando amoníaco como reductor	Amoníaco	Nivel industrial. Obtención de N_2 y H_2O
Descomposición directa de los óxidos de nitrógeno	Ninguno	Temperatura de funcionamiento $1000\text{ }^\circ\text{C}$
Catalizadores de tres vías	Paladio o rodio	Restricción de NO_x , CO e hidrocarburos
Reducción catalítica selectiva empleando hidrocarburos como reductores	Alcanos o alquenos	Buena manejabilidad

Tabla 2-8 Resumen de los procesos catalíticos

3 DESARROLLO DEL TFG

3.1 Plataformas a evaluar

Con el objetivo de tener datos de diversos buques de porte diferente y con funciones completamente distintas, se decidieron evaluar tres de los disponibles en la Escuela Naval Militar durante el período disponible: el patrullero P-28 “*Tabarca*”, la lancha de instrucción “*GM Salas*” y el patrullero P-46 “*Furor*”.

3.1.1 Patrullero P-28 “*Tabarca*”

En primer lugar y de forma breve es necesario mostrar la misión que tiene este tipo de buques en la Armada para comprender la carga que debe de soportar su maquinaria.

El Patrullero P-28 “*Tabarca*” es el octavo de los buques construidos de clase “*Anaga*”. Botado en 1980 y entregado a la Armada en 1981, constituye uno de los buques más antiguos en activo. Dentro de sus funciones cabe destacar la vigilancia costera y de caladeros de pesca nacionales, así como la Zona Económica Exclusiva (ZEE), la cual hace referencia al entorno marítimo en que a cada país se le permite la explotación del fondo marino y la pesca. Igualmente, trabaja de forma íntegra con la Escuela Naval Militar para adiestramiento de sus alumnos durante las semanas de instrucción en la mar, además de realizar cooperaciones con el Ejército de Tierra. De forma general, el buque navega alrededor de 100 días al año, según la necesidad [40].



Figura 3-1 Patrullero P-28 Tabarca

3.1.1.1 Cámara de máquinas

La cámara de máquinas es el espacio del buque donde se encuentran el motor principal, los motores auxiliares y demás elementos esenciales del sistema de propulsión, pero también otros no necesariamente relacionados con el mismo, equipos auxiliares como pueden ser compresores, calderas, sistemas de frío y fluidos, etc.

Como se puede apreciar en la Figura 3-2, el motor principal está situado en el centro de la misma y los auxiliares a ambas bandas en el mismo nivel. También se pueden observar otros elementos necesarios para el correcto funcionamiento del sistema, los cuales no son objeto de este trabajo.

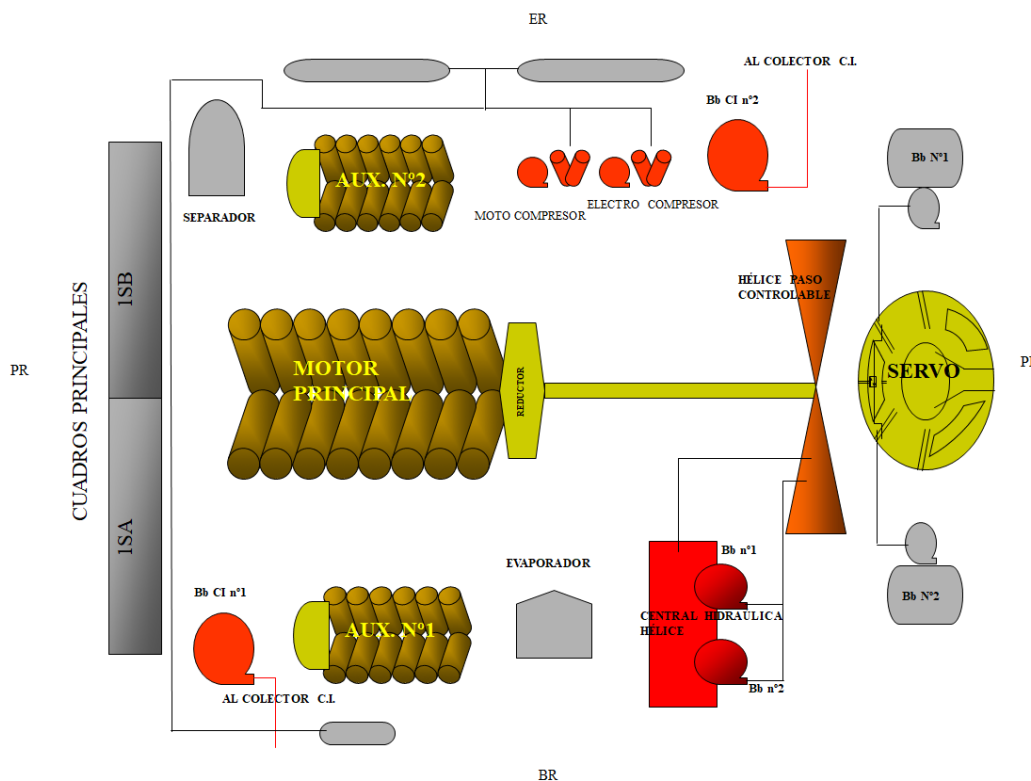


Figura 3-2 Esquema de la cámara de máquinas de la plataforma

Con el objetivo de que sirva de base para el análisis, se estudiará el funcionamiento y composición del motor principal y de sus motores auxiliares.

3.1.1.2 Motor principal Bazán MTU

En cuanto a sus características generales, cabe reseñar que se trata de un motor diésel sobrealimentado de cuatro tiempos e inyección directa. Está constituido por un bloque de 16 cilindros en V, con una cilindrada unitaria de 9,54 litros, que aportan una potencia continua de hasta 4000 CV teóricos (aproximadamente 3000 kW) a 1515 rpm [41].

El motor original de este buque fue sustituido por uno de idénticas características con 8200 horas de funcionamiento en el año 2016, convenientemente reacondicionado, proveniente de un patrullero clase Serviola, concretamente del P-73 Vigía. Con lo cual, el motor actual no data del mismo año que la plataforma en sí.

Es necesario recalcar que el buque lleva al día el Programa de Mantenimiento para buques de la Armada desarrollado por la empresa Navantia. Dicho programa se encuentra dividido en seis niveles de mantenimiento, designados por la letra "W" y un número, que hace referencia al nivel en el que se encuentra el buque. De este modo, el nivel W1 es el nivel más bajo de mantenimiento, completándose en 24 horas, ya que realiza comprobaciones básicas del motor. Por otra parte, el mantenimiento W6 es

el más completo, debiendo realizarse limpiezas y despieces a fondo del motor, con una duración total de 6000 horas. A día de hoy, el buque tiene solicitado un ciclo de mantenimiento W5, pendiente de realización [42].

La extracción de los gases de escape del motor se eleva por la chimenea principal hacia el exterior, mediante un tubo metálico de aproximadamente cincuenta centímetros de diámetro. Estos gases, son refrigerados por el circuito de agua salada que recorre el bloque motor, la cual se vierte al mar directamente tras este proceso [43].

La imposibilidad de realizar un agujero en la extracción de los gases de escape provocó que la medición de los mismos se tuviese que llevar a cabo directamente desde el exterior, en el emplazamiento observado en la Figura 3-3.



Figura 3-3 Elementos de la chimenea del P-28 Tabarca

3.1.1.3 Motores auxiliares

Los motores auxiliares tienen como misión accionar los alternadores que proporcionarán corriente eléctrica al buque durante la navegación. Son dos motores diésel sobrealimentados Chrysler-Barreiros tipo BS 36 ME datados de 1981 [44] que son capaces de aportar una potencia por separado a cada alternador de 112 kW girando a 1500 rpm. Se encuentran respectivamente a ambos lados del motor principal en la cámara de máquinas.

Antes de arrancar el motor principal, primeramente se arranca uno de los auxiliares. Desde el momento en el que el buque se dispone a salir a la mar hasta que ha salido de la dársena (período de babor y estribor de guardia) se arranca también el segundo auxiliar, por motivos de seguridad, en caso de que fuese necesario una mayor potencia en caso de emergencia dentro de la dársena. Por tanto durante este período el buque navega con ambos auxiliares operativos y en funcionamiento. Una vez el buque ha salido de la dársena y se encuentra navegando, se apaga el auxiliar arrancado para el período de babor y estribor de guardia, continuando la navegación con un único auxiliar. El proceso viene explicado gráficamente en la Figura 3-4.

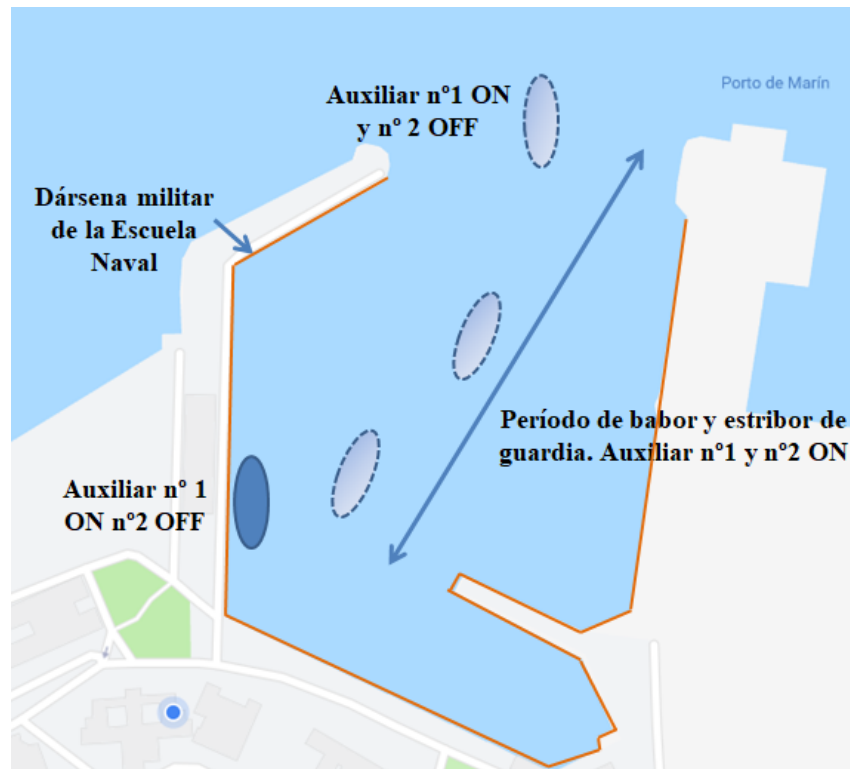


Figura 3-4 Proceso de arranque y parada del motor auxiliar durante una salida a la mar

3.1.2 Lancha de instrucción GM Salas

A diferencia de la primera plataforma, las lanchas de instrucción tienen una dependencia orgánica con la Escuela Naval Militar, por lo que todas sus funciones son en pos de los intereses de la misma.

El Grupo de Lanchas de Instrucción, tiene como principal cometido el adiestramiento de los alumnos de la Escuela Naval Militar, que de forma semanal se hacen a la mar a lo largo de la Ría de Pontevedra para aplicar los conocimientos adquiridos en el aula de forma teórica. De esta manera se practican condiciones reales de navegación para su mejor adaptación a la flota en un futuro, a la vez que mejoran sus técnicas de mando a lo largo de los cursos [46].



Figura 3-5 Lanchas de instrucción en puerto

3.1.2.1 Cámara de máquinas

Naturalmente, el tamaño de la cámara de máquinas de esta plataforma es inferior al anterior al ser un buque de menor entidad, y su disposición es totalmente diferente como se observa en la Figura 3-6. De proa a popa, se encuentra el cuadro eléctrico principal a estribor y la bomba de contraincendios a babor. Seguidamente encontramos los dos motores principales Caterpillar C 18 acoplados a cada uno de los dos ejes que posee el buque y que les proporcionan la potencia necesaria para el movimiento de las hélices. Más a popa se encontrarían los motores auxiliares generadores los cuales en este caso no han sido objeto de medición al no tener punto de medición específico para ello.



Figura 3-6 Cámara de máquinas de las lanchas de instrucción

En la parte superior izquierda de la Figura 3-6 se observa la disposición de la extracción de gases de escape del motor principal de babor. Dicha extracción está conformada por un tubo metálico de unos treinta centímetros, enfriado hacia la mitad de su longitud por el agua salada de refrigeración que es bombeada directamente del mar [46]. Finalmente, los gases son expulsados al exterior por ambos costados, en la mitad trasera de la embarcación.

El punto de medición seleccionado es un orificio preparado para un termopar, el cual proporciona la temperatura y la presión de los gases de escape del motor en tiempo real a una pantalla situada en el puente para controlar el estado del motor sin necesidad de bajar a su emplazamiento físico. Dicho orificio viene representado en la Figura 3-7.



Figura 3-7 Punto de medición de la lancha de instrucción

3.1.2.2 Motor principal Caterpillar C 18

Dos motores marinos Caterpillar C 18 conforman el sistema de propulsión principal en las lanchas de instrucción, datado de 2007. El C 18 se caracteriza por ser un motor diésel sobrealimentado de cuatro tiempos, de inyección de combustible directa e inyección electrónica, lo que permite dosificar adecuadamente el combustible. La electrónica del motor proporciona ventajas tales como el control en tiempo real de la relación aire-combustible y de la sincronización de la inyección todo ello como añadido de tener una vigilancia general del sistema y la regulación del motor. En la Figura 3-8 se observa una vista general del mismo.



Figura 3-8 Motor marino Caterpillar C 18 [47]

En lo que respecta a la cilindrada, su configuración es de 6 cilindros en línea, diésel y con una cilindrada total de 18 litros, lo que equivale a una cilindrada unitaria de 3 litros. El sistema está diseñado para trabajar de forma conjunta con otro motor idéntico, uno a estribor y otro a babor, en una plataforma con dos ejes de las características de las lanchas de instrucción, para lo cual posee un sistema de sincronización que conecta los módulos de control electrónico de ambos motores a un acelerador común. De esta manera se permite el empleo de cualquiera de los dos aceleradores de cada motor en situación de reserva.

En materia de revoluciones, las usuales en navegación son de 900 a 1200 rpm como máximo, aportando una potencia correspondiente de 460 a los 725 CV (339-533 kW). El motor posee adicionalmente un modo de avance mínima empleado únicamente en atracadas, desatrachadas y maniobras de precisión en el cual el motor gira a 600 rpm [48].

3.1.3 Buque de acción marítima (BAM) P-46 “Furor”

Durante la semana del 11 al 17 de febrero, el BAM “Furor” hizo escala en la Escuela Naval Militar de Marín, período en el cual se disponía a realizar mediciones sobre su firma magnética. Las condiciones permitieron la simultánea toma de mediciones sobre gases de escape, la cual se detallará posteriormente.

El BAM P-46 “Furor”, último buque construido de la clase “Meteoro”, es el buque más moderno de la Armada, entregado el 21 de enero de 2019. Con los buques de esta clase la Armada pretende actualizar su flota de patrulleros con unidades capaces de realizar múltiples funciones, en diferentes escenarios y con un alto grado de automatización. Su escasa dotación de 52 hombres y mujeres es prueba de dicho automatismo.

Las prestaciones del buque le permiten operar en una gran variedad de escenarios tanto de media-alta como de baja intensidad realizando operaciones de vigilancia y seguridad marítima, de ayuda humanitaria, de paz y de cooperación pesquera. Esta plataforma de alta tecnología tiene como principal cometido el combate asimétrico, siendo éste, aquel que enfrenta a unidades hostiles improvisadas como pequeños pesqueros con personal armado en su interior. Del mismo modo, puede cooperar con las Fuerzas y Cuerpos de Seguridad el Estado en misiones de salvamento y rescate así como en la lucha contra la contaminación marina, trabajando con diferentes departamentos ministeriales. Su imagen externa se puede observar en la Figura 3-9 [40].



Figura 3-9 BAM P-46 Furor

3.1.3.1 Cámara de máquinas y motor principal

La cámara de máquinas de este buque es la más grande, compleja y moderna de las estudiadas en el trabajo. Está dispuesta en dos salas interconectadas, dentro de las cuales, cada una aloja uno de los motores principales. Tras ellos, separados convenientemente, se encuentran los 4 motores auxiliares generadores, los cuales no pudieron ser analizados debido a la imposibilidad de obtener orificios de medida y al tiempo de embarque. Las dimensiones de la cámara que aloja el motor de babor, se pueden apreciar en la Figura 3-10, la cámara del motor de estribor es totalmente idéntica.



Figura 3-10 Cámara de máquinas BAM Furor

Con respecto al motor analizado, se trata, al igual que en el caso del patrullero Tabarca, de un motor MTU de 16 cilindros, cuatro tiempos e inyección directa, aunque mucho más moderno, construido en mayo de 2016. Posee un sistema de refrigeración formado por dos circuitos diferentes que emplean líquido refrigerante y un sistema integrado de precalentamiento del aire de admisión. Además, destaca por presentar mejoras como sistemas de enfriamiento del pistón e inyección electrónica “*common rail*”, aumentando en gran medida la eficiencia del motor y mejorando asimismo su combustión. Es capaz de aportar una potencia de 5200 kW, lo cual, al tener el buque dos instalados, aportaría una potencia de propulsión total de 10400 kW. Tiene un bajo consumo de combustible y un mantenimiento sencillo, además de ser apto para largos intervalos de servicio. A efectos medioambientales, la empresa MTU afirma que es un motor que trabaja con combustible con muy bajas trazas de azufre y sin aditivos, respetando, igualmente, el nivel 2 de emisiones de óxidos de nitrógeno.

Finalmente, el punto concreto de medición está situado, de manera muy similar a las lanchas de instrucción, en un tubo de pequeñas dimensiones situado en la extracción de ambos principales, por el cual, normalmente se introduce un sensor de temperatura de los gases de escape, señalado en la Figura 3-11.

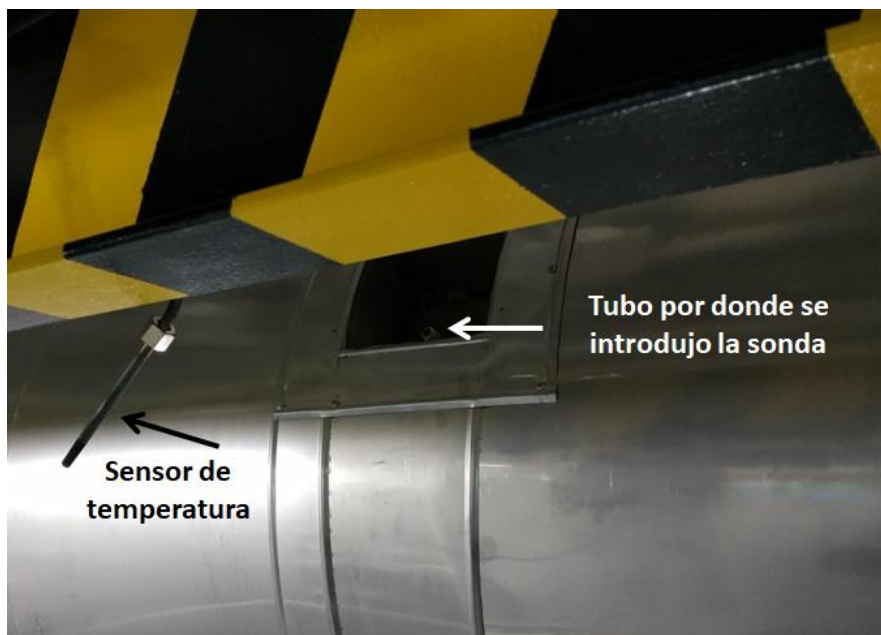


Figura 3-11 Punto de medición BAM (motor de babor)

3.1.4 Estudio del combustible de las plataformas

El combustible de las plataformas fue analizado para la verificación del cumplimiento de la normativa y, en concreto, la limitación de azufre en el mismo establecida por el Convenio Marpol.

En lo que respecta al combustible del patrullero Tabarca, se trata de *gasóleo mar e +*, gasóleo correspondiente a la clase B, de la empresa Repsol, especialmente desarrollado para grandes embarcaciones, como pueden ser las embarcaciones de pesca, de transporte de pasajeros y mercancías o de servicio en puertos. Del mismo modo, en materia de calidad, seguridad y medio ambiente el combustible cumple los requisitos de los motores más modernos y actuales y, asimismo, poseen un sistema de gestión de certificados en calidad y medio ambiente [45].

Según establece la norma ISO 8216-1/2017, los motores de una cilindrada unitaria de entre 5 y 30 litros podrán emplear gasóleo clase B o en la categoría americana DMB, por tanto, se puede decir que se emplea el combustible adecuado siguiendo la presente normativa [16].

La empresa dependiente de Repsol que se encarga de la venta al por mayor, almacenaje, transporte y distribución del citado combustible es Repsol Comercial de Productos Petrolíferos S.A. en su rama de combustibles marinos (RCPP marina), y sirve al buque mediante un sistema bajo pedido desde su emplazamiento de Vigo. Las especificaciones de este combustible proporcionadas por la empresa son las mostradas en la Tabla 3-1.

Características		Unidad	Límite	Gasóleo B
Densidad a 15 °C		kg/m ³	Max Min	880 820
Color		-	-	Rojo
Azufre		mg/kg	Max	10
Índice de cetano		-	Min	46
Número de cetano		-	Min	49
Viscosidad cinemática a 40 °C		mm ² /s	Min Max	2 4,5
Punto de inflamación		°C	Min	60
Punto de obstrucción del filtro frío	Invierno	°C	Max	-10
	Verano	°C	Max	-6
Punto de enturbiamiento	Invierno	°C	Max	4
	Verano	°C	Max	
Residuo carbonoso (10% final destilación)		% m/m	Max	0,3
Contenido en agua		mg/kg	Max	200
Contaminación total (partículas sólidas)		mg/kg	Max	24
Contenido de cenizas		% m/m	Max	0,01
Corrosión lámina de cobre (3 horas a 50 °C)		Escala	Max	Clase 1
Transparencia y brillo		-	-	Cumple
Estabilidad a la oxidación		g/m ³	Max	25

Tabla 3-1 Especificaciones gasóleo mar e+ [45]

El combustible empleado por la lancha de instrucción es el mismo que en el Patrullero Tabarca. Cabe destacar que la cilindrada unitaria de las lanchas es de 3 litros y, por consiguiente, teniendo en cuenta la normativa ISO en la categoría de diésel americana el combustible a emplear sería el diésel marino de clase A (DMA) [16]. En España, sin embargo, el gasóleo B es el combustible común para todo tipo de embarcaciones y, por ello, se emplea el mismo combustible independientemente de las dimensiones del cilindro. Además, es un tipo de combustible que entra dentro del rango de los soportados por la marca Caterpillar, permitiendo combustibles diésel nº1 y nº2, que corresponden a combustibles diésel marinos de clase A y B respectivamente en la categoría americana, rango dentro del cual entra el gasóleo B.

A diferencia de los casos anteriores, el BAM Furor no emplea el gasóleo B marino, sino *Diesel Fuel Marine (DFM)* convencional, utilizado por prácticamente todos los buques de la Armada. Este combustible, cuya denominación en la Armada es F-76, es empleado en buques de mayor porte, mientras que el gasóleo B convencional suele ser mayoritariamente empleado en embarcaciones de recreo o, en el caso de buques militares, patrulleros de poca entidad. La equivalencia en el sistema americano de combustibles debido a su cilindrada unitaria, al igual que en el caso anterior estaría entre el DMA y el DMB, con restricciones intermedias sometidas a la normativa nacional, las cuales serán detalladas posteriormente en el análisis del mismo en el punto 3.1.4.2.

3.1.4.1 Análisis del gasóleo clase B

Se ha observado que tanto el patrullero Tabarca, como la lancha de instrucción comparten combustible y distribuidor (gasóleo mar e+, distribuido por la empresa Repsol). Ante la necesidad de comprobar el cumplimiento de la normativa, se llevó a cabo un análisis del combustible en el Arsenal de Ferrol, obteniendo los siguientes resultados:

Tipo de Ensayo	Unidad	Valor	Límite
Agua y sedimentos por centrifugación	% (volumen)	0,005	Máx 0,1
Índice de cetano calculado		48,08	Mín 46
Color		Rojo	
Densidad a 15 °C	kg/l	0,839	0,82 - 0,86
Destilación punto inicial	°C	164	-
Destilación 65% recogido	°C	284	Mín 250
Destilación 80% recogido	°C	314	-
Destilación 85% recogido	°C	326	Máx 350
Destilación 95% recogido	°C	365	Máx 370
Partículas sólidas	mg/l	4,2	Máx 24
Punto de inflamación	°C	62	Mín 55
Viscosidad cinemática a 40 °C	cSt	2,4	2 – 4,5
Agua	mg/kg	39,5	Máx 200

Tabla 3-2 Resultado de análisis gasóleo B

De la Tabla 3-2 se observa que todos los valores analizados se encuentran dentro de los márgenes establecidos por la normativa y por tanto el combustible es apto para el servicio.

Se ha estudiado que el límite de azufre establecido por el convenio Marpol para buques a partir de 2012 y hasta 2020 es del 3,5% en masa y el real decreto para regulación de los combustibles de uso marítimo lo restringe hasta el 1% en masa. A pesar de no conocer la cantidad de azufre en porcentaje en masa de combustible, en base al resultado de las mediciones y que el combustible fue apto para el servicio, se determinará el cumplimiento o no de la normativa relativa al azufre.

3.1.4.2 Análisis del combustible diésel marino convencional

En el caso del combustible del BAM “Furor” debido a su escasa permanencia en la Escuela Naval y que el motivo de su visita era totalmente distinto a las necesidades de este trabajo, no fue viable extraer una muestra de los tanques de combustible. Sin embargo, se solicitó el último análisis realizado antes de su botadura, realizado por el mismo laboratorio del Arsenal de Ferrol.

Resaltar que al no tratarse del mismo combustible, las restricciones en los parámetros a medir son diferentes. Del mismo modo, existe un parámetro que en el anterior combustible no era necesario estudiar, mientras que en este caso sí, por tanto, será añadido al análisis. Se trata del aspecto a 25 °C. Los resultados de dicho análisis son los mostrados en la Tabla 3-3.

Tipo de Ensayo	Unidad	Valor	Límite
Aspecto a 25 °C		Cumple	-
Agua y sedimentos por centrifugación	% (volumen)	0,005	Máx 0,1
Índice de cetano calculado		56,5	Mín 43
Color		Cumple	-
Densidad a 15 °C	kg/l	0,821	Máx 0,876
Partículas sólidas	mg/l	5,6	Máx 15
Punto de inflamación	°C	61	Mín 60
Viscosidad cinemática a 40 °C	cSt	2,5	1,7 a 4,3
Destilación punto inicial	°C	169	-
Destilación 10% recogido	°C	197	-
Destilación 50% recogido	°C	263	-
Destilación 90% recogido	°C	338	Máx 360
Destilación punto final	°C	366	Máx 388
Destilación residuo + pérdidas	% (volumen)	2,1	Máx 3

Tabla 3-3 Resultado análisis DFM

En la sección de observaciones y recomendaciones del laboratorio recalcan además que el análisis microbiológico resultó negativo y califican al combustible como útil para el servicio. Como se puede observar, todos los valores analizados entran dentro del rango de la normativa en mayor o menor medida y, por tanto, el combustible recibe la calificación de apto para el servicio. En este caso, el azufre tampoco pudo ser analizado y por ello el único dato del que dispondremos serán las emisiones de SO₂ tomadas de cada plataforma.

3.2 Aparato de medición empleado

3.2.1 Testo 340 Professional

Para el análisis de los gases de escape de las plataformas vistas anteriormente, se ha empleado el equipo analizador de productos de combustión Testo 340 Professional. Este instrumento de medición portátil, que realiza un análisis exhaustivo de los productos de una combustión, está fabricado especialmente para su uso en motores turbinas de gas, control de plantas de combustión a nivel industrial, al igual que quemadores y calderas pertenecientes a dicho sector.



Figura 3-12 Testo 340

Además, el sistema tiene capacidad de medir caudal y flujo másico de la corriente de gases de escape, así como presiones y exceso de aire del sistema, aunque para ello se necesiten unos elementos

complementarios al equipo. En este trabajo, se empleará la función de análisis de los gases de escape, para la cual se usarán cuatro sondas instaladas dentro del sistema, siendo empleada cada una de ellas para la medición de SO₂, NO_x, O₂ y CO respectivamente. Las características anteriormente reseñadas hacen del instrumento un aparato profesional que se adapta a las necesidades presentes en este trabajo.

3.2.2 Preparación previa del equipo

Con anterioridad a la medición es necesario definir una serie de consideraciones que afectarán al desarrollo de todo el proceso de medición.

En primer lugar y por razones de seguridad de los componentes del aparato de medida se han limitado los valores máximos de tres de los parámetros a medir, siendo estos el monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO₂) y monóxido de nitrógeno (NO). Esto quiere decir que en el caso de que el equipo se exponga a un flujo de gases cuya composición en alguno de los parámetros anteriormente mencionados sea superior al límite establecido, el sistema automáticamente bloqueará el termopar, protegiendo los sensores contra rangos excesivos.

Los valores tomados como límite para los gases citados anteriormente son respectivamente, 9000 ppm para el CO, 3600 ppm para el NO y 4500 ppm para el SO₂ que corresponden a un 10% menos del límite máximo de la sonda para cada uno de ellos. En otras palabras, se ha establecido un porcentaje de seguridad constante para todos los gases a medir igual a un 10% del límite total.

Un aspecto importante es la selección de los parámetros de O₂ y CO₂ de referencia que marcarán la obtención del porcentaje de CO₂. De todas las opciones de combustibles disponibles que ofrecía la sonda, la seleccionada fue el gasóleo A, al adaptarse sus valores de referencia a los requeridos por el combustible diésel marino, ya que no permitía seleccionar gasóleo B. Para el CO₂ su valor de referencia fue 15,5% y para el O₂, 3%.

Por otra parte, en función del gas que queramos medir la sonda tendrá una resolución u otra. En nuestro caso, para los gases que son objeto de medición, la resolución siempre será de 1 ppm y en el caso de la temperatura, 0,1 °C.

En lo que a la exactitud de la sonda se refiere, igualmente su valor variará dependiendo del tipo de gas. Los valores de exactitud son los siguientes: para el CO, ±10ppm hasta 200 ppm y ±20 ppm desde 201 ppm hasta 10000 ppm (que usualmente será nuestro caso), para NO, ±5 ppm y para SO₂, ±10 ppm. El flujo másico por su parte, al ser una medida tomada de forma indirecta, su exactitud dependerá de la exactitud de los valores que se han empleado para su cálculo y se medirá en todo momento en kg/h. A modo de resumen se ha elaborado la Tabla 3-4, para aportar una visión rápida de los ajustes y datos previos a tener en cuenta.

	Valor a medir	Expresión numérica
Valores límite	CO	9000
	NO	3600
	SO ₂	4500
Parámetros de referencia	O ₂	3%
	CO ₂	15,50%
Resolución	Concentración	1 ppm
	Temperatura	0,1 °C
Exactitud	CO	±10 ppm (<200 ppm)
		±20 ppm (>200 ppm)
	NO	±5 ppm
	SO ₂	±10 ppm

Tabla 3-4 Resumen de los ajustes previos a la medición

Para obtener más información sobre otros parámetros de la sonda, véase el Anexo I: Características Generales del Equipo de Medición.

3.3 Proceso de medición

La obtención de las diferentes mediciones no fue del mismo modo en cada plataforma, debido a la desigual disponibilidad de orificios en el escape por los cuales introducir la sonda. Por una parte, fue posible localizar un orificio útil para el proceso de medición en las lanchas de instrucción y en el BAM Furor, sin embargo, en el Tabarca, por razones de antigüedad en la estructura de su extracción, no fue viable realizar una perforación para introducir la sonda, con lo cual, tuvo que ser realizada desde la chimenea.

La medición realizada en los emplazamientos tuvo un objetivo principal: la obtención de las concentraciones de NO_x (y dentro de la misma la de NO), CO , SO_2 . A continuación, se mostrará el proceso realizado en cada plataforma.

3.3.1 Medición en el patrullero P-28 Tabarca

En primer lugar es necesario reseñar que la medición realizada en esta plataforma tuvo lugar en una única fase debido a las necesidades del propio buque.

El período de medición tuvo lugar en la mañana del 21 de enero durante una salida rutinaria del patrullero. Las mediciones realizadas se repitieron tres veces para minimizar el error obtenido con la media aritmética de los valores y con un tiempo de espera de un minuto en cada una de ellas para garantizar la exactitud de las mediciones al 90%. Como se ha expresado anteriormente, la imposibilidad de realizar un orificio para la introducción de la sonda en el tubo de extracción de la cámara de máquinas redujo las opciones a realizar el análisis en la chimenea directamente y aplicar posteriormente las correcciones de temperatura y humedad. La sonda se situó en el punto central de la abertura circular del escape, apoyada en su superficie para introducir el termopar lo más profundamente que la estructura permitiese, consiguiendo de esta manera que el aire fluyera con total libertad a través del termopar y obtener una medida lo menos diluida posible por el aire.

En primer lugar, unos tres minutos aproximadamente tras el arranque del motor principal, se tomaron medidas al ralentí. Se esperó convenientemente ese tiempo para evitar la saturación de la sonda por el arranque con el motor en frío. Posteriormente el buque soltó las amarras del muelle y ordenó dar atrás mínima para salir de la dársena de la Escuela Naval Militar, momento en el cual se tomaron mediciones por segunda vez.

Una vez que la maniobra de desatraque hubo finalizado comienza la navegación a lo largo de la ría de Pontevedra. El recorrido llevado a cabo fue el descrito en la Figura 3-13. Navegando una distancia de quince millas y con una duración de tres horas aproximadamente se estuvieron tomando mediciones organizadas en dos grupos diferentes. El hecho de que hubiese únicamente un motor principal permitió realizar una comparación entre las emisiones obtenidas en función de la velocidad del buque y las emitidas según las revoluciones del motor.

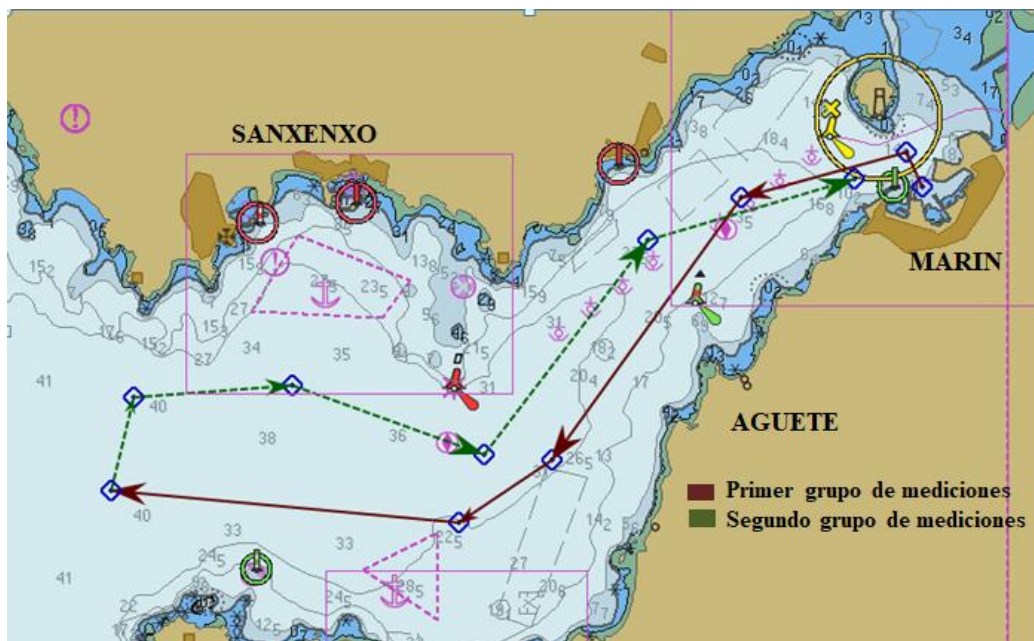


Figura 3-13 Recorrido realizado durante la toma de mediciones en el patrullero Tabarca

Posteriormente se realizó un primer grupo de mediciones en las que se tomaron valores de los gases de escape en función de la velocidad del buque. Se tomó el valor de concentración de los gases objeto de medición a 2,5, 4, 6, 8 y 10 nudos respectivamente tanto en la chimenea de escape del motor principal, como en la del auxiliar. Del mismo modo, se mantuvo un registro de la presión atmosférica, la temperatura y la humedad para aplicar posteriormente las correcciones pertinentes según el código técnico de NO_x .

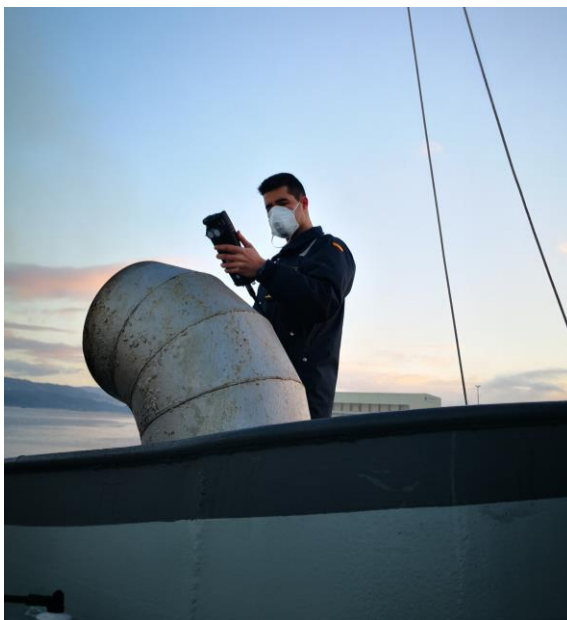


Figura 3-14 Toma de mediciones en la chimenea del P-28 Tabarca

En el segundo grupo de mediciones se tomaron mediciones, en los mismos lugares y empleando el mismo procedimiento, en este caso en función de las revoluciones del motor, tomando medidas a 800, 900, 1000, 1100 y 1200 revoluciones respectivamente.

La elección de las velocidades y revoluciones máximas fueron designadas por el comandante para asegurar el correcto funcionamiento del motor y evitar averías, por lo que el motor no fue llevado a su máxima capacidad.

Conforme se tomaban las mediciones, se capturaba la pantalla con el análisis del flujo de datos ya estable y se procedía a su impresión directa, obteniendo así la prueba sobre papel de cada una de las mediciones tomadas, al mismo tiempo que la hora exacta a la que se realizaba la medición, la temperatura ambiente y la temperatura de los gases de escape.

Una vez que todas las mediciones fueron tomadas se organizaron los resultados de las mismas según si la medida pertenecía al motor auxiliar o principal y según si la medida estaba tomada siguiendo revoluciones o nudos.

3.3.2 Medición en la lancha GM Salas

La toma de mediciones en la lancha de instrucción citada se llevó a cabo, por un lado, el día 21 de febrero, en uno de los motores principales con carga y, en segundo lugar, el día 22 de febrero en el mismo motor en vacío. El objetivo en esta ocasión, fue obtener datos para certificar a los motores en ambas situaciones. Destacar que la salida a la mar se produjo durante una salida de adiestramiento de los alumnos, con lo cual, hubo que adaptarse a las condiciones exigidas por el calendario de ejercicios.

Una de las particularidades concretas que tuvo el análisis de esta plataforma, fue que el agua de refrigeración de los motores principales se expulsaba por el mismo conducto de extracción que los gases de escape y, por tanto, el termopar estuvo en contacto con agua en todo momento. Esto no supuso un problema ya que la sonda estaba preparada para ello, incorporando un pequeño tanque para condensados, que hubo que ir vaciando periódicamente durante la medición, para evitar la sobrecarga de agua. A pesar de ello, el proceso de medición no fue igual de cómodo que en el resto de plataformas debido al espacio reducido, el movimiento del barco y la citada agua de refrigeración. Dicha situación se aprecia en la Figura 3-15.



Figura 3-15 Toma de medidas en la GM Salas

Para poder introducir la sonda, en primer lugar fue necesario desenroscar el pirómetro conectado para la medición de temperatura de los gases de escape. Una vez estuvo apartado, se reguló la sonda al tubo de extracción, el cual fue el más estrecho de los tres y se introdujo manteniéndose estable sin necesidad de sujeción adicional.

Durante la primera medición realizada, en torno a las 16:00 del día 21, se arrancaron los motores principales y se tomaron medidas al ralentí, para observar la variación de concentración durante los primeros minutos y el comportamiento durante el arranque en frío. Tras dicha medición, se produjo la desatracada y comenzó la navegación. Fue al comienzo de la misma, donde se produjo la toma de mediciones con el motor con carga, durante un ejercicio de navegación de precisión, en donde se pudo alterar la velocidad sin perjudicar la correcta realización del mismo. Una vez finalizadas las

mediciones, la dotación continuó su adiestramiento al sur de Sanxenxo hasta las 18:30, hora en la que se atracó de nuevo en la Escuela Naval. En la Figura 3-16 se observa una visión general del recorrido realizado.

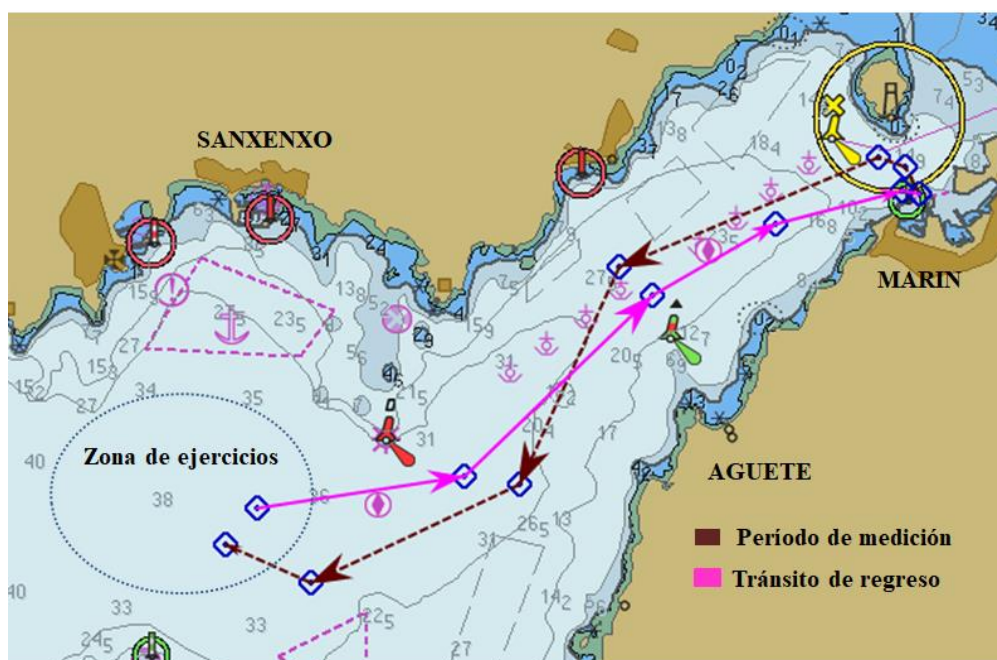


Figura 3-16 Recorrido realizado durante la toma de mediciones en la lancha GM Salas

Las mediciones realizadas consistieron, al igual que en la plataforma anterior, en tres medidas a unas determinadas revoluciones, para posteriormente realizar la media aritmética. Las revoluciones a evaluar fueron, respectivamente, 600, 800, 1000, 1200 y 1400 y 1600, obteniendo, de ese modo, la evolución en las emisiones de los gases en función de las revoluciones.

La poca disponibilidad de tiempo junto con el hecho de que, al tener dos motores principales, la velocidad no iría acorde con las revoluciones de cada motor por separado, no se tomaron medidas según la velocidad del buque. Igualmente, los motores auxiliares no pudieron ser evaluados, al no disponer de orificio específico para ello debido, principalmente, al reducido tamaño del motor auxiliar generador.

El día 22 se produjo del mismo modo, esta vez con el motor en vacío y con la lancha en puerto, es decir, el motor no estaba acoplado al eje y, por tanto, se pudo observar el comportamiento del mismo a diferentes revoluciones pero sin carga.

Los valores fueron recogidos y ordenados en tablas para su posterior análisis. De esta manera finalizó la toma de mediciones en esta plataforma.

3.3.3 Medición en el BAM P-46 Furor

El proceso de medición en este buque también fue realizado en dos períodos aunque, a diferencia de la medición realizada en el patrullero Tabarca, éstas fueron en el mismo día.

En primer lugar, en la mañana del día 13 de febrero, el buque se disponía a salir a la mar para realizar mediciones de su firma radar. El arranque de los motores principales estaba previsto para las 07:30 con lo que previamente se embarcó todo el material en el patrullero. En esta primera ocasión tan sólo se tomaron mediciones del motor principal de babor, para agilizar la salida a la mar del buque. Para la medición se introdujo la sonda en el punto indicado de la extracción, calculando la mitad del diámetro del tubo para que el termopar estuviese lo más próximo al centro del mismo, en donde el flujo de gases es máximo. A continuación, se produjo el arranque del motor, y se tomaron mediciones

de concentración de gases de escape al ralentí, con intervalos de un minuto desde su arranque. El objetivo en este caso fue observar la curva realizada por el flujo de gases durante su arranque hasta 8 minutos aproximadamente después del mismo, con lo cual se realizaron 7 mediciones en total. El procedimiento, en este caso, fue el indicado debido a la imposibilidad de adaptar el buque al proceso de medición del Código Técnico de los NO_x en esta primera medición. Tras la misma, se procedió a desembarcar el equipo, para permitir la navegación programada del buque durante la mañana.

A las 19:00 se embarcó de nuevo, y se tomaron mediciones en el mismo punto, en este caso, tanto en el motor de babor como en el de estribor, como se observa en la Figura 3-17. Destacar que, al igual que en las lanchas de instrucción, en este caso no fue necesario aplicar correcciones de temperatura y humedad debido a que las mediciones fueron realizadas en el interior de la cámara de máquinas. En cuanto al procedimiento de medición en este caso, cabe reseñar que el patrullero se adaptó en la medida de lo posible, pudiendo tomar las mediciones de forma ordenada. Se tomaron datos de concentración de emisiones, de cada motor, y para diferentes valores de la palanca de avance de máquinas, situada en el puente. Los valores de palanca elegidos fueron 2, 4, 6 y 7, lo que equivale a 500, 550, 800, 950 rpm, para no revolucionar en exceso los motores. Con ello, puede observarse que existe un salto considerable de revoluciones entre los diferentes valores de palanca, aumentando en 250 rpm de la palanca 4 a la 6. Mientras se producía la toma de mediciones de uno de los motores, previamente el otro se paraba. Del mismo modo, se tomaron tres mediciones con un minuto de intervalo entre ambas para cada valor de palanca, para posteriormente realizar la media aritmética.



(a)



(b)

Figura 3-17 Proceso de medición en el BAM en motor de babor (a) y motor de estribor (b)

En este caso no se tomaron mediciones en base a la velocidad del buque, debido a que el objetivo de la navegación nocturna en concreto era el adiestramiento de los alumnos de la Escuela Naval Militar y hubo que adaptarse a lo estipulado por el comandante. Igualmente, tampoco se analizaron los motores auxiliares generadores, al no disponer de orificio específico para ello. Resaltar que el recorrido realizado durante la noche fue a lo largo de las Rías Baixas, delimitando al norte con la Ría de Arosa y al sur, con la Ría de Vigo de 19:30 del día 13 de febrero a las 08:00 del 14. Específicamente, el período de medición abarcó desde las 22:30 hasta las 23:50 aproximadamente. Reseñar que, entre el período de medición del motor de babor y de estribor, hubo un tiempo de espera, al tener que arrancar el motor parado y parar el que estaba en funcionamiento. Tras él, comenzó la fase

de patrullaje y adiestramiento de los alumnos embarcados durante toda la noche, realizando el mismo tramo de navegación costera en varias ocasiones. El tramo de medición recorrido fue el indicado en la Figura 3-18.

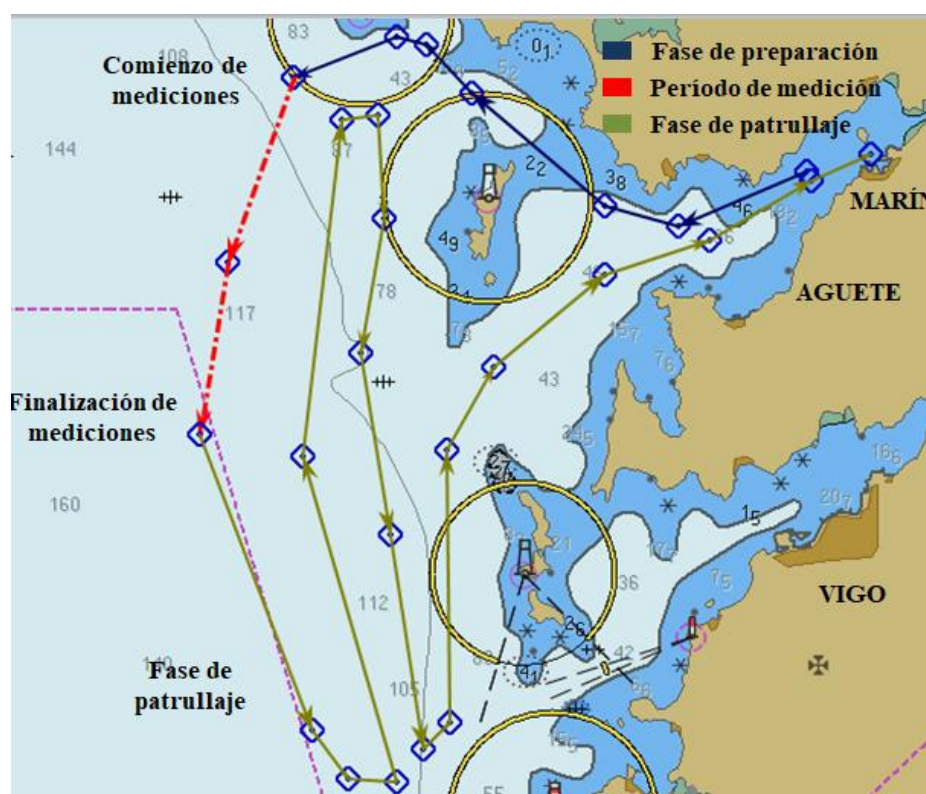


Figura 3-18 Recorrido realizado durante la toma de mediciones en el BAM Furor

4 RESULTADOS

4.1 Patrullero P-28 “Tabarca”

Como se ha expresado previamente los resultados del patrullero Tabarca se obtuvieron en un único período de medición realizado el 21 de enero. Los resultados están divididos según si pertenecen al motor principal o al auxiliar generador. A continuación se detallarán los resultados obtenidos, comprobando al mismo tiempo si cumplen con la normativa vigente tanto nacional como internacional.

4.1.1 Emisiones del motor principal (MP)

En las próximas líneas se mostrarán los resultados de las mediciones obtenidos en los dos grupos de medición, para el motor principal. Se expresarán medidas de concentración y, posteriormente, se mostrará el valor de flujo másico obtenido, realizando los cálculos necesarios para comprobar si coinciden con el límite establecido por la normativa.

4.1.1.1 Mediciones en función de la velocidad del buque

Los resultados adquiridos durante el primer período se tomaron en función de los nudos y posteriormente según las revoluciones del buque como ya se ha explicado, sin olvidar que antes de que el buque saliese a la mar se tomaron medidas del motor al ralentí y durante la desatraca, dando atrás mínima. Se comenzará por tanto mostrando los resultados obtenidos en estos dos primeros casos y posteriormente los conseguidos durante la navegación en nudos:

MOTOR PRINCIPAL A RALENTÍ

Valores a medir	M1 (09:17:35)	M2 (09:19:41)	M3 (09:24:40)	Valor medio	Valor corregido
T _{gas} (°C)	86,0	91,3	95,0	90,8	
T _{ambiente} (°C)	6,7	7,2	7,3	7,0	
CO (ppm)	1563	1513	1423	1499,7	
NO (ppm)	40	38	30	36,0	43,7
NOx (ppm)	42	40	31	37,7	45,7
SO ₂ (ppm)	0	0	2	0,7	

Tabla 4-1 Emisiones MP Tabarca a ralentí

Unos 10 minutos después de arrancar el principal, se toman las mediciones dando atrás mínima para separar el barco del muelle, obteniendo los siguientes resultados:

MOTOR PRINCIPAL EN ATRÁS MÍNIMA

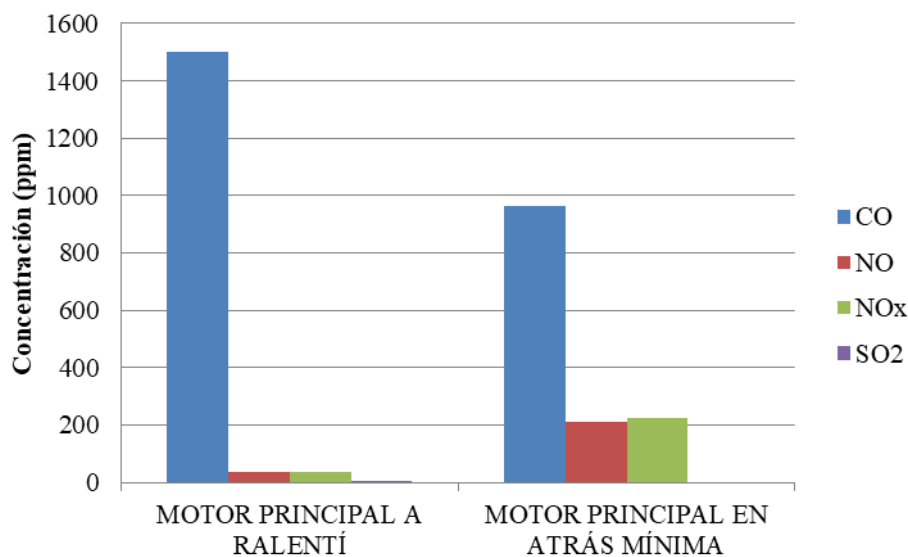
Valores a medir	M1 (09:37:22)	M2 (09:38:06)	M3 (09:39:08)	Valor medio	Valor corregido
T _{gas} (°C)	138,7	139,3	125,5	134,5	
T _{ambiente} (°C)	7,4	7,8	8,3	7,8	
CO (ppm)	895	999	998	964,0	
NO (ppm)	265	192	183	213,3	290,0
NOx (ppm)	278	202	192	224,0	304,5
SO ₂ (ppm)	0	0	0	0	

Tabla 4-2 Emisiones MP Tabarca atrás mínima

Con el motor en frío se toma la primera medición a ralentí apenas varios minutos tras el arranque, observándose los altos valores de CO de la Tabla 4-1, lo cual es habitual durante el tiempo en el que un motor estándar se está calentando. Se comprueba que a medida que se van sucediendo las mediciones el valor de CO disminuye, al comienzo drásticamente ya que en cuestión de 15 minutos, durante la medición en la desatracada, se reduce su valor en torno a 500 ppm (32%) y más adelante su valor decrece de forma progresiva.

En lo que respecta a los óxidos de nitrógeno (en su mayor parte de NO) se aprecia que su valor con el motor a ralentí es mínimo, en torno a 40 ppm, algo normal debido a la baja temperatura del motor. Su valor aumenta considerablemente cuando el motor da atrás para la desatracada hasta más de 200 ppm ya que el motor pasa a aumentar revoluciones.

En cuanto al SO₂ la sonda detectó una ligera presencia durante el arranque probablemente debido a la mala combustión inicial. A pesar de ello su valor no superó los 2 ppm y el aspecto de los gases era correcto. Los valores de las mediciones tomadas durante el arranque y desatracada pueden quedar resumidos en la Figura 4-1.

**Figura 4-1 Emisiones del MP del Tabarca durante arranque y desatracada**

Una vez finalizada la desatracada, se toman los resultados correspondientes al primer grupo de mediciones, manteniendo una velocidad determinada para cada una de ellas, siendo 2'5, 4, 6, 8 y 10 nudos y obteniendo los siguientes valores:

MOTOR PRINCIPAL EN AVANTE 2,5 NUDOS

Valores a medir	M1 (09:57:29)	M2 (09:58:13)	M3 (09:58:49)	Valor medio	Valor corregido
T _{gas} (°C)	139,9	143,8	144,2	142,6	
T _{ambiente} (°C)	11,9	12,3	11,1	11,8	
CO (ppm)	893	897	898	896,0	
NO (ppm)	157	159	160	158,7	159,1
NO _x (ppm)	165	167	168	166,7	167,1
SO ₂ (ppm)	0	0	0	0	

Tabla 4-3 Emisiones MP Tabarca en avante 2,5 nudos

En la Tabla 4-3 se aprecia como la temperatura de los gases de escape aumenta mejorando la combustión y generando menos inquemados (CO) aunque similares a los obtenidos dando atrás. Las emisiones de NO_x disminuyen en este intervalo, ya que el buque necesita más revoluciones al dar atrás mínima que al dar avante mínima por su propio funcionamiento.

MOTOR PRINCIPAL EN AVANTE 4 NUDOS

Valores a medir	M1 (10:11:13)	M2 (10:12:14)	M3 (10:13:16)	Valor medio	Valor corregido
T _{gas} (°C)	146,7	145,0	145,9	145,9	
T _{ambiente} (°C)	14,5	15,1	17,5	15,7	
CO (ppm)	866	882	891	879,7	
NO (ppm)	200	193	193	195,3	200,0
NO _x (ppm)	210	203	203	205,3	210,2
SO ₂ (ppm)	0	0	0	0	

Tabla 4-4 Emisiones MP Tabarca en avante 4 nudos

Al aumentar a cuatro nudos analizando la Tabla 4-4, aumenta ligeramente la temperatura de los gases y disminuye el CO igualmente en pequeñas proporciones. Por el contrario, sí que se puede observar un mayor aumento de los NO_x pasando de 167 a 205 ppm (22,7%) lo cual en proporción es bastante, seguramente debido a que un aumento de las revoluciones del motor de 2,5 a 4 nudos, al pasar de avante mínima a prácticamente duplicar la velocidad, hace que la combustión del motor genere más NO_x de forma drástica y aumente la temperatura.

MOTOR PRINCIPAL EN AVANTE 6 NUDOS

Valores a medir	M1 (10:22:06)	M2 (10:23:17)	M3 (10:24:20)	Valor medio	Valor corregido
T _{gas} (°C)	150,6	148,3	148,3	149,1	
T _{ambiente} (°C)	21,1	18,5	21,5	20,4	
CO (ppm)	864	863	870	865,7	
NO (ppm)	223	214	215	217,3	233,6
NO _x (ppm)	234	225	226	228,3	245,4
SO ₂ (ppm)	0	0	0	0	

Tabla 4-5 Emisiones MP Tabarca en avante 6 nudos

A los seis nudos, en la Tabla 4-5, el CO se mantiene constante, únicamente se reduce en 10 ppm lo cual en proporción es prácticamente despreciable. Los NO_x continúan aumentando progresivamente en una proporción similar hasta las 245 ppm (16,3%).

MOTOR PRINCIPAL EN AVANTE 8 NUDOS

Valores a medir	M1 (10:33:53)	M2 (10:34:55)	M3 (10:36:08)	Valor medio	Valor corregido
T _{gas} (°C)	150,0	153,9	159,3	154,4	
T _{ambiente} (°C)	20,6	20,6	23,4	21,5	
CO (ppm)	762	793	778	777,7	
NO (ppm)	309	298	319	308,7	335,1
NO _x (ppm)	324	313	335	324,0	351,8
SO ₂ (ppm)	0	0	0	0	

Tabla 4-6 Emisiones MP Tabarca en avante 8 nudos

Comprobando la Tabla 4-6, la temperatura de los gases se ha estabilizado, ya que nos encontramos en el rango de velocidades óptimo del buque (de 6 a 8 nudos) y por tanto más eficiente. El CO se reduce en gran medida (decremento de 100 ppm equivalente a un 11,5%) y similar aumento pronunciado de los NO_x hasta las 351 ppm (30,2%).

MOTOR PRINCIPAL EN AVANTE 10 NUDOS

Valores a medir	M1 (10:49:41)	M2 (10:51:57)	M3 (10:53:46)	Valor medio	Valor corregido
T _{gas} (°C)	238,0	244,8	245,5	242,8	
T _{ambiente} (°C)	16,9	16,1	16,2	16,4	
CO (ppm)	562	571	565	566,0	
NO (ppm)	368	358	363	363,0	375,4
NO _x (ppm)	386	376	381	381,0	394,0
SO ₂ (ppm)	25	26	28	26,3	

Tabla 4-7 Emisiones MP Tabarca en avante 10 nudos

Al llegar a los diez nudos, en la Tabla 4-7 se observa como dato principal la presencia de SO₂ por primera vez. Destacar del mismo modo que a esta velocidad (considerada máxima por las limitaciones del buque) las emanaciones de NO_x no alcanzan las 400 ppm.

De todos los datos mostrados se pueden obtener diferentes impresiones. En primer lugar, se observa que las mediciones se tomaron en una franja horaria de una hora y treinta minutos aproximadamente (teniendo en cuenta el desatraque) con lo que se aprecia el aumento de temperatura progresivo con una diferencia de casi diez grados entre la primera y la última medición, lo cual afectará a la corrección por temperatura y humedad.

Una vez dio comienzo la navegación a través de la Ría de Pontevedra, los valores de CO se estabilizan entre las 800 y 900 ppm reduciéndose progresivamente hasta llegar a los 550 ppm aproximadamente en la última medición, achacando su valor al aumento de temperatura del motor al aumentar las revoluciones.

En lo concerniente a los óxidos de nitrógeno, se observa como su valor aumenta de forma gradual y aproximadamente lineal conforme aumenta la velocidad del buque, reacción normal dentro de lo esperado para el motor estudiado y obteniendo como valor máximo 394 ppm. Es interesante apreciar que con cada aumento de dos nudos, el valor de los NO_x aumenta ligeramente de 20 a 40 ppm al comienzo (hasta los 6 nudos) y es a partir de la medición a 8 nudos cuando su valor crece radicalmente en torno a 100 ppm, aumentando en gran medida de nuevo a los 10. Además, se denota que la proporción de NO con respecto al total de NO_x se mantiene prácticamente constante en todas las medidas. Destacar que las correcciones por temperatura y humedad de los óxidos de nitrógeno se realizaron aplicando la Ecuación 2.1, obteniendo los resultados de la Tabla 4-8. Es de importancia reseñar que, para pasar de humedad relativa, obtenida de la crónica el buque, a humedad específica se empleó el diagrama psicrométrico para presión de 1 atm.

	MP 2,5	MP 4	MP 6	MP 8	MP 10
Temperatura (° C)	11,8	15,7	20,4	21,5	16,4
Humedad relativa (%)	87	87	87	87	87
Humedad específica (g H ₂ O/kg aire seco)	7,6	9,7	13,4	14,2	10,4
Corrección NO _x	1,002	1,024	1,075	1,085	1,034

Tabla 4-8 Correcciones por temperatura y humedad MP (I)

Finalmente destacar que no se apreció en ningún momento presencia de óxidos de azufre hasta atravesar la franja de los diez nudos en la cual se obtuvieron unos 26 ppm aproximadamente, un valor ínfimo de este compuesto lo que denota un aspecto positivo tanto por parte del combustible como del motor. Los valores de las mediciones tomadas durante la navegación realizadas siguiendo una velocidad constante para cada medición, se pueden resumir en la Figura 4-2.

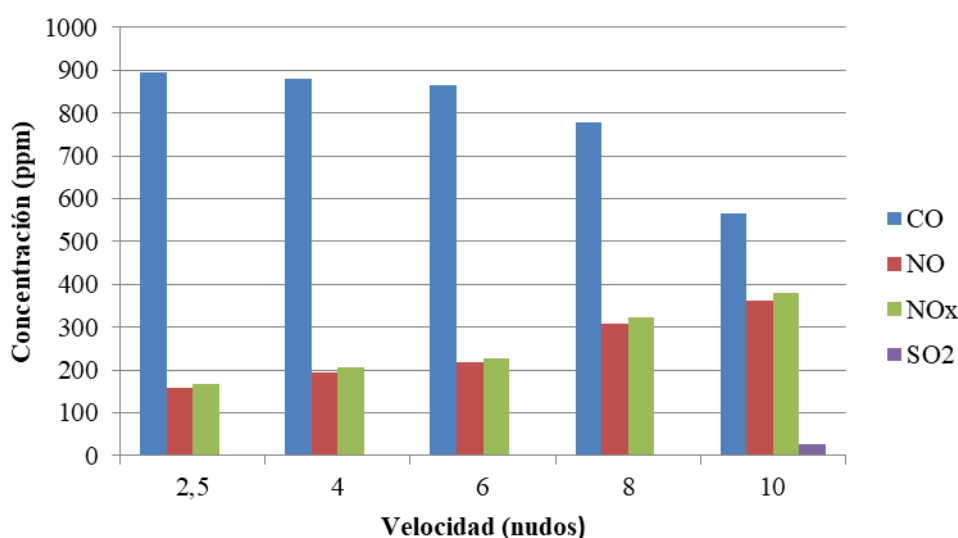


Figura 4-2 Emisiones del MP del Tabarca a velocidades constantes

4.1.1.2 Mediciones en función de las revoluciones del motor

Una vez finalizada la toma de datos manteniendo una velocidad determinada para cada medición se procede de la misma manera, en este caso, con revoluciones constantes para cada medición, siendo las cuales 800, 900, 1000, 1100 y 1200 revoluciones, obteniendo los siguientes resultados tabulados:

MOTOR PRINCIPAL EN AVANTE 800 RPM					
Valores a medir	M1 (11:05:05)	M2 (11:06:02)	M3 (11:07:05)	Valor medio	Valor corregido
T _{gas} (°C)	179,9	175,1	173,3	176,1	
T _{ambiente} (°C)	18,0	17,8	16,3	17,4	
CO (ppm)	892	906	910	902,0	
NO (ppm)	192	181	177	183,0	190,8
NO _x (ppm)	202	190	186	192,0	200,6
SO ₂ (ppm)	0	0	0	0	

Tabla 4-9 Emisiones MP Tabarca a 800 rpm

Comenzando con la Tabla 4-9, el primer factor a tener en cuenta es que el motor ya está a temperatura de funcionamiento a diferencia de la medición tomada a 2,5 nudos. Si bien el CO aumenta y el NO_x disminuye al reducir revoluciones hasta llegar a 800, existe más concentración de NO_x y

menos concentración de CO si lo comparamos con las emanadas a 2,5 nudos, alcanzando estas últimas las 200 ppm.

MOTOR PRINCIPAL EN AVANTE 900 RPM

Valores a medir	M1 (11:17:31)	M2 (11:18:42)	M3 (11:19:43)	Valor medio	Valor corregido
T _{gas} (°C)	180,1	181,6	181,5	181,1	
T _{ambiente} (°C)	18,2	18,1	17,5	17,9	
CO (ppm)	848	852	851	850,3	
NO (ppm)	216	211	209	212,0	220,5
NO _x (ppm)	227	222	219	222,7	231,6
SO ₂ (ppm)	0	0	0	0	

Tabla 4-10 Emisiones MP Tabarca a 900 rpm

En esta ocasión, en la Tabla 4-10 se observa que el CO se ve reducido en 50 ppm (5,6%) y el NO_x aumenta unas 30 ppm (12,9%) siguiendo de forma similar el patrón observado habitualmente en la medición anterior. Se aprecia adicionalmente que la temperatura se mantiene constante.

MOTOR PRINCIPAL EN AVANTE 1000 RPM

Valores a medir	M1 (11:29:38)	M2 (11:30:37)	M3 (11:31:25)	Valor medio	Valor corregido
T _{gas} (°C)	204,1	205,0	202,9	204,0	
T _{ambiente} (°C)	17,7	18,0	17,6	17,8	
CO (ppm)	783	782	788	784,3	
NO (ppm)	213	208	204	208,3	216,9
NO _x (ppm)	224	218	214	218,7	227,6
SO ₂ (ppm)	0	0	0	0	

Tabla 4-11 Emisiones MP Tabarca a 1000 rpm

Lo primero que denota la Tabla 4-11 es un aumento de 20 °C en la temperatura de los gases e igualmente que el CO se reduce unas 50 ppm (6,3%) como habitualmente, sin embargo lo interesante de esta medición es el valor de los NO_x, ya que se mantiene constante e incluso se reduce unas 3 ppm probablemente debido a que el motor se encuentra en las revoluciones óptimas de funcionamiento al igual que se apreciaba entre los 6 y 8 nudos.

MOTOR PRINCIPAL EN AVANTE 1100 RPM

Valores a medir	M1 (11:44:14)	M2 (11:45:15)	M3 (11:46:09)	Valor medio	Valor corregido
T _{gas} (°C)	238,5	238,6	237,4	238,2	
T _{ambiente} (°C)	18,7	18,9	18,9	18,8	
CO (ppm)	727	743	742	737,3	
NO (ppm)	209	204	200	204,3	215,3
NO _x (ppm)	219	214	210	214,3	225,9
SO ₂ (ppm)	0	0	0	0	

Tabla 4-12 Emisiones MP Tabarca a 1100 rpm

En la Tabla 4-12 se observa que el CO continúa reduciéndose en proporción y el NO_x se mantiene constante, probablemente debido a que un aumento de 100 revoluciones no implica un aumento tan grande de velocidad y por ello las emisiones son prácticamente constantes.

MOTOR PRINCIPAL EN AVANTE 1200 RPM

Valores a medir	M1 (12:00:39)	M2 (10:51:57)	M3 (10:53:46)	Valor medio	Valor corregido
T _{gas} (°C)	279,9	279,5	280,0	279,8	
T _{ambiente} (°C)	23,9	21,5	18,3	21,2	
CO (ppm)	718	697	693	702,7	
NO (ppm)	241	225	220	228,7	224,4
NO _x (ppm)	253	236	231	240,0	235,5
SO ₂ (ppm)	57	43	37	45,7	

Tabla 4-13 Emisiones MP Tabarca a 1200 rpm

A partir de 1200 rpm, en la Tabla 4-13, el CO comienza a estabilizarse, mientras que los NO_x remontan su crecimiento, aunque no en gran medida hasta emitir como máximo 235 ppm mucho menores que las casi 400 ppm emanadas a 10 nudos. Destacar también la presencia de SO₂ al igual que ocurría a 10 nudos, en una concentración de 46 ppm.

En esta segunda tanda de mediciones uno de los factores globales que afectará a los datos de NO_x es el aumento considerable de la temperatura ambiente a lo largo de la mañana, ya que la mediciones fueron tomadas casi una hora después que las primeras. Estas correcciones se llevaron a cabo con el mismo procedimiento del código técnico de los NO_x obteniéndose como resultados los mostrados en la Tabla 4-14.

	MP 800	MP 900	MP 1000	MP 1100	MP 1200
Temperatura (°C)	17,4	17,9	17,8	18,8	21,2
Humedad relativa (%)	87	87	87	87	54
Humedad específica (g _{H2O} /kg aire seco)	11	11,1	11,1	12	8,75
Corrección NO _x	1,041	1,040	1,041	1,053	0,981

Tabla 4-14 Correcciones por temperatura y humedad MP (II)

Como valoración global se aprecia que las emisiones de NO_x a máximas revoluciones son menores que las tomadas a máxima velocidad. La razón por la diferencia apreciable entre el máximo número de emisiones de NO_x reside en la incorporación de una tercera variable, el paso de la hélice. El paso de la hélice es un factor que no se ha mencionado previamente y que es necesario para que el buque alcance una velocidad determinada. De esta manera, el buque, manteniendo revoluciones constantes, puede modificar su velocidad alterando el paso de la hélice, lo que explica la diferencia entre ambos valores.

De esta medición también destaca la estabilización final del CO y el valor prácticamente constante de las emisiones de NO_x a partir de 1000 rpm. A continuación, se muestra una gráfica resumen de las mediciones en la Figura 4-3.

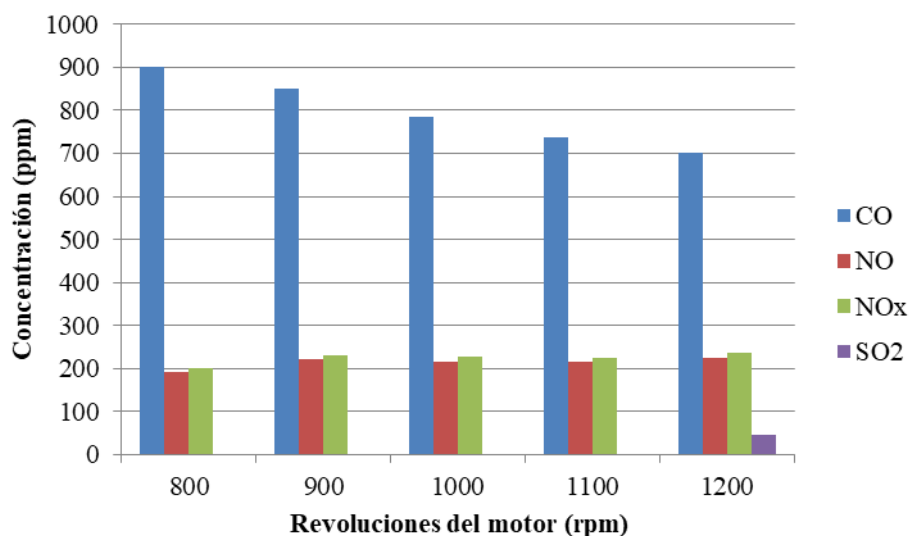


Figura 4-3 Emisiones del MP del Tabarca a revoluciones constantes

Con ella finalizan los datos obtenidos durante la medición en esta plataforma en lo que respecta a su motor principal.

4.1.2 Emisiones del motor auxiliar (MA)

Teniendo en cuenta las características estudiadas de este motor y siendo conscientes de las diferencias en el funcionamiento apreciables en comparación con el motor principal es de esperar resultados dispares en este caso. La antigüedad del motor (1981) jugará un papel importante en sus emisiones sobre todo en el ámbito de los óxidos de nitrógeno. A continuación, se muestran los diferentes períodos de medición en los que se tomaron medidas del motor auxiliar, para un determinado régimen del motor principal.

4.1.2.1 Mediciones simultáneas al MP en función de la velocidad

Remontando al día 21 de enero, de manera casi simultánea a la que se tomaban mediciones en el motor principal, se tomaban en el auxiliar generador cuyo escape se encuentra junto al emplazamiento del principal. Comenzando con las mediciones tomadas a velocidad constante, los resultados fueron los siguientes:

MOTOR AUXILIAR CON MP EN AVANTE 2,5 NUDOS

Valores a medir	M1 (10:00:27)	M2 (10:04:48)	M3 (10:06:59)	Valor medio	Valor corregido
T _{gas} (°C)	250,3	259,6	256,8	255,6	
T _{ambiente} (°C)	12,1	12,4	12,2	12,2	
CO (ppm)	188	143	162	164,3	
NO (ppm)	1486	1645	1471	1534,0	1540,9
NOx (ppm)	1560	1727	1545	1610,7	1671,5
SO ₂ (ppm)	0	0	0	0	

Tabla 4-15 Emisiones MA Tabarca con MP en avante 2,5 nudos

Lo primero que resalta tras observar la Tabla 4-15 es que la temperatura de los gases de escape es mucho mayor que la del principal aunque con una concentración de inquemados mucho menor, sin alcanzar las 200 ppm de CO. En lo que respecta a los óxidos de nitrógeno, la diferencia es incomparable llegando a alcanzar más de 1600 ppm. Esta diferencia es achacable a que la tecnología de enfriamiento de los gases de escape y de regulación de emisiones del motor es ciertamente anticuada comparada con el motor principal, mucho más moderno.

MOTOR AUXILIAR CON MP EN AVANTE 4 NUDOS

Valores a medir	M1 (10:15:58)	M2 (10:17:08)	M3 (10:18:16)	Valor medio	Valor corregido
T _{gas} (°C)	248,5	247,7	246,2	247,5	
T _{ambiente} (°C)	17,1	15,6	16,7	16,5	
CO (ppm)	266	265	267	266,0	
NO (ppm)	1245	1231	1220	1232,0	1278,5
NO _x (ppm)	1307	1293	1281	1293,7	1342,5
SO ₂ (ppm)	0	0	0	0	

Tabla 4-16 Emisiones MA Tabarca con MP en avante 4 nudos

Los datos compilados en la Tabla 4-16 nos muestran que la temperatura se mantiene constante y que al aumentar velocidad en este caso aumenta la concentración de CO de forma considerable. Por otro lado, los NO_x se ven reducidos del orden de 200 ppm (11,9%) lo que denota cierta irregularidad en cuanto a este tipo de emisiones se refiere.

MOTOR AUXILIAR CON MP EN AVANTE 6 NUDOS

Valores a medir	M1 (10:27:22)	M2 (10:28:59)	M3 (10:29:58)	Valor medio	Valor corregido
T _{gas} (°C)	243,8	243,9	244,9	244,2	
T _{ambiente} (°C)	19,4	19,2	19,6	19,4	
CO (ppm)	276	259	226	253,7	
NO (ppm)	1234	1249	1351	1278,0	1356,3
NO _x (ppm)	1296	1311	1419	1342,0	1424,2
SO ₂ (ppm)	0	0	0	0	

Tabla 4-17 Emisiones MA Tabarca con MP en avante 6 nudos

Como se muestra en la Tabla 4-17 no se aprecian cambios de entidad ni en temperaturas ni en emanaciones de CO. Únicamente reseñar el remonte de las emisiones de NO_x, aumentando su valor hasta alcanzar 1424 ppm (5,7%).

MOTOR AUXILIAR CON MP EN AVANTE 8 NUDOS

Valores a medir	M1 (10:38:31)	M2 (10:39:43)	M3 (10:41:04)	Valor medio	Valor corregido
T _{gas} (°C)	244,5	244,8	244,7	244,7	
T _{ambiente} (°C)	20,4	19,6	19,9	20,0	
CO (ppm)	244	244	268	252,0	
NO (ppm)	1312	1302	1238	1284,0	1369,6
NO _x (ppm)	1378	1367	1300	1348,3	1438,2
SO ₂ (ppm)	0	0	0	0	

Tabla 4-18 Emisiones MA Tabarca con MP en avante 8 nudos

Al aumentar la velocidad hasta 8 nudos, los valores se mantienen prácticamente constantes. La Tabla 4-18 denota unos resultados muy similares a los de la Tabla 4-17 en términos de CO, NO_x, y temperaturas, muestra de que es posible que el auxiliar generador mantenga un nivel constante de emisiones a partir de una determinada velocidad.

MOTOR AUXILIAR CON MP EN AVANTE 10 NUDOS

Valores a medir	M1 (10:56:49)	M2 (10:57:54)	M3 (10:58:51)	Valor medio	Valor corregido
T _{gas} (°C)	250,9	248,3	247,3	248,8	
T _{ambiente} (°C)	19,3	18,8	19,6	19,2	
CO (ppm)	239	250	266	251,7	
NO (ppm)	1346	1263	1232	1280,3	1354,6
NO _x (ppm)	1413	1326	1294	1344,3	1422,4
SO ₂ (ppm)	0	0	0	0	

Tabla 4-19 Emisiones MA Tabarca con MP en avante 10 nudos

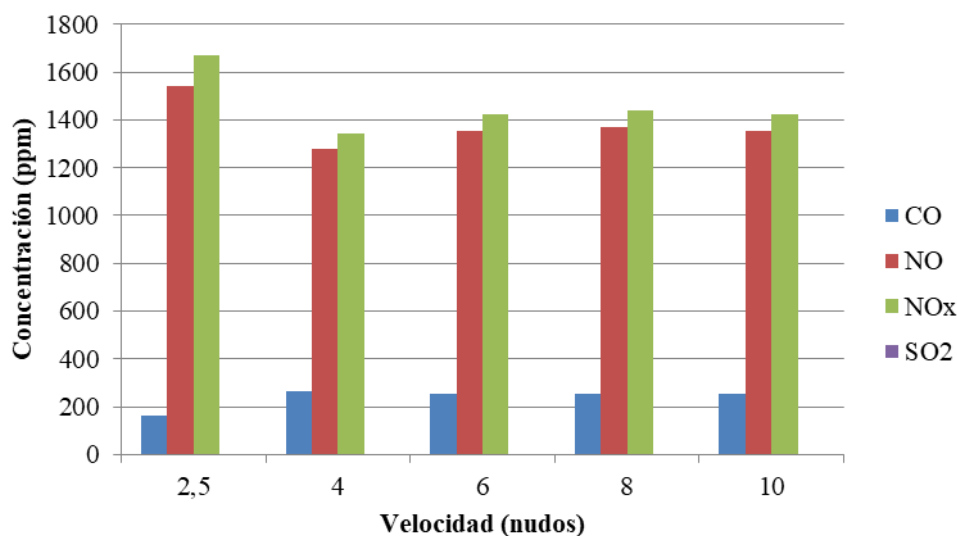
La Tabla 4-19 sirve para reafirmar que el auxiliar generador mantiene constante las emisiones a partir de una cierta velocidad. Vemos que todos los valores se mantienen constantes sin ningún cambio reseñable en proporción.

Como resultado global se puede observar una media de emisiones de CO mucho menor al ser un motor de menor entidad que el principal, sin embargo los escasos métodos de reducción de las emisiones de NO_x generan unas mayores emanaciones de este compuesto, llegando a alcanzar las 1600 ppm y manteniéndose constantes a partir de los 6 nudos en 1400 ppm. Destacar en adición a lo anterior que la temperatura de los gases de escape ha permanecido igualmente sin cambios reseñables desde la primera medición a 2,5 nudos. En lo que respecta a las correcciones por temperatura y humedad en este caso los resultados obtenidos fueron los siguientes:

	MP 2,5	MP 4	MP 6	MP 8	MP 10
Temperatura (°C)	12,2	16,5	19,4	20,0	19,2
Humedad relativa (%)	87	87	87	87	87
Humedad específica (g _{H2O} /kg _{aire seco})	7,8	10,6	12,5	12,9	12,3
Corrección NO _x	1,004	1,037	1,061	1,066	1,058

Tabla 4-20 Correcciones por temperatura y humedad MA (I)

Por último, es reseñable que en ningún momento se apreciaron emisiones de SO₂ lo cual reafirma el bajo nivel de azufre. El conjunto de mediciones tomadas se contempla de forma visual en la Figura 4-4.

**Figura 4-4 Emisiones del MA del Tabarca a velocidades constantes**

4.1.2.2 Mediciones simultáneas al MP en función de sus revoluciones

Tras finalizar la primera toma, de manera análoga que con el motor principal se procede a recoger las medidas de emisiones a diferentes revoluciones logrando los siguientes resultados:

MOTOR AUXILIAR CON MP EN AVANTE 800 RPM

Valores a medir	M1 (11:09:51)	M2 (11:10:55)	M3 (11:12:15)	Valor medio	Valor corregido
T _{gas} (°C)	244,5	243,7	242,9	243,7	
T _{ambiente} (°C)	19,7	19,7	19,3	19,6	
CO (ppm)	253	276	274	267,7	
NO (ppm)	1273	1202	1219	1231,3	1308,3
NOx (ppm)	1337	1262	1280	1293,0	1373,8
SO ₂ (ppm)	0	0	0	0	

Tabla 4-21 Emisiones MA Tabarca con MP en avante 800 rpm

Se comprueba en la Tabla 4-21 que la temperatura de los gases de escape comienza siendo análoga a las mediciones anteriores. Seguidamente, el CO tiene unos valores también del orden de los conseguidos en mediciones previas. Es cierto sin embargo que al reducir revoluciones también lo han hecho las emisiones de NO_x como es lógico, hasta el valor de 1373 ppm, lo que denota una reducción aproximada de 50 ppm (3,6%), de lo que podemos deducir que no existe una clara dependencia entre las revoluciones que lleve el buque y las emisiones del motor auxiliar generador.

MOTOR AUXILIAR CON MP EN AVANTE 900 RPM

Valores a medir	M1 (11:23:01)	M2 (11:24:08)	M3 (11:25:14)	Valor medio	Valor corregido
T _{gas} (°C)	244,8	244,3	244,0	244,4	
T _{ambiente} (°C)	19,1	19,0	19,0	19,0	
CO (ppm)	248	261	262	257,0	
NO (ppm)	1278	1246	1235	1253,0	1319,4
NOx (ppm)	1342	1308	1297	1315,7	1385,3
SO ₂ (ppm)	0	0	0	0	

Tabla 4-22 Emisiones MA Tabarca con MP en avante 900 rpm

Al subir a 900 rpm la Tabla 4-22 muestra una leve disminución de la concentración de CO de unas 10 ppm (3,9%) del mismo modo que un ligero aumento en la concentración de NO_x en torno a las 10 ppm (0,72%) igualmente. A pesar de esta ligera variación podemos afirmar que las emisiones son prácticamente estables y la temperatura es la misma que en la medición anterior.

MOTOR AUXILIAR CON MP EN AVANTE 1000 RPM

Valores a medir	M1 (11:35:42)	M2 (11:36:51)	M3 (11:37:51)	Valor medio	Valor corregido
T _{gas} (°C)	244,1	245,5	246,5	245,4	
T _{ambiente} (°C)	19,0	19,3	19,8	19,4	
CO (ppm)	230	213	204	215,7	
NO (ppm)	1335	1380	1410	1375,0	1459,5
NOx (ppm)	1402	1449	1480	1443,7	1532,4
SO ₂ (ppm)	0	0	0	0	

Tabla 4-23 Emisiones MA Tabarca con MP en avante 1000 rpm

En lo concerniente a la Tabla 4-23, al llegar a las 1000 revoluciones observamos un pico de emisiones de NO_x, un aumento considerable de unas 150 ppm (9,8%) lo cual es anormal hasta el

momento. Las emisiones de CO disminuyen en torno a 40 ppm (15,6%) y la temperatura se mantiene constante.

MOTOR AUXILIAR CON MP EN AVANTE 1100 RPM

Valores a medir	M1 (11:49:40)	M2 (11:51:04)	M3 (11:51:55)	Valor medio	Valor corregido
T _{gas} (°C)	229,2	229,5	228,7	229,1	
T _{ambiente} (°C)	16,6	18,2	16,8	17,2	
CO (ppm)	349	335	322	335,3	
NO (ppm)	1053	1066	1069	1062,7	1124,4
NO _x (ppm)	1106	1119	1122	1115,7	1180,5
SO ₂ (ppm)	0	0	0	0	

Tabla 4-24 Emisiones MA Tabarca con MP en avante 1100 rpm

Curiosamente, como se muestra en la Tabla 4-24, al aumentar revoluciones a 1100 crecen repentinamente las emisiones de CO 120 ppm (35,8%) seguidas de una drástica reducción de los NO_x de 350 ppm (22,8%). Este es un suceso extraño que continua mostrando evidencia de cierta inestabilidad en las emisiones. La temperatura del mismo modo se ve reducida 15 °C.

MOTOR AUXILIAR CON MP EN AVANTE 1200 RPM

Valores a medir	M1 (12:06:23)	M2 (12:08:41)	M3 (12:09:38)	Valor medio	Valor corregido
T _{gas} (°C)	221,0	223,3	223,4	222,6	
T _{ambiente} (°C)	21,9	23,7	23,6	23,1	
CO (ppm)	384	315	321	340,0	
NO (ppm)	962	1096	1071	1043,0	1029,2
NO _x (ppm)	1010	1151	1125	1095,3	1080,9
SO ₂ (ppm)	0	0	0	0	

Tabla 4-25 Emisiones MA Tabarca con MP en avante 1200 rpm

Finalmente en la Tabla 4-25, se puede observar que las emisiones de CO se mantienen constantes mientras que las emisiones de NO_x vuelven a reducirse otras 100 ppm (9,2%) hasta un total de 1080 ppm.

A modo de resumen en lo que respecta al motor auxiliar podemos asegurar que en muchas ocasiones las emisiones son inestables e independientes de las revoluciones del buque. Es posible que se vean afectadas por muchos otros factores y que los picos de emisiones sean debidos a demandas puntuales y excesivas de corriente eléctrica del buque (hora de comienzo de preparación de la comida, etc.) que exijan un funcionamiento más acelerado del motor, sin condicionar únicamente la demanda eléctrica del motor principal. La variación en las emisiones de NO_x es de 450 ppm, lo que supone un aumento del 41,2% entre el punto de mayor y menor concentración.

De la misma manera que en la anterior medición, no se observa ningún tipo de emanación de SO₂ y las correcciones por temperatura y humedad para los óxidos de nitrógeno son las señaladas en la Tabla 4-26:

	MP 800	MP 900	MP 1000	MP 1100	MP 1200
Temperatura (°C)	19,6	19,0	19,4	17,2	23,1
Humedad relativa (%)	87	87	87	87	54
Humedad específica (g _{H2O} /kg aire seco)	12,6	12	12,5	11,8	9,5
Corrección NO _x	1,062	1,052	1,061	1,058	0,986

Tabla 4-26 Correcciones por temperatura y humedad MA (II)

Para finalizar y a modo de resumen se elaboró la siguiente tabla de recopilación de los datos tomados en el presente grupo de mediciones, mostrada en la Figura 4-5:

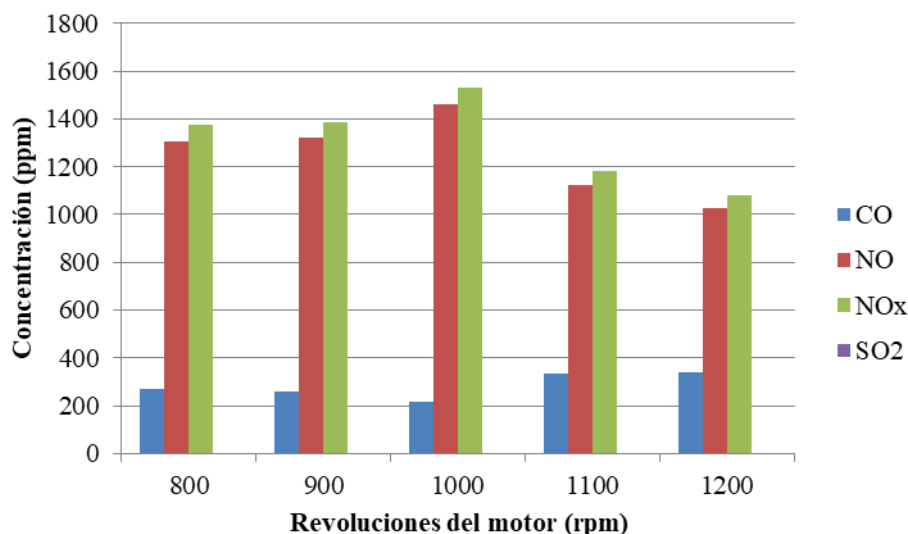


Figura 4-5 Emisiones del MA del Tabarca a revoluciones constantes

De esta manera finaliza el período de análisis de las emisiones del motor auxiliar del Tabarca tanto a revoluciones como a velocidades constantes.

4.1.3 Cálculo del cumplimiento de la normativa de emisiones de NO_x

A la hora de realizar los cálculos para comprobar el cumplimiento de la normativa, ante la ausencia de valores nominales de caudal dada la antigüedad del motor, se calculó el flujo de gases de escape de cada cilindro de la forma más exacta posible, partiendo de los datos de la ficha técnica del motor. Conociendo la carrera y la velocidad del pistón, para unas revoluciones dadas, se puede obtener el tiempo que tarda el pistón en ir del punto muerto inferior al superior, que coincide con el tiempo que se tarda en desalojar los gases de escape del cilindro.

Los datos de partida para este cálculo, aportados por la ficha técnica del motor, son los siguientes:

Velocidad del motor (n) = 1500 rpm

Potencia aportada (P) = 2984 kW = 4000 CV

Temperatura de humos (T_{HM}) = 550 °C

Altura sobre el nivel del mar (A) = Desconocida pero suponemos 100 m como valor habitual

Carrera del pistón = 230 mm

Velocidad del pistón = 11,50 m/s

Cilindrada unitaria = 9,55 l

En este caso el primer objetivo será calcular de manera aproximada el caudal de salida de los gases de escape según los datos disponibles.

$$v_{\text{pistón}} = \frac{\text{carrera pistón}}{\text{tiempo}}; \quad \text{tiempo} = \frac{0,23}{11,50} = 0,02 \text{ s}$$

Por tanto, el caudal unitario de cada cilindro será el volumen de cada cilindro (suponiendo que la mezcla entra por completo y se evacuan los humos en su totalidad) en función del tiempo que tarda en desalojarse su contenido, es decir:

$$\dot{Q}_{unitario} = \frac{V}{t} = \frac{9,55}{0,02} = 477,50 \frac{l}{s} = 0,47 m^3/s$$

Por tanto, para 16 cilindros:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{unitario} \cdot 16 = 16 \cdot 0,47 = 7,64 m^3/s$$

En base a ese caudal, para obtener el flujo másico se obtuvo la densidad total de los humos, en base al proceso de cálculo de la evacuación de humos de una chimenea según la norma UNE-EN 13384-1: 2016 [50]:

$$D_{HM} = \frac{101325(1 - 0,00012 \cdot A)}{R \cdot T_{HM}}$$

La altura (A) a la que se produjo la medición se conoce de los valores nominales, al igual que la temperatura de los humos (T_{HM}). La R es la constante de elasticidad de humos, en J/kgK, propia de cada combustible. La norma UNE 123001, en su anexo B, muestra los diferentes valores de R para todos los tipos de combustible. En nuestro caso el valor de R empleado será el correspondiente al gasóleo, que según la norma es de 290 J/kgK [51]. Por tanto:

$$D_{HM} = \frac{101325(1 - 0,00012 \cdot 100)}{290 \cdot (550 + 273)} = 0,42 kg/m^3$$

Empleando dicha densidad, se obtiene el valor del flujo másico total, utilizando el caudal calculado previamente:

$$\dot{m} \left(\frac{kg}{h} \right) = Q \cdot D_{HM} = 7,64 \cdot 0,42 \cdot 3600 = 11524,17 kg/h$$

Una vez llegados a este punto es necesario emplear la Ecuación 2.2, correspondiente al código técnico de emisiones de NO_x . Previamente aun así, se utilizó el ciclo de ensayo E2 del presente código, estudiado en el punto 2.1.2.2, correspondiente a motores principales de régimen constante. En este punto, en base a los datos aportados por el comandante del buque, se estimó que el buque en un 15% del tiempo de navegación, lo hacía a 900 rpm, en otro 15% del tiempo, navegaba a 1000 rpm, en un 50% del tiempo, a 1100 rpm y en un 20% del tiempo a 1200 rpm. Siguiendo estos valores, se aplicaron las ponderaciones correspondientes a las concentraciones obtenidas en las mediciones del motor:

$$C_{NO_x} \text{ 900 rpm} = 231,6 \cdot 0,15 = 34,74 ppm$$

$$C_{NO_x} \text{ 1000 rpm} = 227,6 \cdot 0,15 = 34,14 ppm$$

$$C_{NO_x} \text{ 1100 rpm} = 225,9 \cdot 0,50 = 112,95 ppm$$

$$C_{NO_x} \text{ 1200 rpm} = 235,5 \cdot 0,2 = 47,10 ppm$$

Resaltar que los valores de concentración anteriormente mostrados ya se les ha aplicado la corrección por temperatura y humedad y por tanto no será necesario aplicarlo en la Ecuación 2.2. Lo que da una concentración tras aplicar las ponderaciones de:

$$C_{NO_x} = 34,74 + 34,14 + 112,95 + 47,1 = 228,93 ppm$$

Aplicando la Ecuación 2.2, el flujo másico de NO_x obtenido sería el siguiente:

$$\dot{m}_{NO_x} \left(\frac{g}{h} \right) = u_{gas} \cdot c_{gas} \cdot q_{mem} \cdot k_{hd} = 0,001586 \cdot 228,93 \cdot 11536,43 \cdot 1 = 4188,68 g/h$$

En base a la potencia aportada, el resultado sería:

$$\frac{\dot{m}_{NO_x} \left(\frac{g}{h} \right)}{P} = \frac{4188,68}{2984} = 1,40 g/kWh$$

Según la regla 13 del anexo VI del Convenio Marpol, el patrullero Tabarca, al estar construido antes del 2011, debe cumplir la normativa Tier I, que para revoluciones entre 130 y 2000 kW, tiene como límite:

$$\text{Tier I: } 45 \cdot n^{-0,2} = 45 \cdot 1500^{-0,2} = 10,42 \frac{g}{kWh}$$

Como se puede observar, el buque, en base a los valores obtenidos durante las medidas, cumple ampliamente con la normativa. Además, realizando los cálculos correspondientes al nivel 3:

$$\text{Tier III: } 9 \cdot n^{-0,2} = 9 \cdot 1500^{-0,2} = 2,08 \frac{g}{kWh}$$

Se aprecia que el patrullero, a pesar de su antigüedad, cumple con la normativa más exigente en términos de emisiones de NO_x. Destacar que a pesar de haber medido la concentración del motor auxiliar, no se calculó el cumplimiento de la normativa al no haber podido obtener datos técnicos del caudal de gases de escape u otros datos que nos permitieran calcularlo. Sin embargo, el Convenio Marpol únicamente restringe las emisiones de los motores de más de 130 kW, según la regla 13 del presente Convenio, y el motor auxiliar aporta una potencia de 112 kW, con lo cual, no estaría sometido a estas restricciones. Aun así, según los valores de concentración obtenidos, se pueden intuir que el flujo de NO_x es considerable.

4.2 Lancha de instrucción GM Salas

La diferencia entre los resultados de las mediciones tomadas en las lanchas de instrucción y los obtenidos en el Tabarca no sólo se verán influenciados por la eminente disparidad entre ambas plataformas, en términos de desplazamiento y potencia del motor entre otros, sino que en este caso las condiciones son distintas en lo que al punto de medición se refiere, al ser en esta ocasión en interiores y tomado directamente desde la extracción. Se realizará el mismo procedimiento empleado para la otra plataforma a excepción de la medición según la velocidad. Las mediciones se realizaron en diferentes periodos, en los cuales se tomaron medidas de concentración tanto con el motor con carga (embragado), como al vacío (sin embragar) y también al ralenti. A continuación, se mostrarán los resultados obtenidos en el motor estudiado.

4.2.1 Emisiones del motor principal al ralenti

Los primeros resultados se obtuvieron durante el arranque, con el motor al ralenti y los mismos criterios empleados para el patrullero Tabarca, obteniéndose los reseñados a continuación:

MOTOR PRINCIPAL AL RALENTÍ						
Valores a medir	M1 (16:01:32)	M2 (16:02:32)	M3 (16:03:33)	M4 (16:04:32)	M5 (16:05:32)	M6 (16:06:32)
T _{gas} (°C)	35	35,5	36,8	43,5	44,7	48,6
T _{ambiente} (°C)	19,1	19,1	19,2	19,3	19,4	19,4
CO (ppm)	456	361	325	257	244	207,0
CO ₂ (%)	2,38	2,29	2,24	2,07	2,03	1,87
NO (ppm)	371	435	453	469	467	456,0
NO _x (ppm)	390	457	476	492	490	479,0
SO ₂ (ppm)	0	0	0	0	0	0

Tabla 4-27 Medición del motor principal de la GM Salas al ralenti

De las seis mediciones tomadas, que se aprecian en la Tabla 4-27, se puede afirmar que la lancha sigue un proceso de calentamiento normal del motor tras el arranque. Los valores de CO comienzan siendo elevados, alcanzando más de 450 ppm, produciéndose un decremento su valor de forma

progresiva en los 6 minutos siguientes hasta los 207 (54,6%). Posteriormente se notará que el valor de CO continúa su reducción. En lo que respecta al CO₂ disminuye aunque no de un modo tan progresivo y casi constante como el CO, pasando de un 2,38% a un 1,87%. En cuanto a los óxidos de nitrógeno, es notable que su valor aumenta conforme se va calentando el motor, como es habitual, hasta prácticamente estabilizarse entre las 470 y 490 ppm. Finalmente, reseñar que no se aprecian emisiones de SO₂ en estos períodos de combustión iniciales. Los datos anteriormente evaluados quedan resumidos en la Figura 4-6.

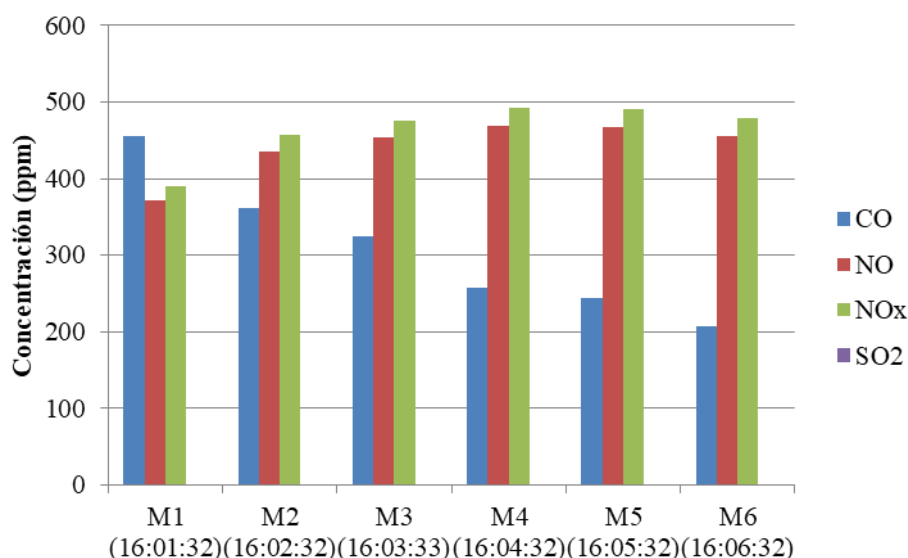


Figura 4-6 Emisiones del motor principal de la GM Salas al ralentí

4.2.2 Emisiones del motor principal con carga

Tras realizar las mediciones al ralentí, el motor se analizó de forma ordenada a diferentes revoluciones para sacar conclusiones válidas y útiles, comprobando al mismo tiempo si concuerdan o no con lo esperado. Los resultados serán desglosados a continuación.

MOTOR PRINCIPAL EN AVANTE 600 RPM

Valores a medir	M1 (16:37:21)	M2 (16:38:22)	M3 (16:39:21)	Valor medio
T _{gas} (°C)	49,9	52,5	50,4	50,9
T _{ambiente} (°C)	19,7	19,6	19,6	19,6
CO (ppm)	108	108	108	108,0
CO ₂ (%)	3,3	3,16	3,08	3,18
NO (ppm)	1069	994	923	995,3
NOx (ppm)	1122	1044	969	1045,0
SO ₂ (ppm)	0	0	0	0

Tabla 4-28 Emisiones del motor principal de la GM Salas a 600 rpm

Comenzando con el motor dando avance a 600 revoluciones, la Tabla 4-28 denota que el CO continúa disminuyendo, quizá sospechando que puede llegar a ser demasiado bajo para un motor de 2007, ya que se recibe que su concentración es de 108 ppm. En lo que respecta a los NO_x, las emisiones aumentan drásticamente, ascendiendo por encima de las 1000 ppm superando así con creces las máximas emisiones del patrullero Tabarca, en términos de concentración.

MOTOR PRINCIPAL EN AVANTE 800 RPM

Valores a medir	M1 (16:41:41)	M2 (16:42:40)	M3 (16:43:40)	Valor medio
T _{gas} (°C)	96,4	57,8	52,6	68,9
T _{ambiente} (°C)	23,6	23,3	23,7	23,5
CO (ppm)	21	12	13	15,3
CO ₂ (%)	3,85	3,89	4,01	3,92
NO (ppm)	1090	996	1124	1070,0
NO _x (ppm)	1045	1046	1180	1090,3
SO ₂ (ppm)	0	0	0	0

Tabla 4-29 Emisiones del motor principal de la GM Salas a 800 rpm

Prosiguiendo con el análisis de la plataforma a 800 rpm, en la Tabla 4-29 se denota, en primer lugar, una drástica disminución de las emisiones de CO hasta 15 ppm (86,11%), con lo cual se puede empezar a especular sobre un posible falseamiento de las mediciones en este aspecto, debido al agua de refrigeración que se expulsa por la misma extracción de gases. Por otro lado, los valores de NO_x continúan dentro de los valores esperados ascendiendo ligeramente alrededor de 40 ppm (3,7%). Destacar igualmente que el CO₂ asciende en una cantidad cercana al 1%.

MOTOR PRINCIPAL EN AVANTE 1000 RPM

Valores a medir	M1 (16:44:50)	M2 (16:45:50)	M3 (16:46:50)	Valor medio
T _{gas} (°C)	65,8	127	/	96,4
T _{ambiente} (°C)	23,5	23,6	/	23,5
CO (ppm)	22	17	16	18,3
CO ₂ (%)	5,9	5,59	5,62	5,70
NO (ppm)	1218	1185	1201	1201,3
NO _x (ppm)	1279	1244	1261	1261,3
SO ₂ (ppm)	0	0	0	0

Tabla 4-30 Emisiones del motor principal de la GM Salas a 1000 rpm

El siguiente paso fue medir a 1000 rpm. La Tabla 4-30Tabla 4-31, muestra que el CO mantiene un valor extremadamente bajo, del orden de las 20 ppm, lo que confirma un falseamiento de las medidas en este aspecto. El NO_x por su parte, sufre un aumento de unas 200 ppm aproximadamente (15,8%), lo cual va acorde con un aumento de la temperatura de los gases de escape de unos 30 °C. Dos medidas de temperatura, de gas y ambiente, fueron descartadas por valores fuera de rango lógico. En lo que respecta al CO₂, sufre un aumento del 1,5% con respecto a su valor a 800 rpm.

MOTOR PRINCIPAL EN AVANTE 1200 RPM

Valores a medir	M1 (16:47:40)	M2 (16:48:40)	M3 (16:49:40)	Valor medio
T _{gas} (°C)	237	144	265,7	215,5
T _{ambiente} (°C)	23,9	23,9	23,8	23,8
CO (ppm)	20	17	19	18,6
CO ₂ (%)	6,97	6,94	6,87	6,93
NO (ppm)	1240	1274	1269	1261,0
NO _x (ppm)	1302	1338	1332	1324,0
SO ₂ (ppm)	0	0	0	0

Tabla 4-31 Emisiones del motor principal de la GM Salas a 1200 rpm

La Tabla 4-31 muestra en primer lugar, un claro aumento de temperatura, lo cual no se refleja proporcionalmente en un incremento de concentración de las emisiones de NO_x, aumentando unas escasas 60 ppm (4,5%) frente a un aumento de aproximadamente 120 °C. El CO mantiene su valor de dudosa validez y el CO₂ aumenta un 1,2 %.

MOTOR PRINCIPAL EN AVANTE 1400 RPM

Valores a medir	M1 (16:50:22)	M2 (16:51:21)	M3 (16:52:21)	Valor medio
T _{gas} (°C)	299,6	294,9	265,7	286,7
T _{ambiente} (°C)	24,1	24,3	24,2	24,2
CO (ppm)	35	31	32	32,6
CO ₂ (%)	8,02	7,92	7,99	7,98
NO (ppm)	1241	1228	1240	1236,3
NO _x (ppm)	1303	1289	1302	1298,0
SO ₂ (ppm)	0	0	0	0

Tabla 4-32 Emisiones del motor principal de la GM Salas a 1400 rpm

En esta ocasión, la Tabla 4-32 muestra que el aumento de las emisiones de NO_x se ha estabilizado, a pesar de un aumento de las revoluciones y un aumento de la temperatura de gases de escape de más de 70 °C, lo que puede que sea una muestra de que su valor se mantiene constante a partir de unas ciertas revoluciones. El CO aumenta unas 10 ppm (30,5%) pero manteniendo un valor fuera de los rangos lógicos y el CO₂, por su parte, vuelve a aumentar en más de un 1%, siguiendo un aumento prácticamente constante con el aumento de las revoluciones.

MOTOR PRINCIPAL EN AVANTE 1600 RPM

Valores a medir	M1 (16:54:00)	M2 (16:54:52)	M3 (16:55:55)	Valor medio
T _{gas} (°C)	347,9	349,8	365,1	354,2
T _{ambiente} (°C)	24,8	24,9	25,4	25,0
CO (ppm)	37	38	40	38,3
CO ₂ (%)	8,23	8,23	8,26	8,24
NO (ppm)	1235	1238	1241	1238,0
NO _x (ppm)	1297	1300	1303	1300,0
SO ₂ (ppm)	0	0	0	0

Tabla 4-33 Emisiones del motor principal de la GM Salas a 1600 rpm

Finalmente, en la Tabla 4-33, obtenemos unos valores máximos de 1300 ppm de NO_x para una temperatura de 354 °C, lo cual confirma que a partir de las 1600 rpm, sus emisiones se mantienen constantes de forma independiente a la temperatura. El CO por su parte alcanza un valor máximo de 40 ppm, lo cual continúa siendo poco representativo, mientras que el CO₂ prosigue aumentando de manera prácticamente constante hasta alcanzar un valor de 8,24 %.

De manera global, resumiendo el comportamiento del motor, cabe resaltar la nulidad de las mediciones de CO, las cuales no fueron representativas a partir de 800 rpm, con lo cual, no se puede saber con exactitud la eficiencia del motor. En lo que respecta a las emisiones de CO₂ destacar que su aumento se produce de manera prácticamente constante, incrementándose en un valor del orden del 1% con cada subida de 200 rpm del motor. En lo relativo al NO_x, su aumento es gradual hasta las 1600 rpm, en donde permanece prácticamente constante a pesar del aumento drástico de la temperatura del motor. En ningún momento se aprecia presencia de SO₂, lo cual denota la ausencia de trazas de azufre en el combustible, a pesar de ser el mismo que el del patrullero Tabarca. Las emisiones del motor quedan resumidas en la Figura 4-7.

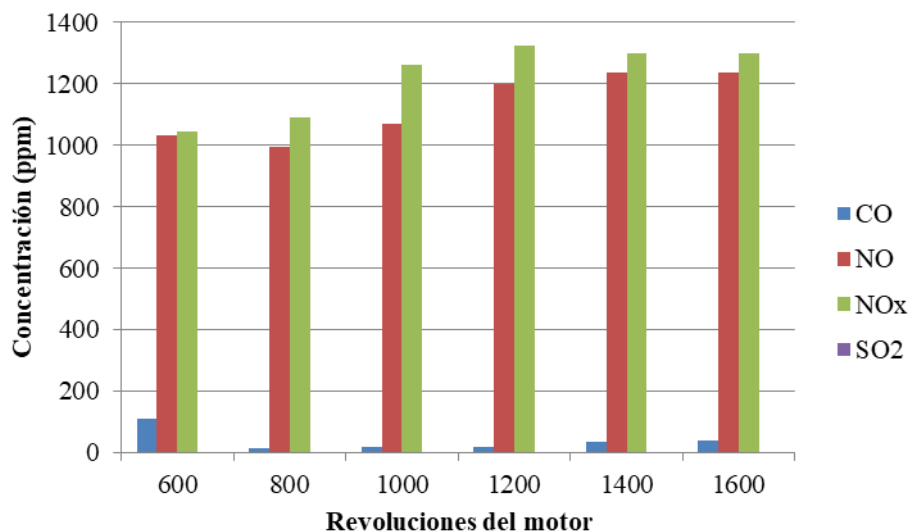


Figura 4-7 Emisiones del motor principal de la GM Salas

4.2.1 Emisiones del motor principal en vacío

Una vez finalizadas las mediciones con el motor principal con carga, se analizaron las emisiones del motor en vacío, adquiriendo los siguientes resultados:

MOTOR PRINCIPAL EN VACÍO A 600 RPM

Valores a medir	M1 (17:02:01)	M2 (17:03:01)	M3 (17:04:01)	Valor medio
T _{gas} (°C)	48,2	48,2	45,3	47,2
T _{ambiente} (°C)	20,8	20,9	21	20,9
CO (ppm)	227	210	199	212,0
CO ₂ (%)	2,18	2,13	2,07	2,13
NO (ppm)	456	462	465	461,0
NOx (ppm)	479	485	488	484,0
SO ₂ (ppm)	0	0	0	0

Tabla 4-34 Emisiones del motor principal en vacío de la GM Salas a 600 rpm

A priori, la Tabla 4-34 muestra un valor lógico de CO, alcanzando las 212 ppm a diferencia de los valores obtenidos del mismo compuesto en el motor con carga. Por otro lado, en lo que respecta a las emisiones de NO_x, las obtenidas son realmente bajas en comparación con el motor con carga, prácticamente la mitad, lo cual nos aporta indicios de la diferencia existente entre el motor trabajando en vacío y con carga.

MOTOR PRINCIPAL EN VACÍO A 800 RPM

Valores a medir	M1 (17:05:07)	M2 (17:06:08)	M3 (17:07:07)	Valor medio
T _{gas} (°C)	50,5	49,9	40,6	47,0
T _{ambiente} (°C)	21	21,2	20,9	21,0
CO (ppm)	227	223	213	221,0
CO ₂ (%)	2,00	1,92	1,87	1,93
NO (ppm)	402	370	367	379,6
NO _x (ppm)	422	388	385	398,3
SO ₂ (ppm)	0	0	0	0

Tabla 4-35 Emisiones del motor principal en vacío de la GM Salas a 800 rpm

La Tabla 4-35 muestra un ligero aumento del CO, de unas 10 ppm, un CO₂ levemente reducido en un 0,2% y, finalmente, unas emisiones de NO_x que descienden a pesar de ser inicialmente bajas. Este último dato difiere del pensamiento que se tenía inicialmente de un aumento progresivo de las emisiones de NO_x con las revoluciones, sin embargo, se aprecia que la temperatura del gas no ha variado considerablemente y por tanto es normal que los resultados en términos de concentración de NO_x, sigan siendo bajos.

MOTOR PRINCIPAL EN VACÍO A 1000 RPM

Valores a medir	M1 (17:08:34)	M2 (17:09:34)	M3 (17:10:34)	Valor medio
T _{gas} (°C)	39,3	45,8	40,1	41,7
T _{ambiente} (°C)	21,2	21,1	21,3	21,2
CO (ppm)	163	139	256	186,0
CO ₂ (%)	1,87	1,84	1,8	1,84
NO (ppm)	298	291	280	289,6
NO _x (ppm)	313	306	294	304,3
SO ₂ (ppm)	0	0	0	0

Tabla 4-36 Emisiones del motor principal en vacío de la GM Salas a 1000 rpm

En la Tabla 4-36 se puede apreciar que continúa el descenso generalizado en la concentración de todos los gases, lo cual denota que las medidas tomadas resultan, cada vez más, en valores no esperados, separándose de las obtenidas en el motor con carga.

MOTOR PRINCIPAL EN VACÍO A 1200 RPM

Valores a medir	M1 (17:12:11)	M2 (17:13:11)	M3 (17:14:11)	Valor medio
T _{gas} (°C)	38,9	40,6	42,8	40,7
T _{ambiente} (°C)	21,2	21,4	21,4	21,3
CO (ppm)	181	137	103	140,3
CO ₂ (%)	1,84	1,87	1,83	1,85
NO (ppm)	233	230	230	231,0
NO _x (ppm)	245	241	241	242,3
SO ₂ (ppm)	0	0	0	0

Tabla 4-37 Emisiones del motor principal en vacío de la GM Salas a 1200 rpm

La Tabla 4-37 prosigue con la reducción continua propia de este grupo de mediciones, llegando hasta las 140 ppm de CO (aumento del 21,5%), CO₂ constante y 242 ppm de NO_x (reducción del 20,4%) los cuales están acorde con la temperatura de los gases, lo que puede que sea el foco del problema.

MOTOR PRINCIPAL EN VACÍO A 1400 RPM

Valores a medir	M1 (17:15:23)	M2 (17:16:23)	M3 (17:17:24)	Valor medio
T _{gas} (°C)	39,6	38,9	41,3	39,9
T _{ambiente} (°C)	20,9	21	21,2	21,0
CO (ppm)	74	59	43	58,6
CO ₂ (%)	1,94	1,94	1,89	1,92
NO (ppm)	205	203	202	203,3
NO _x (ppm)	215	213	212	213,3
SO ₂ (ppm)	0	0	0	0

Tabla 4-38 Emisiones del motor principal en vacío de la GM Salas a 1400 rpm

Aumentando a 1400 rpm, en la Tabla 4-38 se observa una drástica disminución en las emisiones de CO hasta las 59 ppm (57,8%) mientras que el CO₂ continúa sin cambios reseñables. El NO_x por su parte, prosigue en su descenso aunque en esta ocasión, no tan pronunciado, llegando a alcanzar las 213 ppm (11,9%). La temperatura, por su parte, se mantiene acorde a estas bajas emisiones de NO_x, lo cual puede que tenga sentido siendo conscientes de que el motor se encuentra trabajando en vacío.

MOTOR PRINCIPAL EN VACÍO A 1600 RPM

Valores a medir	M1 (17:19:44)	M2 (17:20:44)	M3 (17:21:44)	Valor medio
T _{gas} (°C)	42,1	41,6	42,9	42,2
T _{ambiente} (°C)	20,9	21	21,1	21,0
CO (ppm)	266	265	263	264,6
CO ₂ (%)	2,06	2,05	2,02	2,04
NO (ppm)	190	196	193	193,0
NO _x (ppm)	199	206	203	202,6
SO ₂ (ppm)	0	0	0	0

Tabla 4-39 Emisiones del motor principal en vacío de la GM Salas a 1600 rpm

Para finalizar, la Tabla 4-39 muestra las emisiones que teóricamente deberían ser más pronunciadas. Realizando una comparación con el motor con carga llegado a este punto, se obtiene lo siguiente: el CO realiza un repunte en comparación con los valores anteriores, hasta las 265 ppm, siendo el único valor lógico de los obtenidos frente a los 38 ppm del motor de babor; el CO₂ aumenta ligeramente por encima del 2% lo cual también es considerado un valor ínfimo para esas revoluciones, comparado con los 8,24% del motor de babor; las emisiones de NO_x alcanzan las 202 ppm, lo cual no es ni la sexta parte de las 1300 ppm alcanzadas por el motor de babor.

Estos datos tan contradictorios, muestran que debe de haber algún hecho que genere que la temperatura de gases de escape sea tan baja y, por consiguiente, que las emisiones de NO_x sean ínfimas, ya sea el agua de refrigeración expulsada por la misma extracción o el hecho de que el motor esté trabajando en vacío. También es significativo el hecho de que durante la medición, en ocasiones, saltaba el aviso de exceso de presión en la punta de la sonda, sobre todo a grandes revoluciones del motor, en donde el flujo de agua de refrigeración es mayor, lo que puede ser un factor determinante a la hora de obtener una temperatura de humos correcta. Lo que sí es cierto, es que los valores de NO_x obtenidos en el motor de babor con carga son los más similares a los valores nominales, expresados en la ficha técnica del motor y representados en la Tabla 4-40.

VALORES NOMINALES

rpm	2100	2100	2100	2100	2100
% carga	100	75	50	25	10
P _{motor} (kW)	470,0	352,5	235,0	117,5	47,0
NO _x (ppm)	1237,1	838,3	692,5	1483,0	1800,3
CO (ppm)	190,2	184,5	212,4	644,7	1203,4
HC (ppm)	16,8	28,5	45,1	56,7	132,7
Partículas (ppm)	24,8	32,3	51,5	125,0	134,0
% O ₂ en el escape	10,5	12,0	14,0	15,2	16,9

Tabla 4-40 Valores nominales de emisiones del motor Caterpillar C 18 [49]

El balance de CO en vacío, sin embargo, es positivo y más real comparado con el motor con carga, en donde los valores a partir de 600 rpm comenzaban a situarse por debajo de las 100 ppm pero adaptándose notablemente a los valores nominales. El CO₂, por su parte, se mantiene en todo momento entre el 1,8 y el 2,2%, un valor también fuera de lo esperado. De nuevo, destacar como aspecto positivo la nula presencia de SO₂ durante el proceso de medición. Los valores tomados durante este proceso de medición, se han agrupado y resumido para ser observados de manera más visual en la Figura 4-8.

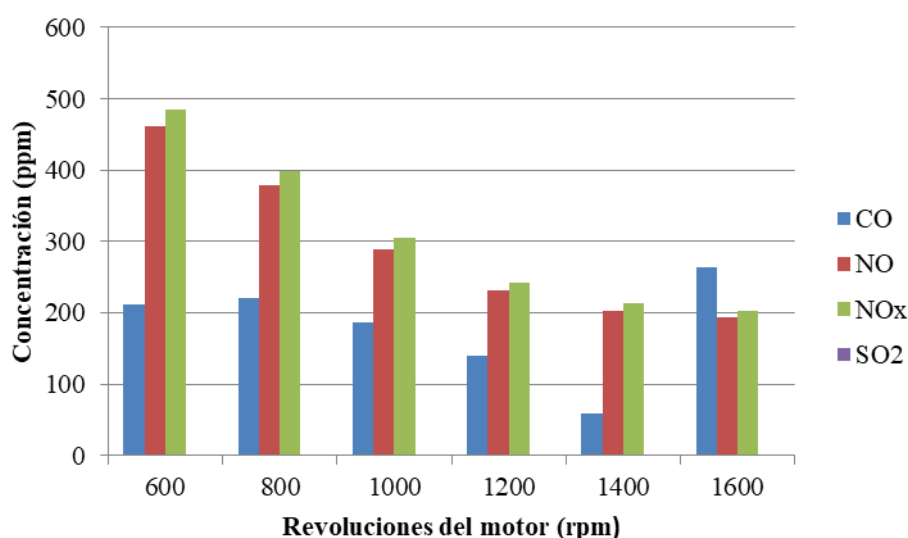


Figura 4-8 Emisiones del motor principal en vacío de la GM Salas

Se pudo realizar una prueba en otro motor para comparar los datos obtenidos, trabajando en vacío del mismo modo. Dicho motor fue el motor principal de estribor de la GM Chereguini. La prueba fue realizada en puerto, aumentando revoluciones de forma progresiva del mismo modo que la prueba realizada en el primer motor. Estos datos quedan reseñados en el Anexo II: Medición en la Lancha GM Chereguini.

4.2.2 Cálculo del cumplimiento de la normativa de emisiones de NO_x

Es necesario, en esta ocasión, hacer una distinción entre el cálculo del cumplimiento de la normativa en el ámbito de emisiones de NO_x realizado para el motor con carga y en vacío.

4.2.2.1 Certificación del motor con carga

En primer lugar se procederá a la certificación del motor con carga. Esta certificación será la de mayor utilidad ya que es la que es el estado normal del motor cuando está en funcionamiento.

Los datos de flujo másico fueron tomados de datos mostrados en la ficha técnica del motor, durante sus pruebas realizadas en junio de 2009; destacar que no se volvieron a tomar mediciones de gases de escape de este barco hasta la fecha. Los datos nominales de partida de este cálculo son los siguientes:

Velocidad del motor (n) = 2100 rpm

Potencia aportada (P) = 470 kW

Caudal de gases de escape ($\dot{Q}$) = 122,6 m³/min

Temperatura de humos (T_{HM}) = 522,4 °C

Altura sobre el nivel del mar (A) = Desconocida pero suponemos 100 m como valor habitual

En primer lugar, el valor de la densidad de humos se calculó de su fórmula correspondiente, sabiendo que el valor de R sigue constante al ser el mismo combustible. Por tanto:

$$D_{HM} = \frac{101325(1 - 0,00012 \cdot 100)}{290 \cdot (522,4 + 273)} = 0,43 \text{ kg/m}^3$$

Empleando dicha densidad, obtenemos el valor del flujo másico total, utilizando el caudal nominal, en esta ocasión, obtenido de la ficha técnica directamente:

$$\dot{m} \left(\frac{kg}{h} \right) = \dot{Q} \cdot D_{HM} = 122,60 \cdot 0,434 \cdot 60 = 3192 \text{ kg/h}$$

De nuevo se emplea la Ecuación 2.2 para el cálculo del flujo másico de NO_x. Previamente se realiza la ponderación correspondiente, siguiendo nuevamente las indicaciones del Código Técnico sabiendo que, según la ficha de especificaciones técnicas del motor; 900 rpm corresponde al 25% de la potencia, 1000 rpm al 50%, 1300 rpm al 75% y 1600 rpm al 100%, obteniendo los valores señalados a continuación:

$$C_{NO_x} \text{ 900 rpm} = 1175,50 \cdot 0,15 = 176,33 \text{ ppm}$$

$$C_{NO_x} \text{ 1000 rpm} = 1261,33 \cdot 0,15 = 189,20 \text{ ppm}$$

$$C_{NO_x} \text{ 1300 rpm} = 1311,00 \cdot 0,50 = 655,50 \text{ ppm}$$

$$C_{NO_x} \text{ 1600 rpm} = 1300,00 \cdot 0,2 = 260,00 \text{ ppm}$$

Lo que da una concentración tras aplicar las ponderaciones de:

$$C_{NO_x} = 176,33 + 189,20 + 655,50 + 260,00 = 1281,03 \text{ ppm}$$

Aplicando la Ecuación 2.2, se obtiene el flujo másico de NO_x:

$$\dot{m}_{NO_x} \left(\frac{g}{h} \right) = u_{gas} \cdot c_{gas} \cdot q_{mem} \cdot k_{hd} = 0,001586 \cdot 1281,03 \cdot 3192 \cdot 1 = 6485,23 \text{ g/h}$$

En base a la potencia aportada, el flujo sería el siguiente:

$$\frac{\dot{m}_{NO_x} \left(\frac{g}{h} \right)}{P} = \frac{6485,23}{470} = 13,79 \text{ g/kWh}$$

Según la regla 13 del anexo VI del Convenio Marpol, la lancha de instrucción, al estar construida antes del 2011, debe cumplir la normativa Tier I, que, para revoluciones mayores de 2000, tiene como límite 9,80 g/kWh. En base a los resultados obtenidos se puede observar que el motor medido de la lancha de instrucción GM Salas no cumple con la normativa en vigor del Convenio Marpol.

4.2.2.2 Certificación del motor en vacío

Suponiendo que, por falta de datos, el caudal nominal de gases de escape del motor con carga es equiparable al existente con el motor en vacío y aplicando las concentraciones obtenidas a diferentes revoluciones con el motor de la GM Salas, se procedió a estudiar el cumplimiento de la normativa con el motor en vacío. El resultado obtenido no será el real, sin embargo, será más restrictivo al aplicar un caudal mayor, por consiguiente, el cumplimiento de la normativa para este caudal, garantizará su cumplimiento para el caudal de gases de escape con el motor en vacío.

Al emplear el mismo caudal, la densidad de humos y, por tanto, el flujo másico de los gases de escape será constante:

$$\dot{m} \left(\frac{kg}{h} \right) = \dot{Q} \cdot D_{HM} = 122,6 \cdot 0,434 \cdot 60 = 3192 \text{ kg/h}$$

En esta ocasión, la ponderación de las concentraciones resultó en los siguientes valores:

$$C_{NOx} \text{ 900 rpm} = 351,33 \cdot 0,15 = 52,70 \text{ ppm}$$

$$C_{NOx} \text{ 1000 rpm} = 304 \cdot 0,15 = 45,60 \text{ ppm}$$

$$C_{NOx} \text{ 1300 rpm} = 227,83 \cdot 0,50 = 113,92 \text{ ppm}$$

$$C_{NOx} \text{ 1600 rpm} = 202,67 \cdot 0,2 = 40,53 \text{ ppm}$$

Lo que da una concentración tras aplicar las ponderaciones de:

$$C_{NOx} = 52,70 + 45,60 + 113,92 + 40,53 = 252,75 \text{ ppm}$$

Aplicando la Ecuación 2.2, el flujo másico de NO_x sería:

$$\dot{m}_{NOx} \left(\frac{g}{h} \right) = u_{gas} \cdot c_{gas} \cdot q_{mem} \cdot k_{hd} = 0,001586 \cdot 252,75 \cdot 3192 \cdot 1 = 1279,55 \text{ g/h}$$

En base a la potencia aportada, se obtiene el siguiente valor:

$$\frac{\dot{m}_{NOx} \left(\frac{g}{h} \right)}{P} = \frac{1279,55}{470} = 2,72 \text{ g/kWh}$$

Sabiendo que, en este caso, se deben cumplir las mismas limitaciones impuestas citadas en el apartado anterior para revoluciones mayores de 2000, el motor en vacío cumple la normativa Tier II cuyo límite se establece en 7,7 g/kWh, pero no llega a cumplir la normativa de nivel 3 que restringe las emisiones a 2 g/kWh.

4.3 BAM P-46 “Furor”

Los datos obtenidos del buque citado se tomaron en diferentes períodos como se ha expresado previamente. En un primer apartado se expondrán los datos del motor al ralentí, tomados durante la mañana. Posteriormente se indicarán los valores obtenidos durante la navegación nocturna de ambos motores.

4.3.1 Emisiones del motor principal de babor al ralentí

Los valores de concentración de gases obtenidos durante la medición de la mañana, fueron recogidos y ordenados para mostrar una curva de la evolución de dicha concentración de gases desde el momento del arranque hasta 8 minutos después una vez el motor estuviese estabilizado. Los datos obtenidos fueron los reseñados a continuación:

MOTOR PRINCIPAL AL RALENTÍ

Valores a medir	M1 (07:29:14)	M2 (07:30:12)	M3 (07:31:13)	M4 (07:32:12)	M5 (07:33:12)	M6 (07:34:12)	M7 (07:35:12)
T _{gas} (°C)	69,9	79,4	86,1	90,4	93,9	96,4	99,1
T _{ambiente} (°C)	23,2	23,4	23,6	23,8	24,0	23,9	24,0
CO (ppm)	81	58	48	42	40	181	67
CO ₂ (%)	1,96	1,92	1,89	1,86	1,85	1,74	1,85
NO (ppm)	360	359	350	343	336	198	331
NO _x (ppm)	378	377	367	360	353	208	348
SO ₂ (ppm)	10	0	0	0	0	0	0

Tabla 4-41 Medición motor principal de babor del BAM al ralentí

En primer lugar, se observa en la Tabla 4-41 comparada con la Tabla 4-1, donde se mostraban los datos del motor al ralentí del Tabarca, que la combustión es mucho mejor debido a la menor presencia de inquemados, (en torno a 80 ppm de CO al arrancar en el BAM, frente a los más de 1500 ppm de CO emitidos por el Tabarca) debido fundamentalmente a que el motor del BAM es considerablemente más moderno. Se denota, del mismo modo, algún tipo de sistema de arranque en frío del motor, para conseguir así una reducción de las emanaciones durante el arranque

En segundo lugar se puede observar que la emisión de NO_x es mucho mayor en este caso, debido a la mayor potencia del motor aunque con una emanación muy reducida en proporción a su potencia, no llegando a superar las 360 ppm en ningún momento. Resaltar igualmente la presencia de SO₂ con un valor de 10 ppm justo en el momento del arranque, dentro de los valores normales.

En lo que respecta a la evolución de los gases, a lo largo del período de muestreo se observa una reducción lenta pero progresiva de todas las concentraciones de gases de escape sin excepción. Cabe destacar la medida nº 6, ya que se produjo una sobre revolución repentina del motor. Esto es debido, acorde con los especialistas de máquinas del patrullero, a una adaptación y prueba continua que realiza el motor de forma automática para una mejor incorporación al régimen de maniobra del buque en términos de temperatura del motor. Se puede apreciar que es una prueba del motor, ya que la muestra nº 7 vuelve a los valores normales de emisión que previamente se estaban produciendo. Durante esta sobre revolución, los valores de CO ascienden hasta los 181 ppm y los de NO_x se reducen a 208 ppm. Los datos obtenidos quedan resumidos en la Figura 4-9:

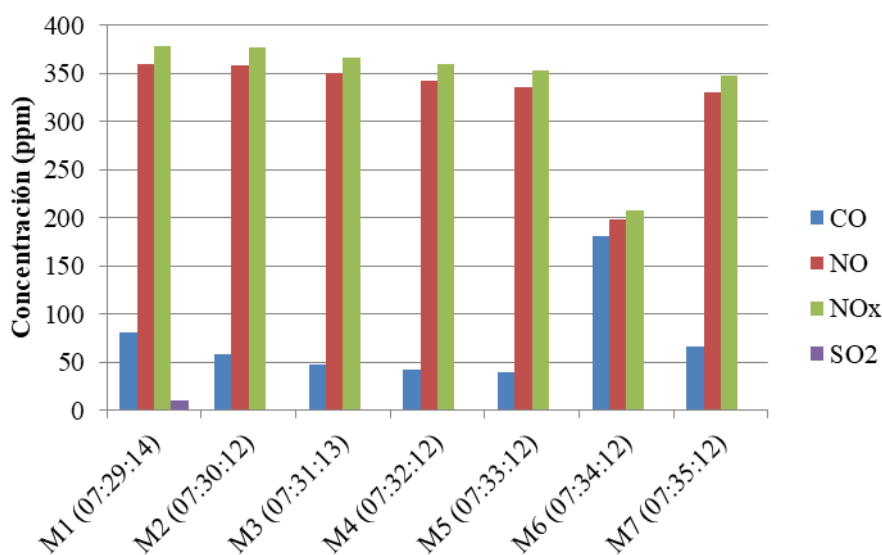


Figura 4-9 Emisiones del motor principal de babor del BAM al ralentí

4.3.2 Emisiones del motor principal de babor

Ya en el análisis realizado tras el ocaso, se pudieron tomar mediciones ordenadas de la forma explicada en el apartado 3.3.3, obteniendo las emisiones del motor de babor a diferentes revoluciones. Es necesario destacar que la temperatura ambiente mostrada, es la tomada en la cámara de máquinas, al estar los datos adquiriéndose en su interior. Los datos tomados, escalados de menores a mayores revoluciones, fueron los siguientes:

MOTOR PRINCIPAL DE BABOR EN AVANTE PALANCA 2 (500RPM)

Valores a medir	M1 (22:27:06)	M2 (22:28:06)	M3 (22:29:06)	Valor medio
T _{gas} (°C)	266,1	265,1	285,7	272,3
T _{ambiente} (°C)	21,8	21,8	22,1	21,9
CO (ppm)	46	43	56	48,3
CO ₂ (%)	3,34	3,44	3,27	3,40
NO (ppm)	599	609	532	580
NO _x (ppm)	629	639	559	609
SO ₂ (ppm)	0	0	0	0

Tabla 4-42 Emisiones motor principal de babor del BAM, en avante palanca 2

Se puede observar en primer lugar en la Tabla 4-42, el reducido número de inquemados (CO) al igual que ocurría con el motor al ralentí debido a la eficiencia del motor, probablemente gracias al sistema de inyección electrónica. Las emisiones de óxidos de nitrógeno van acorde con la temperatura de los gases de escape. En este caso, se dispone de un motor que tiene una temperatura de gases de 272 °C y que emite 609 ppm de NO_x, mientras que en el caso del patrullero Tabarca, el motor no llega a los 180 °C, en avante mínima (800 rpm), y emite 200 ppm. Sin embargo, hay que tener en cuenta que la potencia que aportan ambos motores no es la misma, siendo la del BAM notablemente superior.

MOTOR PRINCIPAL DE BABOR EN AVANTE PALANCA 4 (550 RPM)

Valores a medir	M1 (22:31:18)	M2 (22:32:18)	M3 (22:33:18)	Valor medio
T _{gas} (°C)	335	338,3	339,7	337,7
T _{ambiente} (°C)	22,6	22,5	22,4	22,5
CO (ppm)	146	91	79	105,3
CO ₂ (%)	6,87	6,5	6,41	6,60
NO (ppm)	1074	1051	1030	1051,7
NO _x (ppm)	1128	1104	1082	1104,7
SO ₂ (ppm)	0	0	0	0

Tabla 4-43 Emisiones motor principal de babor del BAM, en avante palanca 4

Al subir a palanca 4, como se aprecia en la Tabla 4-43, aumenta el CO y el CO₂ en proporción, aunque produciendo un pico en la primera medida, seguramente debido a una sobre revolución al aumentar el régimen. Las emisiones de NO_x se disparan, lo cual es interesante, ya que el motor únicamente ha aumentado 50 rpm. La explicación se encuentra en el aumento de temperatura. Al subir de palanca el motor aporta más potencia y sube revoluciones rápidamente. Como consecuencia, la temperatura del motor aumenta radicalmente y en poco tiempo 50 °C, hasta llegar a los 337 °C. Esta mayor temperatura genera que las moléculas de N₂ del aire de admisión, inertes en un principio, se descompongan, reaccionando con el oxígeno del aire y generando mayor cantidad de óxidos de nitrógeno [52]. De esta manera, la emanación de NO_x asciende hasta alcanzar las 1100 ppm.

MOTOR PRINCIPAL DE BABOR EN AVANTE PALANCA 6 (800 RPM)

Valores a medir	M1 (22:36:20)	M2 (22:37:18)	M3 (22:38:18)	Valor medio
T _{gas} (°C)	318,1	318,8	318,5	318,5
T _{ambiente} (°C)	23,1	23,1	23,1	23,1
CO (ppm)	42	50	56	49,3
CO ₂ (%)	5,91	5,85	5,69	5,80
NO (ppm)	787	735	717	746,3
NO _x (ppm)	826	772	753	783,7
SO ₂ (ppm)	0	0	0	0

Tabla 4-44 Emisiones motor principal de babor del BAM, en avante palanca 6

Al aumentar a palanca 6, se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 4-44. Como se puede apreciar, las emisiones de CO y CO₂ se reducen hasta valores del orden de los obtenidos en palanca 2, lo cual es un aspecto positivo. Las emisiones de NO_x, se ven disminuidas del mismo modo, acotando las emanaciones a 783 ppm (reducción del 29%). Esta doble reducción de las emisiones a una mayor demanda del motor, denota que éste se adapta mejor a determinados regímenes de revoluciones, demostrando que el motor es menos contaminante en palanca 6 que en palanca 4.

MOTOR PRINCIPAL DE BABOR EN AVANTE PALANCA 7 (950 RPM)

Valores a medir	M1 (22:42:37)	M2 (22:43:36)	M3 (22:44:36)	Valor medio
T _{gas} (°C)	368,8	378,3	375,6	374,2
T _{ambiente} (°C)	23,8	24,1	24,3	24,1
CO (ppm)	190	207	219	205,3
CO ₂ (%)	6,94	6,95	7,03	7,00
NO (ppm)	821	815	818	818,0
NO _x (ppm)	862	856	859	859,0
SO ₂ (ppm)	0	0	0	0

Tabla 4-45 Emisiones motor principal de babor del BAM, en avante palanca 7

Finalmente, en la Tabla 4-45, se observa que las emisiones aumentan acorde con las revoluciones, dentro de lo esperado. El CO₂ toma valores similares a los de palanca 4, mientras que el CO toma los valores más altos de los analizados, alcanzando más de 200 ppm (aumento del 76%), lo cual indica que la combustión cada vez es más incompleta conforme aumentamos revoluciones. En lo que a las emisiones de NO_x respecta, aumentan del mismo modo, aunque sin llegar a los valores de emisión obtenidos en palanca 4.

A modo de resumen del análisis del motor de babor, se puede llegar a la conclusión de que el motor trabajando a 550 rpm es menos eficiente y más contaminante que en cualquier otro régimen de revoluciones, debido, como se ha expresado anteriormente, al aumento de temperatura. La concentración también es mayor que en el resto de plataformas estudiadas, aunque también es un motor con más potencia, cuyo fin es propulsar, junto con el motor de estribor la plataforma de mayor desplazamiento de las estudiadas. Por último destacar, a diferencia del Tabarca, que en ningún momento se detectó presencia de SO₂, ni siquiera a altas revoluciones, lo cual denota que las trazas de azufre en el combustible son mínimas o casi nulas, cumpliendo así con la normativa nacional y Marpol. En la Figura 4-10, se muestra una gráfica con los valores de las emisiones obtenidos durante el análisis.

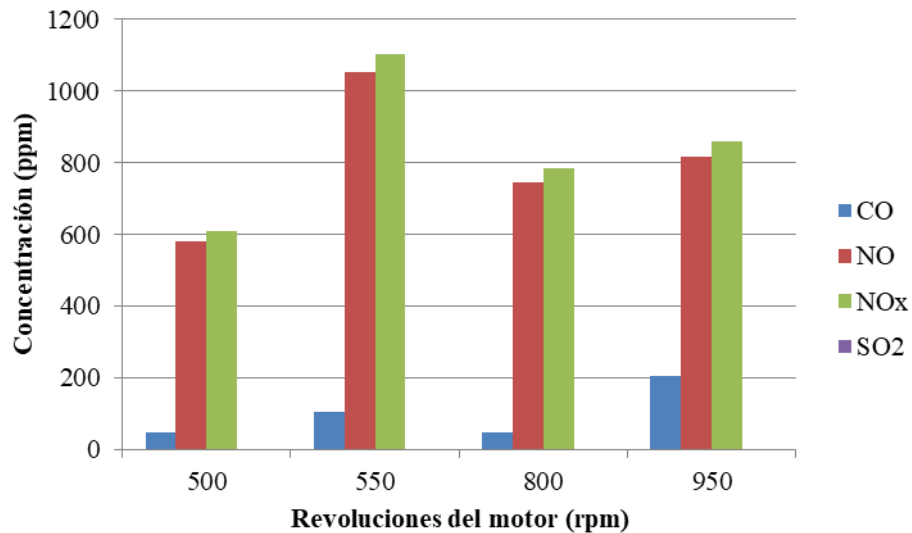


Figura 4-10 Emisiones del motor principal de babor del BAM P-46 Furor

4.3.3 Emisiones del motor principal de estribor

Una vez realizado el análisis completo del motor de babor, se llevó a cabo el del motor de estribor, empleando el mismo procedimiento y tras haber parado previamente el motor de babor. El análisis irá enfocado, en este caso, a realizar una comparación con el motor de babor, en términos de emisiones ya que el motor teóricamente es idéntico. Los resultados obtenidos en esta ocasión, fueron los siguientes:

MOTOR PRINCIPAL DE ESTRIBOR EN AVANTE PALANCA 2 (500 RPM)

Valores a medir	M1 (23:31:00)	M2 (23:32:00)	M3 (23:33:00)	Valor medio
T _{gas} (°C)	244,5	242,2	250,7	245,8
T _{ambiente} (°C)	24,3	24,1	24,3	24,2
CO (ppm)	47	51	54	50,7
CO ₂ (%)	3,26	3,22	3,15	3,20
NO (ppm)	578	603	497	559,3
NOx (ppm)	607	633	522	587,3
SO ₂ (ppm)	0	0	0	0

Tabla 4-46 Emisiones motor principal de estribor del BAM, en avante palanca 2

En la Tabla 4-46, se puede observar que los valores van prácticamente acordes con los del motor de babor. El CO emitido es 2 ppm superior y el CO₂ tan sólo un 0,2% inferior. En lo que respecta a los óxidos de nitrógeno, las emisiones son ligeramente menores, alcanzando las 587 ppm, frente a las 609 obtenidas con el motor de babor.

MOTOR PRINCIPAL DE ESTRIBOR EN AVANTE PALANCA 4 (550 RPM)

Valores a medir	M1 (23:36:15)	M2 (23:37:15)	M3 (23:38:15)	Valor medio
T _{gas} (°C)	319,2	327,7	330,1	325,7
T _{ambiente} (°C)	24,5	24,4	24,4	24,4
CO (ppm)	99	67	75	80,3
CO ₂ (%)	6,89	6,26	6,15	6,40
NO (ppm)	1080	1064	1049	1064,3
NO _x (ppm)	1134	1117	1101	1117,3
SO ₂ (ppm)	0	0	0	0

Tabla 4-47 Emisiones motor principal de estribor del BAM, en avante palanca 4

Al aumentar de revoluciones y pasar de palanca 2 a palanca 4, nos encontramos con la misma situación que la acaecida en el motor de babor. La Tabla 4-47 muestra la ligera disminución de eficiencia en la combustión del motor en términos de emisiones de CO aunque no tan pronunciada como en el caso del motor de babor. Sin embargo, sí que se produce un aumento prácticamente idéntico de las emisiones de NO_x, alcanzando en esta ocasión los 1117 ppm (aumento 47,4%), debido, como se ha expresado previamente, al aumento drástico de temperatura (de 245 °C a 345 °C), en esta ocasión incluso más pronunciado que en el de babor.

MOTOR PRINCIPAL DE ESTRIBOR EN AVANTE PALANCA 6 (800 RPM)

Valores a medir	M1 (23:41:14)	M2 (23:42:14)	M3 (23:43:14)	Valor medio
T _{gas} (°C)	310	313,5	305,4	309,6
T _{ambiente} (°C)	25,0	25,2	25,5	25,2
CO (ppm)	40	48	56	48,0
CO ₂ (%)	5,76	5,68	6,03	5,80
NO (ppm)	786	724	764	758,0
NO _x (ppm)	825	760	802	795,7
SO ₂ (ppm)	0	0	0	0

Tabla 4-48 Emisiones motor principal de estribor del BAM, en avante palanca 6

La Tabla 4-48, muestra que al aumentar a palanca 6, de la misma manera que en el motor de babor, se observa una disminución de las emisiones de CO, de NO_x y de la temperatura. Los valores de las emisiones analizadas son prácticamente idénticos en términos de CO, con una diferencia de 1 ppm y en el caso de los NO_x, se emiten tan sólo 10 ppm más.

MOTOR PRINCIPAL DE ESTRIBOR EN AVANTE PALANCA 7 (950 RPM)

Valores a medir	M1 (23:48:35)	M2 (23:49:38)	M3 (23:50:35)	Valor medio
T _{gas} (°C)	355,6	368,0	382,1	368,6
T _{ambiente} (°C)	24,9	24,7	24,4	24,7
CO (ppm)	173	180	189	180,7
CO ₂ (%)	7,02	6,87	6,73	6,90
NO (ppm)	816	846	848	836,7
NO _x (ppm)	857	888	890	878,3
SO ₂ (ppm)	0	0	0	0

Tabla 4-49 Emisiones motor principal de estribor del BAM, en avante palanca 7

Acorde con lo esperado, la Tabla 4-49 denota que las emisiones, así como la temperatura de los gases, vuelve a aumentar pero de forma proporcional. El CO alcanza los 180 ppm (aumento del 73,3%), significativamente inferior a los 200 ppm del motor de babor. En lo que respecta a las emisiones de NO_x, su valor llega hasta los 878 ppm, mayores en este caso que los 859 ppm alcanzados por el motor de babor.

Sintetizando la información obtenida, se puede observar que las emisiones de ambos motores son prácticamente idénticas. Ambos sufren el mismo pico de revoluciones en palanca 4, debido al aumento de temperatura, y comienza a reducir ligeramente la eficiencia de la combustión a partir de palanca 7, debido al aumento de la velocidad de los pistones. Del mismo modo, en ninguno de ellos se captan emisiones de SO₂ garantizando que combustible tiene trazas de azufre ínfimas. En la Figura 4-11 se muestra una gráfica resumen de las emisiones tomadas.

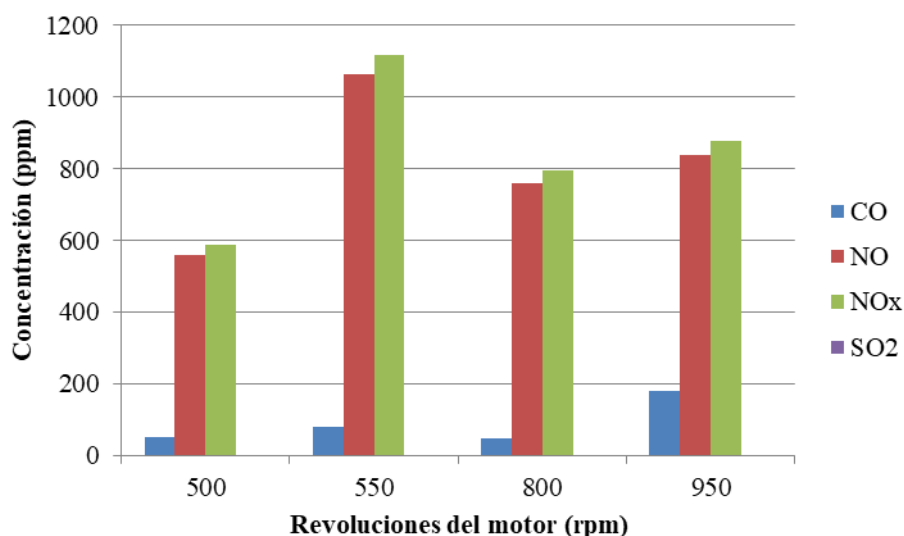


Figura 4-11 Emisiones del motor principal de estribor del BAM P-46 Furor

4.3.4 Cálculo del cumplimiento de la normativa de emisiones de NO_x

Los datos de flujo másico, al igual que en la lancha de instrucción, también se tomaron de datos mostrados en la ficha técnica del motor, en este caso durante su construcción y pruebas concretamente el 9 de marzo de 2014. En este caso si será posible certificar ambos motores principales ya que se dispuso de datos suficientes. Los datos nominales de partida del cálculo son los siguientes:

Velocidad del motor (n) = 1280 rpm

Potencia aportada (P) = 5200 kW

Caudal de gases de escape ($\dot{Q}$) = 18,3 m³/s

Temperatura de humos (T_{HM}) = 420 °C

Altura sobre el nivel del mar (A) = 100 m

Del mismo modo, se calculó en primer lugar la densidad de humos en base a la norma UNE-EN 13384-1: 2016 [50]. El valor de R permanece constante al ser el mismo combustible, por tanto, empleando la ecuación de la densidad de humos:

$$D_{HM} = \frac{101325(1 - 0,00012 \cdot A)}{R \cdot T_{HM}} = \frac{101325(1 - 0,00012 \cdot 100)}{290 \cdot (420 + 273)} = 0,49 \text{ kg/m}^3$$

Empleando dicha densidad, obtenemos el valor del flujo másico total, utilizando el caudal nominal:

$$\dot{m} \left(\frac{kg}{h} \right) = \dot{Q} \cdot D_{HM} = 18,30 \cdot 0,49 \cdot 3600 = 32817 \text{ kg/h}$$

A continuación se obtuvieron las ponderaciones para cada motor, siguiendo el ciclo de ensayos E2, en base a las diferentes potencias entregadas al buque por el motor. En este caso se aproximaron las potencias en base a los cuatro valores de palanca de avance de máquinas empleados; palanca 2, 25% de potencia, palanca 4, 50%, palanca 6, 75% y palanca 7, 100%. Los valores obtenidos para el motor de babor, fueron las siguientes:

$$C_{NOx} \text{ Palanca 2 (500 rpm)} = 609 \cdot 0,15 = 91,35 \text{ ppm}$$

$$C_{NOx} \text{ Palanca 4 (550 rpm)} = 1104 \cdot 0,15 = 165,60 \text{ ppm}$$

$$C_{NOx} \text{ Palanca 6 (800 rpm)} = 783,7 \cdot 0,50 = 391,85 \text{ ppm}$$

$$C_{NOx} \text{ Palanca 7 (950 rpm)} = 859 \cdot 0,2 = 171,8 \text{ ppm}$$

Lo que da una concentración total tras aplicar las ponderaciones de:

$$C_{NOx} = 91,35 + 165,60 + 391,85 + 171,8 = 820,60 \text{ ppm}$$

Aplicando la Ecuación 2.2, se obtiene el flujo másico de NO_x :

$$\dot{m}_{NOx} \left(\frac{g}{h} \right) = u_{gas} \cdot c_{gas} \cdot q_{mem} \cdot k_{hd} = 0,001586 \cdot 820,6 \cdot 32817 \cdot 1 = 42710 \text{ g/h}$$

En base a la potencia aportada, el resultado sería:

$$\frac{\dot{m}_{NOx} \left(\frac{g}{h} \right)}{P} = \frac{42710}{5200} = 8,21 \text{ g/kWh}$$

En lo que respecta al motor de estribor, los valores de concentración efectuando las ponderaciones por el mismo ciclo de ensayos E2, son las siguientes:

$$C_{NOx} \text{ Palanca 2 (500 rpm)} = 587,3 \cdot 0,15 = 88,09 \text{ ppm}$$

$$C_{NOx} \text{ Palanca 4 (550 rpm)} = 1117,3 \cdot 0,15 = 167,60 \text{ ppm}$$

$$C_{NOx} \text{ Palanca 6 (800 rpm)} = 795,7 \cdot 0,50 = 397,85 \text{ ppm}$$

$$C_{NOx} \text{ Palanca 7 (950 rpm)} = 878,3 \cdot 0,2 = 175,66 \text{ ppm}$$

Lo que da una concentración total tras aplicar las ponderaciones de:

$$C_{NOx} = 88,09 + 167,60 + 397,85 + 175,66 = 829,20 \text{ ppm}$$

Aplicando la Ecuación 2.2, se obtiene el flujo másico de NO_x :

$$\dot{m}_{NOx} \left(\frac{g}{h} \right) = u_{gas} \cdot c_{gas} \cdot q_{mem} \cdot k_{hd} = 0,001586 \cdot 829,20 \cdot 32817 \cdot 1 = 43158 \text{ g/h}$$

En base a la potencia aportada, tenemos que:

$$\frac{\dot{m}_{NOx} \left(\frac{g}{h} \right)}{P} = \frac{43158}{5200} = 8,23 \text{ g/kWh}$$

Según la regla 13 del anexo VI del Convenio Marpol, al estar el buque construido después del 1 de enero de 2016, debe cumplir la normativa Tier III, la máxima posible, en las zonas de control de emisiones (ZCE) mientras que en el resto les vale con la Tier II y, para revoluciones mayores entre 130 y 2000, tiene como límite:

$$\text{Tier III: } 9 \cdot n^{-0,2} = 9 \cdot 1280^{-0,2} = 2,15 \text{ g/kWh}$$

Como se puede observar, ninguno de los motores cumple la normativa del Convenio Marpol acorde a su año de construcción y, por tanto, no podrán navegar cumpliendo la normativa por dichos espacios marítimos. En cuanto a la normativa Tier II:

$$\text{Tier II: } 44 \cdot n^{-0,23} = 44 \cdot 1280^{-0,23} = 8,49 \text{ g/kWh}$$

Como se puede apreciar, sí consiguen ambos motores respetar los límites impuestos por el nivel 2 de emisiones lo que les permite navegar libremente por el resto de aguas.

4.4 Empleo de catalizadores como mecanismo reductor de emisiones

Ante las presentes conclusiones, las evidencias de los análisis muestran que, si se desea que los futuros buques de la Armada cumplan las normas más exigentes que se imponen hoy en día, es necesario algún tipo de sistema que reduzca el flujo de emisiones. En este proyecto se ha optado por presentar la catálisis heterogénea como solución, realizando un tratamiento de los gases de escape tras su formación.

Dentro de los catalizadores comerciales que existen, uno de los más viables para la Armada es el que expone la compañía Wärtsilä, el cual será presentado a continuación.

4.4.1 Catalizador NO_x Reducer (NOR)

En primer lugar cabe reseñar que se ha elegido esta empresa por ser una de las más reseñadas en el desarrollo de este tipo de mecanismo de reducción. Wärtsilä, cuya sede en España es Wärtsilä Ibérica, tiene su principal establecimiento en Bermeo (Vizcaya) lo cual supone un aspecto a favor, debido a la cercanía relativa al Arsenal de Ferrol en comparación con empresas de Madrid o Barcelona. Además, existen relaciones ya entabladas entre dicha empresa y la Armada Española por medio de Navantia para la adquisición de ciertos equipos.

La razón por la cual se propone incorporar este elemento, es que asegura el cumplimiento de la normativa Tier III respectiva a los óxidos de nitrógeno, necesaria para que futuros buques, como las fragatas F-110, puedan navegar en las Zonas de Control de Emisiones con la seguridad de que cumplen el Convenio Marpol. Al no disponer de planos de dichos buques, la instalación propuesta se llevará a cabo en el BAM estudiado, lo cual aportará una idea de lo que supondría una instalación de esta magnitud.

El sistema en sí, consta de un reactor catalítico SCR, el cual reduce el nivel de óxidos de nitrógeno por medio de un agente reductor, que en este caso es una disolución de urea añadida a la corriente de gases de escape. Dicha disolución es evaporada conforme se introduce en la corriente de gases a alta temperatura, induciendo, del mismo modo, la descomposición de la urea y dando como productos NH_3 y CO_2 . Las emisiones de NO_x son transformadas por su parte en N_2 y agua.

Los elementos catalíticos se encuentran en el interior de la estructura metálica del reactor, localizada en la línea de extracción de gases. Dicha estructura se encuentra representada en la Figura 4-12.

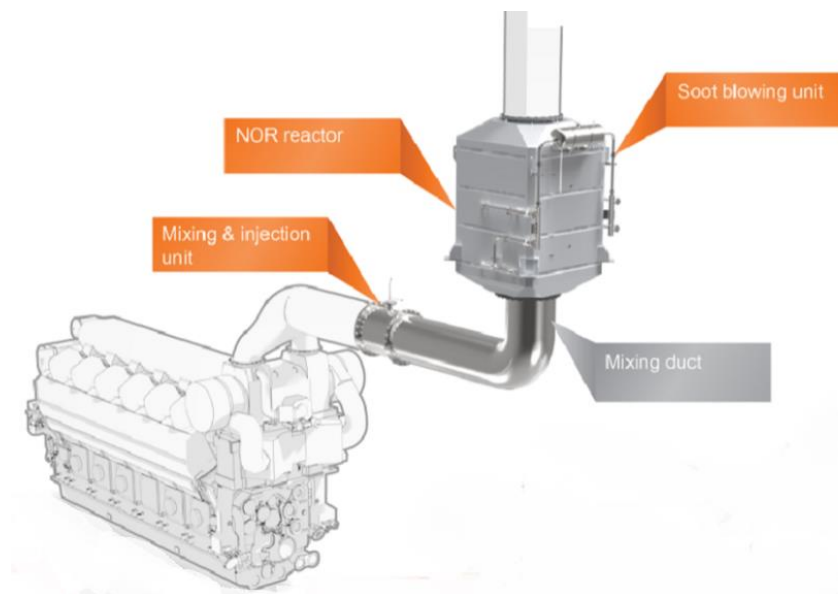


Figura 4-12 Integración del sistema NOR en un motor [49]

Como se observa, es un sistema de sencilla implantación, estando prefabricado y siendo de incorporación directa a la extracción de los gases de escape. Cabe reseñar, que sería necesaria la instalación de un tanque de urea que, mediante una bomba, transmitiera la urea hasta una unidad reguladora de caudal, la cual la inyectaría, en las dosis adecuadas, directamente a la corriente del flujo de gases de escape. El consumo de urea es directamente proporcional a la cantidad de NO_x que se quiere eliminar, siendo el consumo típico para la obtención del nivel Tier III 15 l/MWh.

Los elementos catalíticos del interior del reactor poseen una estructura similar a un panel de abejas, para incrementar la superficie de contacto y se encuentran dispuestos en capas, siendo el material empleado como catalizador, el pentaóxido de divanadio (V_2O_5). El equipo consta además, de un soplador de hollín para limpiar los elementos que lo componen, aumentando así su vida útil, siendo ésta de entre 4 y 6 años. Finalmente se dispone un sistema silenciador de gases de escape que, opcionalmente, puede ir integrado en el reactor como una única pieza [49].

4.4.2 Presupuesto del proyecto

En vista de los resultados de los análisis, la única plataforma viable para la instalación de este sistema fue el BAM Furor. En este caso, se solicitó a la empresa Wärtsilä un presupuesto de instalación de un catalizador SCR para cada uno de los dos motores principales, pero aún estaban elaborándolo cuando se redactó este documento. Por ello, se realizó una estimación de los costes basándose en un presupuesto de la citada empresa para una instalación de este tipo en un buque mercante de proporciones similares [54].

En un principio se trató de estudiar la implantación de este sistema en las fragatas F-110 de nueva construcción, sin embargo, la ausencia de datos impidió su desarrollo. Por ello, el planteamiento del proyecto derivó en un estudio sobre la implantación de este equipo en el BAM.

CUADRO DE PRECIOS DESCOMPUESTOS

CONCEPTO	PRECIO	UNIDADES	COSTE
Sistema de reducción NOR Wärtsilä	196.820 €	2	393.640,00 €
Tanque de urea líquido	5.904 €	2	11.808,00 €
Bomba de dosificación de urea	1.245,25 €	4	4.981,00 €
Control de dosificación	8.455,60 €	2	16.911,20 €
Inyectores de urea	6.056 €	4	24.224,00 €
Válvula bypass en escape	563,50 €	2	1.127,00 €
Soplador de hollín	4.920,50 €	4	19.682,00 €
Mezcladores estáticos	8.932,60 €	4	35.730,40 €
TOTAL			508.103,60 €

Tabla 4-50 Cuadro de precios descompuestos

Se observa (Tabla 4-50), por tanto, que tan sólo existiría una única partida de elementos a adquirir. Se necesitarán por tanto dos reactores catalíticos, uno por cada extracción. Tan sólo se necesitará un elemento de los citados anteriormente por extracción, excepto en el caso de la bomba de dosificación de urea, el soplador de hollín, los mezcladores estáticos y los inyectores de urea, que se instalarán por duplicado en cada una. Con respecto al montaje, el coste de cada elemento sería el reseñado en la Tabla 4-51.

PRESUPUESTO DE MONTAJE

CONCEPTO	PRECIO POR HORA	TIEMPO (H)	COSTE
Grúa	107,00 €	4	428,00 €
Transporte			850,00 €
Maniobras	15,00 €	8	360,00 €
Mano de obra soldadura	55,00 €	8	2.200,00 €
Mano de obra mecánica	55,00 €	8	2.200,00 €
Mano de obra electricista	55,00 €	8	2.200,00 €
Accesorios soldadura, electricidad y mecánica			500,00 €
Técnico de pruebas	40,00 €	5	200,00 €
Formación de la dotación para uso y control	40,00 €	35	1.400,00 €
TOTAL			10.338,00 €

Tabla 4-51 Presupuesto de montaje

Se aprecia que lo más costoso en lo relativo al montaje es la mano de obra, tanto mecánica como de soldadura y eléctrica. Destacar que la partida relativa al personal de PRL sería asumida por personal de la Armada debidamente cualificado para ello, acorde a la magnitud de la obra.

Presupuesto de ejecución material	518.441,60 €
Gastos generales (13% P.E.M.)	67.397,41 €
Beneficio industrial (6% P.E.M.)	31.106,50 €
Presupuesto de licitación	616.945,50 €
I.V.A. (21% P.E.M.)	129.558,56 €
PRESUPUESTO TOTAL DE OBRAS	746.504,06 €

Tabla 4-52 Presupuesto total de obras

Como se puede observar la introducción de estos sistemas es una obra de entidad en una plataforma ya construida. Sin embargo, sería mucho más sencilla y, por tanto, más económica su implantación si se tuviera en cuenta este sistema en el diseño de la extracción de gases, de cara a la construcción de las nuevas F-110, resultando una opción viable y con posibilidad de valorar para la Armada hoy en día.

Un comienzo sería instalar este sistema en varias unidades de las nuevas fragatas, para probar su eficiencia y rendimiento. Una vez se hubieran analizado los resultados de las emisiones obtenidas, sería conveniente realizar de nuevo un estudio sobre si es recomendable instalar este sistema en el resto de unidades.

Actualmente gran cantidad de buques emplean este sistema de reducción, sobre todo los mercantes de la zona del mar Báltico y el mar del Norte, cuya navegación por esas aguas implica cumplir la normativa más exigente en términos de NO_x. Como se ha expresado previamente, estas aguas constituyen una de las zonas de control de emisiones en donde los compuestos de nitrógenos emanados a la atmósfera están altamente restringidos. Países como Noruega o Finlandia son claros impulsores de este tipo de tecnología y fomentan cada vez más su uso en sus flotas de buques mercantes.

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Conclusiones obtenidas

- En primer lugar, se ha revisado la normativa de emisiones contaminantes por la que se rigen los buques mercantes.
A pesar de que la Armada no está obligada a cumplirla, sí ha mostrado interés en adaptarse a su cumplimiento. El Convenio Marpol es la principal normativa que rige las emisiones en el ámbito marítimo y de esta normativa se han extraído los límites máximos que las plataformas estudiadas pueden llegar a emitir.

Durante el desarrollo del trabajo, se han podido realizar mediciones en distintas plataformas: el patrullero P-28 “*Tabarca*”, la lancha de instrucción “*GM Salas*” y finalmente el buque de acción marítima P-46 “*Furor*”. El objetivo consistió en obtener los valores de concentración de los gases contaminantes, concretamente CO, CO₂, NO_x y SO₂, de cada una de las citadas plataformas. En base a dichos valores de concentración, se pudo calcular posteriormente la cantidad de NO_x emitida en función del tiempo y la potencia del motor, certificando así el cumplimiento o no de los límites establecidos por la normativa. De los resultados de emisiones obtenidos se han extraído las siguientes conclusiones:

- En lo que respecta al patrullero Tabarca:
 - La relación entre la potencia aportada por el motor y el nivel de las emisiones hace que dicho motor cumpla la normativa más exigente (Tier III) con creces en términos de emisiones de NO_x, a pesar de la antigüedad de la plataforma.
 - Destacar en lo relativo a las emisiones de CO que el buque tiene las mayores emisiones de las tres plataformas evaluadas, denotando la antigüedad del motor en el aspecto de eficiencia en la combustión del motor y producción de inquemados.
 - En cuanto a las emisiones de SO₂, la concentración de azufre del combustible es muy bajo, por lo que los niveles de este óxido sólo se registran a elevadas revoluciones y/o velocidad.
 - Como valoración global, no se considera necesaria la instalación de un sistema reductor de emisiones en base a los valores de concentración obtenidos en relación con la potencia entregada por el motor.
- En lo que concierne a las lanchas de instrucción:
 - Tanto los resultados de los análisis de concentración, como los cálculos realizados para el motor con diferentes valores de carga, son considerablemente negativos en

términos de óxidos de nitrógeno, sin respetar ninguno de los límites estipulados por el Convenio Marpol, en función de su año de construcción. Sin embargo, como se reseña en el punto 2.1.1.4 del presente estudio, en lo relativo a emisiones de dichos compuestos, no será necesario que buques que únicamente realicen tránsitos por aguas de jurisdicción nacional (como es el caso) cumplan la regla 13, relativa a dichas emisiones.

- Los resultados muestran que a partir de las 600 rpm los valores de emisiones de CO no superan las 100 ppm, lo cual es extraño para un motor de 2007. Sería necesario un estudio en mayor profundidad para intentar determinar el motivo de esta reducida concentración.
 - En lo que al CO₂ se refiere, su aumento se produce de manera constante con cada subida de 200 rpm, incrementándose en un valor del orden del 1%.
 - En las mediciones no se detectaron emisiones de SO₂, lo cual muestra el cumplimiento de la normativa relativa al azufre presente en el combustible.
 - En definitiva, tras el estudio de la plataforma, debido a su función y dimensiones reducidas, se puede concluir que no es viable ni necesaria la implantación de un mecanismo catalizador para reducir sus emisiones.
- En lo que respecta al BAM Furor:
 - Los cálculos para el cumplimiento de la normativa de NO_x, en base a los datos medidos, dieron como resultado que ambos motores de propulsión cumplían la normativa Tier II. Por ello, el buque podría navegar por cualquier parte del mundo cumpliendo la normativa, excepto en el interior de las zonas de control de emisiones (ZCE).
 - El reducido valor de concentración de CO presente en los humos, denota la alta eficiencia del motor debido principalmente a que son motores con pocos años de servicio pertenecientes al buque más moderno de la Armada.
 - El CO₂ es emitido con valores entre el 3 y el 7% en función de sus revoluciones, lo que supone unos valores más controlados en comparación con los obtenidos durante la medición en la lancha.
 - En este caso se podría estudiar la implantación de un reactor catalítico que permitiese reducir las emisiones hasta el cumplimiento de la normativa Tier III y que solucionara el inconveniente de las restricciones de navegación en las ZCE.
 - Destacar el hecho de haber podido realizar un estudio del buque más moderno de la flota, el BAM P-46 “*Furor*”, y poder compararlo con uno de los que cuenta con más años de servicio, el P-28 “*Tabarca*”.
Este hecho aporta al trabajo una información más real de la evolución en la calidad de los motores y sistemas que emplea la Armada Española en términos de propulsión, además del nivel máximo teórico de reducción de emisiones de gases de escape contaminantes a los que llegan sus buques.
 - Principalmente existen tipos de vías de reducción: los que tratan de generar menos emisiones y los buscan una reducción de las mismas una vez han sido producidas.
Se enfocó el trabajo en esta segunda vertiente, ya que un cambio en el motor no se contemplaba para un buque de la Armada Española debido al precio de un nuevo motor y su instalación. Debido a ello, se hizo una reseña especial a los tipos de catalizadores, aprendiendo en base a ello, el nivel de tecnología que existe a nivel comercial hoy en día y ver de esa manera las posibilidades que la Armada Española puede llegar a plantearse.

- Por último, la integración de un sistema de reducción de emisiones depende principalmente del tamaño y antigüedad de la plataforma. Según los resultados de los análisis, el más adecuado sería un catalizador comercial SCR de la compañía Wärtsilä. En base al presupuesto realizado en el punto 4.4.2, se puede ver que la instalación de un sistema reductor de esta casa para una plataforma con dos motores principales como el BAM rondaría los 746.504,06 €. Resaltar que el presupuesto sería más reducido si la instalación se realiza en una plataforma de nueva construcción, al no tener que acondicionar la cámara de máquinas para introducir un tanque de urea y el sistema de bombeo hasta el reactor catalítico. Es por ello por lo que se plantea la instalación de este sistema como opción viable para las nuevas fragatas F-110.

5.2 Líneas futuras de investigación

Muchas de las tecnologías empleadas hoy en día en los buques no son suficientes para afrontar los retos impuestos por la comunidad internacional debido a la aprobación de las diferentes normativas a las cuales deberán de adaptarse los buques en los próximos años.

5.2.1 Solución al problema del arranque en frío

El desarrollo de nuevos y mejorados motores de combustión internos, son la clave para afrontar los dos retos futuros principales: la reducción del CO₂ y el menor consumo de combustible. Sin embargo, la eminente mejora que resulta del avance de la tecnología para mejorar la eficiencia del motor, hace más laborioso el control de las emisiones de gases contaminantes. Las tecnologías estudiadas previamente como el catalizador de tres vías o los catalizadores SCR en procesos industriales son muy poco eficientes a bajas temperaturas y por ello no son capaces de cumplir su función durante el arranque, en donde las emisiones son más pronunciadas.

Las exigencias para los nuevos buques construidos a partir de 2016 en términos de óxidos de nitrógeno también presentan un reto para los desarrolladores. Dichos buques deberán cumplir el “Tier” III lo que implica que tanto los NO_x como los hidrocarburos (HC) sean controlados durante el arranque en frío mencionado previamente.

Una solución potencial a este problema es el empleo de los denominados sistemas de adsorción de hidrógeno a bajas temperaturas (Low Temperature NO_x Adsorber, LTNA) empleados de forma combinada con un catalizador de tres vías o SCR. Su funcionamiento es simple, el LTNA adsorberá los NO_x emanados por el motor a baja temperatura y, una vez el motor ha adquirido la temperatura adecuada, los libera para dejar actuar al catalizador SCR o de tres vías dentro de su rango de temperaturas. Los materiales investigados para actuar como catalizadores LTNA se pueden dividir en dos clases principalmente: los basados en mezclas de paladio o platino y zeolitas y los que se fundamentan en óxidos mezclados con cerio.

En primer término, recientes investigaciones han demostrado que el platino y el paladio tienen un comportamiento diferente con respecto a la adsorción y desorción del NO_x. En el caso del paladio, la mejor opción la presenta el paladio mezclado con óxidos de cerio y zirconio, siendo la mejor combinación para el almacenaje de NO en presencia de C₂H₄ y agua por debajo de los 100 °C, reduciendo asimismo, la formación de NO₂ y N₂O.

Del mismo modo los óxidos de manganeso han sido estudiados para este mismo propósito, demostrando que materiales de ese tipo pueden adsorber NO a una temperatura de 25 °C, deduciendo de la misma manera que puede existir una relación directa entre la capacidad oxidante de NO del compuesto y el almacenamiento de NO_x [50].

5.2.2 Solución al problema de la emisión de hollín

Las partículas de carbono emitidas por la combustión del motor, comúnmente conocidas como hollín, presentan del mismo modo un problema medioambiental y para la salud humana. Tradicionalmente, la emisión de hollín se ha resuelto colocando un filtro de partículas en la extracción de gases del motor en dónde éstas quedaban retenidas y se procedía a su combustión. Sin embargo, la reducida temperatura de trabajo de los motores diésel actuales, hace que la combustión del hollín no se produzca de forma espontánea y, por consiguiente, sea necesario un catalizador que permita reducir dicha temperatura de combustión para poder eliminarlo.

Los catalizadores de platino son los mejores para la combustión en términos de estabilidad y actividad, aunque, como se ha estudiado previamente, su elevado precio no lo hace un sistema de aplicación comercial. Una alternativa de bajo coste que trata de igualar al platino y que se está intentando aplicar en la actualidad es el empleo de óxidos de cerio (CeO_2). Esto es debido a que dicho compuesto puede generar especies de oxígeno altamente reactivas denominadas como “oxígeno activo”, las cuales tienen un alto poder oxidante, muy útil para la reacción de combustión del hollín. Sin embargo, su principal problema se centra en la escasa superficie de contacto entre el óxido de cerio y el hollín. Este inconveniente tratará de reducirse empleando estructuras macroporosas tridimensionales (3DOM) de óxido de cerio, consiguiendo así aumentar la superficie de contacto entre ambos, tal y como se aprecia en la Figura 5-1.

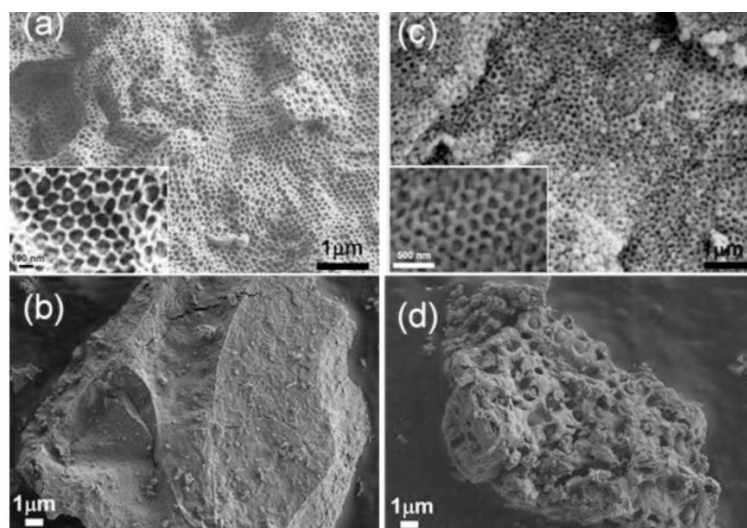


Figura 5-1 PrO_x 3DOM (a), PrO_x (b), CeO_2 3DOM (c), CeO_2 (d) [51]

Otra ventaja del catalizador de óxido de cerio es que puede mejorar la combustión del hollín en presencia de NO_x mediante el llamado “mecanismo de NO_2 asistido”. Este sistema cataliza la oxidación del NO a NO_2 aunque de manera mucho menor que la del platino. Sin embargo, al contrario que con el platino, el NO_2 obtenido puede reaccionar directamente con el hollín a bajas temperaturas, o ser absorbido por el catalizador, generando a su vez más “oxígeno activo”. Ambos caminos suponen una mejora en la combustión del hollín y aportan del mismo modo una reducción de las emisiones de NO_x .

A pesar de lo mencionado, el óxido de cerio tiene actualmente ciertas limitaciones en su capacidad de almacenaje y liberación de partículas, además de problemas de actividad catalítica con el tiempo. El óxido de paraseodimio (PrO_x) presenta el núcleo de las investigaciones actuales en este ámbito, fundamentadas en el mayor potencial reductor de este elemento frente al cerio, mejorando, por consiguiente, los mecanismos de producción de “oxígeno activo” y del “ NO_2 asistido” [51].

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Gobierno de España, «Ministerio para la Transición Ecológica, Protocolo de Kioto,» [En línea]. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/el-proceso-internacional-de-lucha-contra-el-cambio-climatico/naciones-unidas/protocolo-kioto.aspx>. [Último acceso: diciembre 2018].
- [2] Secretaría de Estado de Medioambiente, «Avance de emisiones de gases de efecto invernadero,» 2017.
- [3] International Energy Agency, «World Energy Outlook,» IEA, Paris, Francia, 2014.
- [4] Convenio Marpol, «Convenio internacional para prevenir la contaminación de buques,» 73/78.
- [5] Convenio Marpol 73/78, «Anexo VI Revisado del convenio Marpol,» 1997.
- [6] Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, «Protocolo de Montreal,» Kenya, Montreal, 2000.
- [7] Parlamento Europeo y Consejo de la UE, «Reglamento (CE) no 1005/2009,» Diario oficial de la UE, 2009.
- [8] Gobierno de España, «Ministerio para la Transición Ecológica, óxidos de nitrógeno,» Gobierno de España, [En línea]. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/calidad-del-aire/salud/oxidos-nitrogeno.aspx>. [Último acceso: enero 2019].
- [9] Conselleria de Agricultura, Medio Ambiente, Cambio Climático y Desarrollo Rural, Generalitat Valenciana «La acidificación del medio ambiente,» 2015. [En línea]. Disponible en: <http://www.agroambient.gva.es/es/web/calidad-ambiental/la-acidificacion-del-medio-ambiente>. [Último acceso: enero 2019].
- [10] TFG Luis Estarellas Perales, «Eficiencia energética en buques de guerra. Análisis de datos de consumo de un buque de guerra y posibilidades de reducción,» CUD, Uvigo, Marín, Pontevedra, 2018.
- [11] Gobierno de España, Ministerio para la Transición Ecológica, «Actividades emisoras de compuestos orgánicos volátiles,» [En línea]. Disponible en:

- https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/emisiones/act-emis/compuestos_organicos_volatiles.aspx. [Último acceso: enero 2019].
- [12] Gobierno de España, «Disposición 6228 del BOE num 83 relativo a las enmiendas al Código Técnico de los NOx,» Madrid, 2011.
 - [13] Convenio Internacional para prevenir la contaminación por los buques, «Código técnico relativo al control de las emisiones de óxidos de nitrógeno de los motores diésel marinos,» 2008.
 - [14] Chevron, «Everything You Need to Know About Marine Fuel,» Junio 2012. [En línea]. Disponible en: <https://www.chevronmarineproducts.com>. [Último acceso: Enero 2019].
 - [15] World Fuel Services, «ISO 8217-2017 Requerimientos del Diésel Fuel Marine,» 2017.
 - [16] International Standard Organization, «ISO 8216-1/2017 Fuel (class F) classification - Categories of marine fuels,» 2017.
 - [17] Parlamento Europeo y Consejo de la UE, «Reglamento (CE) 2037/2000 sobre las sustancias que agotan la capa de ozono,» Diario oficial de las comunidades europeas, 2000.
 - [18] Comisión de las Comunidades Europeas, «Estrategia de la Unión Europea para reducir las emisiones atmosféricas de los buques de navegación marítima,» Bruselas, 2002.
 - [19] Parlamento Europeo y Consejo de la UE, «Reglamento (UE) relativo al seguimiento, notificación y verificación de las emisiones de dióxido de carbono generadas por el transporte marítimo,» Diario Oficial de la Unión Europea, Bruselas, 2015.
 - [20] Consejo de la UE, «Directiva relativa a la reducción del contenido de azufre de determinados combustibles líquidos,» Diario Oficial de la Unión Europea, 2009.
 - [21] Gobierno de España Ministerio para la Transición Ecológica, «Real Decreto 818/2018 sobre medidas para la reducción de las emisiones nacionales de determinados contaminantes atmosféricos.,» Boletín Oficial del Estado (BOE), Madrid, 2018.
 - [22] Ministro de Industria Turismo y Comercio, «Real Decreto 1088/2010,» BOE, Madrid, 2010.
 - [23] María Ariela Peralta, «Eliminación de contaminantes de gases de escape de motores diésel: estabilidad de catalizadores,» Universidad Nacional del Litoral, Facultad de ingeniería química, Santa Fé, Argentina.
 - [24] Tesis doctoral Benjamín Pla Moreno, «Análisis del proceso de la recirculación de los gases de escape de baja presión en motores diésel sobrealimentados,» Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2009.
 - [25] Mauricio Barros, «Inyección diésel,» Universidad del Azuay , Ecuador, 2015.
 - [26] Jocelyn Cullen, «Basic principles of direct water injection,» Singapore Polytechnic Singapore Maritime Academy & Maritime Institute Of William Barentsz Bachelor Degree in Maritime Operations (BMO) Diesel Technology, 2015.
 - [27] Jan Babicz, Encyclopedia of Marine Technology, Wärtsilä.
 - [28] Incbio, «Combustible emulsionado,» [En línea]. Disponible en: <http://incbio.com/fwe/es/>. [Último acceso: 29 enero 2019].

- [29] Univesidad Rey Juan Carlos, Patricia Pizarro de Oro, «Reducción de contaminación mediante combustibles emulsionados,» 5 octubre 2013. [En línea]. Disponible en: <http://www.madrimasd.org/blogs/energiasalternativas/2013/10/05/132197>. [Último acceso: 19 enero 2019].
- [30] Marine Engines, «Humid Air Motor - Technology for green profits,» PrimeServ.
- [31] Isaac Asencio Cegarra, «Reducción catalítica selectiva de óxidos de nitrógeno empleando zeolitas intercambiadas como catalizador,» I.S.B.N. Ediciones de la UCLM , Cuenca, 2008.
- [32] MCAT, «Scrubbers (lavadores de gases)» [En línea]. Disponible en: <http://www.scrubbers.com.mx/>. [Último acceso: 6 febrero 2019].
- [33] Íñigo Agote e Iñaki Azkarate, «Hidrógeno y pilas de combustible: estado actual y perspectiva inmediata,» Universidad Pontificia de Comillas, Madrid, 2007.
- [34] TFG Sergio Méndez Learreta, «Estudio de los sistemas de reducción del NO_x y análisis del comportamiento del sistema de reducción catalítica selectiva en el simulador MC90-V,» Universidad del País Vasco, 2017.
- [35] Dr. ingeniero agrónomo Helio Catalán, «Motores: Evolución moderna,» 2010.
- [36] Ismael Prieto, «Reducción de emisiones contaminantes en grandes instalaciones de combustión,» Universidad de Oviedo, Oviedo.
- [37] Tesis doctoral Hermenegildo García Gómez, «Compuestos de Paladio soportados en distintos materiales. Aplicación en Catálisis heterogénea,» Universidad Politécnica de Valencia.
- [38] Arvind Kumar, «Air pollution,» National Institute of Technology Rourkela, Rourkela, India, 2014.
- [39] TFG Arnau Tarragó Fontaneda, «Estudio de los dispositivos y sistemas que permiten el control y reducción de la contaminación en el sector del transporte por carretera,» Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, 2016.
- [40] Ministerio de Defensa, Gobierno de España, «Armada Española,» [En línea]. Disponible: <http://www.armada.mde.es/ArmadaPortal/page/Portal/ArmadaEspannola/buquessuperficie>. [Último acceso: enero 2019].
- [41] MTU Friedrichshafen, Descripción e instrucciones de servicio Motor Diésel 16 V 956 TB 91.
- [42] Navantia, «Plan de mantenimiento motor 16V 956 TB91,» Unidad productiva de motores.
- [43] TFG Jose Ramón Úbeda Calvo, «Análisis del sistema de propulsión del Patrullero “Tabarca”. Mantenimiento y mejoras del sistema,» CUD, Uvigo, Marín, Pontevedra, 2016.
- [44] Patrullero Tabarca, «Libro de destino de electricidad,» Armada Española.
- [45] Escuela Naval Militar, «Manual descriptivo de las lanchas de instrucción A-121,» Escuela Naval Militar, Marín, Pontevedra, 2008.
- [46] Caterpillar, «Sistema de potencia marinos, motores de propulsión comerciales,» CAT, [En línea]. Disponible en: https://www.cat.com/es_ES/products/new/power-systems/marine-

- power-systems/commercial-propulsion-engines.html. [Último acceso: 4 febrero 2019].
- [47] Caterpillar, «Manual de operación y mantenimiento. Motores marinos C 18,» Caterpillar, 2003.
- [48] Gasóleo mar e+, «Combustible para grandes embarcaciones,» Repsol, [En línea]. Disponible en: <https://www.repsol.es/es/productos-y-servicios/gasoleos-y-fueloleos/suministro-a-buques/mar-eplus/index.cshtml>. [Último acceso: 1 febrero 2019].
- [49] UNE, «EN 13384-1 , cálculo de chimenea de evacuación de humos,» 2016.
- [50] UNE, «UNE 123001, Cálculo y diseño de chimeneas metálicas (Guía de aplicación),» AENOR, Madrid, julio 2005.
- [51] CAT, «Motor Caterpillar C18 INDM Acert,» 2009.
- [52] Pedro Fernández Díez, «Control y eliminación de los NOx,» Universidad de Cantabria, Santander, 2017.
- [53] Environmental Technologies, Wärtsilä, «Product Guide,» 2017.
- [54] TFG Alexandra Ruiz Saráchaga, «Cálculo y diseño de un sistema reductor de NOx en un motor de 4T,» Universidad de Cantabria, 2012.
- [55] Agustín Bueno López, «Mn-based mixed oxides for low temperature NOx adsorber applications,» Applied Catalysis A, General, 2018.
- [56] Virginia Alcalde-Santiago, «Three-dimensionally ordered macroporous PrOx: An improved alternative to ceria catalysts for soot combustion,» Applied Catalysis B: Environmental, 2018.

7 ANEXO I: CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL EQUIPO DE MEDICIÓN

En el presente anexo se muestran las especificaciones de la sonda dadas por el fabricante, dentro de las cuales encontramos, rangos de medición, exactitudes, resolución y tiempo necesario para una exactitud del 90% además de otros datos de interés acerca de la sonda.

Parámetro	Rango medición	Exactitud	Resolución	t90 ¹
O ₂	0...25Vol. %	±0.2Vol. %	0.01Vol. %	< 20s
CO, H ₂ -comp.	0... 10000ppm	±10ppm o ±10% del v.m. ¹ a 0...200ppm ±20ppm o ±5% del v.m. ¹ a 201...2000ppm ±10% del v.m. a 2001... 10000ppm	1ppm	< 40s
CObajo, H ₂ -comp.	0...500ppm	±2ppm ±5% del v.m. a 0.0...39.9ppm a 40.0...500ppm	0.1ppm	< 40s
N ₂ O	0...500ppm	±10ppm ±5% del v.m. a 0... 199ppm resto rango	0.1ppm	< 40s
SO ₂	0...5000ppm	±10ppm ±10% del v.m. a 0...99ppm resto rango	1ppm	< 40s
NObajo	0...300ppm	±2ppm ±5% del v.m. a 0.0...39.9ppm a 40.0...300.0ppm	0.1ppm	< 30s
NO	0...4000 ppm	± 5ppm ± 5% del v.m. ±10% del v.m. a 0...99ppm a 100... 1999ppm a 2000...4000ppm	1ppm	< 30s
Tiro, Δp1	-40...40hPa	+ 1.5% del v.m. + 0.03hPa + 1.5% del v.m. a -40.00...-3.00hPa a -2.99...2.99hPa a 3.00...40.00hPa	0.01hPa	-
Δp2	-200...200hPa	±1.5% del v.m. ± 0.5hPa ±1.5% del v.m. a -200.0...-50.0hPa a -49.9...49.9hPa a 50.0...200.0hPa	0.1hPa	-

¹ Tiempo de respuesta 90%, duración mínima de la medición recomendada para garantizar lecturas correctas: 3 min

Tabla 7-1 Rangos de medición y exactitudes (I)

Parámetro	Rango Medición	Exactitud	Resolución	t90 ¹
P abs	600...1150hPa	±10hPa	1hPa	-
Temperatura (NiCrNi)	-40...1200°C ²	± 0.5°C at 0.0...99°C ± 0.5% del v.m. resto rango	0.1°C a -40.0...999.9°C 0.1°C a 1000°C...1200°C	según sonda
Rendimiento	0...120%	-	0.1%	-
Pérdida por humos	0...99,9%	-	0,1%	-
Punto de rocío PdC	0...99,9°C	-	0.1%	-
Determinación CO2 (Cálculado a partir del O2)	0...CO2 máx.	± 0.2 Vol%	0.1 Vol%	<40s

¹ Tiempo de respuesta 90%, duración mínima de la medición recomendada para garantizar lecturas correctas: 3 min

² Con un tipo de termopar S también puede medir temperaturas hasta máx. 1780 ° C.

Tabla 7-2 Rangos de medición y exactitudes (II)

Características	Valores
Rango de temp. de funcionamiento	-5...50 °C
Temp. de almacenamiento/transporte	-20...50 °C
Alimentación	Batería: 3.7 V / 2.4 Ah Alimentador/cargador: 6. V / 1.2 A
Medidas (L x An x Al)	283 x 103x 65 mm
Peso	960 g
Memoria	máx. 100 carpetas, máx 10 situaciones por carpeta
Visualizador	Monocromo, 4 tonos de gris, 160 x 240 píxels
Temp. de almacenamiento de la batería:	±0...35 °C
Autonomía	> 6h (bomba en funcionamiento, luz apagada, 20°C de temperatura ambiente)
Tiempo de carga de la batería	aprox. 5-6 h
Rendimiento de la bomba con x hPa	Presión positiva máx. en la punta de la sonda: ± 50 mbar Presión negativa máx. en la punta de la sonda: -200 mbar
Inicialización y tiempo de fase cero	30 sec.
Clase protección	IP 40
Opción de Bluetooth	Denominación: BlueNiceCom IV Código de producto cualificado Bluetooth BNC4_HW2x_SW2xx Identificador Bluetooth B013784 Identificador empresa Bluetooth 10274
Opción de Bluetooth	Rango <10 m
Certificación de la opción	Países UE Bélgica (BE), Bulgaria (BG), Dinamarca (DK), Alemania (DE), Estonia (EE), Finlandia (FI), Francia (FR), Grecia (GR), Irlanda (IE), Italia (IT), Latvia (LV), Lituania (LT), Luxemburgo (LU), Malta (MT), Países Bajos (NL), Austria (AT), Polonia (PL), Portugal (PT), Rumanía (RO), Suecia (SE), Eslovaquia (SK), Eslovenia (SI), España (ES), República Checa (CZ), Hungría (HU), Reino Unido (GB) y República de Chipre (CY), Turquía (TR). Países de la EFTA Islandia, Liechtenstein, Noruega y Suiza Otros países EE.UU., Canadá, Turquía, Colombia, El Salvador, Ucrania, Venezuela, Ecuador, Australia, Nueva Zelanda, Bolivia, República Dominicana, Perú, Chile, Cuba, Costa Rica, Nicaragua, Corea, México
Directiva de la UE	2014/30 UE

Tabla 7-3 Otros datos técnicos del instrumento

8 ANEXO II: MEDICIÓN EN LA LANCHAS GM CHEREGUINI

MOTOR PRINCIPAL GM CHEREGUINI

Valores a medir	600 rpm (13:12:44)	800 rpm (13:15:34)	1000 rpm (13:20:14)	1200 rpm (13:22:18)	1400 rpm (13:23:33)	1600 rpm (13:24:42)
T _{gas} (°C)	34,6	38,5	36,9	38,4	35,3	31,0
T _{ambiente} (°C)	21,2	21,8	21,8	21,7	21,6	21,6
CO (ppm)	0	232	223	209	328	325
CO ₂ (%)	2,01	1,87	1,70	2,13	1,66	2,24
NO (ppm)	405	339	187	227	210	198
NO _x (ppm)	425	356	196	238	220	208
SO ₂ (ppm)	1	0	0	0	0	0

Tabla 8-1 Mediciones en el motor principal de la GM Chereguini

De la Tabla 8-1, se aprecia que los valores obtenidos en esta prueba son muy similares a los obtenidos con el motor de la lancha GM Salas. Las emisiones de NO_x se van reduciendo de forma progresiva, de un modo muy parecido a las obtenidas en la Salas, pasando de 425 a 208 ppm (51%), destacando que la temperatura de gases de escape se sostiene entre los 31 y 39 °C en todo momento. En lo que respecta al CO, a 600 rpm la sonda no captó ningún valor, sin embargo, a partir de 800 rpm, los valores son del orden de los obtenidos en el otro motor, aunque, en este caso, manteniéndose constante hasta las 1400 rpm, aumentando en ese momento 120 ppm hasta llegar a las 325 (63%). El CO₂ por su parte se mantiene también en un rango muy similar al anterior, acotando su valor entre el 1,6 y 2,25%. Tampoco se denotan emisiones de SO₂ significativas. Los datos se observan visualmente en la Figura 8-1.

A modo de conclusión en base a todos los datos presentados anteriormente, a pesar de confirmar los resultados del motor de la Salas con el de la Chereguini, se puede denotar una clara diferencia entre las emisiones de ambos motores cuando se está trabajando en vacío o con diferentes cargas. A diferencia de las plataformas anteriores, la posibilidad de haber podido medir en vacío uno de los motores permite vislumbrar el rango de actuación del motor con diferentes cargas, observando la desigualdad existente entre las emisiones con el motor en vacío y con carga. Un dato importante son las emisiones de CO, las cuales fueron mayores con el motor en vacío, lo que nos permite deducir que, a priori, el motor es más eficiente cuanto más carga tenga.

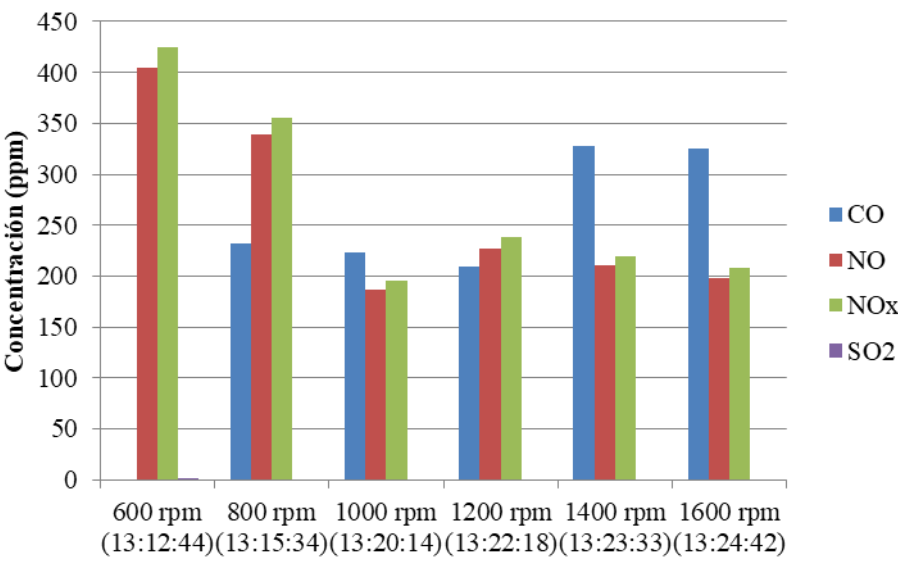


Figura 8-1 Emisiones del motor principal de la GM Chereguini