



UNIVERSIDADE DA CORUÑA



ESCOLA TÉCNICA SUPERIOR DE
NÁUTICA E MÁQUINAS

TRABAJO FIN DE MÁSTER

SISTEMA SCR PARA EL CONTROL DE EMISIONES

MÁSTER EN INGENIERÍA MARINA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA Y MÁQUINAS

JUNIO – 2021

AUTOR: SANTIAGO BAÑA PÉREZ

DIRECTOR: FELIPE ANTELO GONZÁLEZ



UNIVERSIDADE DA CORUÑA



ESCOLA TÉCNICA SUPERIOR DE
NÁUTICA E MÁQUINAS

TRABAJO FIN DE MÁSTER

SISTEMA SCR PARA EL CONTROL DE EMISIONES

MÁSTER EN INGENIERÍA MARINA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA Y MÁQUINAS

JUNIO – 2021

AUTOR:

DIRECTOR

Fdo.: Santiago Baña Pérez

Fdo.: Felipe Antelo González

RESUMEN

A medida que avanzamos en el tiempo las restricciones respecto a la contaminación de los buques es cada vez más estricta porque son responsables del 90 % del comercio internacional debido a que casi el 80 % de los países reconocidos por la ONU tienen salida al mar.

En términos de emisiones mundiales, el transporte marítimo representa una pequeña parte del total, pero junto con la aviación, en los últimos años han sido de las fuentes de emisiones con crecimiento mayor.

Es por ello que tiene vital importancia tomar medidas para la reducción de la contaminación marítima y en el presente trabajo se va a explicar la normativa actual respecto a la contaminación NO_x y sistemas utilizados para su reducción.

En este TFM se detalla con relativa profundidad el sistema de reducción catalítico selectivo (SCR) ya que actualmente tiene la mayor eficacia en el control de emisiones de NO_x garantizando del 95 % de reducción.

En la última parte se explican los problemas encontrados durante la operación y mantenimiento del sistema SCR y las soluciones llevadas a cabo a bordo.

RESUMO

A medida que avanzamos no tempo as restricións respecto a contaminación dos buques é cada vez máis estrita porque son responsables co 90 % do comercio internacional debido a que case o 80 % dos países recoñecidos pola ONU teñen saída ao mar.

En termos de emisións mundiais, o transporte marítimo representa só unha pequena parte do total, pero xunto coa aviación, nos últimos tempos foron as fontes de emisións que máis medraron.

Polo tanto, é moi importante tomar medidas para reducir a contaminación mariña e no presente traballo vaise a explicar a normativa actual respecto a contaminación NO_x e os sistemas que se empregan para a súa redución.

Neste TFM detállase con certa profundidade o sistema de redución catalítica selectiva (SCR), xa que actualmente ten a maior eficiencia no control das emisións de NO_x, garantindo unha redución do 95%.

A última parte explica os problemas atopados durante a operación e mantemento do sistema SCR e as solucións levadas a cabo a bordo.

ABSTRACT

As we move forward in time the restrictions on ship pollution are becoming more stricter because they are responsible for 90% of international trade due to almost 80% of countries recognized by the UN are landlocked.

In terms of global emissions, shipping represents a small part of total, but together with aviation, in recent years it has been one of the fastest growing sources of emissions.

It is very important to take measures for the reduction of maritime pollution and this project will explain the current regulations regarding NO_x pollution and the systems used for its reduction.

In this TFM the Selective Catalytic Reduction (SCR) system is detailed in relative depth, since it currently has the highest efficiency in controlling NO_x emissions, guaranteeing a 95% reduction.

The last part explains the problems found during the operation and maintenance tasks of the SCR system and the solutions carried out on board.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a todos los profesores que he tenido, tanto en la universidad como fuera de ella, por haber fomentado desarrollo de mi curiosidad.

Agradecer especialmente a mi amigo y tutor Felipe Antelo González, no sólo por la ayuda con este trabajo, sino por todo su esfuerzo y sacrificio personal que lleva a cabo por la profesión y la futura incorporación de nuevos Oficiales.

También quiero agradecer a aquellos que me han formado como profesional y como persona, realizando un trabajo que nunca se podrá valorar lo suficiente.

En especial a mi familia, que me ha dedicado todo su tiempo, todo su esfuerzo y todos sus recursos con tal de educarme y formarme lo mejor posible para afrontar la vida.

SISTEMA SCR PARA EL CONTROL DE EMISIONES

ÍNDICE GENERAL



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA Y MÁQUINAS
MÁSTER EN INGENIERÍA MARINA

FECHA: **JUNIO 2021**

AUTOR: Santiago Baña Pérez

Fdo.: Santiago Baña Pérez

INDICE GENERAL

RESUMEN	3
OBJETIVO	9
MEMORIA	11
1. INTRODUCCIÓN	12
2. CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA	12
2.1. Contaminación de los buques	14
2.2. Óxidos de Nitrógeno (NO _x)	20
2.2.1. Reacciones de los NO _x	22
2.2.1.1. Lluvia ácida	23
3. MARPOL	25
3.1. Anexo VI del MARPOL	26
3.1.1. Límites NO _x	27
3.1.2. Límites SO _x	29
3.1.3. Eficiencia de los buques	30
3.1.4. Sustancias que dañan la capa de Ozono	31
4. DIFERENTES MÉTODOS DE REDUCCIÓN DE EMISIONES NO _x	31
4.1. Métodos primarios	32
4.1.1. Reducción de la duración de la inyección	32
4.1.2. Modificación toberas inyección	33
4.1.3. Enfriamiento aire barrido	35
4.1.4. Introducción de agua	35
4.1.5. Recirculación de gases de escape (EGR)	36
4.2. Métodos secundarios	37
5. SISTEMA SCR PARA CONTROL DE NO _x	37
5.1. Principio de funcionamiento	38
5.1.1. Sistema SCR HP	41
5.1.2. Sistema SCR LP	42
5.2. Componentes de un sistema SCR	44
5.2.1. Componentes específicos del SCR HP	59
5.2.2. Componentes específicos del SCR LP	65
5.3. Operación del sistema SCR	66
5.3.1. Operación Tier II con SCR desactivado	66

5.3.2. Arranque del sistema SCR al entrar en Tier III	67
5.3.3. Aumento de carga y velocidad con SCR	70
5.3.4. Atracando en puerto zona Tier III.....	71
5.3.5. Arranque SCR desde puerto con nivel Tier III.....	72
5.3.6. Parada del sistema SCR.....	72
6. PROBLEMAS DURANTE LA OPERACIÓN DE SISTEMAS SCR.....	72
6.1. Obstrucción de tuberías	72
6.2. Fallo sensor de humedad y temperatura entrada aire T/C	76
6.3. Fallo sensor temperatura entrada gases a la turbo	77
6.4. Manómetros locales de estación de bombeo de urea	78
6.5. Tobera de la lanza de dosificación	79
CONCLUSIONES	83
REFERENCIAS	86
DEFINICIONES Y ABREVIATURAS.....	90
ÍNDICE DE TABLAS	93
ÍNDICE DE FIGURAS	95
ANEXOS.....	98
Anexo 1 – Diagrama de tuberías del SCR	99
Anexo 2 - Planos conexiones ECS	100
Anexo 3 - Ejemplo garantía obstrucción tuberías	102
Anexo 4 - Garantía nueva tuberías diferencial presión	103
Anexo 5 - Garantía sensor entrada aire al T/C	104
Anexo 6 - Garantía sensor entrada gases al T/C.....	105
Anexo 7 - Fallo manómetros urea SCR	106

SISTEMA SCR PARA EL CONTROL DE EMISIONES

OBJETIVO



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA Y MÁQUINAS
MÁSTER EN INGENIERÍA MARINA

FECHA: **JUNIO 2021**

AUTOR: Santiago Baña Pérez

Fdo.: Santiago Baña Pérez

OBJETIVO

El objeto del presente trabajo es fortalecer el conocimiento del autor en el sistema de control de emisiones nocivas de óxidos de nitrógeno derivadas de la combustión en motores alternativos lentos de propulsión marina por medio de la reducción catalítica selectiva en un reactor situado en la línea de escape. Este sistema es conocido como SCR por las siglas en inglés correspondientes a Selective Catalytic Reduction.

Por otro lado, no menos importante es la intención de concluir con dignidad la etapa académica conducente al título profesional de Jefe de Máquinas de la Marina Mercante por medio de la superación del Máster en Ingeniería Marina.

En un segundo orden, también se intentará crear un breve manual en español que sirva de referencia a futuros estudiantes y profesionales en relación a esta tecnología con el fin de que el lector pueda abordar con cierta solvencia las vicisitudes del sistema SCR toda vez que será instalado con profusión en muchos medios de transporte dada su eficacia.

Por último, aportando la experiencia de haber operado con éxito el sistema durante 2 años a bordo del buque metanero *Rias Baixas Knutsen*, el autor intentará mostrar los inconvenientes menores que han aparecido así como las soluciones que se instruyeron, algunas de las cuales mejoraron el diseño original.

Se esperan lograr unas conclusiones de interés que permitan valorar el sistema más allá de las bondades que indica su fabricante y que abran el camino a una futura investigación con el fin de mejorar los puntos débiles del SCR para el control de emisiones nítricas en el transporte marítimo.

SISTEMA SCR PARA EL CONTROL DE EMISIONES

MEMORIA



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA Y MÁQUINAS

MÁSTER EN INGENIERÍA MARINA

FECHA: JUNIO 2021

AUTOR: Santiago Baña Pérez

Fdo.: Santiago Baña Pérez

1. INTRODUCCIÓN

Casi la totalidad del comercio mundial es transportado por mar y en los últimos 40 años la cantidad de toneladas transportadas por vía marítima se ha visto cuadruplicada.

En un estudio sobre las emisiones de los buques llevado a cabo en 2017, se estimaba que, de no tomarse medidas, sus emisiones aumentarían entre un 50 % y un 250 % debido a su rápido crecimiento. Con la entrada en vigor del Anexo VI de MARPOL se empieza a intentar reducir las emisiones de los buques creando los llamados niveles Tier I, Tier II y Tier III. Para cumplir con los requisitos de emisiones NO_x más estrictos del nivel Tier III existen diversos métodos siendo el más eficaz el sistema de reducción catalítico selectivo.

Se pretende en este TFM tratar en profundidad todo el sistema SCR, sus partes principales, funcionamiento y finalmente se expondrán una serie de problemas encontrados durante su funcionamiento normal y las soluciones adoptadas.

2. CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

La contaminación atmosférica se define como la presencia en la atmósfera de elementos contaminantes que alteran su composición y que afectan a cualquier componente del ecosistema. Desde un punto de vista antropocéntrico la contaminación atmosférica se refiere a los contaminantes que afectan la salud o el bienestar humano.

Según su origen los contaminantes se clasifican en:

- **Antropogénicos:** derivados de la actividad humana (procesos industriales, transporte de mercancías, generación energética...)

Las emisiones derivadas de la combustión utilizada para la generación de energía o vapor, dependen de la calidad de los combustibles y de la eficiencia de los quemadores, mantenimiento del equipo y de la presencia de equipo de control al final del proceso como pueden ser los filtros, torres de lavado, SCR... Los principales contaminantes asociados a la combustión son SO₂, NO_x, CO₂, CO e hidrocarburos).

- **Naturales:** resultantes de procesos de la naturaleza (erupciones volcánicas, suspensión de suelos...).

En particular a todo aquello emitido por la vegetación y la actividad microbiana en suelos y océanos, que se les denomina emisiones biogénicas, cuyo papel es importante en la química de la troposfera al participar directamente en la formación de ozono. Las emisiones biogénicas incluyen óxido de nitrógeno, hidrocarburos, dióxido y monóxido de carbono y compuestos de nitrógeno y azufre.

Según su estado físico son gases como los óxidos de azufre (SO_x), de nitrógeno (NO_x), el monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2), los hidrocarburos, el ozono (O_3) y compuestos volátiles orgánicos e inorgánicos o partículas como polvo y aerosoles.

Se consideran **primarios** cuando están presentes tal como fueron emitidos y **secundarios**, cuando se forman a partir de los primarios por una reacción química como es el caso del O_3 y de los ácidos sulfúrico y nítrico.

Según su tamaño, las partículas se depositan cerca o a cierta distancia de la fuente de emisión. Si son muy pequeñas pueden mantenerse suspendidas y ser transportadas a grandes distancias. Dentro de las partículas suspendidas se denomina "respirables" a las de un diámetro menor o igual a $10 \mu\text{m}$ por su capacidad de introducirse en las vías respiratorias. Cuanto más pequeñas son las partículas, mayor es su capacidad de penetración en el árbol respiratorio. Las partículas finas cuyo diámetro aerodinámico es $\leq 2,5 \mu\text{m}$ alcanzan fácilmente los bronquiólos terminales y los alvéolos, desde donde pueden ser fagocitadas por los macrófagos alveolares y atravesar la barrera alvéolo-capilar para ser transportadas hacia otros órganos por la circulación sanguínea (Oyarzun, M., 2010) [1]

Más recientemente se han descrito las partículas ultrafinas cuyo diámetro es aún menor ($\leq 0,1 \mu\text{m}$) y pueden pasar directamente desde los alvéolos al torrente circulatorio. Las partículas pueden contener compuestos orgánicos como los hidrocarburos aromáticos policíclicos e/o inorgánicos como sales y metales. (INECC, 2007) [2]

2.1. Contaminación de los buques

El transporte marítimo es vital para la economía, ya que el 90 % del comercio internacional lo utiliza debido a las ventajas que ofrece. (Vacas, L., 2012) [3]

Entre estas ventajas están la economía de los fletes, al poder transportar un mayor número de mercancías en cada travesía, mayor eficiencia energética, mayor seguridad, etc. (Cánovas, B., 2020) [4]

El transporte marítimo es uno de los más eficientes porque con menor uso de energías pueden transportar una gran cantidad de carga.

Es importante recordar que el mar cubre casi las tres cuartas partes del planeta [5] y que, de los 194 países que reconoce la ONU, 150 tienen salida al mar, por lo que el comercio mundial depende del transporte marítimo. (Arzabal, M., 2020) [6]

Casi la totalidad del comercio mundial es transportado por mar y, en los últimos 40 años, la cantidad de toneladas transportadas por este medio se ha visto cuadruplicada. En la figura 2.1.1 se muestra la densidad del tráfico en 2018.

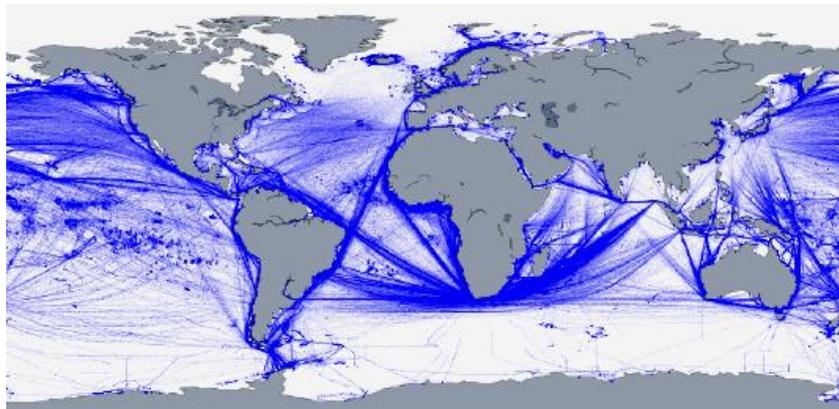


Figura 2.1.1 - Datos globales buques con AIS en 2018

Fuente: IMO (2020) [13]

El comercio marítimo mundial sigue creciendo año tras año, aunque en el 2018 aumentó a menor ritmo, como resultado de la evolución de la actividad económica y comercial mundial. Su volumen aumentó un 2,7 %, debajo de los promedios históricos del 3,0 % y del 4,1 % registrados en 2017, y esta pérdida de impulso afectó a la práctica totalidad de los segmentos del transporte marítimo.

Esto se debió principalmente a las tensiones comerciales y el proteccionismo (figura 2.1.2), seguido de la decisión del Reino Unido (Gran Bretaña e Irlanda del Norte) de abandonar la Unión Europea, la transición económica china, las turbulencias geopolíticas como la tensión en torno al estratégico cuello de botella marítimo del estrecho de Ormuz, problemas ambientales y las perturbaciones de la oferta, como las registradas en el sector petrolero. (ONU, 2019) [11]



Figura 2.1.2 - Factores de incertidumbre

Fuente: ONU (2019) [11]

El crecimiento también se vio lastrado por acontecimientos específicos de cada país como la recesión en algunas economías emergentes, la debilidad de los sectores industriales en múltiples regiones, la desaceleración china y una menor demanda de importaciones tanto en países desarrollados como en desarrollo.

Pese a las dificultades existentes, 2018 marcó un hito, ya que se alcanzó un volumen total de 11.000 millones de toneladas como se ve en la figura 2.1.3.

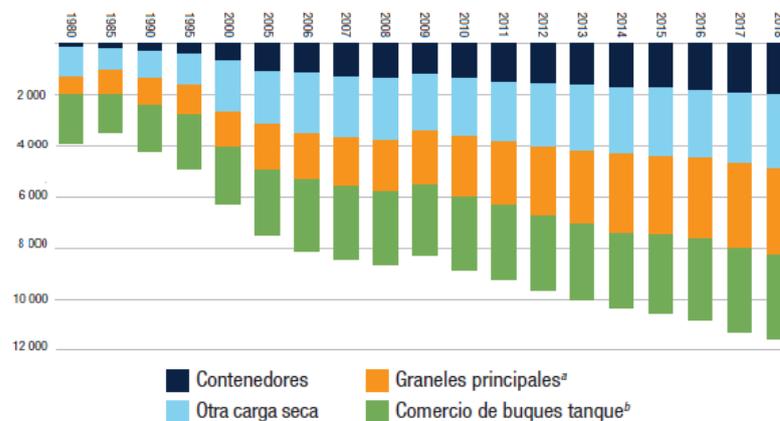


Figura 2.1.3 - Evolución comercio marítimo internacional (millones de ton.)

Fuente: ONU (2019) [11]

(En millones de toneladas cargadas)				
Año	Comercio de buques tanque ^a	Principales mercancías a granel ^b	Otra carga seca ^a	Total (todo tipo de carga)
1970	1 440	448	717	2 605
1980	1 871	608	1 225	3 704
1990	1 755	988	1 265	4 008
2000	2 163	1 186	2 635	5 984
2005	2 422	1 579	3 108	7 109
2006	2 698	1 676	3 328	7 702
2007	2 747	1 811	3 478	8 036
2008	2 742	1 911	3 578	8 231
2009	2 641	1 998	3 218	7 857
2010	2 752	2 232	3 423	8 408
2011	2 785	2 364	3 626	8 775
2012	2 840	2 564	3 791	9 195
2013	2 828	2 734	3 951	9 513
2014	2 825	2 964	4 054	9 842
2015	2 932	2 930	4 161	10 023
2016	3 058	3 009	4 228	10 295
2017	3 146	3 151	4 419	10 716
2018	3 194	3 210	4 601	11 005

Tabla 2.1.1 - Millones de toneladas transportadas por año 1970-2018

Fuente: ONU (2019) [11]

En 2018 la UNCTAD tenía una previsión de expansión del comercio marítimo internacional a un ritmo de 3,4 % entre 2019 y 2024, impulsado sobre todo por un aumento de los contenedores, los graneles secos y el gas.

La crisis sanitaria y económica mundial desencadenada por la pandemia ha transformado de forma radical el panorama del transporte y el comercio marítimos y ha afectado considerablemente a las perspectivas de crecimiento.

En 2020, según datos de la UNCTAD el volumen del comercio marítimo internacional cayó un 4,1 % debido a la pandemia y la economía mundial se vio gravemente afectada por un doble choque de oferta y demanda.

Estas tendencias se desarrollaron con el telón de fondo de un debilitamiento registrado ya en 2019, debido a una pérdida de impulso en el comercio marítimo internacional ya que su volumen creció un 0,5 % en 2019, frente a un 2,8 % en 2018. Al mismo tiempo, el crecimiento del tráfico portuario mundial de contenedores cayó al 2,0 %, frente al 5,1 % registrado en 2018. (ONU, 2020) [15]

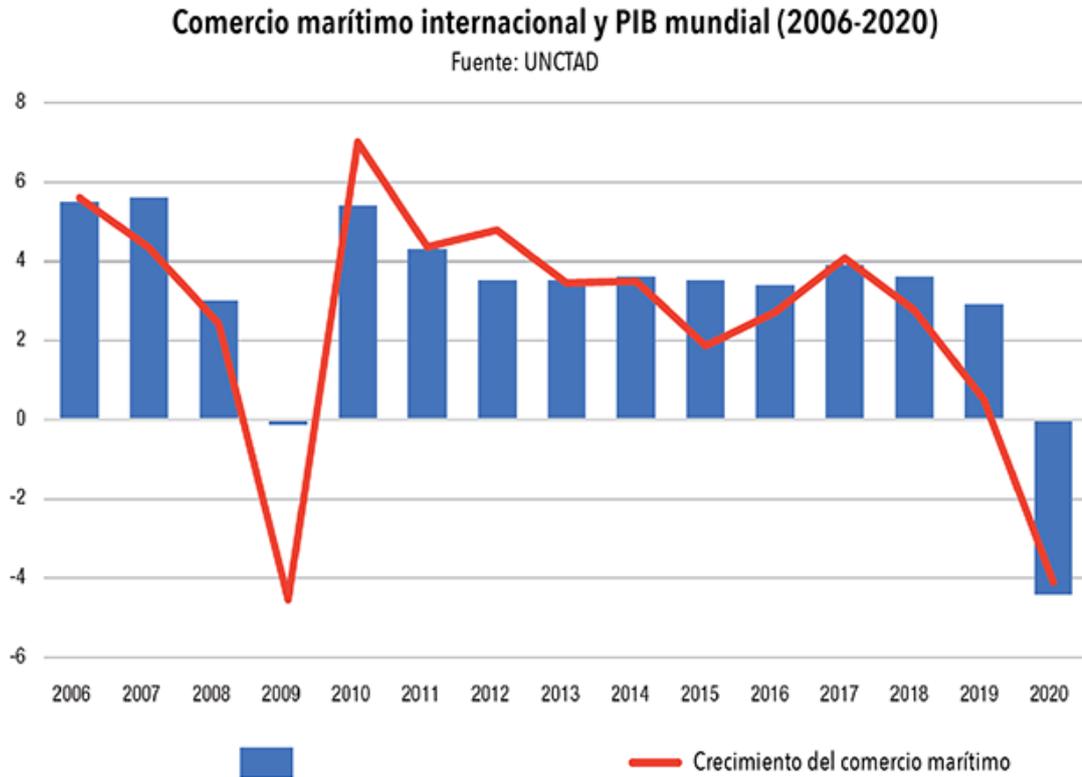


Figura 2.1.4 - Comercio marítimo internacional y PIB mundial 2006-2020

Fuente: UNCTAD (2020) [35]

En cuanto a los pronósticos para 2021, dependiendo de las proyecciones de crecimiento económico, la UNCTAD prevé un incremento del comercio marítimo internacional del 4,8 % y el Fondo Monetario Internacional apuesta por un 5,4 %. (Seco, E., 2021) [36]

Aunque el transporte marítimo representaba aproximadamente un 3,6 % de las emisiones totales de gases de efecto invernadero de la UE en 2017, ha sido las fuentes de emisiones que contribuyen al cambio climático que más rápido han crecido junto con la aviación internacional. (Europarl, 2019) [7]

Esto se debe principalmente al crecimiento del tráfico, impulsado por el aumento del número de pasajeros en el sector de la aviación y el volumen comercial en el caso del transporte marítimo.

Este 3,6 % de las emisiones totales se prevé que aumente hasta el 17,0 % en el año 2025 por lo que es imprescindible tomar medidas en la selección de medios de transporte más eficientes y menos contaminantes. (Black to green, 2017) [9]

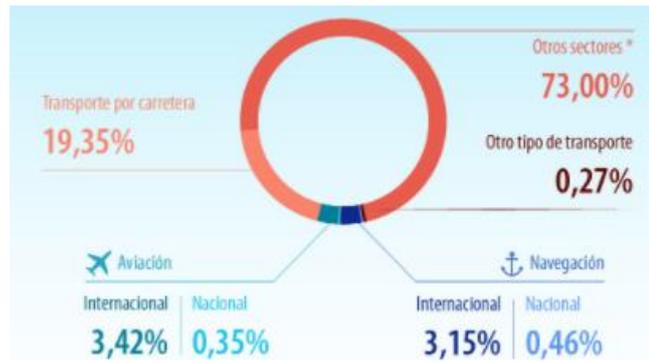


Figura 2.1.5 - Emisiones Transporte UE (2017)

Fuente: Europarl (2019) [7]

Las emisiones del transporte marítimo han crecido casi un 32,0 % en las últimas dos décadas. Este fue el segundo crecimiento más rápido en todo el sector del transporte y el único sector en el que las emisiones han aumentado desde 1990, detrás del sector de la aviación. De no tomarse medidas, se estimaba que las emisiones de los buques aumenten entre un 50,0 % y un 250,0 %.

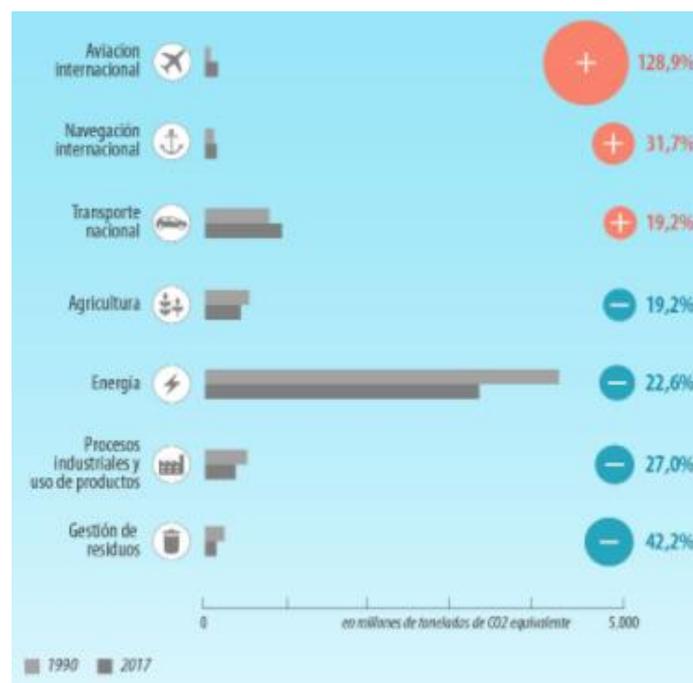


Figura 2.1.6 - Evolución contaminación atmosférica en UE

Fuente: Europarl (2019) [7]

Si nos fijamos en las emisiones de SO_x y NO_x, si no se hubiesen llevado a cabo medidas, se estimaba que las del transporte marítimo superarían a las emisiones de todas las demás fuentes de la UE ya que las terrestres están disminuyendo

gradualmente, mientras que las del transporte marítimo mostrarían un aumento continuo como se puede ver en las siguientes Figuras 2.1.7 y 2.1.8.

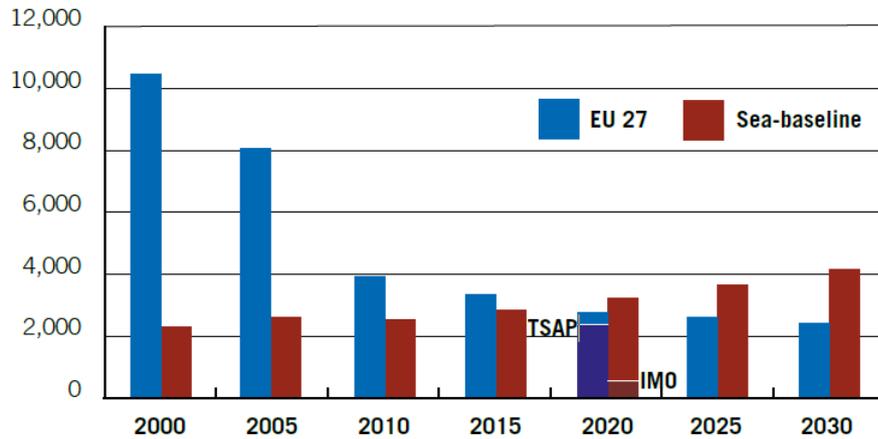


Figura 2.1.7 - Emisiones de SO₂ en UE (2000-2030) en miles de ton.

Fuente: EEB, T&E, SAR (2004) [8]

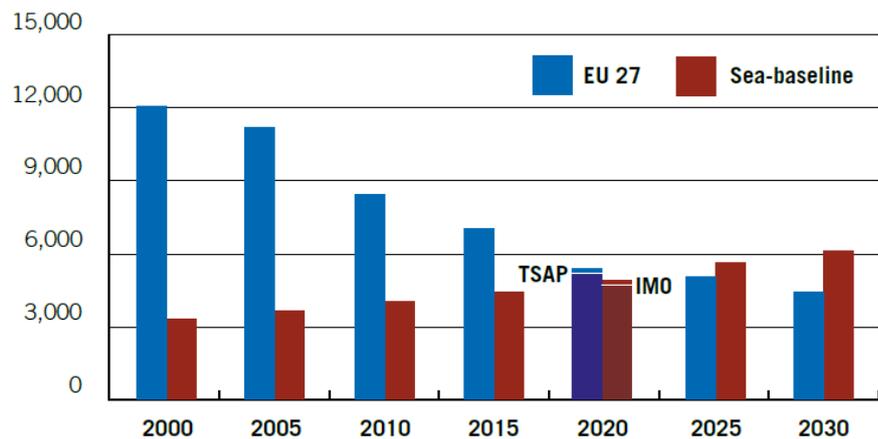


Figura 2.1.8 - Emisiones de NO_x en UE (2000-2030) en miles de ton.

Fuente: EEB, T&E, SAR (2004) [8]

En un escenario sin cambios, se esperaba que las emisiones de SO₂ y NO_x del transporte marítimo aumentasen entre un 40 % y un 50 % entre el año 2000 y el 2020. Sin embargo, al implementarse los acuerdos internacionales sobre nuevos estándares de emisiones SO₂ y NO_x para 2020 las emisiones de SO₂ se redujeron significativamente y las de NO_x no aumentaron tanto como se había anticipado.

Con fecha de 1 de enero de 2020, la flota mundial de buques mercantes de transporte comprendía 61.197 buques mercantes con 1.325 millones de GT. (ANAVE, 2020) [12] como se muestra en la Tabla 2.1.2.

	1985		1990		1995		2000		2005		2010		2015		2019		2020	
	NB	TRB	NB	TRB	NB	GT	NB	GT	NB	GT	NB	GT	NB	GT	NB	GT	NB	GT
Petroleros y Obos	7,1	162,1	6,9	154,5	6,8	159,8	7,3	163,7	7,0	170,9	7,4	209,8	7,7	240,0	8,5	271,2	8,8	287,5
Gaseros	0,8	9,9	0,8	10,6	0,9	14,0	1,1	17,9	1,2	24,7	1,5	46,1	1,7	56,3	2,0	77,5	2,1	82,3
Graneleros	5,0	110,3	4,8	113,4	5,7	129,7	6,1	149,4	6,5	175,8	8,0	250,5	10,9	405,4	11,8	451,9	12,2	473,8
Carga General	21,7	80,1	19,7	72,7	18,9	66,2	18,9	65,6	17,7	59,6	18,6	65,5	16,7	62,7	16,4	63,5	16,6	64,8
Portacontenedores	1,0	18,4	1,2	23,9	1,6	35,1	2,5	55,3	3,2	85,8	4,7	145,5	5,1	200,3	5,2	237,1	5,3	246,9
Otros mercantes ⁽¹⁾	7,6	18,4	6,8	23,5	8,6	46,2	10,1	63,5	11,4	84,8	13,8	123,2	14,5	141,6	15,8	161,8	16,3	169,3
TOTAL MERCANTES	43,2	399,2	40,2	398,6	42,7	451,1	46,0	515,4	47,1	601,7	53,9	840,6	56,6	1.107,8	59,7	1.263,0	61,2	1.324,7
Otros no mercantes	33,2	17,0	38,0	24,9	38,0	24,8	40,8	28,2	42,9	31,6	48,2	42,1	53,0	59,1	58,8	70,7	60,2	73,6
TOTAL	76,4	416,2	78,2	423,5	80,7	475,9	86,8	543,6	90,0	633,3	102,2	882,6	109,6	1.166,9	118,5	1.333,6	121,4	1.398,2

(1) Incluye quimiqueros, otros buques tanque, de pasaje, ferries, ro-ros, transportes de vehículos, etc.

Datos a 1 de enero de cada año, salvo 1980, 1985 y 1990 (datos a 1 de julio). Buques de más de 100 GT.

NB: Miles de buques
TRB: Millones de TRB
GT: Millones de GT

Tabla 2.1.2 - Flota mercante mundial al inicio de 2020

Fuente: ANAVE (2020) [12]

Debido al aumento de la flota mundial, como se muestra en la figura 2.1.9, el aumento de las emisiones va en aumento por lo que se están tomando medidas para reducirlas progresivamente en cuanto a la cantidad de azufre de los combustibles, emisiones de NO_x, eficiencia energética del buque, etc.

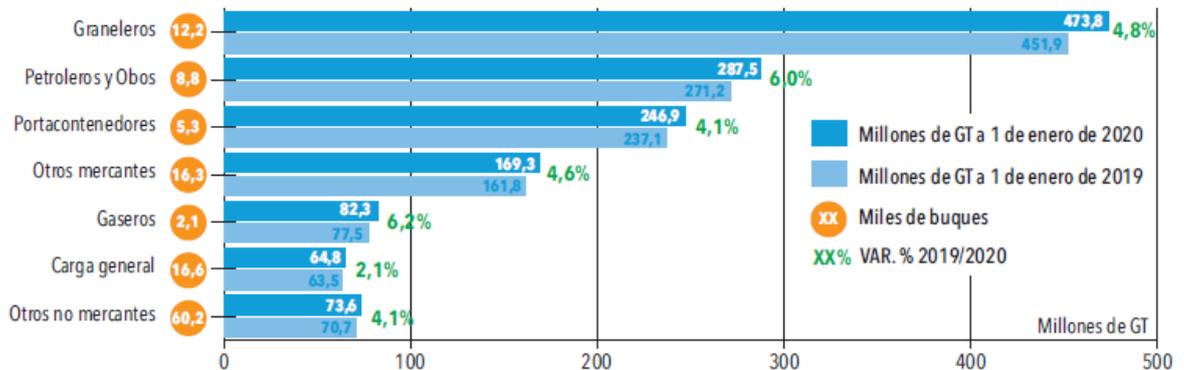


Figura 2.1.9 - Variación flota mundial 2019-2020

Fuente: ANAVE (2020) [12]

2.2. Óxidos de Nitrógeno (NO_x)

Con el término NO_x nos referimos a los compuestos químicos formados por la combinación del oxígeno y el nitrógeno, pudiendo ser el NO, NO₂, N₂O₂, N₂O₄, N₂O, N₂O y NO₃ aunque normalmente con este término se hace referencia únicamente al NO y NO₂ ya que son los más habituales en la atmósfera.

Estos contaminantes están formados por oxígeno y nitrógeno, mismos compuestos que el aire ambiente, pero a temperatura ambiente no reaccional y por lo tanto no se generan los NO_x . (*Herramientas de Ingeniería, 2016*) [17]

El NO es un gas a temperatura ambiente y se oxida fácilmente a NO_2 . El **dióxido de nitrógeno** es el principal contaminante de los óxidos de nitrógeno, y se forma como subproducto en todas las combustiones llevadas a cabo a altas temperaturas. Se trata de una sustancia de color amarillento, que se forma en los procesos de combustión. Es un gas tóxico, irritante y precursor de la formación de partículas de nitrato, que conllevan la producción de ácidos y elevados niveles de PM en el ambiente. (*PRTR, 2007*) [18]

Para que esta formación de NO_x se lleve a cabo existen 3 formas de generación:

- **NO_x térmico:** Es el mecanismo de producción principal que tiene lugar en la combustión y necesita para llevarse a cabo una temperatura muy elevada
- **NO_x del combustible:** Se produce a partir del nitrógeno contenido en el combustible cuando reacciona con el exceso del aire. Como el hidrógeno y el carbono del combustible se oxidan durante la combustión, los átomos de nitrógeno del combustible se liberan como átomos inestables, los cuales se transforman en NO_x y nitrógeno molecular. Este tipo de generación es un problema importante en la combustión del petróleo o carbón, ya que tienen gran cantidad de nitrógeno, pero en combustibles como el gas natural, que sólo contiene nitrógeno molecular, no se genera.
- **NO_x instantáneo:** El formado en la primera fase de la combustión. Se forma al reaccionar el nitrógeno atmosférico con radicales de hidrocarburos existentes en el aire. Generalmente es muy bajo en la mayor parte de procesos industriales.

El NO_2 reacciona en la atmósfera para formar ozono (O_3) y lluvia ácida (HNO_3), ambos compuestos que producen efectos muy perjudiciales para la salud.

El ozono referido como perjudicial es el troposférico, es decir, el que existe en el aire que respiramos y no el ozono estratosférico de la capa alta de la atmósfera, que es el que nos protege de la radiación ultravioleta procedente del sol.

Estos gases se forman tanto como producto de la actividad industrial como por procesos naturales, aunque se estima que el 99,0 % procede de fuentes no naturales. Las principales fuentes son los motores de combustión interna y centrales térmicas tradicionales, aunque también muchos otros procesos industriales.

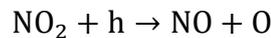
2.2.1. Reacciones de los NO_x

Debido a las altas temperaturas de combustión, el oxígeno y nitrógeno presentes en el aire se combinan para dar NO y este posteriormente se oxida parcialmente a NO₂ (NO_x térmico). Por tanto, la combustión produce ambos contaminantes en proporciones variables.

Una vez en la atmósfera, el NO se oxida a NO₂:



La luz del sol convierte el NO₂ nuevamente en NO a una ratio que depende de la intensidad de radiación solar y la cantidad de ozono existente.



El átomo de oxígeno (O) de la reacción anterior puede también combinarse con oxígeno molecular (O₂) para formar ozono (O₃)

En contacto con el agua, el NO₂ produce ácido nitroso (HNO₂) y ácido nítrico (HNO₃) que son muy corrosivos. Cuando el ácido nítrico entra en contacto con el agua de lluvia se produce la lluvia ácida que es muy perjudicial para plantas, árboles e incluso puentes, estructuras metálicas...

Para reducir la generación de los NO_x existen diversos métodos:

- Reducción de temperatura de combustión ya que la producción de NO_x térmico aumenta exponencialmente con la temperatura.
- Reducción del tiempo de residencia.

- Reducción química del NO_x. Mediante una sustancia reductora se extrae el oxígeno de los óxidos de nitrógeno. La técnica SCR (Reducción Catalítica Selectiva) es un ejemplo de una técnica de este tipo
- Oxidación del NO_x. El objetivo es mejorar la solubilidad con el agua.
- Eliminación del nitrógeno en la combustión. Por ejemplo, usando oxígeno en lugar de aire.
- Tratamiento del gas de combustión. (*Herramientas de Ingeniería, 2016*) [17]

2.2.1.1. Lluvia ácida

La lluvia ácida es cualquier tipo de precipitación con una alta concentración de ácido sulfúrico y ácido nítrico. No sólo se trata de la lluvia líquida que conocemos, sino que también se encuentra en nieve, niebla, granizo, rocío, neblinas y partículas en suspensión que terminan en el suelo.

Se trata de un fenómeno natural causado, entre otras cosas, por la emisión de químicos durante las erupciones volcánicas y la descomposición de plantas. Sin embargo, la mayor incidencia de lluvia ácida está provocada por el uso de combustibles fósiles que provienen de las fábricas, vehículos, centrales térmicas convencionales, etc. (*Ingeoexpert, 2017*) [19]

Se forma cuando la humedad en el aire se combina con el óxido de nitrógeno y el dióxido de azufre emitidos por fábricas, centrales eléctricas y vehículos que queman carbón o productos derivados del petróleo. En interacción con el vapor de agua, estos gases forman ácido sulfúrico y ácidos nítricos que finalmente caen a la tierra acompañando a las precipitaciones, constituyendo la lluvia ácida.

La lluvia normalmente presenta un pH de aproximadamente 5,6 debido a la presencia del CO₂ atmosférico, que forma ácido carbónico H₂CO₃. Se considera lluvia ácida cuando presenta un pH menor de 5,0.

Estos valores de pH se alcanzan por la presencia de ácidos como el ácido sulfúrico (H₂SO₄), y el ácido nítrico (HNO₃). (*Todo es química, 2008*) [22]

Efectos de la lluvia ácida

La lluvia ácida afecta a los lagos, ríos y mares provocando un cambio en su acidez que destruye las algas y el plancton, y aumenta la mortalidad de los peces. En las masas forestales, devasta los microorganismos que fijan el nitrógeno y destruyen de forma directa las hojas y ramas por contacto.

No solamente los elementos orgánicos se ven afectados por la lluvia ácida, también lo sufren los edificios e infraestructuras debido a que disuelve el carbonato de calcio y deteriora el mármol y la caliza. (*Ingeoexpert, 2017*) [19]

En las zonas agrícolas se desioniza el suelo, empobreciéndolo y provocando estrés a las plantas, que las hace más susceptibles a las plagas. Además, cambia y deteriora las condiciones naturales de los ecosistemas acuáticos, impactando en la cadena trófica y afectando a un número importante de especies.

En cuanto al impacto que tiene sobre los seres humanos, el contacto físico con este tipo de lluvia no es perjudicial en sí mismo. Lo peligroso son las partículas de nitrato y sulfato que se producen, que se desplazan a través del aire posibilitando que las inhalamos. En este último caso, una larga exposición a este tipo partículas podría derivar en ciertas enfermedades respiratorias. (*Iberdrola, 2018*) [20]

Soluciones para la lluvia ácida

Entre las soluciones propuestas para paliar este fenómeno (*Juste, I., 2018*) [21]:

- Rebajar el nivel de azufre en los combustibles fósiles y su consumo.
- Impulsar el uso del gas natural.
- Disminuir el consumo en buques mejorando la eficiencia.
- Reducir la emisión de gases contaminantes.
- Potenciar la innovación y las nuevas tecnologías encaminadas a optimizar el consumo energético y desarrollar energías limpias.
- Establecer un mayor control de los niveles de contaminación y del cumplimiento de las leyes al respecto.
- Tener control de las aguas y alcalinizarlas cuando sea necesario para equilibrar de nuevo su pH.

3. MARPOL

El Convenio internacional para prevenir la contaminación por los buques, (MARPOL) es el principal convenio internacional sobre la prevención de la contaminación del medio marino por los buques.

El Convenio MARPOL fue adoptado el 2 de noviembre de 1973 por la OMI. Como respuesta a un gran número de accidentes de buques tanque ocurridos entre 1976 y 1977, se redactó el Protocolo de 1978. Debido a que el convenio MARPOL 1973 aún no había entrado en vigor, el Protocolo de 1978 entra en vigor el 2 de octubre de 1983 absorbiendo al Convenio original.

En 1997, se adoptó un Protocolo para introducir enmiendas en el Convenio y se añadió un nuevo Anexo VI, que entró en vigor el 19 de mayo de 2005. A lo largo de los años, el Convenio MARPOL ha sido objeto de diversas actualizaciones mediante la incorporación de enmiendas.

En el Convenio figuran reglas encaminadas a prevenir y reducir al mínimo la contaminación ocasionada por los buques, tanto accidental como procedente de las operaciones normales, y actualmente incluye seis anexos técnicos. En la mayoría de tales anexos figuran zonas especiales en las que se realizan controles estrictos respecto de las descargas operacionales. Los anexos que figuran en este convenio hasta la actualidad son los siguientes (OMI, 2016) [16]:

- **Anexo I:** Reglas para prevenir la contaminación por hidrocarburos (entrada en vigor el 2 de octubre de 1983)
- **Anexo II:** Reglas para prevenir la contaminación por sustancias nocivas líquidas transportadas a granel (entrada en vigor el 2 de octubre de 1983)
- **Anexo III:** Reglas para prevenir la contaminación por sustancias perjudiciales transportadas por mar en bultos (entrada en vigor el 1 de julio de 1992)
- **Anexo IV:** Reglas para prevenir la contaminación por las aguas sucias de los buques (entrada en vigor el 27 de septiembre de 2003)
- **Anexo V:** Reglas para prevenir la contaminación ocasionada por las basuras de los buques (entrada en vigor el 31 de diciembre de 1988)
- **Anexo VI:** Reglas para prevenir la contaminación atmosférica ocasionada por los buques (entrada en vigor el 19 de mayo de 2005)

3.1. Anexo VI del MARPOL

El Anexo VI del MARPOL establece límites a las emisiones de NO_x y SO_x de los buques y prohíbe las emisiones deliberadas de sustancias que agotan la capa de ozono para buques con arqueo bruto igual o superior a 400 TRB que realizan viajes a puertos o terminales de países bajo la jurisdicción del Anexo VI.

Los estándares de emisiones de la OMI se denominan comúnmente Tier I, Tier II y Tier III. Las normas de Tier I se definieron en la versión de 1997 del Anexo VI, mientras que las normas de Tier II / III se introdujeron mediante enmiendas del Anexo VI adoptadas en 2008, de la siguiente manera:

- **Protocolo de 1997 (Tier I):** el “Protocolo de 1997” del MARPOL, que incluye el Anexo VI, entró en vigor el 19 de mayo de 2005, 12 meses después de haber sido aceptado por 15 Estados con el 54,57 % del tonelaje de la navegación mercante mundial.

Se aplica con carácter retroactivo a los motores nuevos de más de 130 kW instalados en buques construidos con fecha del 1 de enero de 2000 o posterior, o que se someten a una conversión importante después de dicha fecha. El reglamento también se aplica a las plataformas fijas y flotantes y a las plataformas de perforación.

- **Enmiendas de 2008 (Tier II y Tier III):** las enmiendas del Anexo VI adoptadas en octubre de 2008 introdujeron nuevos requisitos de calidad del combustible a partir de julio de 2010, estándares de emisiones de NO_x de Nivel II y III para motores nuevos, y requisitos para las emisiones NO_x Tier I para los motores existentes anteriores a 2000.

En octubre de 2008, el anexo VI fue ratificado por 53 países con el 81,88 % del tonelaje y entró en vigor el 1 de julio de 2010.

El Anexo VI define dos conjuntos de requisitos de emisión y calidad del combustible. Estos son los requisitos globales y requisitos más estrictos aplicables a los buques en las zonas de control de emisiones (ECA). Se puede designar una zona de control de emisiones para SO_x y PM, o NO_x, o los tres tipos de emisiones de los buques.

Las zonas ECA que existen actualmente se listan en la tabla 3.1.1:

	SO _x		NO _x	
	Adoptado	Entrada en vigor	Adoptado	Entrada en vigor
Mar Báltico	1997	2005	2016	2021
Mar del Norte	2005	2006	2016	2021
América del norte (incluido mayor parte costa de Estados Unidos y Canadá)	2010	2012	2010	2012
Caribe de EE.UU, incluido Puerto Rico y las Islas Vírgenes de EE.UU	2011	2014	2011	2014

Tabla 3.1.1 - Zonas ECA en el mundo

Fuente: Elaboración propia con datos de DieselNet (2020) [14]

Las enmiendas al Anexo VI de MARPOL introdujeron medidas obligatorias para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Las Enmiendas agregaron un nuevo Capítulo 4 al Anexo VI sobre "Regulaciones sobre eficiencia energética para buques". (*DieselNet, 2020*) [14]

El cumplimiento de las disposiciones del anexo VI se determina mediante inspecciones y reconocimientos periódicos. Al aprobar los reconocimientos, el barco recibe un "Certificado internacional de prevención de la contaminación atmosférica", con 5 años de validez.

Según el "Código técnico de NO_x", el operador del barco es responsable del cumplimiento en uso. (*Naciones Unidas, 2020*) [15]

3.1.1. Límites NO_x

Los límites de emisión de NO_x de la Regulación 13 del Anexo VI de MARPOL se aplican a los motores diesel marinos con una potencia de salida mayor de 130 kW. Hay dos excepciones, motores que se utilicen en caso de emergencia y motores en barcos que operan únicamente dentro de las aguas del estado en el que están abanderados.

Los límites de emisión de NO_x se establecen para los motores diésel en función de la velocidad máxima de funcionamiento del motor (n, rpm), como se puede ver en las siguientes tabla y figura 3.1.1.1. Los límites de Tier I y Tier II son globales,

mientras que los estándares Tier III se aplican solo en Áreas de control de emisiones de NO_x.

Tier	Ship construction date on or after	Total weighted cycle emission limit (g/kWh) n = engine's rated speed (rpm)		
		n < 130	n = 130 - 1999	n ≥ 2000
I	1 January 2000	17.0	$45 \cdot n^{(-0.2)}$ e.g., 720 rpm – 12.1	9.8
II	1 January 2011	14.4	$44 \cdot n^{(-0.23)}$ e.g., 720 rpm – 9.7	7.7
III	1 January 2016	3.4	$9 \cdot n^{(-0.2)}$ e.g., 720 rpm – 2.4	2.0

Tabla 3.1.1.1 - Límite de emisiones NO_x Anexo VI MARPOL

Fuente: IMO (2010) [23]

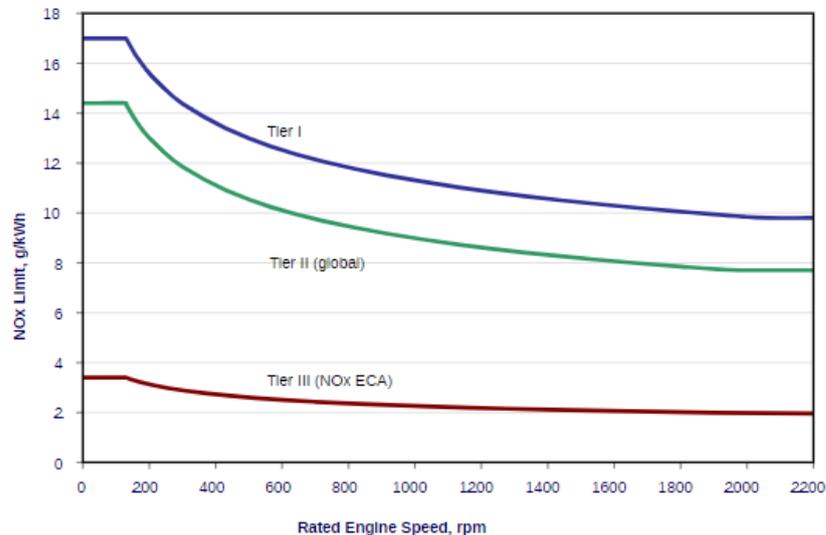


Figura 3.1.1.1 - Límite de emisiones NO_x Anexo VI MARPOL

Fuente: DieselNet (2020) [14]

Los controles de Nivel III se aplican sólo a los barcos especificados mientras operan en Áreas de Control de Emisiones (ECA) establecidas para limitar las emisiones de NO, fuera de dichas áreas se aplican los controles de Nivel II.

Se espera que los estándares de Tier II se cumplan mediante la optimización de los procesos de combustión.

Para el cumplimiento de las normas Tier III se requieren tecnologías dedicadas de control de emisiones de NO_x, como diversas formas de inyección de agua en el proceso de combustión, recirculación de gases de escape o reducción catalítica selectiva.

En relación a motores anteriores el año 2000, en las enmiendas del Anexo VI de 2008, las normas Tier I se vuelven aplicables a los motores existentes instalados en buques construidos entre el 1 de enero de 1990 y el 31 de diciembre de 1999, con una cilindrada superior a 90 litros por cilindro y una potencia nominal mayor de 5000 kW, sujeto a la disponibilidad de un kit de actualización aprobado.

3.1.2. Límites SOx

Las regulaciones del Anexo VI incluyen límites al contenido de azufre del fueloil como medida para el control las emisiones de SOx e, indirectamente, las emisiones de PM (no hay límites explícitos de emisión de PM).

Existen disposiciones especiales sobre la calidad del combustible para las áreas de control de emisiones de SOx (SOx ECA o SECA). Los límites de azufre y las fechas de implementación se pueden ver en la tabla y figura 3.1.2.1.

Date	Sulfur Limit in Fuel (% m/m)	
	SOx ECA	Global
2000	1.5%	4.5%
2010.07	1.0%	
2012	0.1%	3.5%
2015		
2020		0.5%

Tabla 3.1.2.1 - Límite azufre en combustible

Fuente: DieselNet (2020) [14]

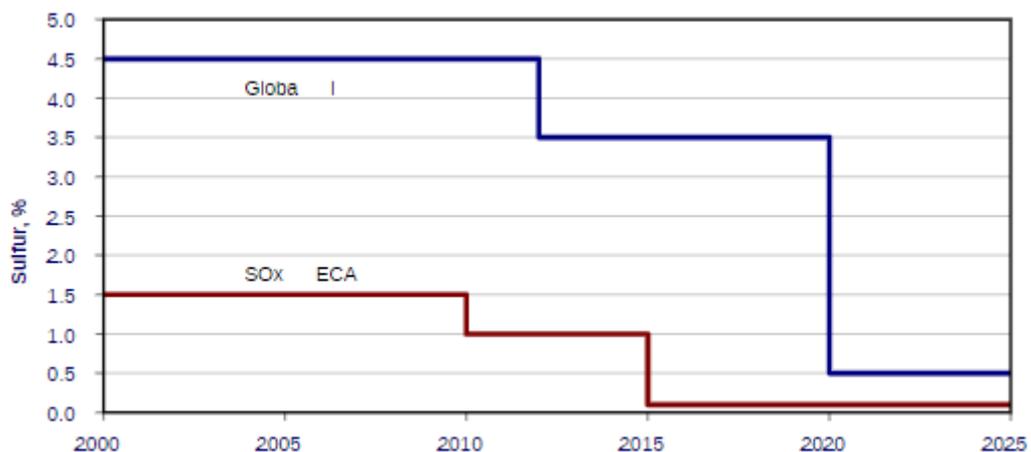


Figura 3.1.2.1 - Límite azufre en combustible

Fuente: DieselNet (2020) [14]

El límite existente actualmente es de 0,1 % en las zonas ECA y de 0,5 % fuera de las mismas. Se permite el fueloil pesado (HFO) siempre que cumpla con el límite de azufre aplicable, llamado ULSFO.

También se permiten medidas alternativas (en las ECA de SO_x y a nivel mundial) para reducir las emisiones de azufre, como mediante el uso de sistemas de limpieza de gases de escape (EGCS o GWS)) o utilizar cualquier otro método tecnológico para limitar las emisiones de SO_x a $\leq 6,0$ g/kWh.

3.1.3. Eficiencia de los buques

El Capítulo 4 del Anexo VI del MARPOL introduce dos mecanismos obligatorios destinados a garantizar un estándar de eficiencia energética para los buques: EEDI “**Índice de Diseño de Eficiencia Energética**” (Energy Efficiency Design Index), para buques nuevos, y el SEEMP “**Plan de Gestión de Eficiencia Energética de Buques**” (SEEMP “Ship Energy Efficiency Management Plan”) para todos los barcos.

- El EEDI es un mecanismo que se basa en el requerimiento de una cierta eficiencia energética mínima en los buques nuevos. Los diseñadores y constructores de barcos son libres de elegir las tecnologías para satisfacer los requisitos de EEDI en un diseño de barco específico.
- La SEEMP establece un mecanismo para que los operadores mejoren la eficiencia energética de los buques.

Los reglamentos se aplican a todos los buques de arqueo bruto igual o superior a 400 GT y entraron en vigor a partir del 1 de enero de 2013 con flexibilidades en el período inicial de hasta seis años y medio después de la entrada en vigor.

En abril de 2018, la OMI adoptó una estrategia inicial sobre la reducción de las emisiones de GEI de los buques (GHG), con el objetivo de reducir las emisiones de GEI anuales totales en al menos un 50 % para 2050 en comparación con 2008. La estrategia exige fortalecer los requisitos EEDI y una serie de otras medidas para reducir las emisiones, tales como medidas de eficiencia operativa, mayores reducciones de velocidad, medidas para abordar las emisiones de CH₄ y VOC, combustibles alternativos...

3.1.4. Sustancias que dañan la capa de Ozono

El Anexo VI prohíbe las emisiones deliberadas de sustancias que agotan la capa de ozono, que incluyen halones y clorofluorocarbonos (CFC).

Las nuevas instalaciones que contengan sustancias que dañan la capa de ozono están prohibidas en todos los buques.

El anexo VI también prohíbe la incineración a bordo de buques de determinados productos, como materiales de embalaje contaminados y PCB.

4. DIFERENTES MÉTODOS DE REDUCCIÓN DE EMISIONES NO_x

La presencia de NO_x en las emisiones de escape de los motores marinos se debe, principalmente, a la alta temperatura de combustión que hace reaccionar el nitrógeno con el oxígeno presentes en el aire suministrado para la combustión.

Entre las causas principales para la formación de NO_x estarían (*Anish, 2019*) [25]:

- Alta temperatura y presión durante el proceso de combustión
- Altas cargas en el motor
- Proporción inadecuada de aire y combustible en la combustión.
- Alta temperatura del aire de barrido.
- Mala calidad del combustible

Para llevar a cabo su reducción existen las medidas primarias y las medidas secundarias.

Las **medidas primarias** tienen como objetivo reducir la cantidad de NO_x que se forman durante la combustión. Como los principales factores que influyen en la formación de NO_x son las concentraciones de oxígeno y nitrógeno y las temperaturas locales en el proceso de combustión, estos métodos se centran en reducir estas concentraciones, los picos de temperatura y la cantidad de tiempo que los gases permanecen a altas temperaturas.

Por otro lado, las **medidas secundarias** eliminan los NO_x de los gases de escape mediante técnicas de limpieza posteriores.

4.1. Métodos primarios

4.1.1. Reducción de la duración de la inyección, retraso del inicio de la inyección y preinyección

Un retraso en la inyección da como resultado menores presiones máximas y menores temperaturas de combustión. Con la reducción del tiempo de inyección también disminuye la cantidad de combustible quemado antes de la presión máxima, reduciendo así el tiempo de exposición de los gases a la alta temperatura. Existen múltiples estudios relacionados con estos tiempos de inyección (*Dong Nam, 2000*) [30]

En 2001, “Okada” aplicó un retardo en el tiempo de inyección de un motor experimental MAN- B&W 4T50MX obteniendo una reducción NO_x del 30 % pero con un aumento del 7 % en el consumo.

En 2010, “Li” también analizó la influencia del ángulo de avance a la inyección en las reducciones NO_x teniendo resultados muy similares.

En 2006, “Moreno Gutierrez” estudió el consumo y emisiones NO_x en varios motores con diferentes tiempos de inyección.

Mediante otros estudios también se llegó a la conclusión que mediante una preinyección podemos reducir los NO_x, con un ligero aumento del consumo.

En 2001, “Frankhauser y Heim” llevaron a cabo este estudio en un motor Sulzer RT-Flex, en el cual, mediante una inyección triple con inyecciones cortas y sucesivas a tiempos distintos, obtuvieron como resultados reducciones del 30 % con aumentos del 8% en consumo.

En 2008, “Kontoulis” y un año después “Panagiotis” estudian el efecto de las estrategias de la inyección múltiple en un Sulzer RTA58T y Sulzer RT-Flex58T-B respectivamente obteniendo resultados similares y demostrando que es posible la reducción NO_x con un pequeño ahorro de combustible al añadir una inyección piloto adecuadamente temporizada. (*Lamas, I. et al., 2012*) [32].

4.1.2. Modificación toberas inyección

Los diferentes tipos y modelos de boquillas de combustible tienen un gran impacto en la formación de NO_x porque está influida por la combustión de la mezcla combustible-aire, temperatura y concentración de oxígeno en el área de pulverización de combustible.

En 1997 MAN-B&W desarrolla el inyector Slide, que incorpora un asiento de aguja cónico convencional y una válvula deslizante dentro de la tobera, minimizando el volumen de combustible en el interior de la misma y el riesgo de goteo posterior. Con esta configuración se reducen en gran medida las emisiones de NO_x , humo visible y CO.

En la siguiente figura 4.1.2.1 se pueden apreciar tipos distintos de toberas de inyección aparecidas a lo largo de la búsqueda del control de emisiones.

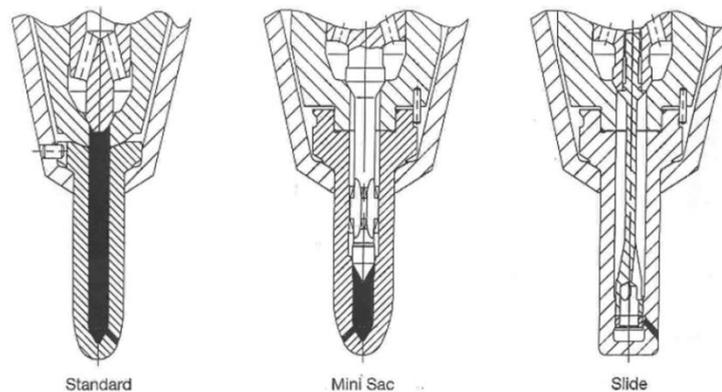


Figura 4.1.2.1 - Tipos de toberas inyector

Fuente: Dong Nam (2020) [30]

En 1997, MAN B&W hace un estudio en un motor K90MC al 90 % carga, con distintos tipos de toberas. En este estudio se pudieron apreciar la producción de NO_x obtenidas al utilizar las diferentes toberas, destacando las de tipo Slide. Éstos fueron los resultados obtenidos (*Dong Nam, 2000*) [30]:

- Tobera de inyección estándar: 1594 ppm NO_x
- Tobera de inyección de 6 orificios: 1494 ppm NO_x
- Tobera de inyección tipo Slide: 1232 ppm NO_x

En otro estudio de la misma época, MAN-B&W utilizó toberas estándar con 10 y 14 orificios, y toberas tipo Mini Sac con 10 y 14 orificios siendo el ángulo de inyección y el área total de los orificios la misma. Cuando el número de los orificios de los inyectores era el mismo, se observó poca diferencia de reducción entre los inyectores estándar y los de tipo Mini Sac (2 % más de reducción en los Mini Sac).

Entre una boquilla estándar de 10 orificios y una de 14 orificios, se observa que en la de 14 orificios se reduce un 14 % la formación de NO_x, aumentando un 0,9% el consumo de combustible. Si además la boquilla es de tipo Mini Sac de 14 orificios la reducción de NO_x en comparación con la estándar de 10 llega al 16 % aumentando únicamente el consumo de combustible un 1,0 %.

En cuanto al número de orificios, diámetro y forma, en 2001 “Kelling y Rautenstrauch” estudian la cantidad y diámetro de los orificios de la tobera en un motor MAN-B&W RK215 llegando a la conclusión de que para obtener menores emisiones NO_x hay que reducir el diámetro de los orificios y aumentar su cantidad para obtener una mezcla más uniforme y menos estratificada.

En 2001, “Al-Saned” estudia el motor MAN B&W RK215 y descubre que al reducir el ángulo del cono de pulverización de 140° a 130°, se reducían los NO_x en un 32 % y aumentaba el consumo de combustible en un 6,0 %. El motivo de esta reducción se ligó a que el menor ángulo de pulverización redujo el arrastre de aire en la pulverización, dando lugar a una peor mezcla antes de la combustión. Además, también descubrió que, al aumentar la entrada de la tobera de 2,0 a 6,0 mm en el interior de la cámara de combustión, se obtiene un 6 % menos de NO_x y el consumo de combustible aumentaba ligeramente, porque la pulverización estaba más cerca de la cabeza del pistón dando lugar a una menor presión de combustión y temperatura.

Gracias a estos estudios se puede ver que para obtener una menor formación de NO_x se tiene que tener una combustión lo más uniforme posible y así evitar unas altas temperaturas en zonas locales de la cámara de combustión. (*Lamas, I. et al., 2012*) [32].

4.1.3. Enfriamiento aire barrido

La refrigeración de aire de barrido tiene por objetivo la reducción de temperatura máxima en el cilindro y la temperatura antes de la compresión.

En 1998, “Holtbecker y Geist” muestran en un motor Sulzer RTA84C que por cada 3 % de reducción en la temperatura de aire de barrido, los NO_x bajan un 1 %.

En 2010, “Scenic” desarrolló un modelo CFD para simular la reducción de las emisiones NO_x con la reducción de la temperatura de aire de barrido en los motores MAN 6S50MC y Wärtsilla RT-Flex50. (*Lamas, I. et al., 2012*) [32].

4.1.4. Introducción de agua

Al introducir agua en la cámara de combustión se reduce la formación NO_x debido a la reducción de temperatura máxima de combustión y la concentración de oxígeno. La influencia del agua varía según el tipo del motor, pero en general, al añadir un 1 % de agua se consigue una reducción NO_x del 1 %.

Existen 3 posibilidades para la inyección de agua:

- **Emulsión de agua en el combustible**

Con la emulsión de agua en el combustible se pueden obtener reducciones en una relación de 1 % de agua con 1 % de reducción NO_x.

La adición de agua se efectúa antes de la línea de retorno de fuel y es el flujo de combustible el que controla el flujo de agua, aunque se puede realizar un control del flujo de agua monitorizando los NO_x en la salida de los gases de escape. Se realizaron múltiples estudios acerca de este método. (*Lamas, I. et al., 2012*) [32].

En 1995 “Leva” demuestra que se pueden llevar a cabo reducciones NO_x hasta un 35 % con emulsión de agua combustible al 50 %. Para llevar a cabo esta reducción se requiere un sistema de manejo de combustible de alta capacidad para que la potencia de salida no se mantenga afectada.

El inconveniente principal de este método es que se debe ampliar significativamente la capacidad de agua dulce ya que en un estudio realizado en 1998 por “Schiff y Hafen” tienen como resultado que para un motor de unos 14 MW se utilizan para las reducciones NOx unas 30 toneladas de agua dulce por día.

- **Inyección directa de agua**

Con la introducción directa de agua se reducen los picos de temperatura de combustión y como el agua tiene una capacidad calorífica alta, se reduce la presión parcial de oxígeno. Además, como con la evaporación del agua se consume energía, se reduce también la temperatura final.

Con la inyección directa de agua se puede llegar a una reducción entre 50 % y 60 % de NOx pero nos aumenta ligeramente el consumo de combustible y además, hay que tener en cuenta el consumo de agua, que será aproximadamente el 50 % del consumo de combustible.

- **Humidificación**

Otra de las formas de la reducción NOx es la humidificación del aire de barrido con agua o vapor. En un estudio llevado a cabo en 1997 se obtuvieron resultados de reducción de un 20% ya que la cantidad de agua en los cilindros está restringida por el punto de rocío del agua en el colector de barrido. Además, la adición de demasiada agua en el aire puede dañar el estado del cilindro.

4.1.5. Recirculación de gases de escape (EGR)

Con el sistema EGR, parte de los gases de escape con bajo contenido de oxígeno se vuelven a introducir en la cámara de combustión mediante un ventilador independiente, enfriándose y limpiándose previamente. Como el aire de barrido lleva menos cantidad de oxígeno el CO₂ de los gases de escape tienen mayor capacidad calorífica que el nitrógeno y oxígeno, se obtienen temperaturas de combustión más bajas, obteniendo reducciones NOx.

Estos gases de escape se enfrían previamente y se pueden recircular antes o después del turbocompresor como se puede ver en la figura 4.1.5.1.

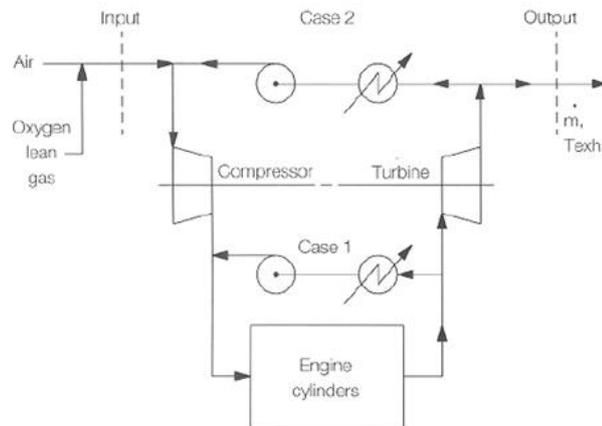


Figura 4.1.5.1 - Método EGR para reducciones NO_x

Fuente: Dong Nam (2020) [30]

4.2. Métodos secundarios

Los métodos secundarios son los que se realizan sobre los gases antes de su expulsión a la atmósfera. Entre ellos destaca el sistema de **Reducción Catalítica Selectiva** (SCR) como el más eficaz para las reducciones NO_x obteniendo como resultados de hasta un 95 % de reducción, cumpliendo con los requisitos más estrictos de la actualidad.

Esta reducción se obtiene inyectando amoníaco o urea en los gases de escape y cuando esta mezcla de gases de escape y amoníaco atraviesan un catalizador, tienen lugar una serie de reacciones químicas que dan lugar a nitrógeno y agua.

5. SISTEMA SCR PARA CONTROL DE NO_x

El sistema SCR está diseñado para cumplir con las regulaciones IMO Tier III referente a NO_x, regulación que se puede encontrar en el Anexo VI revisado de MARPOL y en el Código Técnico de 2008 sobre los NO_x.

Es el sistema más eficaz actualmente en cuanto a reducir los NO_x y se garantiza una reducción del 95%. (Martínez, I., 2014) [29]

En el caso de los motores lentos (dos tiempos), se debe cumplir con un valor de 3,4 g/kWh porque su velocidad máxima es inferior a 130 rpm.

5.1. Principio de funcionamiento

La reducción de NO_x se obtiene mediante un proceso catalítico en un reactor SCR aplicado sobre los gases de la combustión del motor. Hay dos tipos de instalaciones según la presión de trabajo: HP (alta) y LP (baja). Para las instalaciones HP, el reactor se coloca antes del turbocompresor y para las instalaciones LP, después del mismo. En el reactor SCR, los NO_x se reducen catalíticamente a nitrógeno y agua utilizando amoníaco como agente reductor.

Los agentes reductores que se pueden utilizar para los procesos SCR son urea o amoníaco acuoso.

El proceso catalítico se lleva a cabo en el reactor, que contiene elementos reductores con un gran número de canales proporcionando una gran superficie de reacción. En la figura 5.1.1 se pueden ver los canales del catalizador para asegurar el contacto óptimo entre los gases de escape, el agente reductor y el material del catalizador.

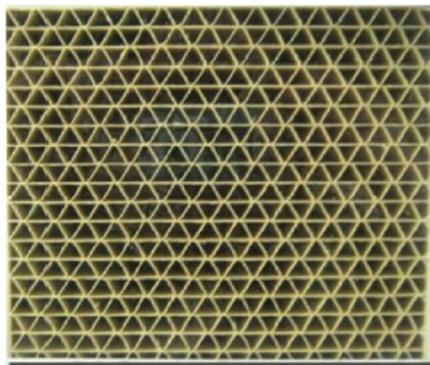


Figura 5.1.1 - Canales del elemento catalítico del SCR

Fuente: HHI & MAN-B&W (2018) [26]

El agente reductor se inyecta en el vaporizador y en caso de utilizar urea, ésta se descompone en amoníaco y dióxido de carbono.

Al atomizar la urea en la corriente de gases de escape, se descompone en 3 pasos. Estos son la evaporación de la solución, descomposición térmica e hidrólisis.

- Evaporación: $(\text{NH}_2)_2\text{CO}_{\text{liq}} \rightarrow (\text{NH}_2)_2\text{CO}_{\text{gas}} + \text{H}_2\text{O}_{\text{gas}}$
- Descomposición térmica: $(\text{NH}_2)_2\text{CO} \rightarrow \text{NH}_3 + \text{HNCO}$
- Hidrólisis: $\text{HNCO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NH}_3 + \text{CO}_2$

Tras el transporte de los reactivos hasta el catalizador, es aquí donde se lleva a cabo el proceso químico de reducción. Los gases de escape con urea disuelta pasan a través de las superficies del catalizador y se forman enlaces químicos dando lugar a la reducción NO_x tal como da a entender la figura 5.1.2.

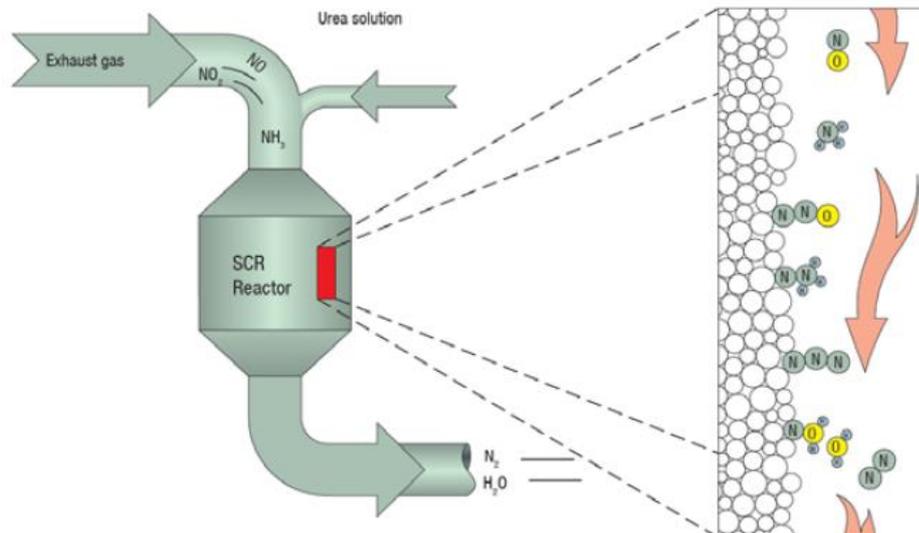


Figura 5.1.2 - Reacciones en el reactor SCR

Fuente: Hyundai Heavy Industries (2020) [34]

A esta reducción se puede llegar por 3 vías distintas en función de la temperatura y del contenido de NO_x en los gases de combustión. Estas 3 reacciones que se llevan a cabo son:

- Reacción SCR estándar: $4 \text{NH}_3 + 4 \text{NO} + \text{O}_2 \rightarrow 4 \text{N}_2 + 6 \text{H}_2\text{O}$
- Reacción SCR rápida: $2 \text{NH}_3 + \text{NO} + \text{NO}_2 \rightarrow 2 \text{N}_2 + 3 \text{H}_2\text{O}$
- Reacción SCR lenta: $8 \text{NH}_3 + 6 \text{NO}_2 \rightarrow 7 \text{N}_2 + 12 \text{H}_2\text{O}$

A pesar de ser un sistema muy selectivo, es inevitable la formación de subproductos que consumen los reactivos o puedan dañar el catalizador cuando se opera el sistema fuera del rango de temperaturas adecuado. Éstos son:

- Formación óxidos de nitrógeno $4 \text{ NH}_3 + 4 \text{ NO} + 3 \text{ O}_2 \rightarrow 4 \text{ N}_2\text{O} + 6 \text{ H}_2\text{O}$
- Oxidación del amoníaco $4 \text{ NH}_3 + 5 \text{ O}_2 \rightarrow 4 \text{ NO} + 6 \text{ H}_2\text{O}$
- Formación nitrato de amoníaco $2 \text{ NH}_3 + 2 \text{ NO}_2 \rightarrow \text{NH}_4\text{NO}_3 + \text{ N}_2 + \text{ H}_2\text{O}$

Cuando la temperatura sobrepasa los 400 °C se pueden formar óxidos de nitrógeno y la oxidación del amoníaco aumentando considerablemente el consumo de reactivo y ralentizando la reducción NO_x .

Cuando la temperatura de los gases durante la reducción baja de los 200 °C se podría producir la deposición de nitrato de amonio y obstrucción del catalizador.

El segundo grupo de las reacciones indeseables están asociadas con un alto contenido de azufre en el combustible. Aunque se utilizan catalizadores con vanadio por su mejor resistencia al azufre, un alto porcentaje de SO_x en los gases de escape podría afectar a la eficiencia del sistema ya que el dióxido de azufre, al igual que el amoníaco, se puede absorber en la superficie del metal al reaccionar con oxígeno para formar SO_3 . La adsorción de los compuestos de azufre en la superficie de la capa catalítica bloquea el acceso al amoníaco ralentizando el proceso de reducción. Además, cuando se dan condiciones de temperatura muy extremas, el azufre absorbido puede reaccionar de las siguientes formas:

- Formación de trióxido de azufre $\text{SO}_3 \rightarrow \text{SO}_{3\text{gas}}$
- Formación de Sulfato de amonio $2 \text{ NH}_3 + \text{SO}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$
- Formación de bisulfato de amonio $\text{NH}_3 + \text{SO}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow (\text{NH}_4)\text{HSO}_4$

La formación de trióxido de azufre tiene lugar por encima de los 400 y 450 °C dependiendo del contenido de azufre del combustible.

La formación de sulfatos de amonio se produce en el catalizador en combinación con temperaturas por debajo de los 200 °C y dan lugar a la obstrucción de todo el sistema pudiendo aumentar considerablemente la contrapresión de los gases de escape. (Cattaneo, F., 2018) [33]

5.1.1. Sistema SCR HP

El sistema de **alta presión** (SCR HP) consta de tres componentes principales: el reactor, el vaporizador y la unidad de dosificación. (HHI & MAN-B&W, 2020) [26]

El agente reductor se inyecta en el vaporizador a través del sistema de dosificación, y se mezcla con los gases de escape antes de ser dirigido al reactor para su reducción. Como es necesaria una temperatura elevada para llevar a cabo el proceso de reducción, conviene instalar el sistema SCR en el lado de alta presión en motores diesel marinos lentos de 2 tiempos como se ve en la figura 5.1.1.1., ya que esta temperatura será entre 50 °C y 175 °C más elevada que en el lado de baja presión.

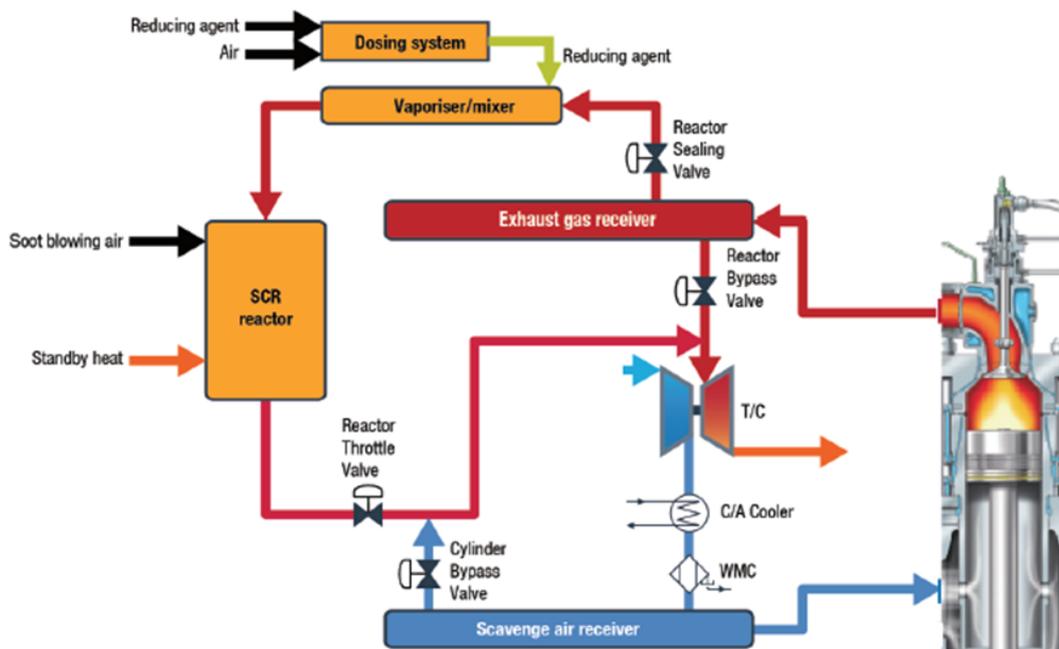


Figura 5.1.1.1 - Sistema SCR HP

Fuente: HHI & MAN-B&W (2018) [26]

Cuando se opera en modo Tier II el sistema SCR no está habilitado.

Todo el sistema de SCR se aísla de los gases de escape cerrando la RSV (Reactor Sealing Valve) y la RTV (Reactor Throttle Valve). La válvula RBV (Reactor Bypass Valve) en este caso está abierta y los gases de escape pasan directamente al turbocompresor. Al no pasar gases de escape por el sistema SCR, estará en funcionamiento un sistema de ventilación con aire para mantener limpia la línea SCR y el reactor.

El sistema también tiene una válvula de derivación de gases de escape EGB (Exhaust Gas Bypass) para proporcionar al motor un ajuste a baja carga cuando se opera en el modo Tier II puenteando el paso de gases por fuera de la turbina.

Cuando se opera en modo Tier III, el sistema SCR se activa cuando la temperatura de los gases de escape está por encima del límite de condensación del ácido sulfúrico (> 200 °C). De lo contrario, un sistema de calefacción mantendrá el sistema SCR por encima de este límite siempre que sea posible.

Cuando la temperatura de los gases de escape es correcta, las válvulas RSV y RTV abren la línea SCR progresivamente y después de un proceso de calentamiento de todo el sistema, la RBV se va cerrando. Al mismo tiempo que los gases de escape pasan a través del reactor, se inicia una secuencia de soplado de hollín para evitar la obstrucción del reactor.

Aunque el reactor se coloque antes de la turbina, la temperatura de los gases de escape aún no será lo suficientemente alta con cargas bajas para que tenga lugar el proceso de SCR. Para aumentar la temperatura, se instala la CBV (Cylinder Bypass Valve) que comunica el aire de barrido con la entrada al TC. Al abrir el bypass, el flujo de gases a través de los cilindros se reducirá sin perder la presión del aire de barrido y, en consecuencia, aumentará la temperatura de los gases de escape. Mediante la apertura de la CBV se consigue mantener una temperatura lo suficientemente alta para que tenga lugar el proceso de SCR. Sin embargo, esta desviación del aire de barrido aumentará el consumo específico de combustible.

Cuando todos los sensores de temperatura en la línea SCR miden un valor dentro de la ventana de temperatura permitida, puede comenzar la inyección de agente reductor y, por lo tanto, la reducción de NO_x .

5.1.2. Sistema SCR LP

Cuando un buque opere en zonas con restricción del 0,1 % o menor de azufre en el combustible, es posible instalar un sistema SCR de **baja presión** (SCR LP). En este sistema, la línea SCR se coloca después del TC (Turbo Charger), lo que proporciona una mayor flexibilidad para la instalación del SCR y consta básicamente de los mismos componentes principales que el sistema SCR HP.

Como se puede ver en la figura 5.1.2.1 el sistema también consta de reactor SCR, vaporizador y sistema de dosificación.

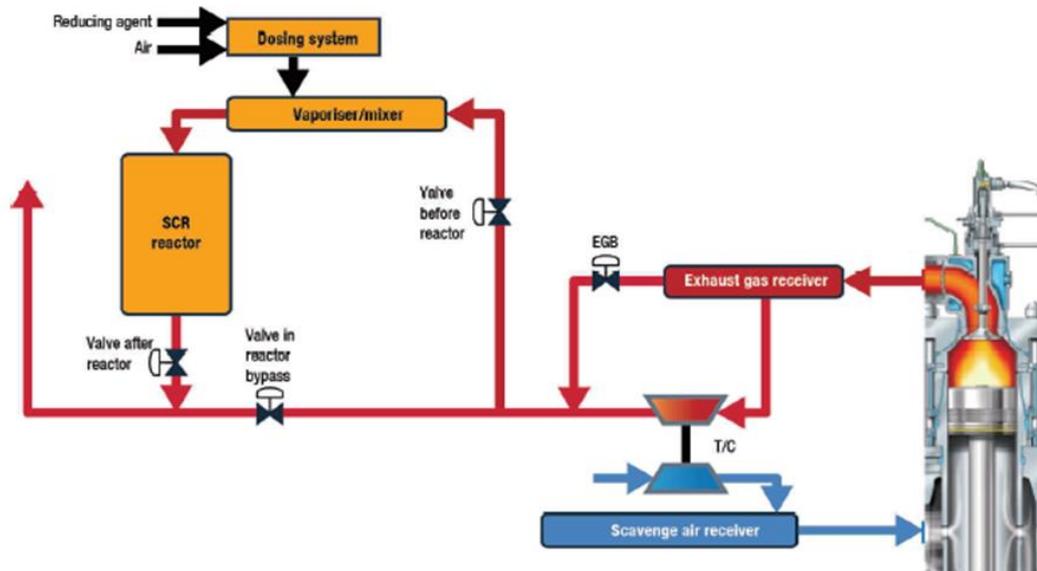


Figura 5.1.2.1 - Sistema SCR LP

Fuente: HHI & MAN-B&W (2018) [26]

Como la temperatura de los gases de escape es más baja que en el lado de alta presión, no es posible la inyección directa de urea como agente reductor, siendo necesario la utilización de sistemas de dosificación y vaporización separados de la línea principal de los gases de escape en los que la urea se descompone en amoníaco en un mezclador (AIG). Este sistema de descomposición independiente llevará componentes adicionales como un quemador, ventilador y un vaporizador. Puede verse en la figura 5.1.2.2.

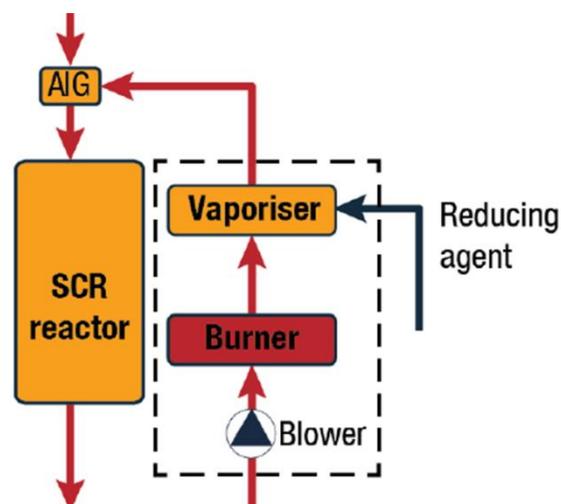


Figura 5.1.2.2 - Equipos adicionales del sistema SCR LP

Fuente: HHI & MAN-B&W (2018) [26]

Cuando se opera en modo Tier II el sistema SCR es aislado por la VBR (Valve Before Reactor) y la VAR (Valve After Reactor). La VRB está abierta y los gases de escape pasan directamente a la chimenea.

Cuando se opera en modo Tier III, el sistema SCR se activará abriendo la VBR y la VAR, y cerrando la VRB. La EGB se abrirá para aumentar la temperatura de los gases después del TC. Cuando todos los sensores de temperatura en la línea SCR miden un valor por encima del límite especificado, comienza la inyección de agente reductor y la reducción catalítica. (HHI & MAN-B&W, 2020) [26]

5.2. Componentes de un sistema SCR

Las instalaciones SCR tanto de alta como baja presión, tienen los siguientes componentes comunes.

- **Reactor SCR:** En el reactor tiene lugar la reducción de los NO_x en nitrógeno y agua. Su gran diámetro reduce resistencia al flujo de gases, dando lugar a una caída muy pequeña de presión. (Cattaneo, F., 2018) [33]. Su disposición se puede ver en la figura 5.2.1. En aplicaciones marinas, el componente catalítico predominante es el pentóxido de vanadio (V₂O₅) soportado sobre dióxido de titanio (TiO₂) siendo la configuración más habitual TiO₂ como portador, trióxido de Tungsteno (WO₃) como impulsor y el V₂O₅ como componente activo.

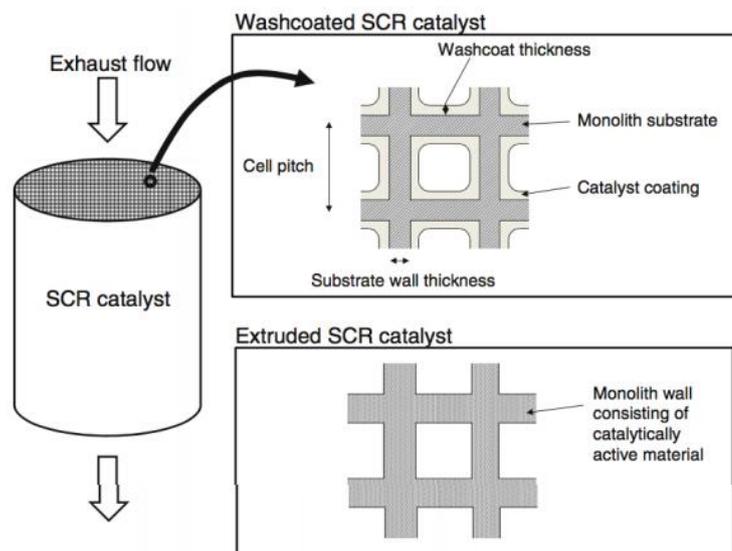


Figura 5.2.1 - Estructura del elemento catalítico

Fuente: Cattaneo, F. (2018) [33]

El vanadio se escoge por su menor coste en comparación con las zeolitas de hierro y cobre y por su mayor eficiencia así como resistencia al azufre y a las temperaturas de los gases de escape. El trióxido de tungsteno actúa como impulsor químico y estructural ampliando el rango de temperatura de la reacción SCR y mejorando las propiedades mecánicas y estructurales del catalizador. Por último, se utiliza el dióxido de titanio para evitar la formación de sulfatos. En el reactor se tienen que cumplir las siguientes características.

- El volumen del reactor tiene que contener la cantidad necesaria de material catalizador para lograr la reducción deseada y el material reductor debe mantenerse limpio para que funcione correctamente.
 - No puede haber una caída de presión excesiva de los gases de escape al pasar por el mismo.
 - Para asegurar el contacto óptimo entre los gases de escape y el catalizador, el perfil de flujo másico debe ser lo más uniforme posible.
 - Importante asegurar su resistencia mecánica y estanqueidad.
- **Sistema de soplado de hollín:** Para evitar la contaminación de los elementos del reactor, se instala un sistema de soplado de hollín. El proceso de soplado se realiza periódicamente cuando los gases de escape pasan a través del reactor SCR y el hollín es expulsado con los gases de escape después de ser desprendido de los elementos dentro del reactor.
 - **Sistema de dosificación externo:** El sistema de dosificación externo es capaz de suministrar el agente reductor en base a la señal de demanda de dosificación proporcionada por el sistema de control del motor. Además, también es capaz de limpiarse a sí mismo mediante una secuencia de lavado. Es muy importante que se realice la dosificación correcta de urea porque si baja la temperatura de los gases de escape y tenemos en el sistema urea que no reaccionó, se puede dar el caso de formación de bisulfato de amonio ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$) y depositarse en todo el sistema dañando las celdas del reactor. Existen básicamente 2 principales agentes reductores:
 - Urea Acuosa (Solución al 40 %): Se recomienda utilizarlo con fines marinos porque no presenta riesgos importantes para la salud, se puede

almacenar como sólido y mezclarse a bordo, aunque se dispone de líneas para hacer bunker directamente al tanque.

- Amoniaco acuoso (solución al 25 %): Es corrosivo y nocivo para la salud y el medioambiente, aunque teniendo en cuenta una serie de precauciones se podría manipular de la misma forma que la urea. Para poder utilizarlo, el tanque de almacenamiento y toda la parte de bobeo y suministro se debería ubicar en un compartimento separado de la sala de máquinas con lo que el coste de tubería y todo el sistema saldría mucho más costoso.

La unidad de suministro dispone además de un sistema de limpieza para purgar con aire las boquillas de inyección de urea. En la figura 5.2.2 se puede apreciar todo el sistema de suministro de agente reductor utilizando urea.

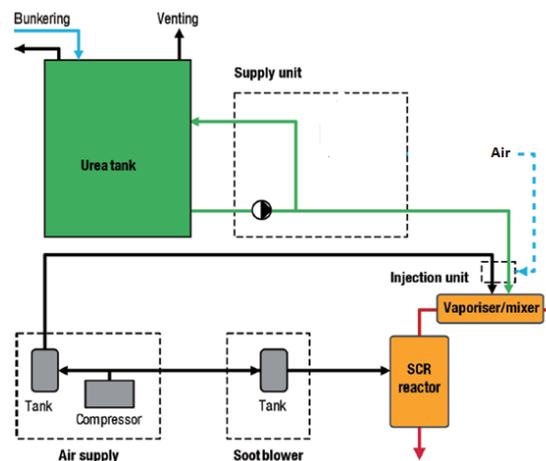


Figura 5.2.2 - Sistema de suministro agente reductor

Fuente: HHI & MAN-B&W (2018) [26]

- **Unidad de control de sensores SCR (sensores de NO_x)**: Los sensores miden la concentración de NO_x después del reactor SCR y el turbocompresor, para asegurar la correcta dosificación de agente reductor. Esta unidad de control de sensores SCR se compone de un armario de control donde se encuentra el PLC y una caja de conexiones de los sensores. Estos sensores están expuestos en la línea a los gases de escape a alta temperatura con lo que su vida útil es de aproximadamente unas 2000 h. Por este motivo se montan 2 sensores y es conveniente tenerlos un poco separados en horas

para que no fallen los 2 al mismo tiempo por problemas desviación y envejecimiento.

Un buen método consiste en tener un sensor nuevo y otro con unas 1000 h, aproximadamente, por lo que es muy importante tener siempre sensores de respeto. Así aumenta la probabilidad de que cuando un sensor se desvía y es el que más horas tiene, sea el que está fallando la lectura, aunque no siempre tiene porque ser siempre así ya que se puede dar el caso de un fallo prematuro. En la figura 5.2.3 se muestra un sensor NOx. Se puede apreciar que está formado por el propio sensor, cable y el cabezal del sensor.



Figura 5.2.3 - Sensor NOx para sistema SCR

Fuente: HHI & MAN-B&W (2018) [26]

Los sensores se comunican vía CAN bus para transferir datos y es por ello que la MPC del motor principal no puede comunicarse directamente con los sensores, sin pasar antes por el PLC Wago. Una de las funciones principales del PLC es la conversión de la señal CAN bus con información del estado de los sensores a una señal analógica de 4 a 20 mA para mandarla a la MPC

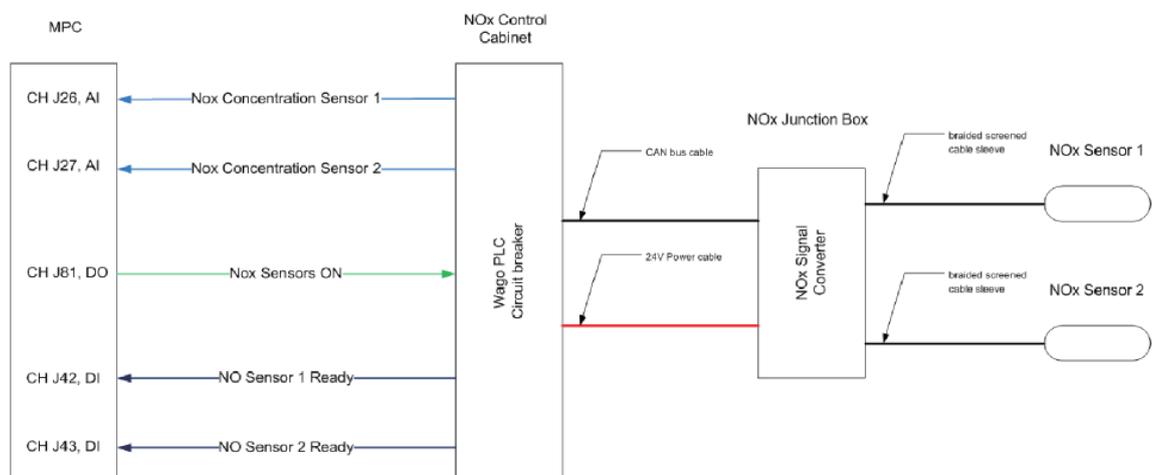


Figura 5.2.4 - Diagrama de señal entre los sensores y la MPC

Fuente: HHI & MAN-B&W (2018) [26]

Otra de las funciones principales es el control de la secuencia de inicio correcta para cada uno de los sensores. Como se puede ver en la figura 5.2.5, una vez se enciende el PLC, se alimentan los sensores y empieza durante 60 segundos al chequeo de la señal CAN bus. Al pasar estos 60 segundos, arranca el modo de precalentamiento hasta superar el punto de rocío. A partir de aquí empieza la secuencia de calentamiento principal y cada ciclo de 200 segundos chequea automáticamente si estamos por encima del punto de rocío. Si todo está correcto, aparece la señal válida de los sensores NOx y se muestra la concentración que actual en los gases de escape.

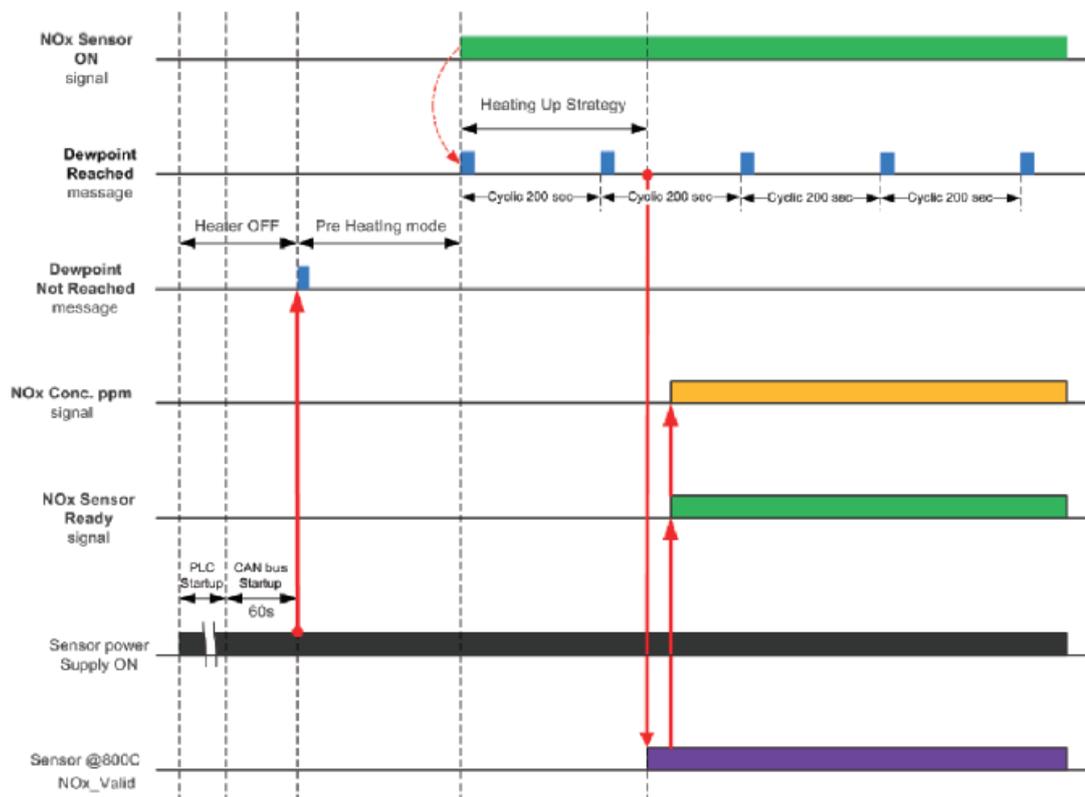


Figura 5.2.5 - Secuencia de inicio de sensores NOx

Fuente: HHI & MAN-B&W (2018) [26]

- **Hardware:** Antes de explicar todos los componentes hardware de los que dispone el sistema SCR se dará una noción global del sistema de control del motor (ECS), el cual consiste en una serie de ordenadores basados en controladores multipropósito, adquisición de datos, unidades de supervisión y paneles operacionales.

Dentro del sistema de control del motor aparecen diferentes unidades para cada proceso del motor. Estas unidades se dividen en 4 grupos principales que serían los controladores multipropósito, unidades de adquisición de datos y supervisión, paneles operacionales y estaciones de control y finalmente, los sistemas de monitorización.

○ Controladores multipropósito (MPC):

- **ACU (Auxiliary Control Unit):** Esta unidad auxiliar de control es la encargada del sistema hidráulico y las soplantes auxiliares de arranque. Controla la puesta en marcha y parada de las bombas hidráulicas y regulación de presión de aceite y funcionamiento de los sopladores auxiliares dependiendo de la presión de barrido.

El control de cada uno de estos equipos auxiliares se divide en ACUs diferentes, para que, en caso de fallo de una unidad, tenga suficiente redundancia para asegurar la operatividad del motor.

- **CCU (Cylinder Control Unit):** Es el encargado del control de la ELGI, ELWI y la FIVA, válvulas de aire de arranque y lubricadores de los cilindros. Antes de la siguiente explosión, la CCU se asegura de la recepción de datos válidos y cuando el motor llega al ángulo de cigüeñal correcto, da comienzo a la inyección.
- **CWCU (Cooling Water Control Unit):** Lleva el control de todas las partes del sistema de refrigeración de baja y alta temperatura.
- **ECU (Engine fuel Control Unit):** Lleva a cabo las funciones de control del motor como serían la velocidad, modos de funcionamiento y secuencia de arranque.

Para el control de velocidad del motor es necesario el cálculo de cantidad de combustible en cada una de las combustiones en el cilindro. El cálculo que lleva a cabo la ECU comienza conociendo el momento exacto de la inyección y ofrece la cantidad de combustible que será inyectado en el siguiente ciclo.

Esta cantidad de combustible se calcula teniendo en cuenta distintos algoritmos de seguridad y protección y limitaciones en la cantidad de combustible aportadas por el operador.

Según el perfil de funcionamiento seleccionado del motor, la ECU selecciona un perfil de inyección, calcula los parámetros de inyección de combustible, tiempo de apertura de las válvulas de escape y presión adecuada de aceite hidráulico.

En función de la entrada manual del operador en cuanto a cantidad de azufre en el combustible, selecciona la tasa de suministro de aceite de cilindros mínima. Obviamente, calcula el caudal suministrado de aceite de lubricación de cilindros para cada uno de ellos individualmente.

Todos estos datos resultantes de cantidad de combustible, perfil de inyección, parámetros de sincronización y tasa de alimentación de aceite de cilindros son enviados a la CCU de cada uno de los cilindros y los puntos de ajuste de presión hidráulica a todas las ACUs.

Para tener una mayor redundancia, el sistema de control tiene dos ECUs operando en paralelo para realizar la misma tarea, estando una de ellas siempre preparada para asumir el control sin interrupción alguna cuando la otra falle.

- **EICU (Engine Interface Control Unit):** Es la encargada de la comunicación con sistemas externos y recibe todas las entradas de navegación de las distintas unidades de control. Para mayor redundancia, hay dos EICUs funcionando en paralelo.
- **SACU (Second Auxiliary Control Unit):** Controla y monitoriza equipos auxiliares relacionados con el sistema de gas siendo su tarea más importante el control de la presión de aceite de sello para evitar fugas de gas en el sistema, los inyectores de gas...
- **SCU (Scavenge air Control Unit):** Controla la EGB y está conectado a la red del ECS recibiendo del mismo la carga del motor y presión de aire de barrido.

En motores anteriores a 2013, este control de la EGB tenía en cuenta condiciones del ambiente, y a una carga determinada del motor, dependiendo de las condiciones atmosféricas, la EGB podría tener un punto de ajuste diferente. Para motores construidos a partir de ese año, la posición de la EGB depende únicamente de la carga del motor.

- **SPCU (Second fuel Plant Control Unit):** Su tarea principal es el control y monitorización de válvulas y sensores en la GVU (Gas Valve Unit) y sistema de suministro de gas.
- **SPSU (Second fuel Plant Safety Unit):** Monitoriza los sensores de gas de seguridad y, en caso de fallo, lleva a cabo una parada de emergencia de suministro de gas y purga del sistema con nitrógeno.
- Adquisición de datos y unidades de supervisión:
 - **SCSU (Second fuel Cylinder Safety Unit):** Monitoriza los sensores específicos de los cilindros y supervisa cada inyección y combustión de gas, y en caso de fallo, detiene el suministro de gas y purga todo el sistema.
- Paneles operacionales y estaciones de control:
 - **LOP (Local Operating Panel):** Situado en la plataforma intermedia del motor, tiene las funciones básicas como arranque y parada del motor, velocidad del motor y los sistemas más importantes del mismo. En caso de que no se pueda operar el motor desde los mandos del control de la máquina o del puente, se cogerá el control local del motor en emergencia.
 - **MOP (Main Operating Panel):** Es la interface entre el operador y el ECS. Está situado en el control de la máquina y es un ordenador en el cual se puede llevar a cabo órdenes al motor, ajuste de parámetros, selección de modos de operación y observar el estado de los sistemas de control. El MOP se comunica con los controladores del ECS, pero el funcionamiento del motor no depende de éste, y en caso de fallo en el MOP, el motor seguirá funcionando de manera correcta.
- Sistemas de monitorización:
 - **PMI (Pressure Measurement Instrument):** Es una herramienta para interpretación de mediciones y llevar a cabo ajustes básicos del motor. La unidad de adquisición de datos del PMI recopila los ciclos de presión de combustión medidos por los sensores de presión de cada cilindro y envía los datos del proceso a los programas CoCoS EDS y al PMI Autotuning instalados en el EMS (Engine Management Services) MOP para registro, visualización y análisis. Los valores principales de

presión, como la presión media, indicada o máxima, se transfieren a través de la red al ECS MOP y a las unidades del ECS.

A través del ECS MOP se puede habilitar o deshabilitar el auto ajuste, enviar órdenes y controlar los ajustes del proceso de combustión.

Desde aquí, el rendimiento del motor se puede afinar ajustando el tiempo de inyección de combustible y el tiempo e instante de cierre de la válvula de escape.

Este ajuste del proceso de combustión para obtener el mejor rendimiento consiste en dos operaciones (figuras 5.2.6 y 5.2.7):

1. Equilibrar la presión media de los cilindros para minimizar la desviación con el valor medio para la carga del momento

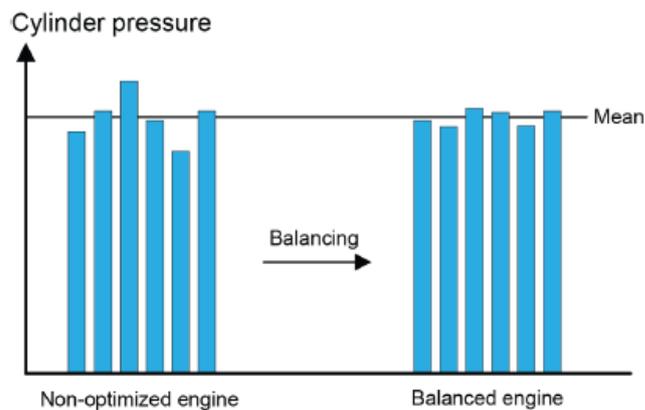


Figura 5.2.6 – Equilibrio de presiones minimiza desviación con presión máxima

Fuente: HHI & MAN-B&W (2020) [27]

2. Ajustar la presión media de los cilindros para aumentar la potencia del motor al nivel seleccionado.

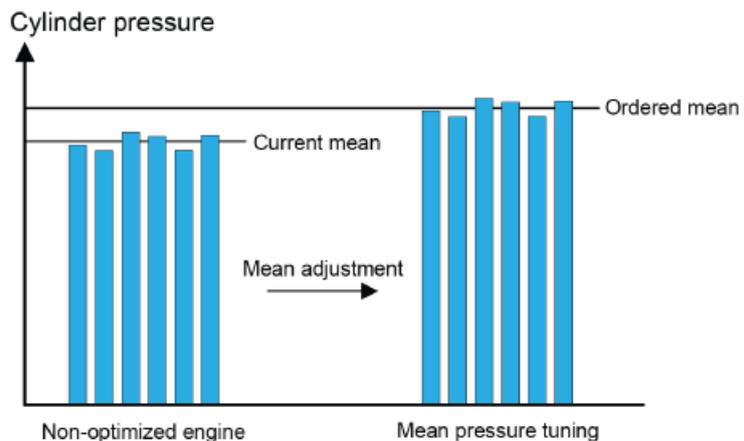


Figura 5.2.7 - Ajuste de la presión media a un nuevo valor ordenado

Fuente: HHI & MAN-B&W (2020) [27]

En la figura 5.2.8 se muestra el diagrama del sistema de autoajuste entre cilindros para el funcionamiento correcto del motor y sus conexiones con el ECS.

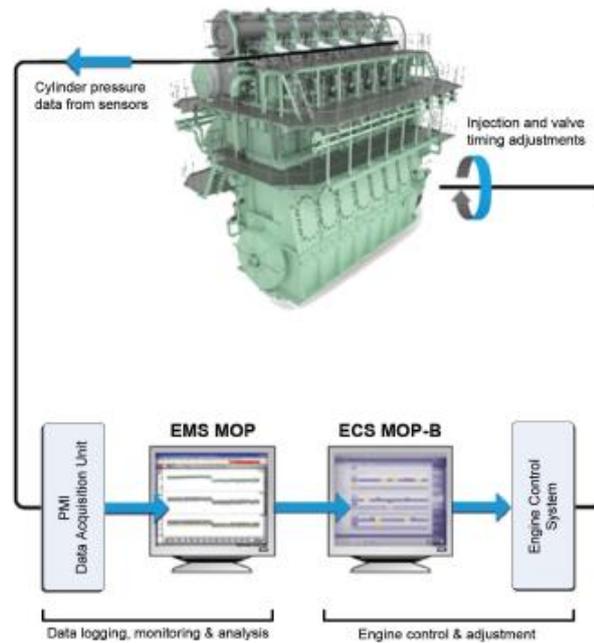


Figura 5.2.8 - Sistema de auto ajuste del motor por medio del PMI

Fuente: HHI & MAN-B&W (2020) [27]

- **CoCoS EDS:** Programa que se utiliza para la recopilación y registro de datos del ECS. Está instalado en el mismo ordenador en el que se ejecuta el PMI y es muy importante actualizar el software siempre que aparezcan nuevas versiones porque mejora las opciones de solución de los problemas. Como el CoCoS se conecta con el ECS, hay que asegurarse que las versiones sean compatibles y en caso de actualizar el ECS tenemos que actualizar también el programa. Junto con el CoCoS se instala también el programa DatGat, mediante el cual se pueden extraer datos del ECS para enviarlos al servicio técnico de MAN en caso de cualquier avería.

En el Anexo 2 del TFM se adjunta el esquema de todas las conexiones entre los sistemas de control del motor.

Para el sistema SCR existen, a mayores, una serie de componentes hardware que se describen a continuación:

- **ERCS (Engine Reduction Control System):** Es el sistema encargado de controlar todos los procesos relacionados con el sistema de reducción NO_x y está en continua comunicación vía Modbus con el ECS. La interfaz entre el ERCS y el operador es el ERCS MOP y para cada motor hay un monitor en el que tendremos 2 pantallas, la pantalla principal SCR y la pantalla con información de las válvulas.

En la pantalla principal del ERCS MOP aparece la información más importante sobre el sistema. Como se aprecia en la figura 5.2.9, el esquema del sistema de reducción con información como temperaturas de entrada y salida del SCR, del reactor y de entrada a la turbina, azufre del combustible, presión del SCR y sensores de presión diferencial, dosificación del agente reductor, concentración NO_x, etc.

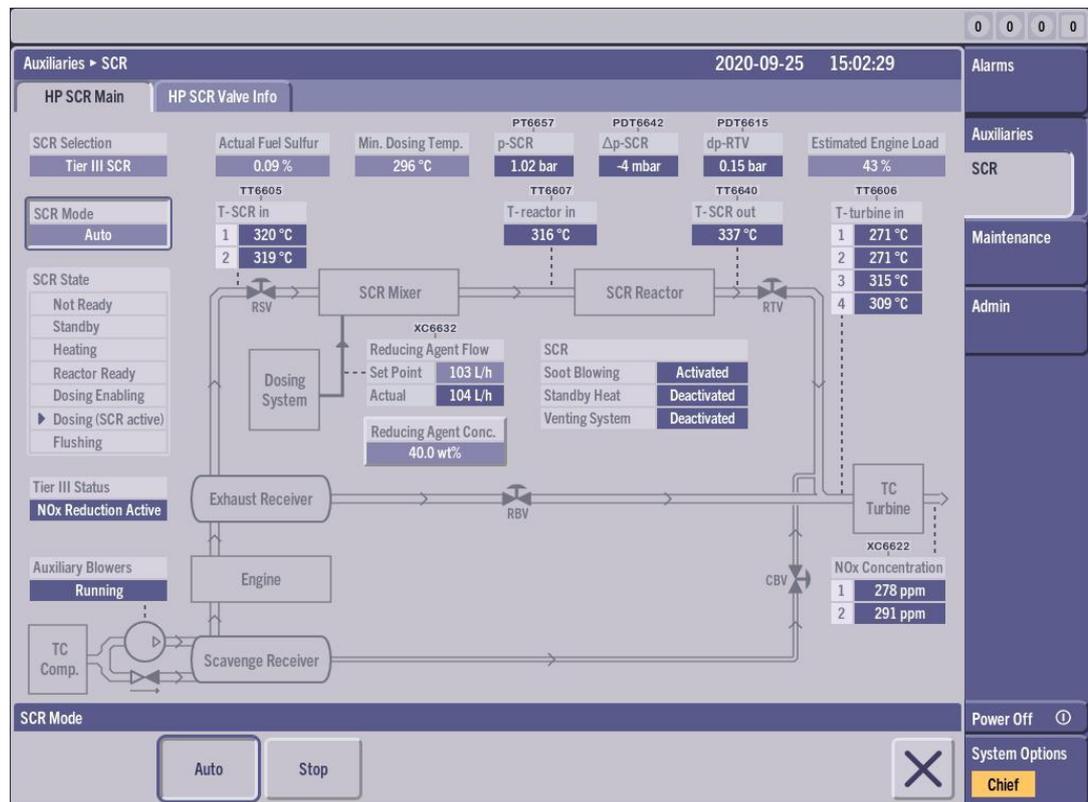


Figura 5.2.9 - Pantalla principal SCR en el ERCS MOP

Fuente: Propia del Autor (Captura)

Además, en la parte izquierda de la pantalla se incorporan estos apartados:

- **SCR Selection:** Sólo es indicación y en él puede aparecer:
 - *No SCR:* Cuando el motor está en modo Tier II y no está activada la función de preparación por lo que el SCR está desactivado.

- *Prepare SCR*: Motor en modo Tier II y función de preparación activada por lo que el sistema SCR está calentándose, pero sin inyección de urea.
- *Tier III*: Motor en modo Tier III, con el SCR caliente e inyectando el agente reductor si las condiciones para el SCR son las correctas.
- **SCR Mode**: Funciona como botón con la opción de poder escoger entre:
 - *AUTO*: Cuando el sistema va a funcionar automáticamente si lo tenemos seleccionado en el ECS MOP.
 - *STOP*: El SCR estará parado y no arrancará, aunque tengamos seleccionado modo Tier III en el ECS MOP

Además, tiene función de indicación, pudiendo aparecer:

- *Failure*: Cuando el SCR falla y lo aísla del sistema
- *Manual*: Cuando se desean controlar las válvulas manualmente desde la pantalla de información de válvulas.
- **SCR State**: Sólo es indicación e indica en qué distintas fases se encuentra el proceso de reducción y así saber si tenemos en alguna.
 - *Not ready*: No se puede poner el SCR porque el modo SCR está parado o tenemos algún fallo en el sistema
 - *Standby*: SCR desactivado, pero preparado para activarlo cuando se le ordene o cuando las condiciones sean las adecuadas.
 - *Heating*: El sistema SCR está siendo calentado dejando pasar parte de los gases de escape por el mismo de manera progresiva.
 - *Reactor Ready*: El sistema SCR alcanzó la temperatura de funcionamiento adecuada y todo el flujo de gases de escape pasa a través del reactor.
 - *Dosing Enabling*: El sistema de dosificación está preparando la inyección de agente reductor.
 - *Dosing*: El sistema está inyectando el agente reductor
 - *Flushing*: El sistema de dosificación está haciendo la secuencia de lavado.
- **Tier III Estatus**: Sólo es indicación y podemos ver lo siguiente:
 - *Not ready*: La reducción NO_x por debajo de los niveles Tier III no es posible por fallo del sistema o porque no está en modo automático

- *Not Activated*: No se seleccionó en el ECS MOP el modo Tier III
- *Preparing*: La reducción está siendo preparada
- *Prepared*: La reducción NO_x Tier III está ya preparada y a la espera de arrancar cuando se ordene
- *Activated*: La reducción Tier III está seleccionada, pero falló algún paso durante la preparación del sistema o el proceso de reducción no está por debajo de los niveles Tier III
- *NO_x Reduction Active*: La reducción está activada y por debajo de los valores Tier III.

Otra de las pantallas para operar sobre el sistema SCR es la de información de válvulas con información detallada de las mismas. En esta pantalla las indicaciones más importantes aparte de las ya mencionadas antes serían:

- **Valve mode**: Funciona como indicación y botón y podremos seleccionar:
 - *AUTO*: Las válvulas siguen el punto de ajuste que le manda el sistema de control del SCR
 - *Manual*: Las válvulas abren y cierran según el operador de indica la orden desde esta pantalla. Es muy importante antes de seleccionar el modo manual de las válvulas que el motor, sopladores auxiliares y sistema SCR estén parados.
- **Valve State**: Sólo es indicación y en él puede aparecer:
 - *Valves in fail safe*: Las RBV, RTV y RSV están abiertas completamente y la CBV cerrada. Esto puede ocurrir cuando un fallo del sistema SCR puede resultar un riesgo para el flujo por el turbocompresor, o si el motor está parado en modo puerto Tier II.
 - *Stop*: El sistema SCR está parado. Todo el flujo de gas está siendo dirigido a través de la RBV, estando cerradas la RTV, RSV y CBV.
 - *SCR line Min Open*: La RSV está abierta completamente y la RTV abierta al mínimo para tener un flujo de gases pequeño a través del reactor y estabilizar los cambios de temperatura del SCR durante el proceso de calentamiento del sistema o al terminar el proceso de limpieza luego de un fallo de parada del SCR.
 - *Automatic*: Las válvulas son controladas automáticamente por el control de temperatura del ERCS.

- *Open SCR Bypass:* Es el primer paso para aislar el sistema SCR en el que se abre la RBV y se cierra la CBV si estaba abierta.
- *Close SCR line:* Es el segundo paso para aislar el sistema en el que se cierran la RSV y la RTV
- *Manual:* Modo manual para operar las válvulas.

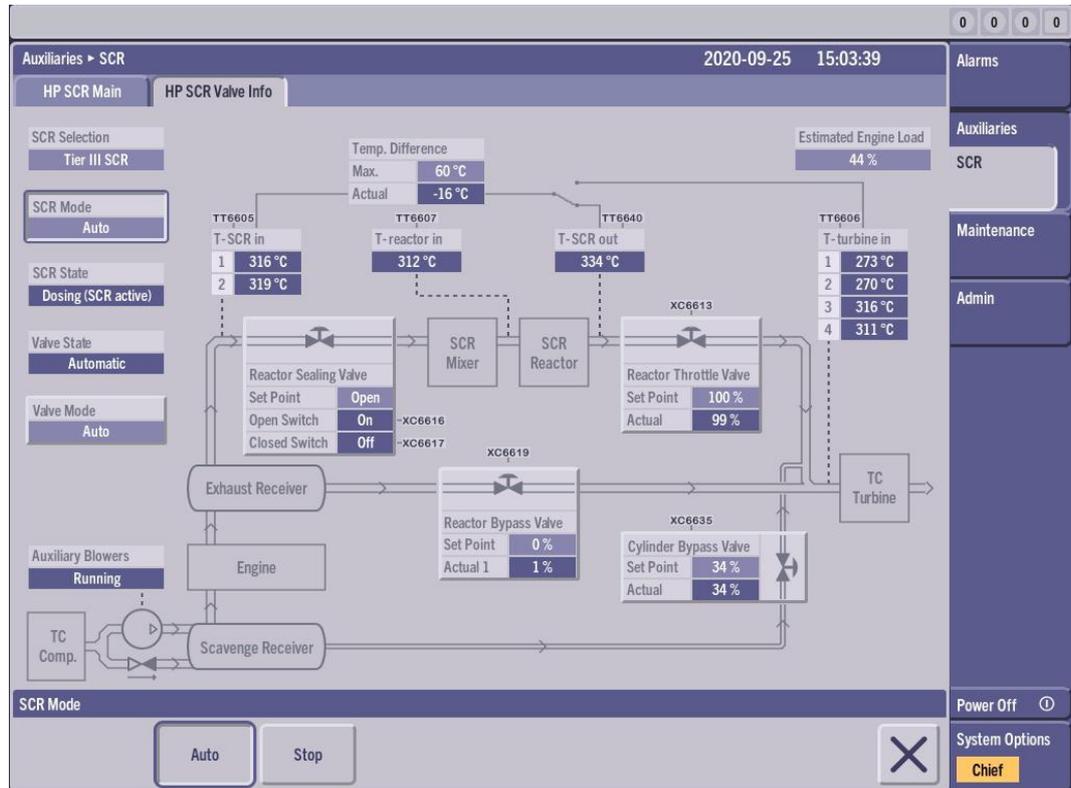


Figura 5.2.10 - Pantalla información de válvulas en el ERCS MOP

Fuente: Propia del Autor (captura)

- **ECS (Engine Control System):** Dentro del sistema de control del motor tenemos una parte que se encarga también de controlar la operación del SCR para que opere de manera que no afecte negativamente al funcionamiento normal del motor. Para interactuar con los parámetros del motor, como ya se explicó anteriormente, está el ECS MOP en el que aparecen unas indicaciones y botones que permiten que el operador active el sistema de reducción.

Desde la pantalla del ECS MOP podremos ver (figura 5.2.11):

- *Engine mode:* seleccionaremos el modo Tier II o Tier III.
- *SCR:* Repetidor de indicación del proceso en el que se halla el SCR

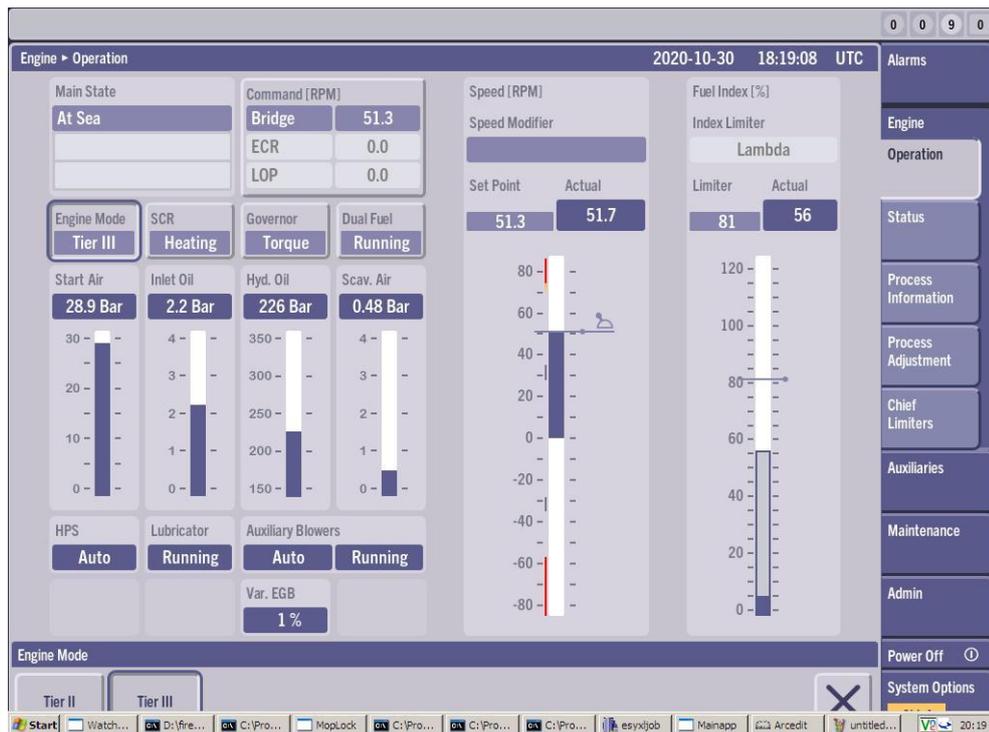


Figura 5.2.11 - Pantalla ECS MOP

Fuente: Propia del Autor (captura)

- **MPC (Multi Purpose Controller):** Los MPC son controladores que no tienen una interfaz con el usuario como pantalla o teclado, pero tienen una amplia variedad de entradas y salidas para interactuar con sensores y actuadores. El procesador principal que llevan es un Motorola 68332 con procesador de 32 bit. Incluye además un coprocesador para la sincronización con el giro del cigüeñal y la medición de la velocidad.

Todos los componentes que tiene el MPC se pueden programar y permite su actualización de manera sencilla ya que no contiene discos duros ni otros componentes mecánicos que puedan fallar. El software se almacena en una memoria flash no volátil y puede enviarse y programarse en el controlador a través de la red, y de este modo, restablecer la funcionalidad después de sustituir un controlador por otro de respeto.

En la figura 5.2.12 se pueden ver todas las conexiones que tiene un MPC:

- Entradas como por ejemplo la señal del tacómetro, transductores de 4 a 20 mA, señales de ± 10 V, interruptores y señales binarias de 24V

- Salidas como señales 4 a 20 mA y ± 10 V, contactos e interruptores de semiconductores de alta velocidad
- Sistema duplicado de control de red y de alimentación para mayor seguridad
- Canal para conexión de ordenador portátil para mantenimiento

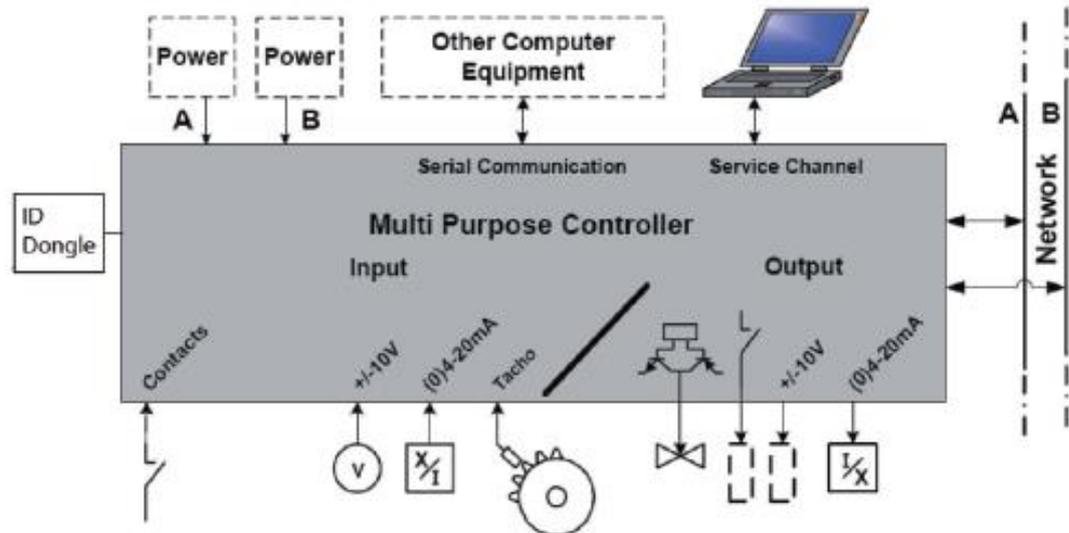


Figura 5.2.12 - Conexiones del MPC

Fuente: HHI & MAN-B&W (2020) [27]

5.2.1. Componentes específicos del SCR HP

Aparte de los sistemas comunes principales, los SCR de alta presión tendrán los siguientes componentes específicos que se muestran en la figura 5.2.1.1:

- **Vaporizador / Mezclador:** Junto con el reactor, se pueden considerar los componentes principales de todo el sistema HP del SCR. En el vaporizador, el proceso catalítico se prepara inyectando el agente reductor, que se vaporiza y se mezcla con los gases de escape. Estos gases mezclados con el agente reductor se conducen al reactor, donde ya tiene lugar la reducción NO_x .
- **Válvulas:** El aspecto funcional más importante de las válvulas es evitar el daño del motor principal como consecuencia de unas condiciones operativas inadecuadas y además, el control del flujo para asegurar una temperatura adecuada para que el proceso de reducción se pueda llevar a cabo. Hay 4 válvulas principales que controlan todo el proceso de reducción:

- **RSV (Reactor Sealing Valve):** Esta válvula se utiliza para sellar el reactor cuando el sistema SCR no está en funcionamiento y durante los procesos de calefacción y venteo.
En caso de que la presión en la línea SCR sea demasiado alta en comparación con la presión de entrada del turbocompresor, se abriría como medida de seguridad de alivio de presión.
Cuando el sistema SCR no se ponga en marcha durante más de 1 mes, es importante abrir la válvula de manera manual desde el ERCS MOP, estando el motor y sistema SCR parados, y asegurando localmente su apertura para evitar que se quede atascada y falle cuando se ponga en funcionamiento el sistema.
- **RTV (Reactor Throttle Valve):** Durante el proceso de calefacción, esta válvula se abre gradualmente aumentando el flujo de gases de escape a través del reactor SCR, para garantizar una temperatura mínima de funcionamiento del sistema y una diferencia máxima de temperatura entre la temperatura de los gases en la entrada SCR y en la entrada de la turbina para un funcionamiento adecuado del motor. Esta válvula se utiliza, además, en caso de que la presión en el SCR aumente por encima de la presión en la línea de bypass durante el funcionamiento del motor con el SCR desactivado.
- **RBV (Reactor Bypass Valve):** Esta válvula se utiliza para desviar los gases de escape del reactor SCR cuando estamos en funcionamiento Tier II, durante incrementos rápidos de carga del motor y para regular el flujo de gases durante el calentamiento del sistema. Cuando la RTV está completamente abierta, la RBV se cerrará gradualmente manteniendo una diferencia de temperatura máxima en la línea de SCR y asegurando que el turbocompresor tenga suficiente energía para no dañar el motor.
- **CBV (Cylinder Bypass Valve):** La regulación de esta válvula se utiliza para aumentar la temperatura de los gases de escape cuando el motor está funcionando a baja carga siempre que el reactor lo necesite. Además de esto, se utiliza para aumentar la temperatura en el reactor SCR antes de la parada de las soplantes auxiliares de aire, para una parada suave y también para amortiguar oscilaciones eventuales de temperatura.

El propio sistema, de manera automática, lleva a cabo una función de movimiento de las válvulas CBV, RTV y RBV con dos propósitos diferentes:

1. **Evitar que las válvulas se atasquen:** Cuando el motor está en marcha, una vez al día se activa esta función y hace que las válvulas se muevan un poco para asegurar que operan correctamente y no están agarrotadas en una determinada posición. Si una de ellas tuviera algún problema, saltaría una alarma de desviación de la posición de la válvula.

En caso de que el SCR se desconecte para pasar a modo Tier II o por algún fallo en el sistema, la RTV se cierra y se utiliza aire de ventilación para evitar la entrada de los gases de escape al reactor. Si la presión de la línea SCR es menor que en la línea bypass, el sistema anulará la función automática de movimiento de la RTV para que no se introduzcan gases de escape en el SCR.

2. **Verificar que el sistema de control de las válvulas funcione bien:** Al arrancar el motor en puerto, las válvulas se moverán para verificar que se tiene control sobre ellas en el momento que el sistema de control del SCR recibe la señal de arranque del motor del ECS.

Durante la estancia en puerto en nivel Tier II, la RBV y la RTV están abiertas y la CBV cerrada. El sistema mueve un poco la RBV y la CBV para verificar su movimiento dejándolas abiertas y cierra completamente la RTV para el arranque del motor con el sistema SCR desactivado.

Si la estancia es en modo Tier III, la RBV está abierta y las RTV y CBV cerradas. El sistema mueve un poco las válvulas dejándolas finalmente en la misma posición.

- **Posicionador SiPart con amplificador integrado:** El posicionador SiPart PS2 se utiliza para garantizar una regulación segura y fiable de las válvulas en el sistema SCR. Se utiliza un amplificador de volumen integrado porque está diseñado para operar con actuadores neumáticos que requieren gran flujo en tiempos de carrera rápidos. Además, este tipo de posicionadores con amplificador, pueden responder a cambios de entrada pequeños o graduales sin poner en peligro la precisión o estabilidad del proceso.

- **Sistema de calefacción de reserva:** Para evitar la condensación del ácido sulfúrico en el reactor durante la parada y arranque del sistema se incluye un sistema de calefacción de reserva. Este sistema de calefacción mantiene la temperatura del reactor por encima de los 200 °C y además reduce los tiempos de calentamiento del SCR.
- **Sistema de ventilación:** Para evitar la condensación del ácido sulfúrico en el reactor durante la parada y arranque del sistema, también se incluye el sistema de ventilación. El reactor se ventila con aire fresco operando en modo Tier II con el SCR desconectado. En caso de que falle el sistema SCR, la línea SCR se aísla y el sistema de ventilación sigue funcionando para garantizar que los gases de escape no ingresen en el sistema de reducción.
- **Control de presión:** El sistema SCR de alta presión está equipado con un sistema de corte en ciertas circunstancias de las válvulas RTV y RSV. La presión de la línea SCR se debe mantener por debajo de la presión máxima dictada por la sociedad de clasificación en las tuberías, reactor, mezclador... MAN requiere una instalación de control del exceso de presión de la línea SCR ya que el sistema SCR puede acumular presión en la misma, incluso con las válvulas RTV y RSV cerradas. Esta subida de presión del sistema puede provenir de los gases de escape, sistema de ventilación, sistema de calefacción de reserva, sistema de soplado de hollín, etc.

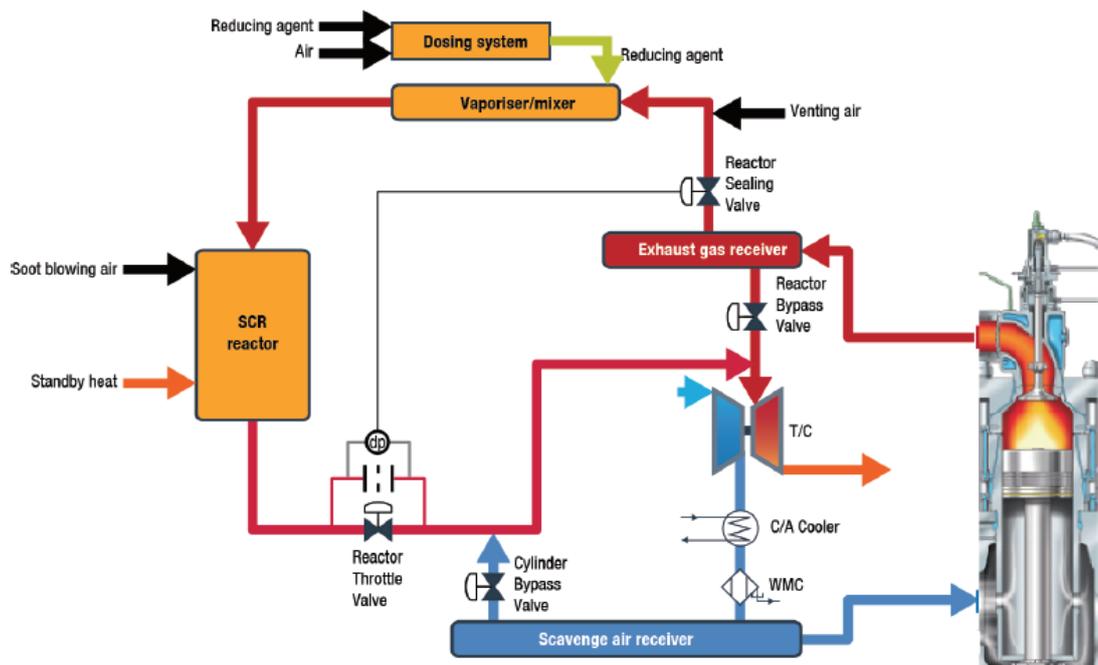


Figura 5.2.1.1 - Sistema de control de presión del SCR HP

Fuente: HHI & MAN-B&W (2018) [26]

La presión máxima en la línea SCR se puede conocer en todas las condiciones asegurando una diferencia de presión máxima entre la línea SCR y el colector de gases de escape mediante un sistema de control de diferencial de presión. En caso de una diferencia de presión excesiva en la RTV, el sistema activa la apertura automática de la RSV para igualar la presión del sistema a la del colector de escape, y de esta manera reducir la presión en el SCR. Cuando esto ocurre, el flujo másico de gases del sistema SCR se expande hacia el colector, lo que puede ocasionar un retorno inadecuado de aire de barrido y perturbaciones en la turbosoplante, por lo que es de vital importancia tener ajustado este diferencial de presión a los valores adecuados.

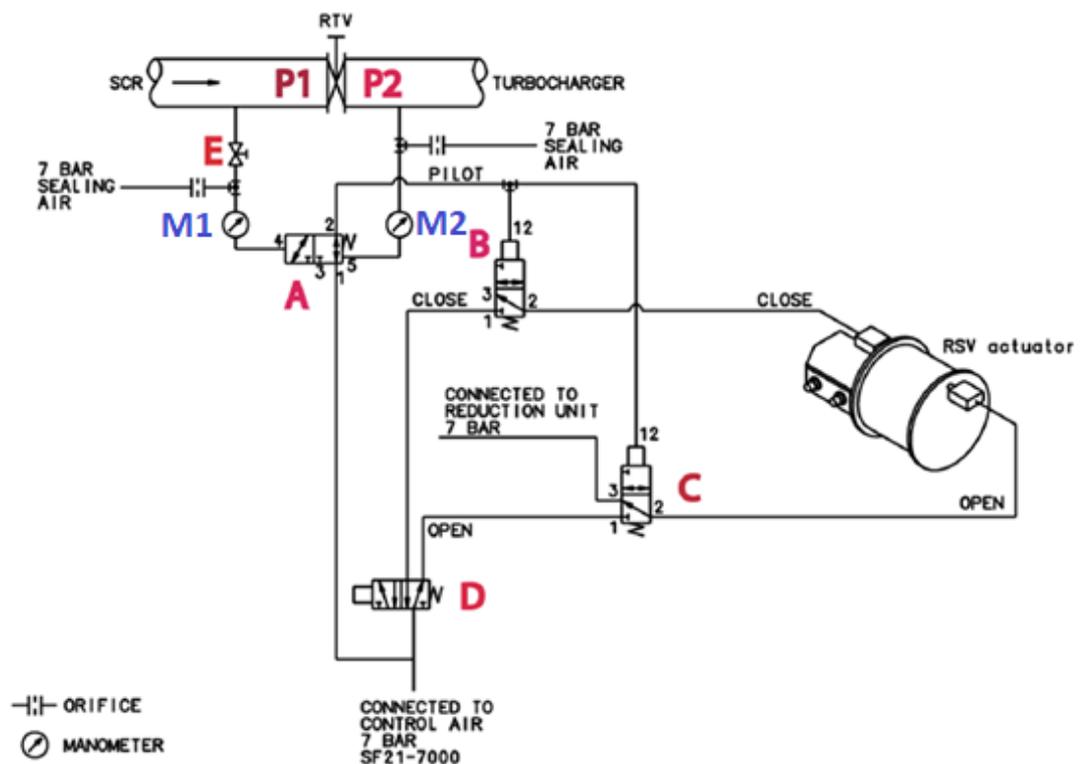


Figura 5.2.1.2 - Diagrama neumático sistema de control de presión

Fuente: HHI & MAN-B&W (2018) [26]

La presión máxima en la línea SCR según las especificaciones es de unos 5,15 bar, y se recomienda ajustar la apertura de la RTV siempre en un diferencial de presión en un rango entre 0,50 bar y 0,80 bar para evitar problemas en el turbocompresor. Si el ajuste está por debajo de 0,50 bar la RSV abrirá más frecuentemente por lo que no es conveniente para el motor, y si se ajusta por encima de 0,80 bar podría comprometer la seguridad del sistema y aumenta la perturbación del turbocompresor.

En condición normal, la apertura y cierre de la RSV están controlados por la válvula D de 5/2 vías. En la figura 5.2.1.3 se puede ver un esquema del circuito para simular su funcionamiento.

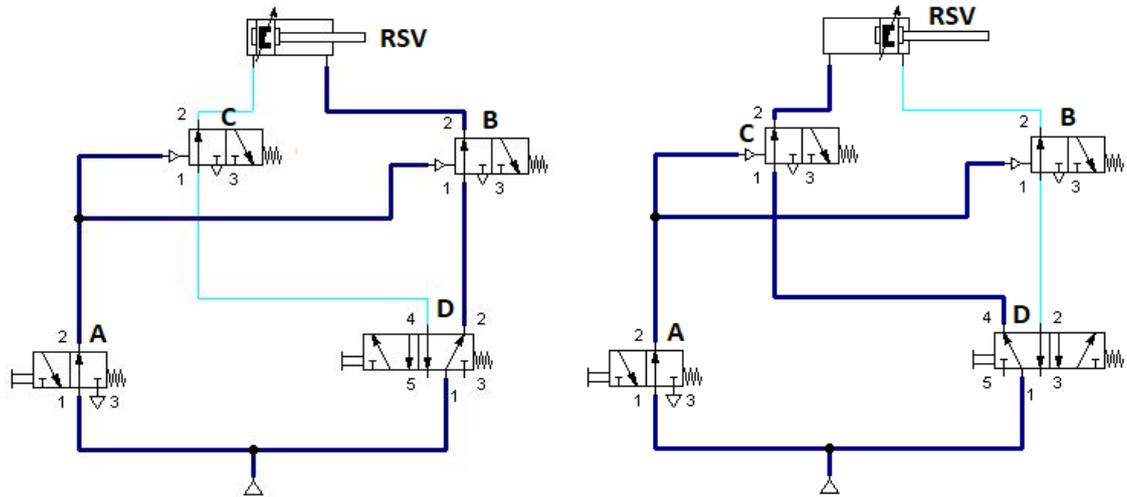


Figura 5.2.1.3 - Funcionamiento normal apertura RSV

Fuente: Elaboración Propia del Autor

Cuando se llega al valor por encima del punto ajustado de diferencial de presión entre P1 y P2, se activará la válvula de diferencial de presión A y corta el aire piloto a las válvulas 3/2 vías B y C, pasando la RSV a su posición de seguridad que siempre es abierta, independientemente de la posición de la válvula D de 5/2 vías como se puede interpretar en la figura 5.2.1.4.

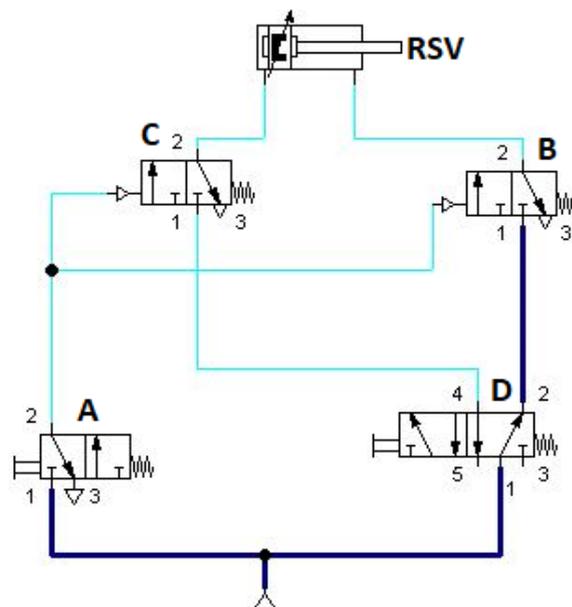


Figura 5.2.1.4 - Sobrepresión en el SCR y apertura de la válvula RSV

Fuente: Elaboración Propia del Autor

Cuando se vuelve a alcanzar aproximadamente el 60 % del punto de ajuste después de equalizar la presión, la válvula A de diferencial de presión vuelve a su estado inicial y la RSV vuelve a ser controlada por la válvula D de 5/2 vías. Como ya se dijo anteriormente, es de vital importancia tener regulada la válvula A de diferencial de presión para evitar daños.

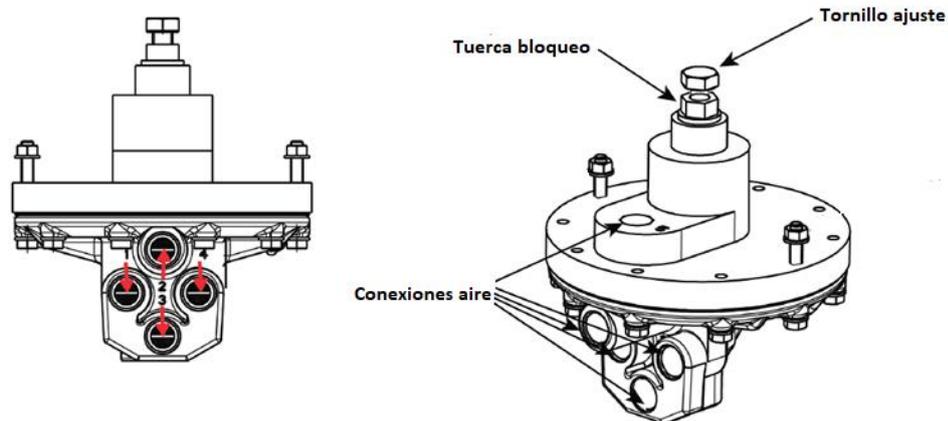


Figura 5.2.1.5 - Esquema de la válvula de sobrepresión

Fuente: HHI & MAN-B&W (2018) [26]

- **Ventiladores auxiliares:** Estos ventiladores auxiliares se encuentran también en motores sin sistema de SCR. En este caso, estos ventiladores se pondrán en marcha en el arranque del sistema SCR y siempre estarán en marcha cuando el motor esté por debajo de una determinada carga para mantener una presión suficiente en el colector de aire de barrido. Cuando el sistema SCR está desactivado, los sopladores funcionarán en modo normal.
- **Compresores y botella de aire SCR:** Esta unidad garantiza un suministro de aire constante y adecuado para el soplado del reactor SCR.

5.2.2. Componentes específicos del SCR LP

Aunque los elementos del sistema SCR de baja presión son prácticamente iguales a los de alta presión, tendrá los siguientes componentes específicos:

- **Sistema de descomposición externo para inyección de urea:** Como los gases de escape tienen menor temperatura en la parte de baja presión, será necesario instalar la unidad de descomposición externa. Esta unidad dispone de soplador, quemador y recipiente vaporizador.

En el vaporizador externo se inyecta la urea que se mezcla con los gases de escape a alta temperatura provenientes del quemador, y estos gases ya mezclados con la urea se conducen a la rejilla de inyección de amoníaco (AIG) donde ya se mezclan con los gases de escape del motor y pasan al reactor SCR.

- **Rejilla de inyección de urea (AIG):** En la rejilla de inyección, los gases creados en el sistema de descomposición externo se mezclan con los gases de escape del motor, antes de ser dirigidos al reactor SCR.

5.3. Operación del sistema SCR

La puesta en marcha y parada del sistema SCR se gestiona desde el ECS MOP como ya se comentó anteriormente, y las operaciones detalladas y toda la información del sistema se maneja desde el ERCS MOP. En el ECS MOP, el operador selecciona el modo Tier II o Tier III, el sistema de control SCR inicia o detiene el sistema, y el ECS maneja el modo de funcionamiento del motor adaptando en cada caso la sincronización de la inyección de combustible.

5.3.1. Operación Tier II con SCR desactivado

Cuando nos encontramos en aguas que no están reguladas por el nivel Tier III, operaremos en modo Tier II, desviando los gases de escape del sistema SCR. En el ECS MOP el operador tendrá seleccionado modo Tier II y se desactivará la función de preparación del SCR, mostrando en el ERCS MOP el texto: “No SCR”.

La RBV estará abierta y la RSV, RTV y CBV cerradas, de modo que los gases de escape se dirigen directamente al turbocompresor y el motor funciona de igual manera que sin tener sistema SCR como se ve en la figura 5.3.1.1.

Mientras funcione en modo Tier II, el sistema de control del SCR envía una señal al sistema de ventilación externo para que se inicie y siga ventilando la línea SCR para mantener los gases de escape con contenido en azufre fuera del sistema SCR. Al estar toda la línea fría, si entrasen los gases de escape al sistema SCR, condensarían ácido sulfúrico y lo dañarían.

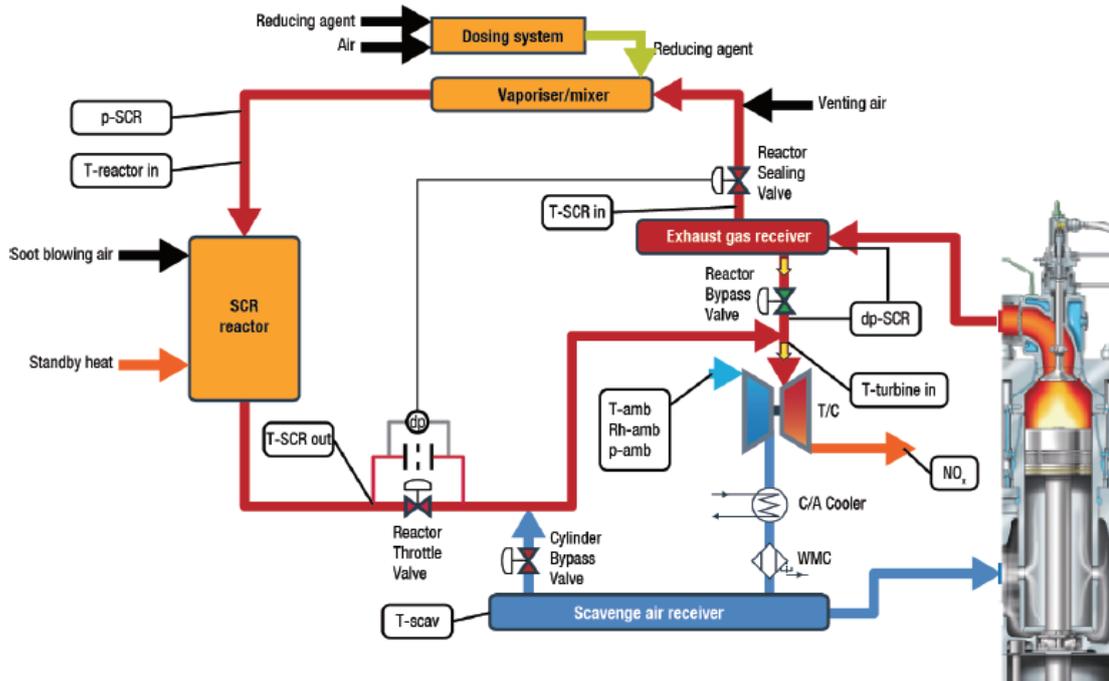


Figura 5.3.1.1 - Sistema HP SCR modo Tier II

Fuente: HHI & MAN-B&W (2018) [26]

5.3.2. Arranque del sistema SCR al entrar en Tier III

Antes de entrar a una zona regulada con nivel Tier III, se deben realizar una serie de chequeos previos.

En primer lugar, antes de iniciar el sistema SCR, se debe verificar que el contenido de azufre de los combustibles se corresponde con las especificaciones del sistema SCR indicadas en el ERCS MOP y si no se corresponde, se tendría que cambiar al valor adecuado desde el ECS MOP. Si se arranca el sistema SCR con un combustible con contenido en azufre demasiado elevado, se contamina el reactor y se degrada el catalizador.

Además, se debe verificar que el valor de la concentración de urea se corresponde a la disponible a bordo.

Una vez realizadas estas comprobaciones, se puede iniciar el sistema SCR y existen dos formas para hacerlo: mediante un paso o mediante dos pasos.

Para arrancar el sistema en **un paso**, se cambia a modo Tier III directamente, y luego el sistema ERCS, siempre que esté en modo automático y se den las

condiciones de carga y temperatura adecuada, comienza a calentar hasta los valores correctos y a dosificar urea. Este proceso de calentamiento es bastante largo y difícil de calcular el tiempo exacto para conseguir los valores adecuados para la reducción, por lo que es más conveniente utilizar el sistema en dos pasos con el que se controla el momento exacto deseado para comenzar la reducción.

El método de arranque en **dos pasos** consiste en activar la función de preparación del sistema SCR mientras se halla en modo Tier II. Entonces, el ERCS comienza a calentar el sistema de la misma manera, pero se detiene cuando el SCR está completamente listo y se alcanzaron las temperaturas adecuadas en la línea. Entonces, en la pantalla del ERCS MOP aparecerá el texto "*Reactor Ready*" y ahora, cuando el operador desde en ECS seleccione modo Tier III, como el sistema está ya caliente, empezará la inyección de agente reductor tan pronto como el sistema de dosificación externo esté listo para iniciarse.

Independientemente de la manera que se elija para el arranque del sistema, los pasos que va a llevar a cabo el ERCS van a ser los mismos.

Cuando el operador escoge el modo Tier III o se habilita la función de preparación, el estado del SCR en la pantalla principal del ERCS MOP cambia a "*Heating*". Para que esto se efectúe es importante tener el sistema en automático y, además, la temperatura de los gases de escape tiene que estar por encima del límite de condensación del ácido sulfúrico. En la pantalla principal se puede ver que la ventilación del sistema SCR se detiene, pero comienza con el soplado de hollín, que siempre estará activado cuando pasen los gases de escape por el reactor para evitar que los elementos del catalizador se obstruyan.

Al mismo tiempo, en la pantalla de información de válvulas en el ERCS MOP se ve que el estado de las válvulas cambia a abierto al mínimo. La RSV abre completamente y la RTV abre al mínimo dejando pasar una pequeña parte de los gases de escape a través de la línea SCR calentándose y los sensores comienzan a medir esta subida progresiva de temperatura. Luego, las válvulas cambian a modo automático y pasan a moverse por medio del controlador de temperatura del sistema hasta que se detenga el sistema. Sólo se controla una válvula al mismo tiempo, abriendo primero la RTV y luego cerrando la RBV. De

esta manera, gradualmente van entrando más gases de escape por el sistema. Este control de las válvulas tiene en cuenta la diferencia de temperatura de los gases de escape entre la entrada al sistema SCR y la entrada a la turbina para que no exceda un valor predefinido. En la pantalla de información de válvulas del ERCS MOP se puede ver el valor instantáneo de diferencial de temperatura y también el valor máximo admisible. De esta manera, se asegura que sólo una pequeña parte de la energía de los gases de escape se utiliza para calentar el sistema de reducción, para que no quede el turbocompresor sin flujo de gases de escape.

A medida que se activa el SCR, la temperatura de gases de escape normalmente aumenta, y si es más baja que la temperatura aceptable para operar el SCR, la válvula CBV empieza a abrirse para alcanzar la temperatura de funcionamiento, manteniendo siempre el diferencial de temperatura por debajo del máximo aceptable. Como al abrir la CBV el aire de barrido afecta en la medición de temperatura de entrada a la turbina, siempre que esté abierta, el sistema coge como referencia para calcular el diferencial máximo aceptable, la temperatura de entrada al SCR, como hacía antes, pero la otra que tiene en cuenta será la de salida del reactor porque no está afectada por esta entrada de aire frío de barrido a la entrada de la turbina.

Cuando se alcanza la temperatura correcta en todos los puntos de medición de la línea SCR, se activa el SCR y está listo para comenzar la dosificación. En este momento cambia el estado del SCR a *“Reactor Ready”*. Si se activó el SCR en modo Tier II, habilitando el sistema, se detiene en este punto hasta que el operador seleccione modo Tier III.

Si se selecciona el modo Tier III o el sistema se arrancó con el método de un único paso, el estado de SCR cambia a *“Dosing enabling”*. El ERCS envía una señal al sistema de dosificación externo para preparar la inyección de agente reductor y cuando está lista, le envía una señal de vuelta al ERCS y este cambia a estado del SCR *“Dosing (SCR active)”* y le da el punto de ajuste de la cantidad de agente reductor al sistema de dosificación.

A bajas cargas del motor, el ERCS siempre solicita al ECS que mantenga los sopladores auxiliares funcionando hasta que se suba de una determinada carga

entrada a la turbina subirán más lentamente debido a la capacidad calorífica de todo el sistema SCR. Para cumplir con el diferencial máximo admisible entre la temperatura de entrada al sistema SCR y la temperatura de entrada al turbocompresor, podría ser necesario que el ERCS cerrase la CBV en caso de estar abierta e incluso podría enviar la orden de apertura de la RBV, derivando parte de los gases de escape directamente a la turbina. Con la apertura de la RBV el flujo total de los gases de escape no pasa por el reactor por lo que no es posible la dosificación completa de agente reductor.

En este caso se mantiene una cantidad mínima de dosificación para evitar que la tobera dosificadora se atasque hasta que la RBV vuelva a cerrar nuevamente y todas las temperaturas del sistema SCR estén en el rango adecuado, momento en el que dosificará la cantidad de agente reductor necesaria y vuelva a estar nuevamente en los rangos de reducción Tier III.

5.3.4. Atracando en puerto zona Tier III

Al aproximarse a puerto la carga del motor va a ser tan baja que la temperatura de los gases de escape disminuye por debajo del límite de condensación del ácido sulfúrico por lo que el ERCS aísla automáticamente el sistema.

El ERCS entonces envía una señal al sistema de dosificación externo, parando las bombas y comenzando a hacer la limpieza de todo el sistema de dosificación y de la tobera con aire comprimido. En caso de que el sistema de lavado no funcione correctamente, se puede dar el caso de obstrucción del sistema y de la tobera dosificadora.

Cuando finaliza el lavado, el SCR pasa a estar en espera, la CBV cierra y la RBV abre. Una vez que la RBV está completamente abierta, entonces la RTV y la RSV cierran aislando completamente el sistema SCR.

Ahora se detiene el sistema de soplado de hollín y se inicia el sistema de calefacción externo para mantener el sistema a una temperatura por encima de la de condensación del ácido sulfúrico en el interior del reactor.

Para que el sistema de calefacción funcione correctamente, la RTV y RSV tienen que estar completamente cerradas por lo que estando en un puerto con nivel Tier III, es muy importante no cerrar el aire de control a estas válvulas.

5.3.5. Arranque SCR desde puerto con nivel Tier III

Estando en puerto con restricciones Tier III, el sistema SCR estará aislado, pero con el sistema de calefacción funcionando hasta que vaya subiendo la carga del motor y se obtenga una temperatura de los gases de escape por encima del límite de condensación del ácido sulfúrico. En este momento, el SCR se activa automáticamente de nuevo y comienza la reducción NOx.

5.3.6. Parada del sistema SCR

Cuando el buque esté fuera de la zona Tier III, el operador puede cambiar el modo de funcionamiento del motor a Tier II.

Una vez hecho esto, el ERCS envía la señal al sistema de limpieza de las líneas de agente reductor con agua y luego desconecta todo el sistema SCR. Cuando se cierran completamente la RTV y la RSV, el ERCS ordena que se inicie el sistema de ventilación externo y el sistema SCR se vuelve a ventilar hasta su siguiente funcionamiento para evitar la entrada de gases de escape al sistema. En el momento que el buque se detenga en zona Tier II, el sistema de ventilación se detendrá de la misma manera porque no hay riesgo de entrada de gases al SCR y cuando se vuelva a arrancar el motor, se activará de nuevo el venteo.

6. PROBLEMAS DURANTE LA OPERACIÓN DE SISTEMAS SCR

6.1. Obstrucción de tuberías

El principal problema del SCR con el que se ha encontrado en el buque fue la obstrucción de las tuberías que van a los sensores de presión diferencial. Uno de los sensores de presión diferencial se conecta antes y después de la RTV y el otro diferencial antes y después de la RSV.

La obstrucción de estas tuberías es debido al hollín de los gases de escape principalmente porque la tubería es de un diámetro muy reducido, y además estas tuberías se conectan a la parte inferior de la línea de gases de escape. Al estar en la parte baja, por la acción de la gravedad, estas partículas de hollín se irán incrustando en la tubería al precipitar. En la figura 6.1.1 se puede apreciar la posición inicial de los sensores de presión diferencial y el diámetro de las tuberías.

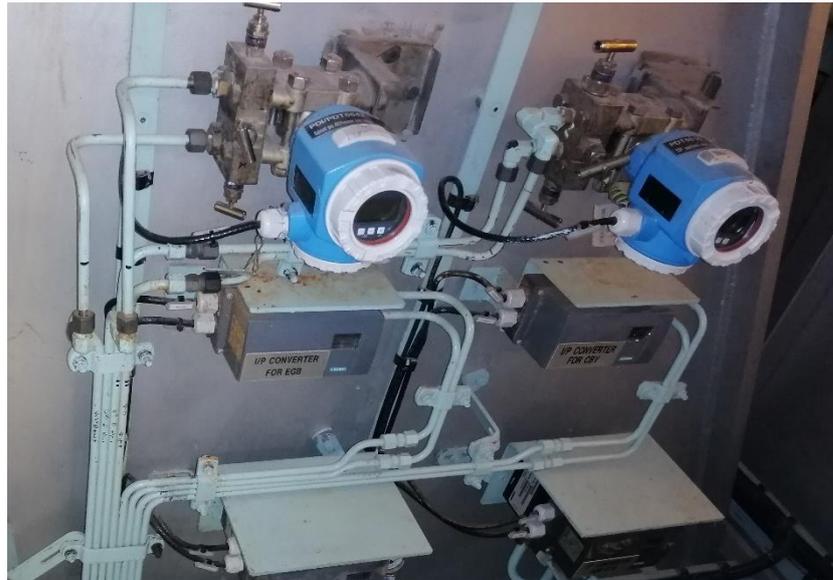


Figura 6.1.1 - Posición inicial dP RBV y dP RTV

Fuente: Propia del Autor

Al estar las tuberías atascadas, y querer probar el sistema SCR, en el ERCS MOP se mostró la alarma del diferencial de presión fuera de rango. Como posibles soluciones, el programa mostraba fallo del sensor de presión, fallo en algún cable, mala calibración...

Lo primero que se hizo fue cerrar las válvulas de las tuberías que van al sensor de diferencial de presión y desconectar la tubería. Se comprobó que en el sistema SCR no había presión elevada abriendo lentamente esta válvula y además en el ERCS MOP, la presión del SCR mostraba 1,83 bar, manteniéndose por debajo de los 5,00 bar de diseño que tolera el sistema.

Al tener las tuberías desconectadas del sensor de presión se comprobó que funcionaban correctamente y finalmente se intentaron soplar las tuberías con aire poniendo de manifiesto que estaban obstruidas.

Se limpiaron y desatascaron todas las tuberías y se volvieron a montar en el sistema constatando que funcionaba correctamente.

Aproximadamente 1 semana después se observó que se volvían a obstruir estas tuberías por lo que siendo un fallo del sistema se procedió a hacer una garantía por nueva construcción.

Como el buque Rías Baixas Knutsen es un buque con menos de 2 años de antigüedad, tiene garantía completa de todos los equipos y sistemas siempre que los fallos o roturas sean por causas de funcionamiento y no debidos a un mal mantenimiento o fallo del operador. En la garantía se explicó el problema al astillero y se pidió un nuevo sistema de tuberías para evitar estos atascos continuos de hollín en las tuberías.

En el Anexo 3 se puede ver el ejemplo que se hizo a bordo de la garantía.

El astillero como medida de urgencia optó por enviar nuevas tuberías, pero el problema persistió al ser del mismo diámetro con obstrucciones continuas y corrosión interna de la tubería. Se ve el montaje en la figura 6.1.2.



Figura 6.1.2 - Tuberías instaladas mismo diámetro

Fuente: Propia del Autor

Finalmente, se hizo una nueva garantía que se puede ver en el Anexo 4 sobre el problema y desde a bordo se propuso cambiar la ubicación de los sensores de presión diferencial. En lugar de tenerlos en la parte baja del colector de gases, subirlos y ponerlos por encima de los mismos y así evitar la precipitación del hollín por causa de la gravedad. Además, el astillero envió unas tuberías y válvulas de

diámetro mucho mayor y desde su instalación no se han vuelto a tener estos problemas de nuevo.

En las siguientes figuras 6.1.3 y 6.1.4 se puede ver la nueva posición de los sensores de presión diferencial por encima del colector de gases de escape y el aumento del diámetro de la tubería para evitar atascos.

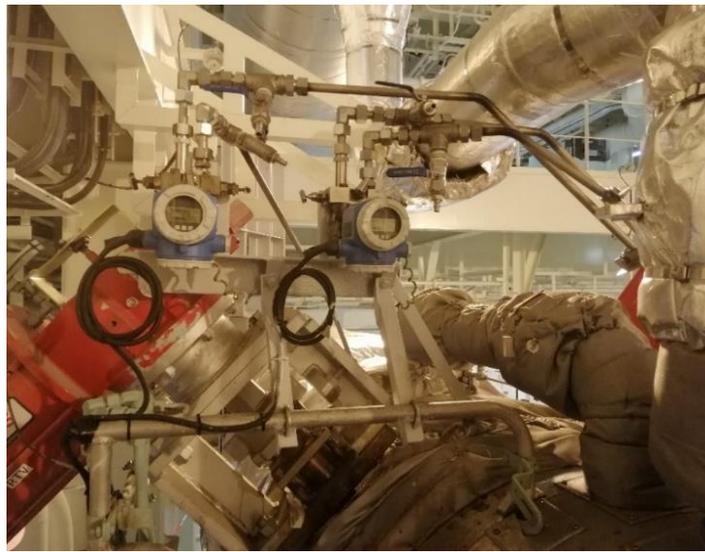


Figura 6.1.3 - Nueva posición dP RBV y dP RTV

Fuente: Propia del Autor

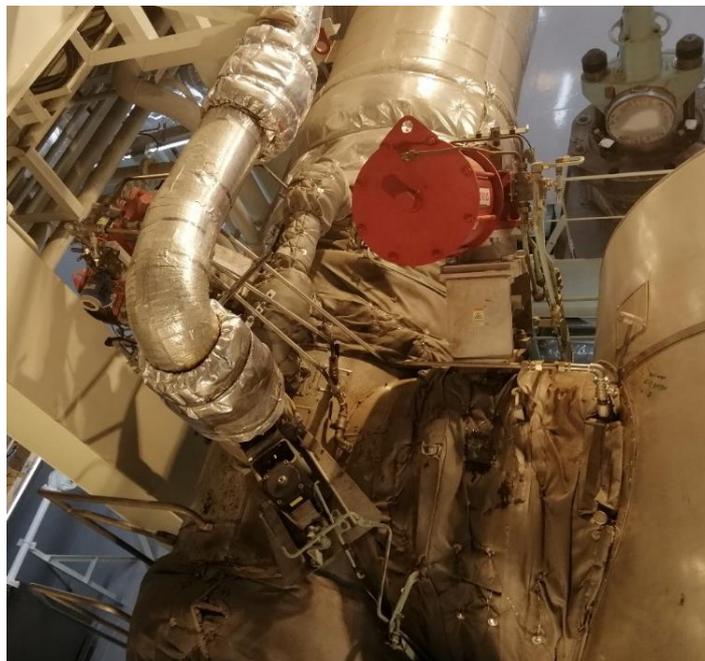
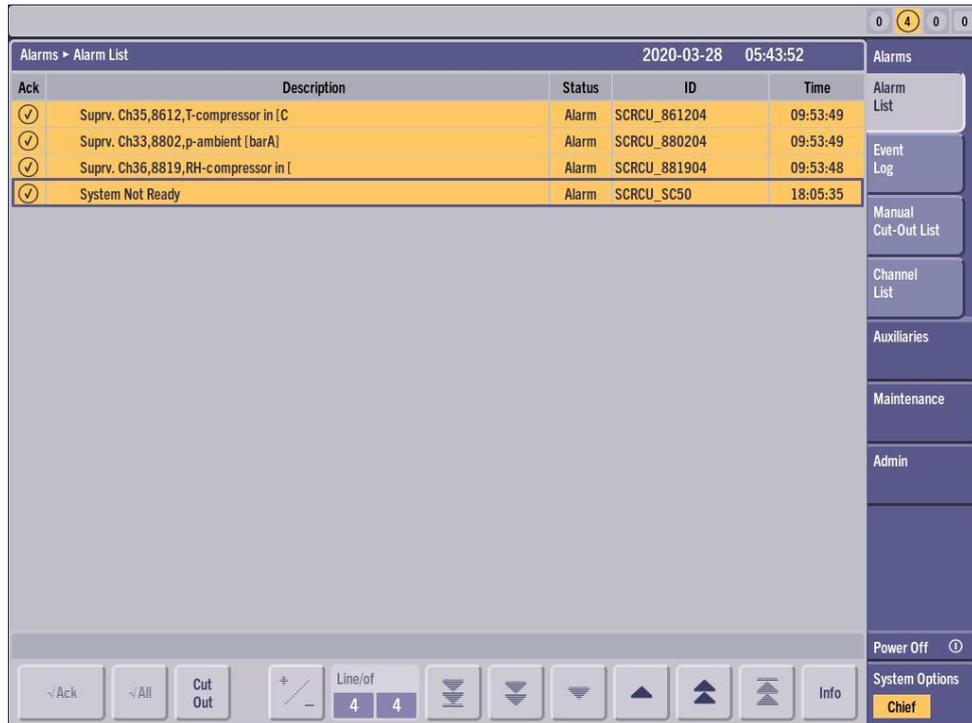


Figura 6.1.4 - Vista superior nueva posición sensores de presión diferencial

Fuente: Propia del Autor

6.2. Fallo sensor de humedad y temperatura entrada aire T/C

Otro de los problemas encontrados es el fallo del sensor de humedad relativa y temperatura situado a la entrada de aire del turbocompresor. Al fallar este sensor no es posible poner a funcionar el sistema SCR por lo que se chequeó todo el cableado hasta el sensor verificando su perfecto estado. Finalmente se decidió cambiar el sensor por uno de respeto y se solucionó el problema.



Alarms > Alarm List					2020-03-28 05:43:52
Ack	Description	Status	ID	Time	
✓	Suprv. Ch35,8612,T-compressor in IC	Alarm	SCRCU_861204	09:53:49	
✓	Suprv. Ch33,8802,p-ambient [barA]	Alarm	SCRCU_880204	09:53:49	
✓	Suprv. Ch36,8819,RH-compressor in I	Alarm	SCRCU_881904	09:53:48	
✓	System Not Ready	Alarm	SCRCU_SC50	18:05:35	

Figura 6.2.1 - Pantalla alarma ERCS MOP fallo sensor aire T/C

Fuente: Propia del Autor (Captura)

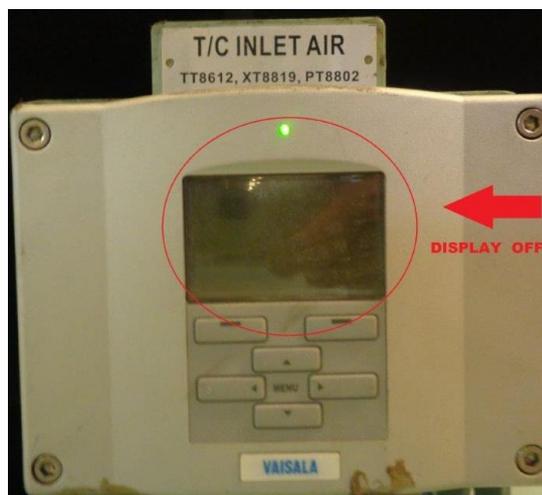


Figura 6.2.2 - Fallo sensor entrada aire T/C

Fuente: Propia del Autor

Además, como ya se dijo anteriormente, al estar el buque en garantía se hizo la correspondiente reclamación al astillero para volver a tener un sensor de respeto.

En el Anexo 5 se puede ver el ejemplo de la garantía.

6.3. Fallo sensor temperatura entrada gases a la turbo

Otro fallo que se suele dar es el deterioro de alguno de los 4 sensores de entrada de gases de escape a la turbina.

Cuando esto ocurre, en el ECS MOP aparece la alarma de desviación de temperatura del sensor y el sistema SCR como medida de seguridad se detiene y los gases de escape pasan al turbocompresor directamente.

ID: Unit_Tag	Date	Time	Description	Status	MCo	ACo	Ack
SCRCU_SC50	2020-11-02	16:24:01,80	System Not Ready	Alarm			X
SCRCU_SC50	2020-11-02	16:23:45,12	System Not Ready	Alarm			
SCRCU_SC50	2020-11-02	15:57:49,23	System Not Ready	Normal			X
SCRCU_HS082733	2020-11-02	15:57:38,30	T-turbine in sensor 4 deviating	Normal			X
SCRCU_SC50	2020-11-02	15:57:38,29	System Not Ready	Alarm			X
CLK_T	2020-11-02	10:36:51,02	Time bumped -1 seconds	Event			
CLK_T	2020-11-02	08:06:31,02	Time bumped -1 seconds	Event			
SCRCU_HS082733	2020-11-02	07:50:07,71	T-turbine in sensor 4 deviating	Normal			
SCRCU_SC50	2020-11-02	07:42:15,84	System Not Ready	Alarm			
SCRCU_HS082733	2020-11-02	07:42:15,84	T-turbine in sensor 4 deviating	Alarm			
SCRCU_GS1145	2020-11-02	06:24:03,56	NOx SCR out too high	Normal			X
SCRCU_GS1145	2020-11-02	06:20:10,34	NOx SCR out too high	Alarm			X
SCRCU_GS1145	2020-11-02	06:19:37,61	NOx SCR out too high	Alarm			
SCRCU_GS1145	2020-11-02	06:02:05,41	NOx SCR out too high	Normal			X
SCRCU_GS1145	2020-11-02	05:59:46,66	NOx SCR out too high	Alarm			X
SCRCU_GS1145	2020-11-02	05:59:25,31	NOx SCR out too high	Alarm			
SCRCU_CBVE90	2020-11-02	03:33:53,74	CBV Exercise Function Activated	Normal		X	X
SCRCU_RBV1E90	2020-11-02	03:33:53,74	RBV Exercise Function Activated	Normal		X	X
SCRCU_RTVE90	2020-11-02	03:33:53,74	RTV Exercise Function Activated	Normal		X	X
SCRCU_CBVE90	2020-11-02	03:33:37,14	CBV Exercise Function Activated	Alarm		X	X

Figura 6.3.1 - Alarma ECS MOP fallo sensor temperatura entrada al T/C

Fuente: Propia del Autor (Captura)

Se observa que la temperatura de entrada de gases a la turbina que indican los otros 3 sensores era prácticamente la misma excepto la del sensor del fallo.

Para solucionar el problema se cambió el sensor por uno de respeto (figura 6.3.2), se volvió a poner en marcha el sistema SCR y se hizo su respectiva garantía al astillero como se puede ver en el Anexo 6.



Figura 6.3.2 - Cambio del sensor de temperatura entrada gases al T/C

Fuente: Propia del Autor

Es muy importante tener siempre sensores de este tipo en el buque para el funcionamiento correcto del motor y del sistema SCR.

6.4. Manómetros locales de estación de bombeo de urea

Todos los manómetros de la estación de bombeo de urea se dañaron indicando presiones fuera de rango (figura 6.4.1). Se cambiaron por manómetros nuevos de respeto y se hizo la garantía correspondiente indicando al astillero que los manómetros suministrados no tienen la calidad suficiente para urea y se solicitando unos de mejor calidad. En el Anexo 7 se puede ver la garantía.



Figura 6.4.1 - Manómetros locales bombeo urea fuera rango

Fuente: Propia del Autor

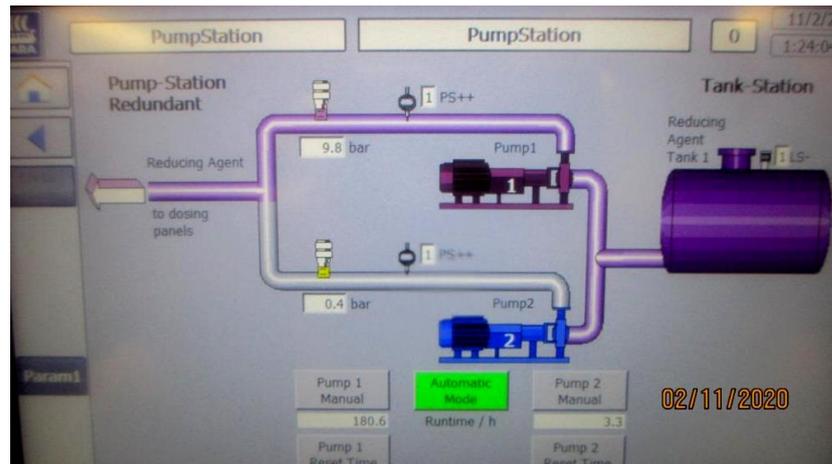


Figura 6.4.2 - Indicación remota de presión de bombeo de urea

Fuente: Propia del Autor (captura)

6.5. Tobera de la lanza de dosificación

Otro de los problemas advertidos fue que con los motores a similar carga y temperatura de funcionamiento, con la misma concentración de agente reductor (40 %), el motor de estribor inyectaba más cantidad de agente reductor (108 l/h) pero la concentración de NO_x estaba por encima de la del motor de babor, con unos valores de 350 ppm. Al activarse la alarma, paraba la dosificación. Se reanudaba con la aceptación de la alarma. Véase la figura 6.5.1.

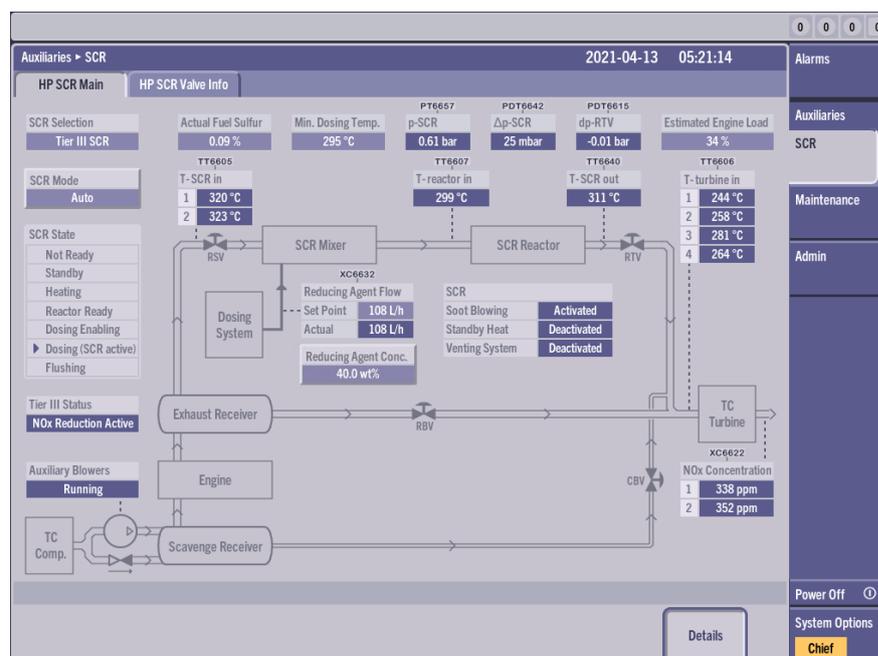


Figura 6.5.1 - ERCS MOP Motor estribor 350 ppm con 108 l/h (40 % urea)

Fuente: Propia del Autor (captura)

Por el contrario, el motor de babor con una inyección de agente reductor de unos 100 l/h conseguía bajar a 100 ppm los NO_x como muestra la figura 6.5.2.

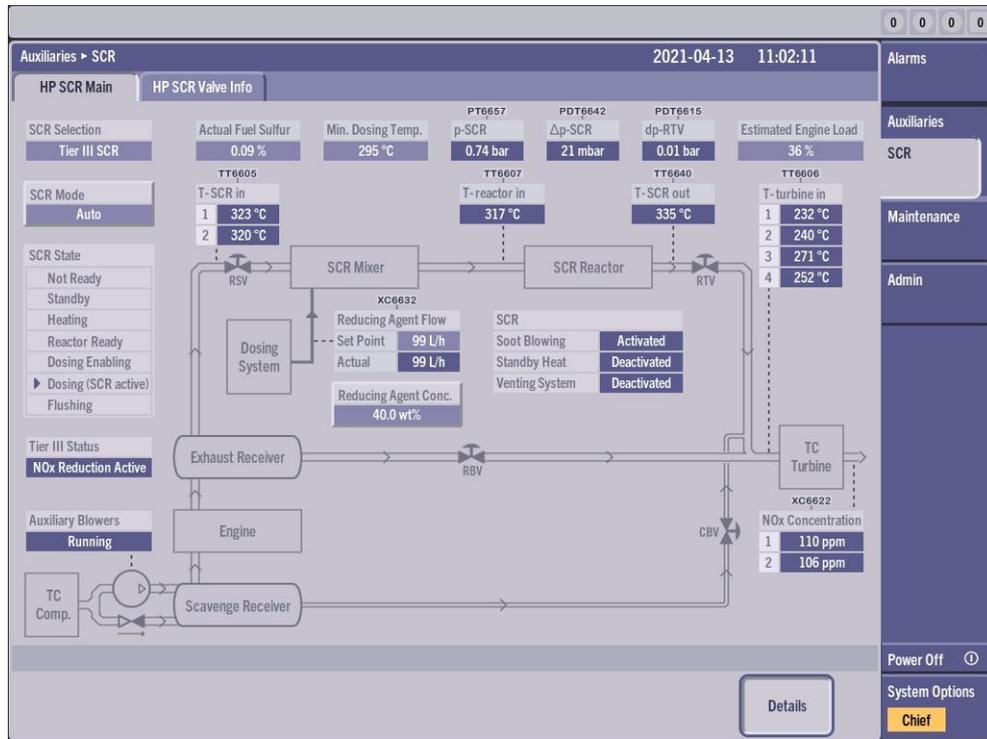


Figura 6.5.2 - ERCS MOP Motor babor 100 ppm con 100 l/h (40 % urea)

Fuente: Propia del Autor (captura)

Como medida paliativa y temporal con el fin de que el SCR no estuviese continuamente parando y arrancando el sistema de dosificación, se le bajó manualmente la concentración de urea al 38,5 %. Gracias a esto, el sistema interpretó que, por cada litro de inyección de la disolución de agente reductor, entra menos cantidad de urea al sistema y, en consecuencia, el sistema automáticamente aumenta la cantidad de agente reductor dosificada consiguiendo bajar los NO_x a 250 ppm con una inyección de 125 l/h como se ve en figura 6.5.3.

Al salir de la zona ECA, cuando se paró el motor de estribor, se aprovechó para desmontar la lanza de dosificación de urea (figura 6.5.4) para chequear la tobera. En ella se encontraron algunos de los orificios obstruidos por lo que la inyección de urea no era la adecuada. Se limpiaron los orificios (figura 6.5.5) y se volvió a montar en su ubicación (figura 6.5.6). Tras la intervención, en las siguientes operaciones con el SCR activado, se vio que los 2 motores funcionaban con similares resultados en cuanto a reducciones NO_x y cantidad de agente reductor dosificado.

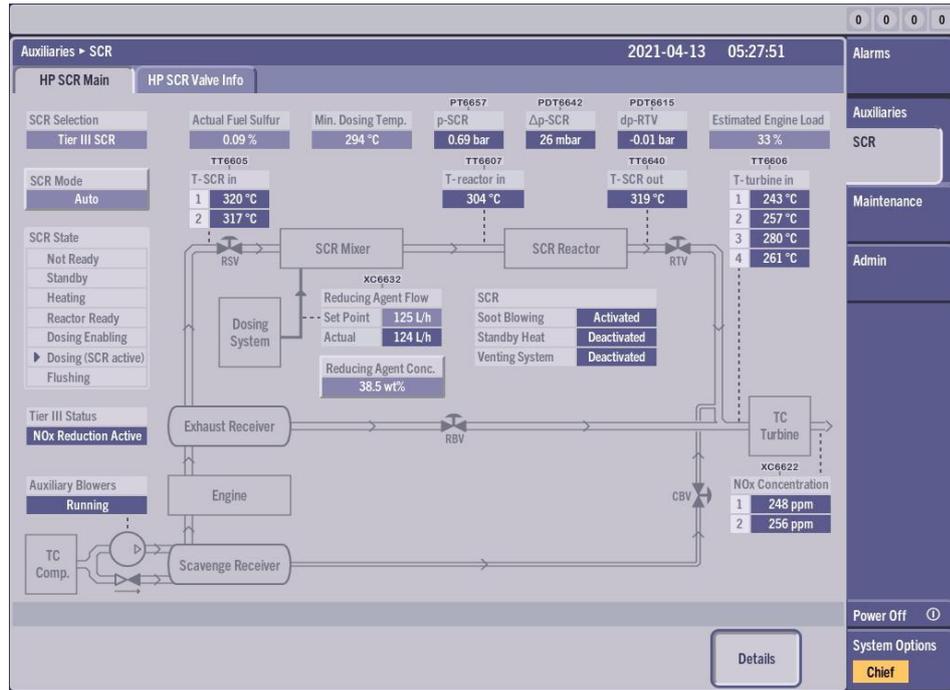


Figura 6.5.3 - ERCS MOP Motor estribor 250 ppp y 125 l/h (38,5 % urea
Fuente: Propia del Autor (captura)



Figura 6.5.4 - Alojamiento de la lanza
Fuente: Propia del Autor



Figura 6.5.5 - Orificios de tobera de dosificación urea
Fuente: Propia del Autor



Figura 6.5.6 - Ubicación de la lanza de dosificación urea

Fuente: Propia del Autor

SISTEMA SCR PARA EL CONTROL DE EMISIONES

CONCLUSIONES



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA Y MÁQUINAS

MÁSTER EN INGENIERÍA MARINA

FECHA: JUNIO 2021

AUTOR: Santiago Baña Pérez

Fdo.: Santiago Baña Pérez

CONCLUSIONES

El sistema SCR es el sistema de reducción NO_x con mayor efectividad de la actualidad consiguiendo aproximadamente un 95 % de reducción. Este TFM ha permitido profundizar en el conocimiento del autor de los diferentes sistemas SCR en el mercado y puede servir de guía para futuros lectores con interés en actualizarse profesionalmente. También como material de estudio académico.

Después de casi 2 años de experiencia a bordo con el sistema SCR se puede concluir que funciona correctamente y es un sistema muy eficaz. Además, todo el proceso está automatizado por lo que resulta muy sencilla su puesta en marcha y parada con un entrenamiento básico del operador, evitando errores y permitiendo que el buque cumpla con la normativa medioambiental vigente en las zonas de control de emisiones menos permisivas.

Es importante su correcto mantenimiento y la verificación periódica de apertura y cierre de válvulas y además chequear que si el sistema de venteo está funcionando perfectamente cuando el SCR está parado para evitar la entrada de gases de escape y la posterior condensación del ácido sulfúrico que podría saturar el reactor.

Cabe destacar las pocas averías que se han encontrado durante este tiempo de funcionamiento, y si se estudian en detenimiento, la mayoría son fallos de elementos como sensores de presión o temperatura, por lo que se resuelven fácilmente teniendo a bordo los respetos necesarios y llevando siempre el correcto stock gestionando altas y bajas adecuadamente al recibir o utilizar componentes en el programa de mantenimiento.

En cuanto a la obstrucción de las tuberías de los sensores de presión diferencial, es de vital importancia el estudio para mejorar la ubicación de estos sensores y el aumento del diámetro de tubería que van a los mismos para evitar dichos problemas. Además, se debería cambiar el diseño en todos los buques con SCR y Hyundai Heavy Industries debe mejorar este diseño en los futuros proyectos

Para el problema de los sensores de humedad y de temperatura se propone solucionarlo mediante la mejora de la calidad de sus componentes. Como, además, están sujetos a las altas temperaturas de los gases de escape los fallos

se suelen producir en los pequeños componentes que llevan incorporados. Hay que estudiar la mejor manera y materiales para su aislamiento con estas altas temperaturas y evitar su fallo prematuro.

Para evitar los problemas con la lanza de inyección de urea debe investigar el modo de mejorar la forma y disposición de sus orificios para así evitar la obstrucción de los mismos. También se debería chequear la presión de aire de limpieza, y determinar si es la adecuada o se tendría que aumentar para su correcta limpieza de urea después de la parada de dosificación. Todo esto podría realizarse en un estudio futuro conducente a la elaboración de una tesis o de una publicación técnica.

Como medida local en el buque, el Jefe de Máquinas debe solicitar la incorporar al programa de mantenimiento actual una tarea periódica de limpieza de toberas (aproximadamente cada 6 meses) para asegurar su correcto funcionamiento.

Finalmente, como el sistema de urea tiene unos manómetros estándar, habría que instalar manómetros específicos para dicho producto, los cuales están concebidos y contruidos con materiales que no se dañan con la urea evitando el fallo prematuro de estos indicadores.

Para concluir, el autor cree que este sistema tiene más ventajas que inconvenientes y seguramente sea el más adecuado pues su fiabilidad y eficacia son elevadas y no influye en el ciclo termodinámico del motor con lo que se puede hacer funcionar a éste eficientemente contribuyendo a cumplir con otros requisitos actuales como el índice de eficiencia energética tanto operativa como de diseño.

SISTEMA SCR PARA EL CONTROL DE EMISIONES

REFERENCIAS



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA Y MÁQUINAS

MÁSTER EN INGENIERÍA MARINA

FECHA: JUNIO 2021

AUTOR: Santiago Baña Pérez

Fdo.: Santiago Baña Pérez

REFERENCIAS

- [1] OYARZÚN, M. (2010) – **“Contaminación aérea y sus efectos en la salud”**
 Fecha de consulta: Febrero 2021
https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0717-73482010000100004
- [2] INECC (2007) – **“Tipos y fuentes de contaminantes atmosféricos”**
 Fecha de consulta: Febrero 2021
<http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/396/tipos.html>
- [3] VACAS, L. (2012) – **“Análisis de la nueva normativa OMI sobre eficiencia energética (EEDI/SEEMP)”**
 Fecha de consulta: Febrero 2021
<https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/16382>
- [4] CÁNOVAS, B. (2020) – **“El transporte marítimo internacional entre el cambio climático y el coronavirus”**
 Fecha de consulta: Febrero 2021
http://www.ieee.es/Galerias/fichero/docs_opinion/2020/DIEEEO26_2020BARCAN_mar.pdf
- [5] Saber es práctico (2021) – **“Cuántos países hay en el mundo”**
 Fecha de consulta: Marzo 2021
<https://www.saberespractico.com/geografia/cuantos-paises-hay/>
- [6] ARZÁBAL, M. (2020) – **“Estados sin litoral”**
 Fecha de consulta: Marzo 2021
<https://www.vix.com/es/btg/curiosidades/60270/estados-sin-litoral-sabes-cuales-son-los-44-paises-del-mundo-que-no-tienen-salida-al-mar>
- [7] EUROPARL (2019) – **“Emisiones de aviones y barcos: datos y cifras”**
 Fecha de consulta: Marzo 2021
<https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/society/20191129STO67756/emisiones-de-aviones-y-barcos-datos-y-cifras-infografia>
- [8] EEB, T&E, SAR (2004) – **“Air pollution from ships”**
 Fecha de consulta: Marzo 2021
https://www.airclim.org/sites/default/files/documents/shipbriefing_nov04.pdf
- [9] Black to green (2017) – **“Eficiencia energética en transporte marítimo”**
 Fecha de consulta: Marzo 2021
<https://blacktogreen.com/2017/10/eficiencia-energetica-en-transporte-maritimo/>
- [10] UNCTAD (2018) – **“Informe sobre el transporte marítimo (2018)”**
 UNCTAD/RMT/2018
 ISBN 978-92-1-047243-2
 Fecha de consulta: Abril 2021
https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2018_es.pdf
- [11] ONU (2019) – **“Informe sobre el transporte marítimo (2019)”**
 ISBN 978-92-1-004304-5
 Fecha de consulta: Abril 2021
https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2019_es.pdf
- [12] ANAVE (2020) – **“Marina mercante y transporte marítimo 2019/2020”**
 Fecha de consulta: Abril 2021
https://www.anave.es/images/informes/marina_mercante/2020/MMTM2020_webOK.pdf

- [13] IMO (2020) – **“Fourth IMO GHG Study 2020”**
Fecha de consulta: Abril 2021
<https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Fourth%20IMO%20GHG%20Study%202020%20-%20Full%20report%20and%20annexes.pdf>
- [14] DIESELNET (2020) – **“IMO Marine Engine Regulations”**
Fecha de consulta: Abril 2021
<https://dieselnet.com/standards/inter/imo.php#other>
- [15] ONU (2020) – **“Informe sobre el transporte marítimo (2020)”**
Fecha de consulta: Junio 2021
https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2020summary_es.pdf
- [16] IMO (2016) – **“Convenio internacional para prevenir la contaminación por los buques (MARPOL)”**
Fecha de consulta: Marzo 2021
[https://www.imo.org/es/About/Conventions/Paginas/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-\(MARPOL\).aspx](https://www.imo.org/es/About/Conventions/Paginas/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-(MARPOL).aspx)
- [17] Herramientas de ingeniería (2016)– **“Óxidos de Nitrógeno (NOx)”**
Fecha de consulta: Febrero 2021
<https://www.herramientasingeneria.com/tech/NOx/NOx.html>
- [18] PRTR (2007) – **“NOX (ÓXIDOS DE NITRÓGENO)”**
Fecha de consulta: Febrero 2021
<https://prtr-es.es/NOx-oxidoss-de-nitrogeno.15595.11.2007.html>
- [19] INGEOEXPERT (2017) – **“¿Qué es la lluvia ácida?”**
Fecha de consulta: Febrero 2021
<https://ingeoexpert.com/2017/12/22/que-es-la-lluvia-acida/>
- [20] IBERDROLA (2018) – **“La lluvia ácida, un peligro real para los seres vivos”**
Fecha de consulta: Febrero 2021
<https://www.iberdrola.com/medio-ambiente/lluvia-acida>
- [21] JUSTE, I. (2018) – **“Cuáles son las posibles soluciones de la lluvia ácida”**
Fecha de consulta: Febrero 2021
<https://www.ecologiaverde.com/cuales-son-las-posibles-soluciones-de-la-lluvia-acida-1201.html>
- [22] Todo es química (2008) – **“Formación de la lluvia ácida”**
Fecha de consulta: Febrero 2021
<https://todoesquimica.blogia.com/2008/040201-formacion-de-la-lluvia-acida.php>
- [23] IMO (2010) – **“Nitrogen Oxides (NOx) – Regulation 13”**
Fecha de consulta: Febrero 2021
[https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Nitrogen-oxides-\(NOx\)-%E2%80%93-Regulation-13.aspx](https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Nitrogen-oxides-(NOx)-%E2%80%93-Regulation-13.aspx)
- [24] KARAN, C (2020) – **“10 Technologies/Methods for Controlling NOx & SOx Emissions from Ships”**
Fecha de consulta: Abril 2021
<https://www.marineinsight.com/tech/10-technologiesmethods-for-controlling-nox-sox-emissions-from-ships/>
- [25] ANISH (2019) – **“What is Nitrogen Oxides or NOx air pollution from Ships?”**
Fecha de consulta: Abril 2021
<https://www.marineinsight.com/maritime-law/what-is-nitrogen-oxides-or-nox-air-pollution-from-ships/>
- [26] HHI & MAN-B&W (2018) – **“Selective Catalytic Reduction Manual”**
- [27] HHI & MAN-B&W (2018) – **“Main Engine Manual - Volume II”**

- [29] MARTÍNEZ, I. (2014) – **“Tratamiento de los gases de combustión mediante reducción catalítica selectiva para el control de NOx”**
Fecha de consulta: Mayo 2021
<https://www.yara.es/productos-quimicos-nitrogenados-y-soluciones-medioambientales/reduccion-nox-para-plantas-industriales/sistemas-scr-sncr-o-sncrscr-hibridos/tecnologia-scr/>
- [30] DONG NAM (2000) – **“How to reduce emission of nitrogen oxides from marine diesel engines in relation to Annex VI of MARPOL 73/78”**
Fecha de consulta: Mayo 2021
https://commons.wmu.se/cgi/viewcontent.cgi?article=1297&context=all_dissertations
- [31] U.S. Environmental Protection Agency (1999) – **“Nitrogen Oxides (NOx), Why and How They Are Controlled”**
Fecha de consulta: Mayo 2021
<https://www3.epa.gov/ttnca1/dir1/fnoxdoc.pdf>
- [32] LAMAS, I & RODRIGUEZ, C. (2012) – **“Emissions from Marine Engines and NOx Reduction Methods”**
Fecha de consulta: Mayo 2021
<https://www.jmr.unican.es/index.php/jmr/article/download/172/168>
- [33] CATTANEO, F. (2018) – **“Selective Catalytic Reduction System for Marine Applications”**
Fecha de consulta: Junio 2021
<https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:d826e500-4551-4a8e-bd80-feea35a8c10/datastream/OBJ/download>
- [34] HHI (2018) – **“LNGC RIAS BAIXAS: Machinery Operating Manual”**
- [35] UNCTAD (2020) – **“La pandemia recorta el comercio marítimo mundial”**
Fecha de consulta: Junio 2021
<https://www.anave.es/prensa/ultimas-noticias/2563-unctad-la-pandemia-recorta-el-comercio-maritimo-mundial>
- [36] SECO, E.(2021) – **“El transporte marítimo crecerá en torno al 5% en 2021”**
Fecha de consulta: Junio 2021
<https://www.cadenadesuministro.es/noticias/el-transporte-maritimo-crecera-en-torno-al-5-en-2021/>

SISTEMA SCR PARA EL CONTROL DE EMISIONES

DEFINICIONES Y ABREVIATURAS



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA Y MÁQUINAS

MÁSTER EN INGENIERÍA MARINA

FECHA: JUNIO 2021

AUTOR: Santiago Baña Pérez

Fdo.: Santiago Baña Pérez

DEFINICIONES Y ABREVIATURAS

ACU	Auxiliary Control Unit
AIG	Ammonia injection grid
CAN bus	“Controller Area Network and Bus” Protocolo de comunicación para intercambio de información entre las unidades de control
CBV	Cylinder Bypass Valve
CCU	Cylinder Control Unit
CFC	Clorofluorocarbonos
CoCos EDS	Programa instalado en el EMS para obtener datos del motor
CWCU	Cooling Water Control Unit
ECA	Emission Control Areas
ECS	Engine Control System
ECU	Engine Control Unit
EEDI	Energy Efficiency Desing Index
EGB	Exhaust Gas Bypass
EGCS	Exhaust Gas Cleaning Systems
EICU	Engine Interface Control Unit
ELGI	Electrical Gas Injection
ELWI	Electrical Window
EMS	Engine Management Services
ERCS	Engine Reduction Control System
FIVA	Fuel Injection Valve Actuator
GEI	Emisiones de gases efecto invernadero
GT	“Gross Tons” (Arqueo bruto)
HP	High Pressure
LOP	Local Operating Panel
LP	Low Pressure
MARPOL	Convenio Intnal. para prevenir la contaminación de los buques
Modbus	Protocolo de comunicación abierto, utilizado para transmitir información a través de redes en serie entre dispositivos electrónicos
MOP	Main Operating Panel
MPC	Multi Purpuse Controller

OMI	Organización Marítima Internacional
ONU	Organización de las Naciones Unidas
PCB	Bifenilo Policlorado
PLC	Controlador Lógico Programable
PM	Materia particulada
PMI	Pressure Measurement Instrument
RBV	Reactor Bypass Valve
RSV	Reactor Sealing Valve
RTV	Reactor Throttle Valve
SACU	Second fuel Auxiliary Control Unit
SCR	Reducción Catalítica Selectiva
SCSU	Second fuel Cylinder Safety Unit
SCU	Scavenge air Control Unit
SECA	Sulphur Emission Control Areas
SEEMP	Ship Energy Efficiency Management Plan
SFOC	Consumo específico de combustible
SOLAS	Convenio Intnal. para la seguridad de la vida humana en el mar
SPCU	Second fuel Plant Control Unit
SPSU	Second fuel Plant Safety Unit
TC	Turbocompresor
TRB	Tonelaje de Registro Bruto
UE	Unión Europea
ULSFO	Ultra Low Sulfur Fuel Oil
UN	Naciones Unidas
UNCTAD	Conferencia de las Naciones Unidas sobre Comercio y Desarrollo
VAR	Valve After Reactor
VBR	Valve Reactor Bypass
VOC	Compuestos orgánicos volátiles

SISTEMA SCR PARA EL CONTROL DE EMISIONES

ÍNDICE DE TABLAS



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA Y MÁQUINAS

MÁSTER EN INGENIERÍA MARINA

FECHA: JUNIO 2021

AUTOR: Santiago Baña Pérez

Fdo.: Santiago Baña Pérez

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1.1 - Millones de toneladas transportadas por año 1970-2018	16
Tabla 2.1.2 - Flota mercante mundial al inicio de 2020	20
Tabla 3.1.1 - Zonas ECA en el mundo	27
Tabla 3.1.1.1 - Límite de emisiones NO _x Anexo VI MARPOL.....	28
Tabla 3.1.2.1 - Límite azufre en combustible	29

SISTEMA SCR PARA EL CONTROL DE EMISIONES

ÍNDICE DE FIGURAS



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA Y MÁQUINAS

MÁSTER EN INGENIERÍA MARINA

FECHA: JUNIO 2021

AUTOR: Santiago Baña Pérez

Fdo.: Santiago Baña Pérez

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1.1 - Datos globales buques con AIS en 2018	14
Figura 2.1.2 - Factores de incertidumbre	15
Figura 2.1.3 - Evolución comercio marítimo internacional (millones de ton.)	15
Figura 2.1.4 - Comercio marítimo internacional y PIB mundial 2006-2020	17
Figura 2.1.5 - Emisiones Transporte UE (2017).....	18
Figura 2.1.6 - Evolución contaminación atmosférica en UE	18
Figura 2.1.7 - Emisiones de SO ₂ en UE (2000-2030) en miles de ton.	19
Figura 2.1.8 - Emisiones de NO _x en UE (2000-2030) en miles de ton.....	19
Figura 2.1.9 - Variación flota mundial 2019/2020.....	20
Figura 3.1.1.1 - Límite de emisiones NO _x Anexo VI MARPOL.....	28
Figura 3.1.2.1 - Límite azufre en combustible	29
Figura 4.1.2.1 - Tipos de toberas inyector.....	33
Figura 4.1.5.1 - Método EGR para reducciones NO _x	37
Figura 5.1.1 - Canales del elemento catalítico del SCR.....	38
Figura 5.1.2 - Reacciones en el reactor SCR.....	39
Figura 5.1.1.1 - Sistema SCR HP	41
Figura 5.1.2.1 - Sistema SCR LP	43
Figura 5.1.2.2 - Equipos adicionales del sistema SCR LP	43
Figura 5.2.1 - Estructura del elemento catalítico	44
Figura 5.2.2 - Sistema de suministro agente reductor.....	46
Figura 5.2.3 - Sensor NO _x para sistema SCR	47
Figura 5.2.4 - Diagrama de señal entre los sensores y la MPC	47
Figura 5.2.5 - Secuencia de inicio de sensores NO _x	48
Figura 5.2.6 - Equilibrio presiones minimizar desviación con presión máxima.....	52
Figura 5.2.7 - Ajuste de la presión media a un nuevo valor ordenado	52
Figura 5.2.8 - Sistema de auto ajuste del motor por medio del PMI.....	53

Figura 5.2.9 - Pantalla principal SCR en el ERCS MOP	54
Figura 5.2.10 - Pantalla información de válvulas en el ERCS MOP	57
Figura 5.2.11 - Pantalla ECS MOP	58
Figura 5.2.12 - Conexiones del MPC	59
Figura 5.2.1.1 - Sistema de control de presión del SCR HP	62
Figura 5.2.1.2 - Diagrama neumático sistema de control de presión	63
Figura 5.2.1.3 - Funcionamiento normal apertura RSV	64
Figura 5.2.1.4 - Sobrepresión en el SCR y apertura de la válvula RSV	64
Figura 5.2.1.5 - Esquema de la válvula de sobrepresión	65
Figura 5.3.1.1 - Sistema HP SCR modo Tier II	67
Figura 5.3.2.1 - Sistema HP SCR modo Tier III con CBV abierta	70
Figura 6.1.1 - Posición inicial dP RBV y dP RTV	73
Figura 6.1.2 - Tuberías instaladas mismo diámetro	74
Figura 6.1.3 - Nueva posición dP RBV y dP RTV	75
Figura 6.1.4 - Vista superior nueva posición sensores de presión diferencial.....	75
Figura 6.2.1 - Pantalla alarma ERCS MOP fallo sensor aire T/C	76
Figura 6.2.2 - Fallo sensor entrada aire T/C	76
Figura 6.3.1 - Alarma ECS MOP fallo sensor temperatura entrada al T/C	77
Figura 6.3.2 - Cambio del sensor de temperatura entrada gases al T/C.....	78
Figura 6.4.1 - Manómetros locales bombeo urea fuera rango	78
Figura 6.4.2 - Indicación remota de presión de bombeo de urea.....	79
Figura 6.5.1 - ERCS MOP Motor estribor 350 ppm con 108 l/h (40 % urea).....	79
Figura 6.5.2 - ERCS MOP Motor babor 100 ppm con 100 l/h (40 % urea)	80
Figura 6.5.3 - ERCS MOP Motor estribor 250 ppm y 125 l/h (38,5 % urea).....	81
Figura 6.5.4 - Alojamiento de la lanza.....	81
Figura 6.5.5 - Orificios de tobera de dosificación urea	81
Figura 6.5.6 - Ubicación de la lanza de dosificación urea	82

SISTEMA SCR PARA EL CONTROL DE EMISIONES

ANEXOS



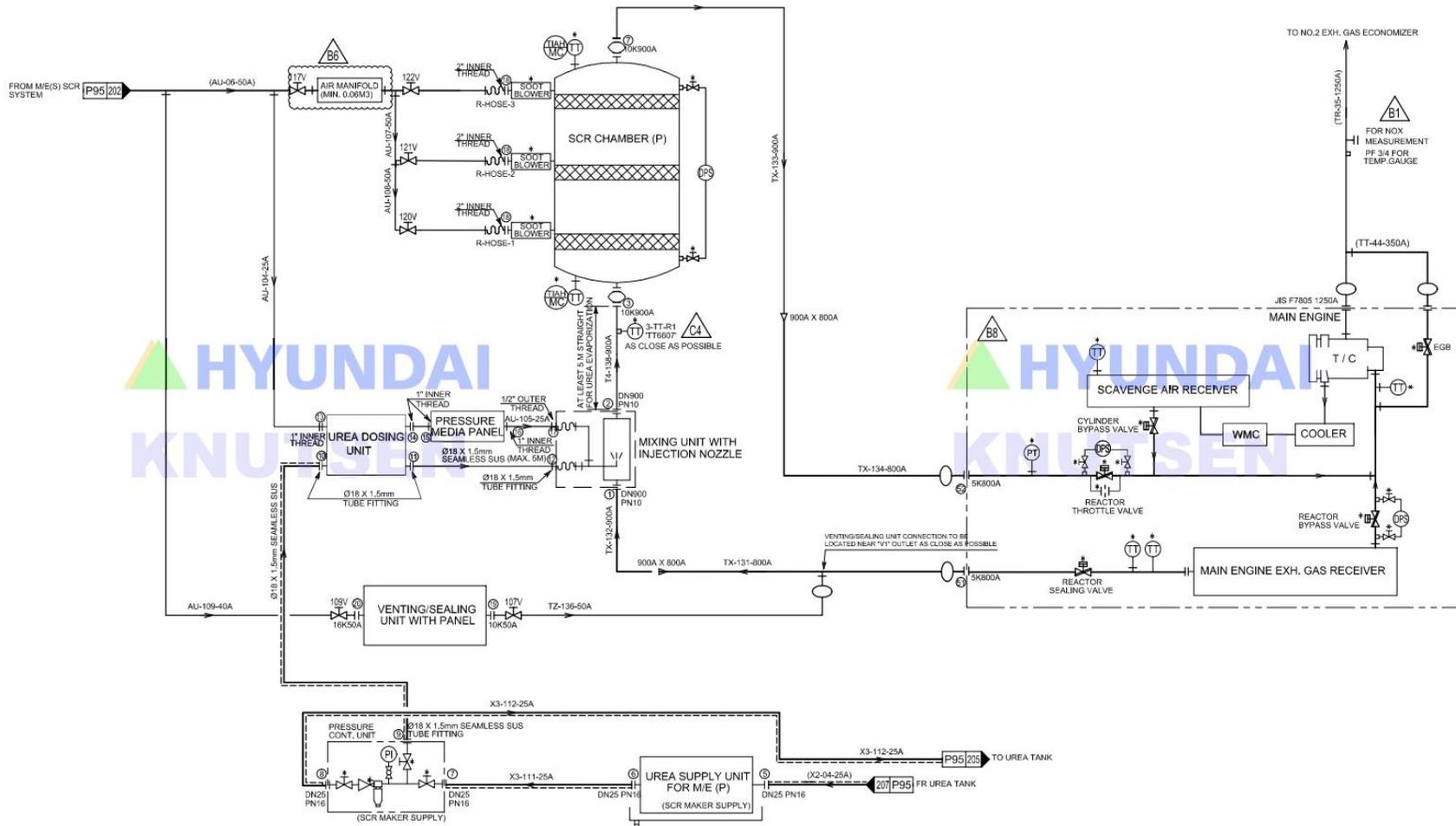
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA Y MÁQUINAS
MÁSTER EN INGENIERÍA MARINA

FECHA: **JUNIO 2021**

AUTOR: Santiago Baña Pérez

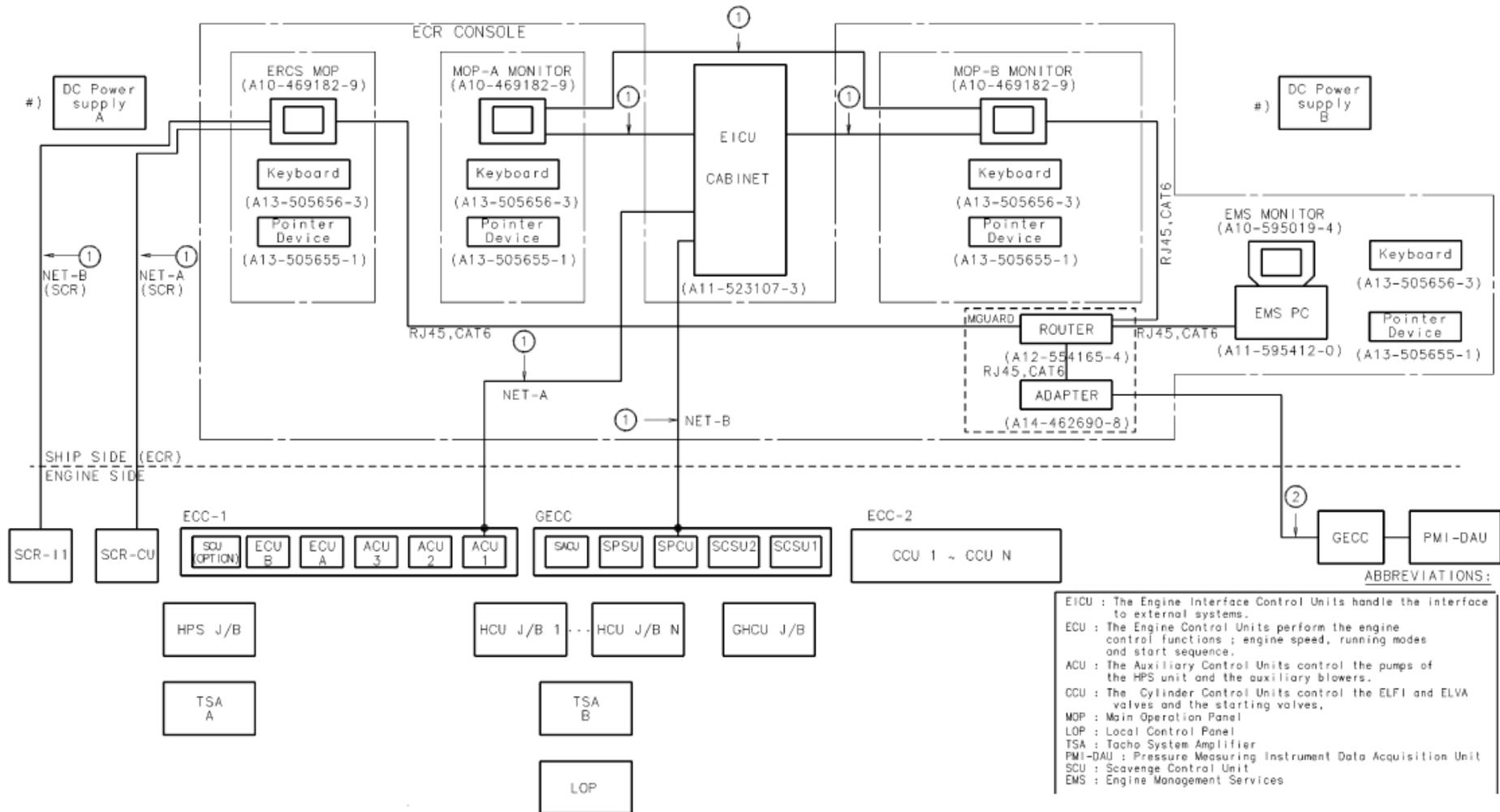
Fdo.: Santiago Baña Pérez

Anexo 1 – Diagrama de tubería del SCR



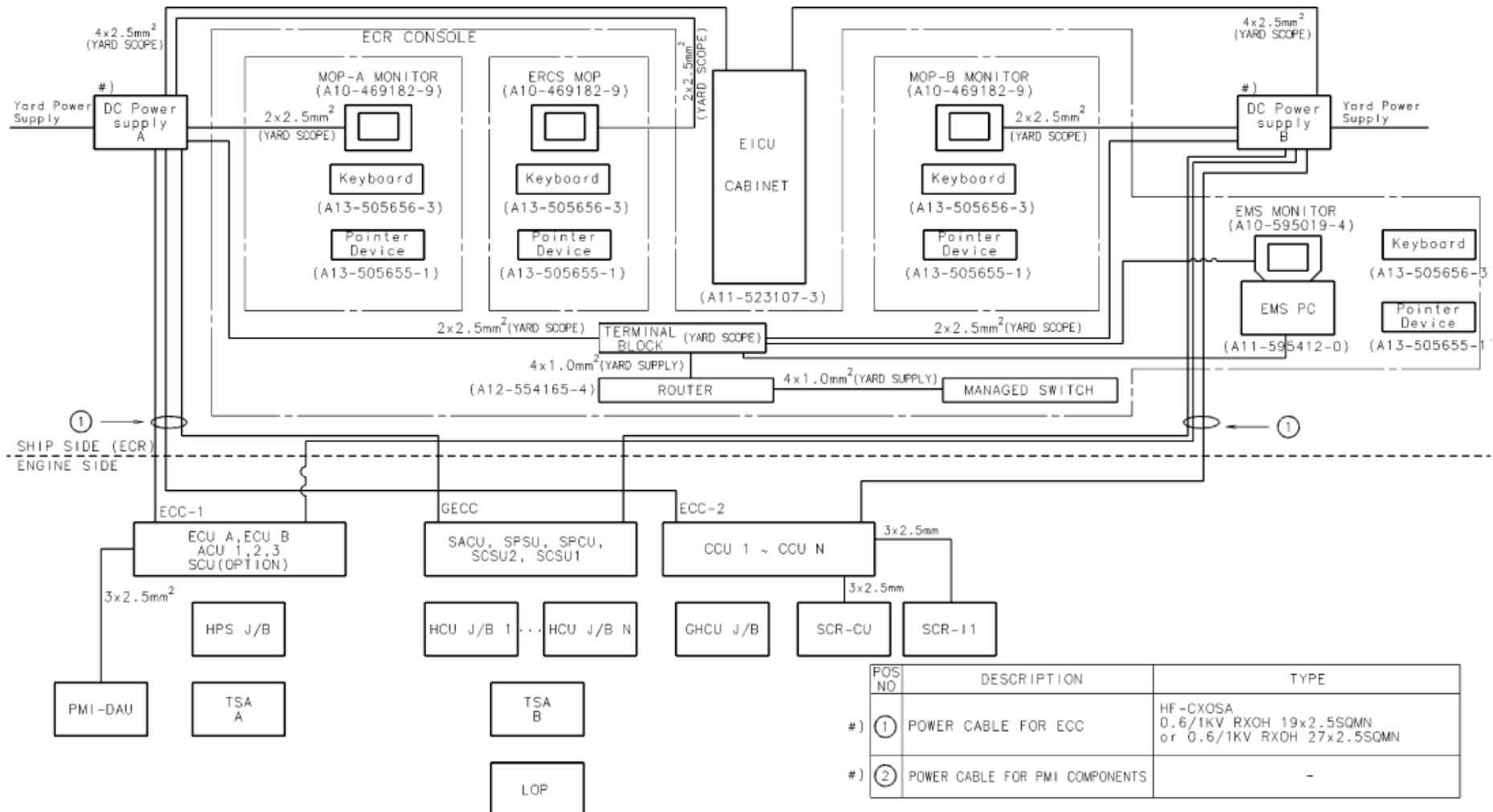
Fuente: HHI & MAN-B&W (2018) [26]

Anexo 2 – Planos conexiones ECS



Fuente: HHI & MAN-B&W (2018) [26]

Fuente: HHI & MAN-B&W (2018) [26]



Anexo 3 – Ejemplo garantía obstrucción tuberías

Vessel information

Vessel name: _____		Claim No: _____
LNG/c Rias Baixas Knutsen		RS/ Claim no-192
Yard name: _____		Claim Date: _____
Hyundai Heavy Industries Co. Ltd		13.01.2020
SCR Valves/pipes clogged		Created by: _____

Defective part information

Component: _____		Supplier: _____
Pipes & Valves, SCR System, M/E ST		Hyundai Heavy Industries Co.,Ltd.
Maker: _____		Bangeojjinsunhwan-doro 1000
Maker type: _____		Dong-gu, Ulsan
Serial number: _____		682-792
SFI Code: _____		-
743.05.01.25		

Claim description

Every two weeks. Some pipe or valve from SCR system to PDT 6642 (Over reactor by-pass valve) or/and PDT 6615 (Throttle valve) dogging during normal service on both Engines (with SCR on service or stand-by)

Reason

-Valves or/and pipe clogged
 -Excessive pipe length and loops between field valve and DPT sensor.
 -Pipe diameter

Action

Dismantle pipes and valves for cleaning

Comments

HHI must suggest new arrangement of piping and supports to prevent quick dogging of pipes and valves.

All valves are in very bad condition due a exhaust gases and premature corrosion. HHI must be supply valves (8 pieces) and suggest piping as explained before.

for more info please see photos and drawings arrangement.

Anexo 4 – Garantía nueva tuberías diferencial presión

Vessel information

Vessel name: LNG/c Rias Baixas Knutsen		Claim No: RS/Claim no-636
Yard name: Hyundai Heavy Industries Co. Ltd		Claim Date: 17.03.2021
SCR (PT-6657) Valves/pipes clogged		Created by:

Defective part information

Component: Pipes & Valves, SCR System, M/E ST		Supplier: Hyundai Heavy Industries Co.,Ltd.
Maker: _____		Bangeojinsunhwan-doro 1000
Maker type: _____		Dong-gu, Ulsan
Serial number: _____		682-792
SFI Code: 743.05.01.25		

Claim description

Pipe and/or valve from SCR exhaust system to pressure transmitter PT-6657 (Exhaust gas before reactor throttle valve) result clogged in both MEGIs during normal service. It happens equally with SCR in service or in stand-by mode (venting).

Reason

-Excessive pipe length and loops between field valve and PT sensor.
-Pipe diameter too small.

Action

Pipes and valves regularly dismantled for cleaning.
Some pipe section was completely renewed already due to big internal corrosion.

Comments

HHI must supply new piping arrangement, together with new valves, in order to prevent quick clogging as happens now. Similar system as now installed in differential pressure transmitters DPT-6615 and DPT-6642 is expected.

for more info please see photos and drawings attached.

Anexo 5 – Garantía sensor entrada aire al T/C**Vessel information**

Vessel name: _____		Claim No: _____
LNG/c Rias Baixas Knutsen		RS/Claim no-292
Yard name: _____		Claim Date: _____
Hyundai Heavy Industries Co. Ltd		30.03.2020
Port MEGI SCRCU sensor fail, RH-compressor in, T-compressor in		Created by: _____

Defective part information

Component: _____		Supplier: _____
Temperatur/Pressure SensorsTransmitters, M/E PT		MAN B&W - HYUNDAI
Maker: _____		
Maker type: _____		
Serial number: _____	SFI Code: _____	
	601.02.66.15	

Claim description

Port MEGI RH-compressor/T-compressor-in sensor failed (relative humidity and inlet air temperature for turbocharger). This is a sensor located close to T/C air suction filter, on floor level. See attached pictures for info. The sensor itself turns off every few days and it is necessary to remove power and turn on again. Cabling was checked and seems to be ok. Please note this sensor must be in service for operation of SCR system.

Reason

Premature failure of sensor.

Action

--

Comments

HHI is required to supply following part:

Sensor TAG No. TT8612, XT8819, PT8802
 Description. Ambient temperature/humidity/pressure sensor
 HYUNDAI Drawing No. A13-621056-9
 Qty: 1 pc

Anexo 6 – Garantía sensor entrada gases al T/C

Vessel information

Vessel name: LNG/c Rias Baixas Knutsen		Claim No: RS/Claim no-492
Yard name: Hyundai Heavy Industries Co. Ltd		Claim Date: 05.11.2020
HP SCR, Turbine inlet temp Sensor N4. deviation		Created by:

Defective part information

Component: Selective Catalytic Reduction System (HP) for M/E ST		Supplier: Hyundai Heavy Industries Co.,Ltd.
Maker: Hyundai Heavy Industries Co.,Ltd.		Bangeojinsunhwan-doro 1000
Maker type: NoNOx		Dong-gu, Ulsan
Serial number: _____		682-792
SFI Code: 743.05.01		

Claim description

Exhaust temperature deviation alarm triggered in stbd MEGI SCR system. It provoked SCR system shutdown.

Reason

Exhaust temp deviation alarm was provoked by temperature sensor No.4 at exhaust turbine gas inlet. See enclosed pictures and mimics from stbd ERCS.

Action

Thermo couple sensor No. 4 replaced by unit in stock

Comments

HHI is required to provide new sensor as follows:

Temperature transmitter maker Heriana Co. Ltd
TAG No. TT-6606-4, Exhaust gas before turbo-charger.
Type HR101-TS, 600 °C
DC 24V
Serial No. TE180097
Qty: 1 pc

1.1. Anexo 7 – Fallo manómetros urea SCR

Vessel information

Vessel name: _____		Claim No: _____
LNG/c Rias Baixas Knutsen		RS/Claim no-484
Yard name: _____		Claim Date: _____
Hyundai Heavy Industries Co. Ltd		02.11.2020
SCR pump station manometers		Created by: _____

Defective part information

Component: _____		Supplier: _____
Urea Supply Unit, M/E ST		Hyundai Heavy Industries Co.,Ltd.
Maker: _____		Bangeojinsunhwan-doro 1000
Hyundai Heavy Industries Co.,Ltd.		Dong-gu, Ulsan
Maker type: _____		682-792
Serial number: _____	SFI Code: _____	
	743.05.01.10	

Claim description

As observed in enclosed pictures, reading of local manometers is wrong at suction side on both pump stations. All four pressure gauges are indicating incorrect pressure or they are just far out of range. Values showed are similar if pumps are working or not.

Reason

Premature failure of manometers

Action

Faulty units renewed using vessel stock.
We do not have enough manometers to replace all of them

Comments

HHI must supply all manometers, better quality, to replace faulty units and spares used.
For details pls see enclosed pdf