

**UNIVERSIDAD AUSTRAL DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA NAVAL**



**“Análisis de la Contaminación Atmosférica Provocada  
por Buques en base a las Exigencias del Anexo VI del  
MARPOL 73/78”.**

Tesis para optar al Grado de  
Licenciado en Ingeniería Naval,  
Mención Máquinas Marinas.

Profesor Patrocinante:  
Sr. Héctor Legüe L.  
Ingeniero Civil Mecánico  
Msc. Ingeniería Oceánica.

Martin Roberto Wunderlich Contreras

Al llegar al final de esta etapa sólo me resta darle las gracias a todos los que me acompañaron y ayudaron de una u otra forma: padres, hermanos, amigos, de ustedes también es este triunfo.

Y en especial de ti, mamá.

## Índice.

<b>Resumen</b>	1
<b>Summary</b>	1
<b>Introducción</b>	2
<b>Capítulo I</b>	3
1.1 Contaminación atmosférica	3
1.2 La atmósfera	4
1.3 Cambio climático	5
1.4 Efecto invernadero	6
1.5 Reducción del ozono	7
1.6 Lluvia ácida	8
1.7 Protocolos internacionales	9
<b>Capítulo II. Contaminantes atmosféricos</b>	11
2.1 Introducción	11
2.2 Derivados del azufre	11
2.2.1 Bióxido de azufre (SO <sub>2</sub> ) y derivados	12
2.2.2 Trióxido de azufre o anhídrido sulfúrico (SO <sub>3</sub> )	13
2.2.3 Ácido sulfhídrico o sulfuro de hidrógeno (SH <sub>2</sub> )	13
2.2.4 Hexafluoruro de azufre (SF <sub>6</sub> )	14
2.3 Derivados del carbono (C)	14
2.3.1 Dióxido de carbono o anhídrido carbónico (CO <sub>2</sub> )	14
2.3.2 Monóxido de carbono (CO)	16
2.3.3 Metano (CH <sub>4</sub> )	17
2.4 Halógenos y derivados	17
2.4.1 Clorofluorocarbonos (CFC <sub>s</sub> )	18
2.4.2 Halocarbonos (C + halógeno)	19
2.4.3 Cloruro de hidrógeno o ácido clorhídrico (HCl)	19
2.4.4 Policloruro de vinilo (PCV)	20
2.4.5 Bifenilo policlorado (PCB)	20
2.5 Derivados del nitrógeno (N)	21
2.5.1 Óxido nitroso o monóxido de nitrógeno (N <sub>2</sub> O)	22
2.5.2 Óxido nítrico o dióxido de nitrógeno (NO)	22
2.5.3 Dióxido de nitrógeno (NO <sub>2</sub> )	23

2.6 Ozono (O <sub>3</sub> )	23
2.7 Hidrocarburos	24
2.8 Partículas	24
2.9 Otros	25
2.9.1 Plomo (Pb)	25
2.9.2 Compuestos radiactivos	26
2.10 Resumen de contaminantes atmosféricos	26
<b>Capítulo III. Productores de Contaminación Atmosférica en Buques</b>	29
3.1 Motores de combustión interna	29
3.1.1 Emisiones desde motores diesel marinos	30
3.1.2 Métodos de reducción de contaminantes	36
3.1.2.1 Métodos primarios	38
3.1.2.2 Métodos secundarios	45
3.1.3 Concepto de “motor ambiental”	49
3.2 Calderas	51
3.3 Incineradores	55
3.4 Combustibles marinos	56
3.4.1 Características del petróleo	56
3.4.2 Clasificación de los combustibles marinos	58
3.5 Equipos de refrigeración y de aire acondicionado	62
3.6 Equipos extintores de incendio	63
<b>Capítulo IV. Análisis del Anexo VI del MARPOL 73/78</b>	64
4.1 Antecedentes históricos	64
4.1.1 MARPOL 73/78	64
4.1.2 Anexo VI	65
4.2 Características del MARPOL 73/78	66
4.3 Comentarios del Anexo VI	68
4.3.1 Definiciones de importancia para este Anexo	68
4.3.2 Aplicación	72
4.3.3 Inspecciones y certificación	74
4.3.3.1 Plazos de inspección	74
4.3.3.2 Inspectores	75
4.3.3.3 Faltas	76
4.3.3.4 Certificado Internacional de Prevención de la Polución del Aire	77
4.3.4 Requerimientos para el control de las emisiones desde buques	78

4.4 Exigencias del Anexo VI	84
4.4.1 Responsabilidades de los Gobiernos del Protocolo de 1.997	84
4.4.2 Responsabilidades del Armador, Capitán y oficiales del buque	86
<b>Conclusión</b>	88
<b>Bibliografía</b>	90
<b>Anexos</b>	92

## **Resumen.**

En esta tesis se analiza el problema de la contaminación atmosférica provocada por la maquinaria de los buques, por lo que se estudia la química de los contaminantes atmosféricos y posteriormente dicha maquinaria, esta es: motores de combustión interna, calderas, incineradores, combustibles marinos, equipos de refrigeración y aire acondicionado y equipos extintores de incendio.

Para finalizar se realiza un análisis del Anexo VI del MARPOL 73/78, lo que incluye antecedentes históricos, sus características, exigencias y comentarios de él.

## **Summary.**

In this thesis the problem of atmospheric pollution provoked by ships' machinery is analyzed, thus studying the chemistry of the contaminants in the atmosphere and finally such machinery, that is: internal combustion engines, boilers, incinerators, marine fuels, refrigerating equipment and air conditioned as well as fire extinguishers.

In the end, an analysis of Annex VI of MARPOL 73/78 is made; it includes historical antecedents, its characteristics, demands, and comments about the annex.

## **Introducción.**

A medida que pasa el tiempo la Tierra sufre transformaciones, algunas de ellas naturales y otras causadas por el hombre, quien por su naturaleza adapta el lugar que habita a él y nunca, o casi nunca, lo hace al revés. Es durante esta interacción con el ambiente que el ser humano produce desperdicios producto de sus actividades diarias de forma inherente a él y estos desperdicios, o desechos, afectan al suelo, agua y aire y tienen consecuencias que son, muchas veces, irremediables, como por ejemplo la erosión de grandes porciones de tierra o la progresiva elevación de la temperatura en la Tierra llegando a ser el año 2.005 el más caluroso de la historia, tema que tiene mucha relación con este trabajo ya que para muchos es la principal consecuencia que provocan las emisiones de gases contaminantes hacia la atmósfera.

El transporte marítimo es una actividad fundamental en la actualidad y cada vez lo será más, por esto es importante su análisis desde todos los puntos de vista posibles y uno de ellos es la contaminación atmosférica que provoca. Es en este sentido en que han ido apareciendo estudios generales, pero muy pocos específicos relacionados con el tema que aquí se trata, por lo que los antecedentes que se tienen son muchos y a la vez, diversos.

Por todo lo planteado es de gran importancia realizar un análisis de la contaminación atmosférica provocada por buques. Para esto, antes que nada, se deben revisar antecedentes generales de la problemática y a continuación estudiar los fundamentos de su comportamiento en base a analizar los contaminantes atmosféricos que provoca directa o indirectamente la maquinaria de un buque para luego analizarla a ella.

De esto se desprende el objetivo fundamental de este trabajo, que es analizar las fuentes que existen a bordo para buscar las posibles soluciones frente al tema y saber qué están haciendo los fabricantes de las máquinas. Otro objetivo importante es el análisis que se hace de una ley marítima internacional, que es el MARPOL 73/78 y específicamente de su Anexo VI sobre "Regulaciones para la Prevención de la Contaminación Atmosférica por Buques" para saber cuáles son los aportes reales de ésta y cuál es el grado de compromiso de las autoridades internacionales en la materia.

O sea que, lo que se presenta en esta tesis son los antecedentes, causas y posibles soluciones frente al problema de la contaminación atmosférica provocada por los buques, por lo cual este texto puede ser útil e interesante para personas que deseen profundizar al respecto.

## Capítulo I. Antecedentes generales.

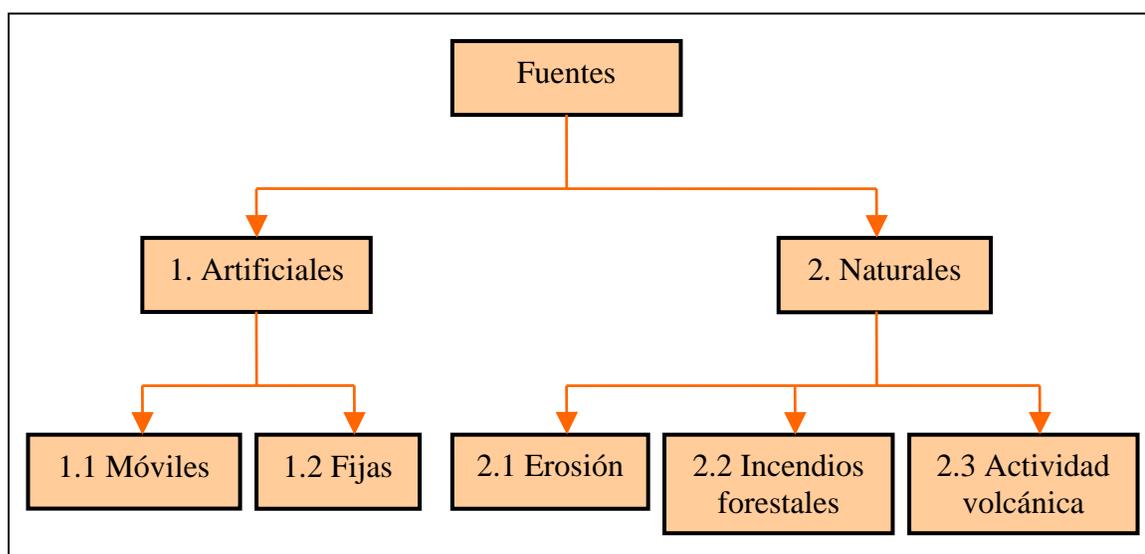
### 1.1 Contaminación atmosférica.

Contaminar es, según la Real Academia de la Lengua Española, alterar nocivamente la pureza o las condiciones normales de una cosa o un medio, como los alimentos; las aguas; el aire; etc. por agentes químicos o físicos.

De lo anterior se puede desprender fácilmente qué es la contaminación atmosférica, pero para tener un concepto mucho más claro del tema se citará la definición del Consejo de Europa, que dice que “hay contaminación del aire cuando la presencia de una sustancia extraña o una variación importante en la proporción de sus constituyentes, es capaz de provocar un efecto perjudicial o de crear una molestia, teniendo en cuenta los conocimientos científicos del momento”.

La contaminación atmosférica puede ocurrir por efectos naturales o por efectos antrópicos (causados por el hombre) y su origen fue con alteraciones naturales como erupciones volcánicas, brumas (o niebla) terrestre y extraterrestre. Este es uno de los problemas medioambientales que se extiende con mayor rapidez, ya que las corrientes atmosféricas pueden transportar el aire contaminado a todos los rincones del globo.

A continuación es posible apreciar la diversidad de fuentes que provocan la contaminación atmosférica. Se debe hacer notar que los buques, que son una fuente móvil, no sólo contaminan por el uso de combustibles para producir potencia, también por el uso de incineradores, refrigerantes, detergentes, pinturas, entre otras causantes conocidas hasta el momento.



**TABLA 1-1:** origen de los contaminantes atmosféricos.



A continuación se muestran las concentraciones de los componentes de la atmósfera seca hasta los 80 kilómetros de altura sobre el nivel del mar, ya que por compresión es en este intervalo donde se concentra casi el 100% de la masa atmosférica. De los gases que la componen el nitrógeno y el argón son geoquímicamente inertes, lo que quiere decir que permanecen en la atmósfera sin reaccionar con ningún otro elemento. En cambio, el oxígeno es muy activo y reaccionará con otros elementos y compuestos puestos en la atmósfera por la actividad humana, lo que es un punto fundamental a tener presente durante todo este trabajo.

Componentes	Fórmula química	Volumen, en % de aire seco
Nitrógeno	N <sub>2</sub>	78,08
Oxígeno	O <sub>2</sub>	20,95
Argón	Ar	0,93
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	350 ppm
Neón	Ne	18,2 ppm
Helio	He	5,24 ppm
Metano	CH <sub>4</sub>	2 ppm
Criptón	Kr	1,1 ppm
Hidrógeno	H <sub>2</sub>	0,5 ppm
Óxido nitroso	N <sub>2</sub> O	0,3 ppm
Xenón	Xe	0,08 ppm
Monóxido de carbono	CO	0,05 – 0,2 ppm
Ozono	O <sub>3</sub>	0,02 – 0,03 ppm

**TABLA 1-2:** composición atmosférica, donde ppm = partes por millón (referencia 1).

### **1.3 Cambio Climático.**

También se conoce con el nombre de “cambio global en el medio ambiente” y se refiere a las transformaciones que experimenta el medio ambiente, consideradas como un fenómeno planetario, como por ejemplo el crecimiento de la temperatura media de la Tierra que ha crecido unos 0,6° C en los últimos 130 años. Dada la enorme complejidad de los factores que afectan al clima es muy difícil saber si este ascenso de temperatura es debido a factores naturales o artificiales, aunque diversos modelos predicen relación

directa entre el incremento en la temperatura media del planeta y el aumento de las concentraciones de gases con efecto invernadero.

Los principales procesos asociados al cambio climático son la intensificación del efecto invernadero, la disminución de la capa de ozono, la lluvia ácida y la pérdida de la biodiversidad. Es caso de este estudio el análisis de los tres primeros, ya que su entendimiento es fundamental para conocer las causas de las actuales leyes que se tratan en los próximos capítulos.

#### 1.4 Efecto invernadero.

Este término se aplica al papel que juega la atmósfera en el calentamiento de la superficie terrestre. Gracias a algunos gases atmosféricos la temperatura media en la Tierra es de unos 15° C y si la atmósfera no existiera sería de unos -18° C. Por lo tanto, el efecto invernadero hace que la temperatura media de la superficie de la Tierra sea 33° C mayor que la que tendría si no existieran gases con este efecto en la atmósfera. Este efecto debe existir, pero en la actualidad ha sido incrementado por factores antrópicos, algunos de los cuales serán analizados en este trabajo.

El efecto invernadero que se origina de forma natural está compuesto en alrededor del 60 al 70% por el vapor de agua (bajo un cielo claro). Después de él son importantes, por este orden, el dióxido de carbono, el metano, el ozono y los óxidos de nitrógeno.

En el último siglo la concentración de anhídrido carbónico y otros gases de efecto invernadero en la atmósfera ha ido creciendo constantemente debido a la actividad humana y en los últimos decenios, por el uso masivo de combustibles fósiles como el petróleo, carbón y gas natural, para obtener energía y por el uso de clorofluorcarbonados.

Los gases con mayor influencia en el efecto invernadero son los siguientes:

	Acción relativa	Contribución real
CO <sub>2</sub>	1 (referencia)	76%
CFC <sub>s</sub>	15.000	5%
CH <sub>4</sub>	25	13%
N <sub>2</sub> O	230	6%

**TABLA 1-3:** gases de efecto invernadero (ref. 2).

Como se indica en la columna de acción relativa, un gramo de CFC produce un efecto invernadero 15.000 veces mayor que un gramo de CO<sub>2</sub>, pero como la cantidad de CO<sub>2</sub> es mucho mayor que la del resto de los gases, la contribución real al efecto invernadero es la que señala la columna de la derecha. Otros gases como el oxígeno y el nitrógeno, aunque se encuentran en proporciones mucho mayores, no son capaces de generar efecto invernadero (ref. 2).

Los efectos de este fenómeno no están comprobados, pero se estima que produciría el derretimiento de los hielos polares, lo que subiría el nivel de los mares, cambiaría el clima global y regional, alteraría la vegetación natural y las cosechas; todo lo que afectaría enormemente a la civilización humana.

### **1.5 Reducción del ozono.**

El ozono es un gas que existe de forma natural en la atmósfera y que presenta su máximo nivel de concentración en la llamada capa de ozono de la estratosfera. Cuando se encuentra próximo al nivel de la corteza terrestre es muy contaminante, contribuye a la formación de la humareda fotoquímica y de la lluvia ácida. Pero en las capas altas de la atmósfera, entre unos 15 y 50 km sobre el nivel de la superficie terrestre, forma la capa que protege a la Tierra de los letales rayos ultravioletas del Sol.

Para saber detalles técnicos de su reducción ver 2.6.

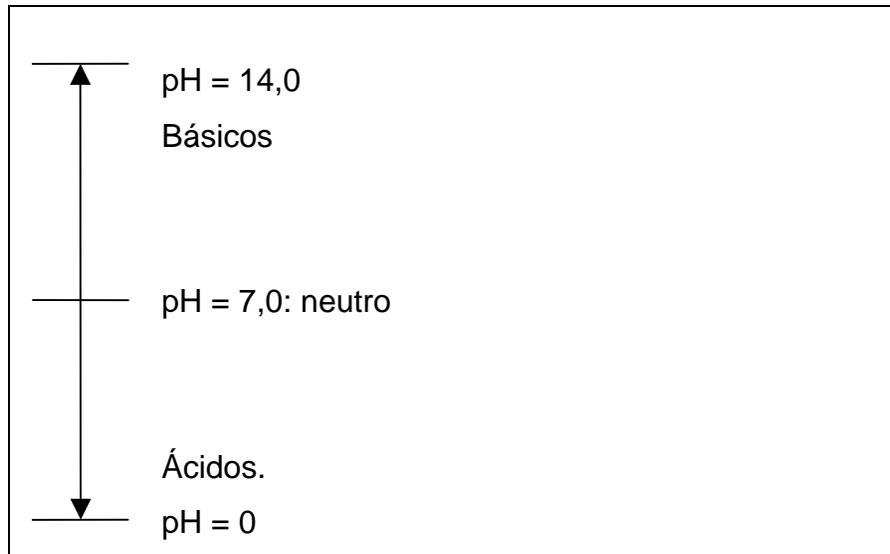
La medición de la reducción de la capa de ozono en la Antártica ha certificado la existencia de un agujero en la capa de ozono en aquella latitud que crece de forma continua. En el polo norte se prevé que puede abrirse un nuevo agujero en la capa de ozono, y también se han comprobado reducciones significativas en el hemisferio norte sobre los países más industrializados del mundo.

Algunos investigadores han calculado un descenso del 4% en el total del ozono entre 1.980 y 1.985, además, el descenso ha sido dos veces más rápido de lo explicable por la suma de todos los procesos conocidos hasta hoy: de los CFC<sub>s</sub> hasta el óxido de nitrógeno, pasando por la actividad solar (ref. 1).

El debilitamiento de la capa de ozono trae consecuencias negativas en varios ámbitos originados por la menor absorción de los rayos ultravioletas, lo que influye en la salud del hombre; en la calidad de las cosechas; en el ecosistema de los océanos; en la degradación de materiales polímeros.

## 1.6 Lluvia ácida.

Para entender a cabalidad este concepto se debe tener muy claro qué es la acidez. Este término se refiere a un cierto valor del pH de una sustancia. El pH es una medida de la concentración de iones hidrógeno y está tabulado entre 0 y 14, por lo que un pH = 7,0 es neutro, los valores mayores al valor neutro se conocen como básicos y los menores como ácidos, como se muestra en el siguiente diagrama:



**FIGURA 1-3:** escala de pH.

En el esquema anterior es posible ver que mientras el pH de una sustancia es más cercano a 0 más ácida será dicha sustancia. Una sustancia es ácida si tiene ciertas características que la definen como tal, estas son tener un sabor agrio, colorear de rojo el tornasol (que es un tinte vegetal) y reaccionar con ciertos metales desprendiendo hidrógeno. Mientras más ácida sea la sustancia mayor concentración de iones hidrógeno tendrá.

Una vez aclarado lo anterior se puede definir a la lluvia ácida. Es la precipitación, normalmente en forma de lluvia, pero también en forma de nieve, niebla o rocío, que presenta un pH del agua inferior a 5,65, o sea, más ácido que el del agua pura, que es alrededor de 6,5. En lugares contaminados por ácido sulfúrico y ácido nítrico el pH de la lluvia varía entre 5 y 3, lo que implica la deposición de sustancias desde la atmósfera durante la precipitación hacia bosques, lagos, edificios, suelo, monumentos. Los contaminantes pueden depositarse también en forma seca, como gas o como pequeñas partículas, lo que se conoce como deposición.

Es ocasionada principalmente por la quema de combustibles fósiles, liberando principalmente dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) y óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), siendo las principales fuentes emisoras de estos contaminantes las centrales térmicas. Estos

contaminantes son liberados al quemar carbón y aceite cuando se usan como combustible para producir calor o movimiento (motores de ciclos Otto y Diesel).

### **1.7 Protocolos internacionales.**

En el año 1972 se celebró en Estocolmo (Suecia) la Conferencia sobre el Medio Humano en la que se comenzaron a discutir temas de índole ambiental, en especial respecto al efecto invernadero y también sobre la lluvia ácida, aspecto en el que el gobierno sueco puso de manifiesto cómo los óxidos de azufre, vertidos al aire por las instalaciones industriales que quemaban combustibles fósiles situadas lejos de sus fronteras dañaban los ecosistemas del país nórdico al ser arrastrados por los vientos, transformándose en la atmósfera en ácido sulfúrico, y precipitar en el suelo y en las aguas interiores en forma de lluvia ácida.

20 años después se realizó en Río de Janeiro la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo (CNUMAD), conocida comúnmente como Cumbre de Río o Cumbre de la Tierra. El objetivo de la Cumbre, a la que asistieron representantes de 172 países, fue el de establecer los problemas ambientales existentes y proponer soluciones a corto, mediano y largo plazo. Se aprobaron cinco acuerdos, de los cuales interesan:

- La Agenda 21: es un programa de acción para lograr el desarrollo sostenible y afrontar las cuestiones ambientales y de desarrollo de forma integrada a escala mundial, nacional y local.
- Convención Marco sobre el Cambio Climático: es un acuerdo para estabilizar las concentraciones de gases causantes del efecto invernadero en la atmósfera, hasta unos valores que no interfieran en el sistema climático mundial. En 1997, en la tercera reunión de la Convención Marco sobre el Cambio Climático en Kioto, se aprobó el Protocolo que establece que los países desarrollados deben reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero en un 5,2% para el año 2012, respecto a las emisiones del año 1990, lo que sin ninguna duda fue el precursor del Anexo VI del MARPOL 73/78.

La Convención de Viena para la Protección de la Capa de Ozono de 1985 sienta las bases para una coordinación mundial que reúne esfuerzos y provee cooperación científica e intercambio de información a nivel internacional.

Destaca el Protocolo de Montreal de 1987, ya que es el primer acuerdo global de trabajo conjunto de todas las naciones para reducir la producción de los químicos

que dañan la capa. Se firma el compromiso de todos los países para reducir el uso de CFC y detener la producción de halones en el año 2000. Como consecuencia de este Protocolo la producción de CFC en los países desarrollados cesó casi por completo a finales de 1995. En los países en vías de desarrollo los CFC se van a ir retirando progresivamente hasta eliminarse por completo en el año 2010. Han existido una serie de enmiendas a este Protocolo en las que se añadieron otras sustancias reductoras del ozono y se debe eliminar los HCFC en el año 2040. El Anexo VI del MARPOL 73/78 ha tomado los gases contaminantes prohibidos por este Protocolo para incluirlos en él.

El Convenio que regula los asuntos relacionados con la contaminación ocasionada por los buques es el MARPOL 73/78, Convenio adoptado por la Organización Marítima Internacional (OMI) en su afán de reducir los efectos nocivos que provocan los buques en sus faenas. Este Convenio Internacional cuenta con el Anexo VI sobre “Regulaciones para la Prevención de la Contaminación Atmosférica por Buques”, acordado el año 1997 y que entró en vigor el año 2005. Éste será analizado en profundidad en el capítulo IV de esta tesis.

## Capítulo II. Contaminantes atmosféricos.

### 2.1 Introducción.

Una vez vistos los efectos que produce la contaminación atmosférica se verán los contaminantes que los provocan, debiendo destacar que los que nos interesan son los contaminantes primarios, que son aquellos que produce directamente una fuente y no los secundarios, que son aquellos que se producen por reacciones químicas posteriores. Los contaminantes atmosféricos se pueden clasificar de acuerdo a diferentes parámetros, pero el de mayor utilidad para este análisis es de acuerdo a su elemento químico común más característico, clasificación que es la que se entrega en las siguientes páginas y se presenta en el siguiente cuadro.

GRUPO	CONTAMINANTES
1. Compuestos de azufre.	SO <sub>2</sub> , SO <sub>3</sub> , SH <sub>2</sub> , SF <sub>6</sub> .
2. Compuestos de carbono.	CO, CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> .
3. Compuestos halogenados.	CFC <sub>s</sub> , halocarbonos, HCl, PCV, PCB.
4. Compuestos de nitrógeno.	NO, NO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> O.
5. Ozono.	O <sub>3</sub>
6. Hidrocarburos	COV, THC.
7. Partículas	Aerosoles, niebla, hollín, humo, etc.
8. Otros	Plomo, compuestos radioactivos.

**TABLA 2-1:** clasificación de los contaminantes atmosféricos según su elemento químico común más característico.

### 2.2 Derivados del azufre (S).

El azufre es un elemento no metálico, que tiene una gran gama de derivados que provienen principalmente de las actividades del hombre a través de sus numerosas acciones industriales, urbanas y de transporte. Del azufre se produce, en interacción con la radiación solar y a partir de contaminantes preexistentes el ozono, se acidifican los compuestos atmosféricos y se generan aerosoles naturales, como la niebla y el humo.

La producción de óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>) proviene principalmente de la combustión del carbón y de algunos derivados del petróleo. Los niveles de SO<sub>x</sub> varían dependiendo del combustible usado en cuanto a su porcentaje de azufre, las emisiones

totales de azufre son del orden de 63 Tg/año (fuente: PNUMA, Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente), aunque han disminuido gracias a la toma de conciencia y a medidas apropiadas para su reducción, ya que el PNUMA estima que en 1983 se emitían entre 80 y 288 millones de toneladas al año.

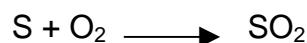
A continuación se detallan los principales contaminantes derivados del azufre, antes de lo cual se debe hacer notar que los óxidos de azufre no son el peligro, sino que es que participan activamente de la formación del ácido sulfúrico y del ácido sulfuroso, que son los principales precursores de la lluvia ácida.

### 2.2.1 Bióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y derivados.

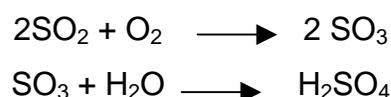
Este compuesto también se conoce como dióxido de azufre o anhídrido sulfuroso. Es un gas incoloro, no inflamable, con olor picante y sabor ácido (ref. 6). Es percibido por el olfato en concentraciones de hasta de 3 ppm (0.003%). Tiene un período de residencia de 3 ó 4 días en la atmósfera, sin embargo, sus efectos contaminantes son muy importantes, siendo el principal contaminante entre los derivados del azufre, el SO<sub>2</sub>. Su concentración normal en la atmósfera es de 0,2 ppb (ppb = partes por billón).

La actividad humana produce la mayor parte del SO<sub>2</sub> presente en la atmósfera y entre ellas la mayor cantidad proviene de las combustiones, sobre todo de la combustión del carbón y del petróleo, que contiene cantidades variables de azufre dependiendo de qué derivado del petróleo se trate y de donde provenga (ver 3.4).

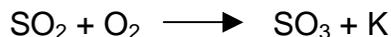
El SO<sub>2</sub> para presentarse como tal sufre una serie de transformaciones a partir del momento en que aparece en la atmósfera; esto quiere decir que no permanece estable, sino que se incorpora al ciclo del azufre en la biosfera. Se produce por la combinación del azufre con el oxígeno en la combustión:



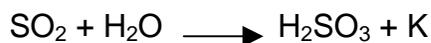
Luego este gas es liberado a la atmósfera donde por otra oxidación produce el anhídrido sulfúrico o trióxido de azufre (SO<sub>3</sub>) y este puede reaccionar con el vapor de agua del aire produciendo ácido sulfúrico, lo que se representa mediante las siguientes ecuaciones químicas:



Bajo la acción de los rayos UV se ve:



Ante la presencia de vapor de agua el  $\text{SO}_2$  se transforma en ácido sulfuroso, con desprendimiento de calor.



El  $\text{H}_2\text{SO}_3$  no es estable y debido a reacciones fotoquímicas (por acción de rayos UV) se transforma en  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . Por lo que se concluye que el ácido sulfúrico se puede obtener mediante las dos formas antes nombradas.



### 2.2.2 Trióxido de azufre o anhídrido sulfúrico ( $\text{SO}_3$ ).

El trióxido de azufre es un agente deshidratante poderosísimo, se obtiene por oxidación del anhídrido sulfuroso o por calentamiento de ácido sulfúrico mediante las reacciones que se indican.



Bajo la acción de los rayos UV se ve:



### 2.2.3 Ácido sulfhídrico o sulfuro de hidrógeno ( $\text{SH}_2$ ).

Este compuesto se produce en gran parte de forma natural por la descomposición de microorganismos. Las emisiones de origen antropogénico provienen principalmente de papeleras y refinerías, que vierten a la atmósfera el equivalente a  $3 \cdot 10^6$  tm de azufre/año en forma de  $\text{SH}_2$ .

Su concentración normal en el aire es de 0,2 ppb. Es un compuesto que, en la atmósfera, se oxida casi siempre a  $\text{SO}_2$  (ref. 5).

#### **2.2.4 Hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>).**

Es uno de los 6 principales gases causantes del efecto invernadero. Es un gas inerte, de mayor densidad que el aire, asfixiante, no tóxico ni inflamable. Se produce por reacción directa a unos 300° C de azufre fundido y el flúor gaseoso.

Se utiliza en:

- Aislamiento de equipos de distribución de energía eléctrica.
- Detección de fugas.
- Desgasificación del aluminio.
- Fusión de magnesio y sus aleaciones.

Es un gas muy riesgoso en cuanto al efecto invernadero en mayor medida a que está compuesto por flúor, elemento que será analizado en las próximas páginas junto a los hidrofluorocarbonos.

#### **2.3 Derivados del carbono (C).**

El carbono es uno de los compuestos naturales de la atmósfera (entre el monóxido de carbono y el anhídrido de carbono constituyen 350,2 ppm del volumen total de la atmósfera) por lo que es esencial para la vida en la Tierra, al tiempo que es parte del contaminante gaseoso que en mayor cantidad es causante del efecto invernadero (el CO<sub>2</sub>, que aporta en un 63%), aunque en su forma elemental no es tóxico y si es incandescente a altas temperaturas y es combustible.

Forma parte de todos los compuestos orgánicos y de unos pocos inorgánicos.

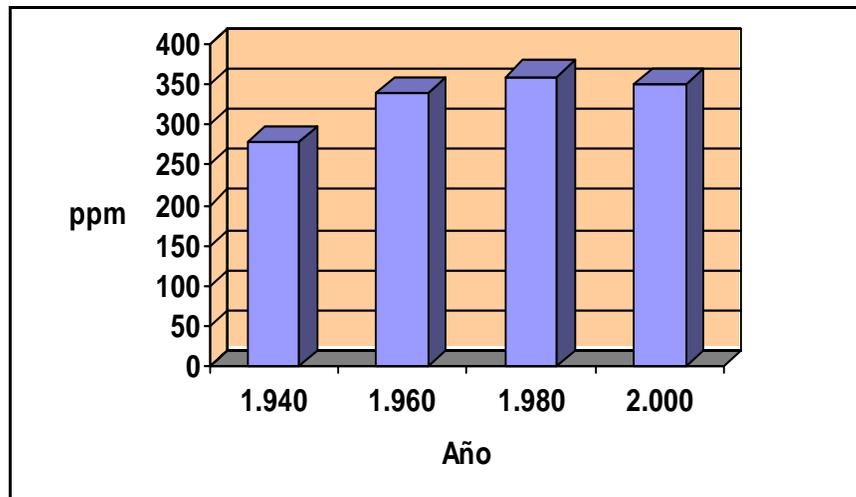
##### **2.3.1 Dióxido de carbono o anhídrido carbónico (CO<sub>2</sub>).**

Este compuesto se puede encontrar como gas, líquido o sólido (hielo seco) en la Tierra. En todas sus formas es incoloro e inodoro con un tenue sabor ácido; es incombustible; soluble en agua, en hidrocarburos y en la mayoría de los líquidos orgánicos. Está presente en la atmósfera en 0,03% del volumen y en 0,0474% en peso, y es el gas de efecto invernadero que más participa en el calentamiento global, aportando con un 63%. Se calcula que aumenta a razón de 5% por década, siendo con esto el gas de mayor incremento en la atmósfera gracias a:

- Combustión de combustibles fósiles como carbón, petróleo y gas, que aportan con un alrededor de 20 billones de toneladas de este gas a la atmósfera al año.

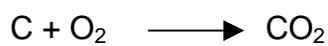
- Deforestación e incendios forestales, con lo que se deja de procesar para la posterior liberación de oxígeno en la fotosíntesis.
- Erupciones volcánicas.
- Que se ocupa en equipos de extinción de incendio.

La cantidad de CO<sub>2</sub> fue en continuo aumento hasta alrededor del año 1991, donde se alcanzaron las 360 ppm. Este valor ha comenzado a decrecer, o mantenerse, en los últimos años gracias al aumento de conciencia de las personas y a las nuevas legislaciones existentes.



**TABLA 2-2:** evolución de la cantidad de CO<sub>2</sub> en la atmósfera (ref. 3).

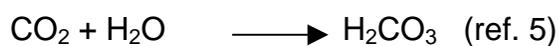
La condición que debe existir para que se produzca este compuesto es una combustión del carbono en una atmósfera con presencia de abundante oxígeno (ver 3.2.1).



También puede formarse por oxidación del monóxido de carbono:



Mientras que la lluvia ácida se forma gracias a reacciones como:



### 2.3.2 Monóxido de carbono (CO).

Es un gas o líquido incoloro, insípido, venenoso, prácticamente inodoro, ligeramente soluble en agua, en alcohol y en benceno. Es muy inflamable, su límite más bajo de explosión en el aire es de 12,5% en volumen (ref. 6). En la atmósfera está presente entre 1,5 y 0,020 ppm en lugares no contaminados y puede sobrepasar las 100 y hasta las 300 ppm en la proximidad de focos emisores (generalmente en ciudades con mucho tráfico de vehículos y ciertas condiciones climatológicas). Es por esto que es el mayor contaminante del aire.

Se puede obtener casi puro por diferentes procesos químicos de laboratorio, por la combustión del tabaco y por la combustión de materias orgánicas como aceite, carbón, madera, petróleo, gas o cualquier otro compuesto que contenga carbono en una atmósfera con suministro de aire u oxígeno limitado, lo que provoca una combustión incompleta de esas materias. Esto ocurre en los cilindros de los motores de combustión interna.

Pero sin ninguna duda, la fuente principal del gas es la combustión incompleta de los productos derivados del petróleo en los motores de combustión interna, principalmente de los motores otto. La proporción de CO en los gases de escape de los motores a gasolina y diesel ha sido objeto de numerosos estudios, admitiéndose en general los datos siguientes:

Régimen del motor	Tipo de motor	% de CO <sub>2</sub>	% de CO
Marcha en ralentí	Gasolina	De 6,5 a 8	De 9 a 14
	Diesel	4,3	0,1
Velocidad 50-60 km/hr (27-32,4 Kn)	Gasolina	De 9 a 11	De 3 a 5
	Diesel	4,2	0,1
Pleno régimen	Gasolina	De 12 a 13	De 1 a 3
	Diesel	7	0,2

**TABLA 2-3:** aporte de derivados del carbono a la atmósfera producto de motores de combustión interna (ref. 5).

Naturalmente estos datos son relativos, pues la proporción de gases depende principalmente de la relación aire – combustible (es mayor la emisión de CO cuando la relación es más pobre, condición común durante el arranque del vehículo) y también,

entre otros factores, depende del tipo de combustible, de la potencia y estado de conservación del motor, así como de la altitud sobre el nivel del mar (donde hay menor presencia de oxígeno disponible para la combustión). Actualmente se tienden a disminuir fuertemente las emisiones de CO mejorando las condiciones de funcionamiento de los motores, habiéndose alcanzado resultados bastante esperanzadores.

### **2.3.3 Metano (CH<sub>4</sub>).**

Es un gas incoloro, inodoro e insípido; más ligero que el aire. Prácticamente inerte frente a los ácidos sulfúrico y nítrico, álcalis y sales, pero reacciona con cloro y bromo a la luz (con explosión a la luz solar directa). Es poco tóxico.

Se obtiene a partir del gas natural. Forma una mezcla explosiva con el aire (ref. 7). El metano es un gas que provoca el efecto invernadero y se genera naturalmente y también por las actividades del hombre. Debido a estas últimas, el metano ha aumentado considerablemente, siendo función del incremento de la población.

Se estima que entre los campos de arroz y el ganado bovino se produce el 35% de las emisiones de metano en el mundo. Al menos un 15% es emitido por los grandes basurales y vertederos y por la quema de leña, combustible muy usado en las industrias del Tercer Mundo. También es producido por la minería del carbón y el gas natural, donde el gas metano atrapado en sus depósitos es liberado. Fuentes naturales como los pantanos y humedales contribuyen con otro tercio del total de las emisiones.

## **2.4 Halógenos y derivados.**

Son los 5 elementos del grupo VIIA del sistema periódico: flúor, cloro, bromo, yodo y ástato. No existen libres en la naturaleza, pero sus combinaciones son muy abundantes y estables. Esto es lo que los hace tan útiles y también les permite atacar la capa de ozono. Son muy utilizados por el hombre, quien los utiliza en la fabricación de Halón y refrigerantes o propulsantes como el Freón; Ucon; Genetron, lo que provoca que casi el 100% de los halógenos que llegan a la atmósfera sean de origen antropogénico. Los principales culpables de la destrucción de la capa de ozono son estos dos compuestos halogenados:

- CFC<sub>s</sub> (en 80%).
- Halocarbonos: carbono + halógeno.

Los dos elementos más utilizados de este grupo son el flúor y el cloro. El flúor es el mayor agente contaminante de este grupo por ser el de más energía. Las principales fuentes de flúor son, en mayor medida, la industria del aluminio y las plantas de fabricación de sus derivados y son fuentes menores las fábricas de abonos fosforados y las industrias que utilizan compuestos silíceos y arcillas.

De entre los halógenos las combinaciones más abundantes son las del cloro, el que se emite a la atmósfera en estado libre y como ácido clorhídrico (o cloruro de hidrógeno, HCl) desde incineradores de residuos, que vierten el ácido a la atmósfera al quemar las basuras que contienen restos de plásticos del grupo de los PCV y PCB que se volatilizan. También se emite el cloro y sus derivados a la atmósfera a lo largo de los diferentes procesos de fabricación del mismo. En cuanto a las causas de contaminación el 80% del cloro estratosférico ha provenido de las actividades del hombre.

#### **2.4.1 Clorofluorocarbonos (CFC<sub>s</sub>).**

Estos compuestos no son tóxicos ni inflamables y como están formados por halógenos son muy estables químicamente, por lo que son muy útiles en los procesos en que se utilizan.

Los CFC<sub>s</sub> fueron desarrollados como refrigerantes en la década de 1930; luego hacia 1950 se masificaron nuevas aplicaciones industriales como aerosoles propulsantes ("spray") de decolorantes hasta medicamentos, pasando por artículos para la limpieza de muebles o vidrios, en la actualidad son utilizados en espuma de poliuretano, aire acondicionado, solventes para la limpieza de microchips y otros equipos electrónicos.

Una vez propulsados, los CFC<sub>s</sub> se elevan: al cabo de unos ocho años llegan a la estratosfera, donde permanecen durante un siglo y son descompuestos por los rayos ultravioletas del Sol. Una vez los átomos de cloro (o bromuro, para el caso de otros compuestos de menor importancia) han sido liberados gracias a este proceso convierten al ozono en oxígeno corriente. Cada átomo de cloro puede destruir 10.000 moléculas de ozono y si bien son menos abundantes que el CO<sub>2</sub> cuando se contabilizan molécula por molécula, ellos son 18.000 veces más poderosos en lo que respecta al calentamiento de la atmósfera.

Las características que los hacen nocivos son:

- Larga sobrevivencia en la atmósfera.
- No son fácilmente devueltos a la Tierra por las precipitaciones.
- No son destruidos por otras reacciones.
- Un átomo de cloro puede destruir 10.000 moléculas de ozono (ref. 8).

Algunos de los CFC<sub>s</sub> más usados son el Carbono tetracloro, el Metilcloroformo, los Halones, el Metilbromo.

➤ El Carbono tetracloro se utiliza como:

- Solvente industrial.
- Fumigaciones agrícolas.
- Refinación petroquímica.
- Lavado en seco.

➤ El Metilcloroformo se utiliza como:

- Solvente industrial.
- Limpiador de metales.

➤ El Metilbromo (bromuro de metilo) se usa desde 1991 especialmente en pesticidas.

Hacia 1930 el refrigerante más usado era el amoniaco, que después fue cambiado por el CFC y éste actualmente se ha ido reemplazado por los HCFC<sub>s</sub>, debido a que son menos nocivos ya que contienen hidrógeno, facilitando su destrucción en la troposfera, lo que no quiere decir que no tengan un efecto contaminante.

#### **2.4.2 Halocarbonos (C + halógeno).**

Estos son compuestos que contienen carbono, un halógeno y algunas veces, hidrógeno. Se utilizan como:

- Refrigerantes.
- Gases propulsores.
- Agentes extintores de incendio.

El más utilizado es el Halón, que es una marca registrada de un polímero de tetrafluoretileno ((C<sub>2</sub>F<sub>4</sub>)<sub>n</sub>). Los Halones se utilizan fundamentalmente en extintores, pero su uso está decayendo debido a que no se fabricarán más por estar prohibidos por el Protocolo de Montreal. Contribuyen en un 5% a la destrucción de la capa de ozono; aumentan anualmente en 10%, pero por lo anterior se espera que estas cifras comiencen a bajar considerablemente.

#### **2.4.3 Cloruro de hidrógeno o ácido clorhídrico (HCl).**

El cloruro de hidrógeno es un gas con olor sofocante e incoloro, el que al estar en solución acuosa da lugar al ácido clorhídrico. Se obtiene haciendo reaccionar directamente al cloro y al hidrógeno por acción del ácido sulfúrico sobre el cloruro sódico.

El ácido clorhídrico es un ácido inerte muy corrosivo y muy tóxico por ingestión e inhalación. Es producido desde incineradores de residuos, que vierten el ácido a la atmósfera al quemar las basuras que contienen restos de plásticos del grupo de los PCV (policloruros de vinilo) y PCB (bifenilo policlorado) que se volatilizan, lo que está analizado en 4.3.4.4.

#### **2.4.4 Policloruro de vinilo (PCV).**

Este compuesto es mucho más conocido por sus siglas en inglés: PVC. Es un polímero sintético, está formado por carbono, hidrógeno y cloro y tiene la siguiente forma:  $-(\text{CH}_2 - \text{CHCl})_n$ .

Es un plástico duro, resistente al fuego, a la luz, a los productos químicos, a los insectos, a los hongos y a la humedad. Es ignífugo, no se rompe ni se astilla. Su rigidez permite utilizarlo en la fabricación de tuberías, láminas y recubrimientos de suelos. Se hace flexible al mezclarlo con un plastificador, siendo utilizado como aislante de tendidos eléctricos, como cuero sintético, para envases de alimentos y artículos impermeables.

Todas estas propiedades más el hecho de que no requiera ser pintado y que pueda reciclarse, implican un bajo costo de mantenimiento y un menor impacto ambiental, aunque en este sentido el impacto es indirecto, ya que su incineración provoca contaminación atmosférica debido a que se compone de cloro.

#### **2.4.5 Bifenilo policlorado (PCB).**

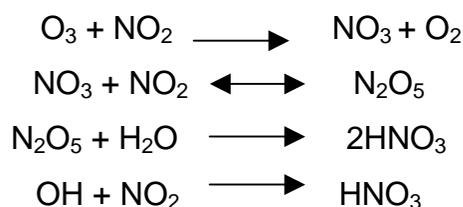
Son sustancias consideradas como residuos tóxicos y peligrosos, utilizadas sobre todo en mezcla líquida con triclorobenceno en el aislamiento eléctrico y en la refrigeración de determinados tipos de transformadores eléctricos. Los que pueden estar situados, por ejemplo, en postes de vías públicas o en terrenos privados, así como en el interior de edificios, industrias o locales.

Esta sustancia procede exclusivamente de la actividad humana. Son poco biodegradables y se acumulan en los organismos. Su fabricación está totalmente prohibida en la mayoría de países y también se han dictado normas en relación al transporte, almacenamiento y etiquetado; además, se precisa una autorización para gestionar y eliminar los residuos de PCB. En buques está prohibida su incineración (ver 4.3.4.4).

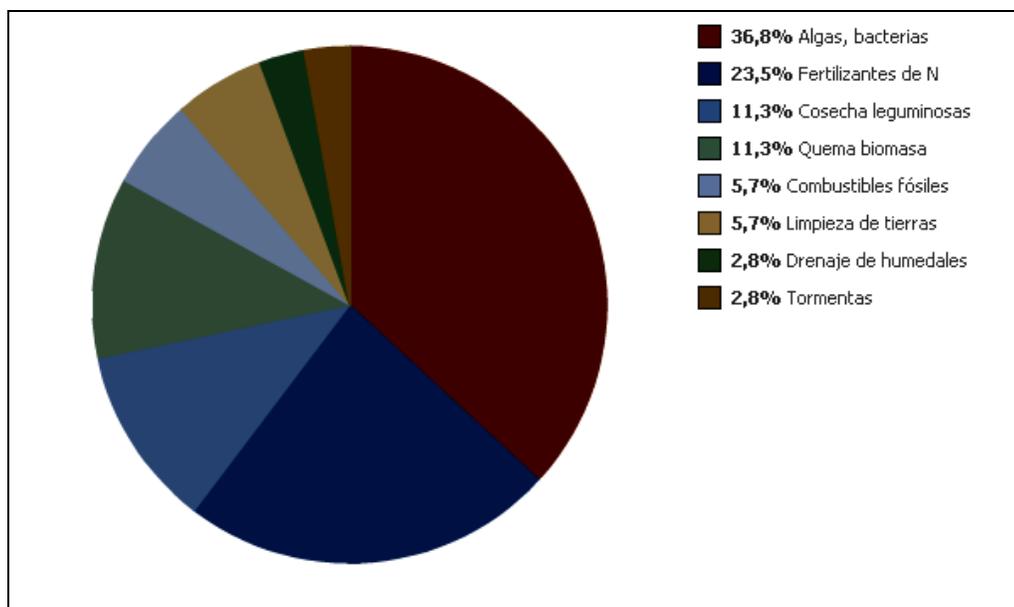
## 2.5 Derivados del nitrógeno (N).

Es el mayor constituyente de la atmósfera, aportando un 78,08% del volumen de ella. Es un gas incoloro; inodoro e insípido, no es combustible; comburente; ni venenoso.

En el medio natural estos contaminantes no son importante excepto en casos aislados de algunas plantas de fabricación de fertilizantes y casos muy concretos de vías urbanas de circulación de automóviles (debido a la combustión de combustibles fósiles). Sin embargo, estos productos en presencia de derivados de azufre, de humedad y de luz sufren una serie de reacciones provocando lluvia ácida y es en este caso en el que adquieren importancia desde el punto de vista ambiental. Entre las posibles reacciones atmosféricas para la formación del ácido nítrico se tienen:



Antes de conocer el ciclo del nitrógeno se entregan las fuentes antropogénicas y naturales de este elemento.



**TABLA 2-3:** fuentes globales de emisión de nitrógeno (referencia: FAO, <http://apps.fao.org>).

Dado que está presente en la atmósfera en una gran diversidad de compuestos, se puede encontrar como  $N_2$  y principalmente como  $N_2O$  y  $NO$  y  $NO_2$ , los llamados óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ). También forma otras combinaciones con oxígeno tales como  $N_2O_3$  y  $N_2O_5$  (anhídridos), "precursores" de los ácidos nitroso ( $HNO_2$ ) y nítrico ( $HNO_3$ ). Con hidrógeno forma amoníaco ( $NH_3$ ), compuesto gaseoso en condiciones normales.

Para formar los óxidos de nitrógeno parte del nitrógeno reacciona con el oxígeno a elevadas temperaturas en diferentes procesos, los óxidos resultantes se transforman en la atmósfera mediante reacciones fotoquímicas a ácido nítrico (sobre todo en ciudades con mucha luminosidad y contaminadas), el cual cae al suelo con el agua de lluvia, constituyendo un aporte de nitrato a los suelos.

### 2.5.1 Óxido nitroso o monóxido de nitrógeno ( $N_2O$ ).

Tiene una concentración media en la atmósfera de 0,3 ppm. Es un gas de efecto invernadero y fuente del  $NO$ , así como parte activa en la destrucción del  $O_3$ .

Es producido globalmente por una gran cantidad de fuentes y se cuenta con estimaciones anuales tentativas a nivel mundial: suelos naturales, suelos cultivados, quema de biomasa, quema de combustibles fósiles, tratamiento de aguas servidas, océanos, cambios de uso del suelo, industrias, fuentes móviles, acuíferos, basura, desechos animales y otros de menor importancia.

### 2.5.2 Óxido nítrico o dióxido de nitrógeno ( $NO$ ).

Es un gas incoloro, no inflamable. Se encuentra en la atmósfera en cantidades variables, pero en una concentración menor a 0,5 ppm. Es precursor de la formación de  $NO_2$ .



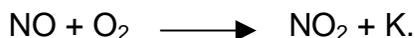
La emisión de  $NO$  es en su mayoría por el uso de fertilizantes nitrogenados y también por la quema de combustibles fósiles (petróleo, carbón natural y gas natural), principalmente desde motores de combustión interna de ciclo Diesel, en los que la formación de este gas se ve favorecida a temperaturas altas por la disociación del  $NO_2$ . Las fuentes en buques serán analizadas en el apartado 3.2.1.



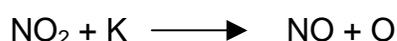
### 2.5.3 Dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>).

Se puede encontrar como líquido amarillo o gas rojo pardo (ref. 7). Existe en equilibrio variable con otros óxidos, especialmente con el tetróxido de dinitrógeno (N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>), dependiendo de la temperatura. Es el mayor componente de la contaminación del aire, por ser componente de los gases de escape de los motores de combustión interna (ver 3.2.1).

En los escapes de los vehículos se verifica la reacción:



El NO<sub>2</sub> se disocia por acción fotoquímica para producir óxido nítrico:



El NO<sub>2</sub> de la atmósfera se transforma en ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>) bajo la acción del vapor de agua de la atmósfera, provocando la lluvia ácida.

### 2.6 Ozono (O<sub>3</sub>).

No por considerar al ozono como un constituyente natural de la atmósfera puede dejar de ser estudiado como contaminante, más aún cuando su concentración sea superior a la normal sobre todo en lugares cercanos a la superficie terrestre, en la que en condiciones normales está entre 0,02 y 0,03 ppm de volumen. Es altamente venenoso, con una tolerancia en el aire de 0,1 ppm para las personas (ref. 7).

El ozono se forma cuando las radiaciones ultravioletas del Sol descomponen las moléculas de oxígeno (O<sub>2</sub>) para producir dos átomos de oxígeno (O), que se combinan con otras moléculas de oxígeno para formar moléculas de ozono (O<sub>3</sub>). Estas últimas vuelven a ser descompuestas por las radiaciones ultravioletas del Sol, manteniendo así un balance entre los átomos de oxígeno (O), las moléculas de oxígeno (O<sub>2</sub>) y el ozono (O<sub>3</sub>) en la atmósfera. También se forma por causas antropogénicas al estar los CFC expuestos a la radiación ultravioleta, los que en las regiones superiores de la atmósfera liberan átomos de cloro destruyendo al ozono y produciendo átomos de oxígeno y monóxido de cloro, el que a la vez reacciona con un átomo de oxígeno liberando otro átomo de cloro que puede iniciar de nuevo el ciclo. También el ozono se considera como un contaminante de origen antropogénico secundario al ser formado por la reacción de compuestos como aldehídos (compuestos de carbono, oxígeno e

hidrógeno), alcoholes (como el metilpropanol o el metanol), olefinas (también llamados alquenos, de fórmula general  $C_nH_{2n}$ ) y diolefinas con lo que se ha podido llegar a una concentración de 0,5 ppm de ozono en la ciudad norteamericana de Los Ángeles (ref. 9).

## **2.7 Hidrocarburos (HC).**

En este caso nos referiremos a los hidrocarburos como gases producto de la combustión de combustibles. Hidrocarburos son combinaciones que contienen solamente carbono e hidrógeno, aunque cuando se encuentran en estado gaseoso están combinados con más elementos que se encuentran en cantidades mucho menores, como nitrógeno, oxígeno y azufre. Se pueden dividir en dos grupos: hidrocarburos totales (THC) e hidrocarburos sin metano (NMHC), los que en Estados Unidos se conocen como Compuestos orgánicos volátiles (COV).

Contribuyen a la formación de ozono y smog y algunos, especialmente los que contienen metano contribuyen al efecto invernadero.

Con respecto a los COV se señala, por ejemplo, que no se ha llegado a un acuerdo universal sobre la definición de los COV (ref. 11), aunque suelen medirse en la atmósfera como hidrocarburos que no provienen del metano, porque el metano es relativamente poco reactivo en la formación de smog fotoquímico y ésta es una de las características de ellos.

Los COV, a veces llamados VOC (por sus siglas en inglés), son liberados por la quema de combustibles como gasolina, madera, carbón o gas natural. También son liberados por disolventes, pinturas, materiales de limpieza, pegantes y otros productos, cuando se usan y también, pero en menor medida, cuando se almacenan. Algunos ejemplos de compuestos orgánicos volátiles son gasolina, benceno, amianto, formaldehído, disolventes como tolueno, xileno y percloroetileno (o tetracloroetileno), el principal disolvente usado en la industria del lavado en seco.

## **2.8 Partículas.**

Se estima que en Estados Unidos para el año 1977 aportan con el 1% de las emisiones producidas por el transporte y con un 12% del total de las emisiones a la atmósfera. Las partículas son materia sólida o líquida, se encuentran dispersas y

arrastradas por el aire, son mayores que las moléculas individuales (esto es aproximadamente 0,0002  $\mu\text{m}$  de diámetro) pero menores de 500  $\mu\text{m}$  (ref. 9).

Las partículas suspendidas en el aire se clasifican de acuerdo a su origen, tamaño y composición y son las siguientes:

1. Aerosoles: es una dispersión de partículas microscópicas, sólidas o líquidas en medios gaseosos. Son otra de las causas de la contaminación atmosférica. Son responsables, en parte, del aumento de la opacidad de la atmósfera.
2. Polvo: partículas sólidas capaces de estar en suspensión temporal en el aire.
3. Ceniza fina: partículas finamente divididas arrastradas por el gas de la combustión. Estas partículas pueden contener combustible no quemado.
4. Niebla: aerosol visible.
5. Vapores: partículas formadas por condensación, sublimación (pasar directamente de sólido a vapor) o reacción química, predominantemente mayores de 1  $\mu\text{m}$  (humo o tabaco).
6. Nieblina: dispersión de pequeñas gotas de líquido de suficiente tamaño como para caer desde el aire.
7. Humo: partículas pequeñas arrastradas por los gases que resultan de la combustión.
8. Hollín: aglomeración de partículas de carbón.

## **2.9 Otros.**

Los siguientes contaminantes atmosféricos son aquellos que son de menor importancia, serán expuestos como información general y para mostrar que existen más contaminantes de la atmósfera que aquellos a que hace referencia el Anexo VI del MARPOL 73/78.

### **2.9.1 Plomo (Pb).**

Es un metal, de color gris, dúctil y de elevado peso molecular, que puede sedimentar y acumularse, con efectos tóxicos considerables en los seres vivos. La inhalación de plomo en forma de polvo o humo es altamente tóxica. El contenido de plomo en la corteza terrestre ha ido aumentando en este siglo debido a su amplia utilización.

La contaminación natural por plomo es pequeña. La contaminación artificial, es decir, aquella procedente de la actividad humana es grande, siendo dos de las principales fuentes:

- Las emisiones industriales: fundiciones de hierro, zinc, cobre y plomo; fábricas de pinturas, pólvora y explosivos; combustión de carbón; etc.
- Emisiones producidas por los vehículos. Actualmente el plomo ya no se utiliza en las gasolinas con el motivo de reducir las emisiones que perjudican a la atmósfera.

### **2.9.2 Compuestos radiactivos.**

Los elementos y compuestos radiactivos emitidos a la atmósfera pueden considerarse como elementos contaminantes primarios.

La radiactividad es la desintegración espontánea de núcleos atómicos mediante la emisión de partículas subatómicas y, por tanto, los compuestos radiactivos son aquellos a los que se fisionan sus núcleos atómicos para liberar grandes cantidades de energía. Las cantidades de energía que pueden obtenerse mediante procesos nucleares superan con mucho a las que pueden lograrse mediante procesos químicos, que sólo implican las regiones externas del átomo. Esta energía producida por la fisión de los núcleos del átomo se conoce como energía nuclear.

Estos compuestos pueden ser vertidos a la atmósfera accidentalmente por las centrales nucleares productoras de energía eléctrica, por las explosiones nucleares en la atmósfera y en mucho menor grado por los ensayos subterráneos.

Su acción sobre los seres vivos es gravísima por las lesiones y alteraciones que producen, modificando seres vivos y ecosistemas completos.

### **2.10 Resumen de contaminantes atmosféricos.**

Al finalizar este capítulo se presenta un cuadro que resume a grandes rasgos los contaminantes atmosféricos aquí tratados, por lo que son los que tienen cierta relación con los provocados por los buques y no se pretende que sea una base de todos aquellos contaminantes de la atmósfera.

CLASE	COMPUESTO	FUENTE
Derivados del azufre	SO <sub>2</sub>	Industria, combustión combustibles fósiles
	SO <sub>3</sub>	
	SH <sub>2</sub>	Principalmente natural, también papeleras y refinerías
	SF <sub>6</sub>	Equipos eléctricos
Derivados del carbono	CO <sub>2</sub>	Combustión combustibles fósiles, deforestación, erupciones
	CO	Combustión materia orgánica, uso combustibles fósiles
	CH <sub>4</sub>	Producción arroz, ganado, basurales, quema leña
Halógenos	CFC	Refrigeración, propelentes
	Halocarbonos	Refrigeración, propelentes, extintores incendio
	HCl	Incineradores
	PCV	Incineradores
	PCB	Incineradores

CLASE	COMPUESTO	FUENTE
Derivados del nitrógeno	N <sub>2</sub> O	Suelos, quema materia orgánica, uso combustibles fósiles
Ozono	NO	Suelos, fertilizantes, quema combustibles fósiles
	NO <sub>2</sub>	Gases de escape
	O <sub>3</sub>	De forma natural y al entrar en contacto ciertos compuestos con la atmósfera
HC	gasolina, benceno y otros	Combustión combustibles, industria del lavado
Partículas	---	Aerosoles, tormentas, combustión
Plomo	---	
Radiactividad	---	Centrales y explosiones nucleares

**TABLA 2-4:** principales contaminantes atmosféricos y su fuente.

## Capítulo III. Productores de Contaminación Atmosférica en Buques.

### 3.1 Motores de Combustión Interna.

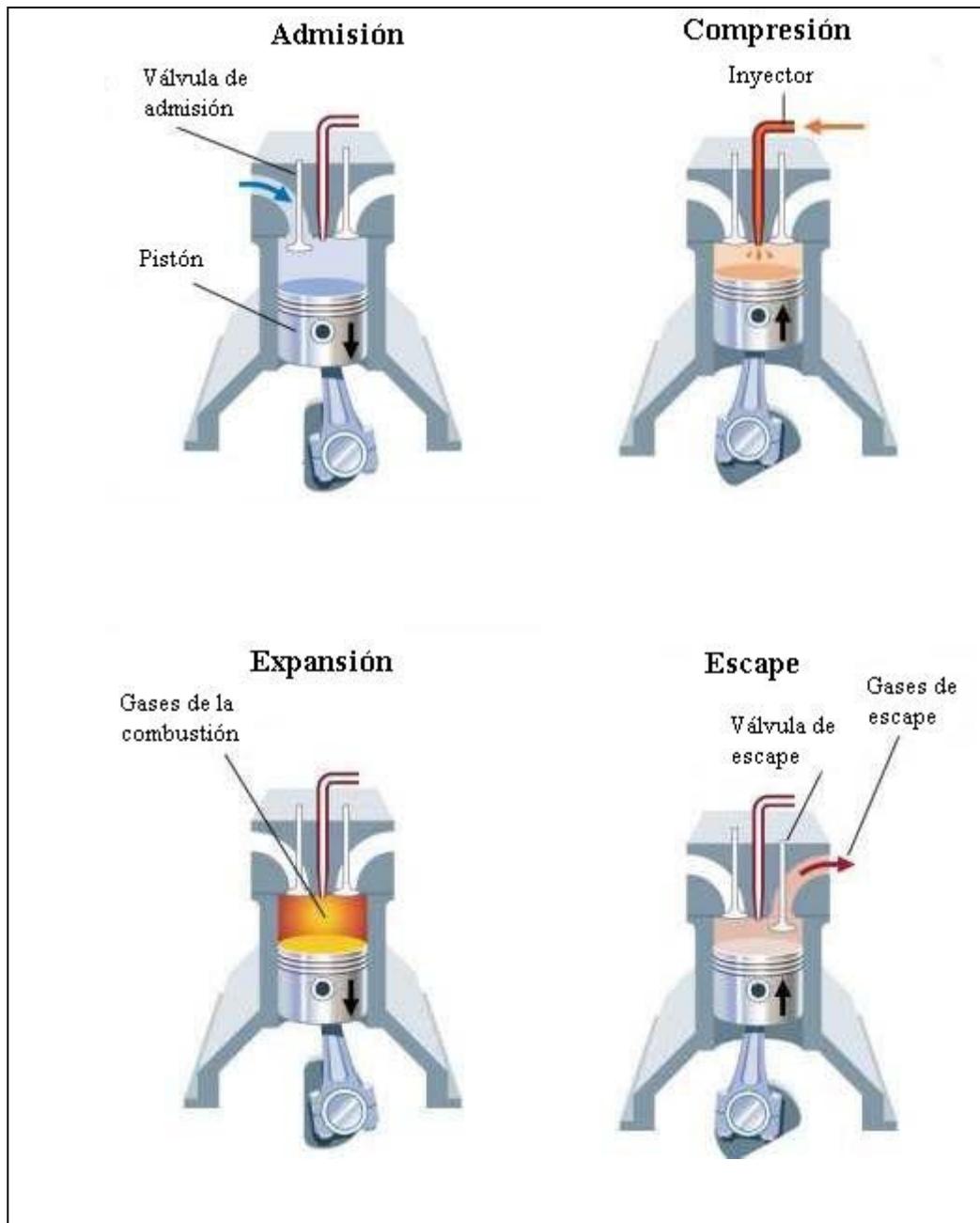
Combustión es una reacción química auto mantenida durante la cual se oxida un combustible y se libera una gran cantidad de energía en forma de calor, la que habitualmente se manifiesta por incandescencia o llama. El oxidante empleado con mayor frecuencia en los procesos de oxidación es el aire, ya que es gratis y se consigue fácilmente (ref. 12).

La energía liberada durante la combustión provoca una subida de temperatura en los productos y esta temperatura alcanzada dependerá de la velocidad de liberación y disipación de energía, así como de la cantidad de productos de combustión. Teóricamente, en toda combustión sólo se precisa añadir una mínima porción de aire al combustible para completar el proceso, sin embargo, con una mayor cantidad de aire la combustión se efectúa con mayor eficacia y hay un mayor aprovechamiento de la energía liberada. Por otra parte, un exceso de aire reducirá la temperatura final y la cantidad de energía liberada. En consecuencia habrá de establecerse la relación aire - combustible en función de la temperatura y del grado de combustión deseados. Para lograr altas temperaturas se puede utilizar aire rico en oxígeno. Esta relación aire – combustible, así como la temperatura son factores de gran importancia en este estudio.

Un motor de combustión interna es una máquina térmica que obtiene energía mecánica directamente de la energía química producida por un combustible que arde en la cámara de combustión (ref. 8) ocasionando el desplazamiento de un pistón. Existen 2 tipos de motores de combustión interna: de 4 tiempos y de 2 tiempos y es posible clasificarlos de acuerdo a la forma de encendido, donde se encuentran los motores que se encienden por compresión (de ciclo diesel) y los motores a explosión (ciclo otto). La gran mayoría de los motores de combustión interna que utilizan las naves son de ciclo diesel y de 2 tiempos.

Los motores de ciclo diesel son también conocidos como motores a compresión, ya que el aire se comprime a grandes presiones, alcanzando altas temperaturas durante la carrera de compresión. Luego se inyecta el combustible (generalmente petróleo) en forma de lluvia atomizada antes que el pistón llegue al punto muerto superior generando la combustión cuando la mezcla aire – combustible alcanza la temperatura de autoencendido, lo que provoca el movimiento del eje cigüeñal, en el caso de los motores marinos. Debido a que en este proceso no se produce pre-ignición, el grado de compresión puede ser muy elevado, provocando una gran eficacia.

Los motores diesel marinos funcionan como se muestra en la siguiente figura:



**FIGURA 3-1:** funcionamiento de un motor diesel marino.

### 3.1.1 Emisiones desde motores diesel marinos.

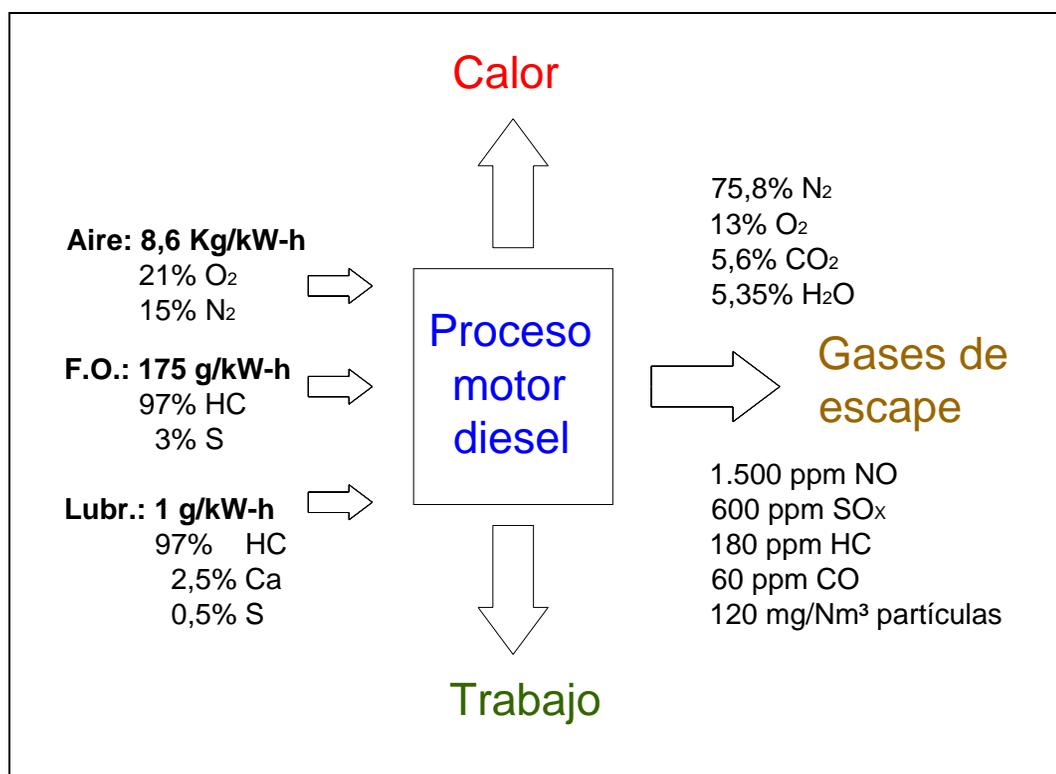
Las contribuciones de las emisiones de los buques hacia la atmósfera son bastante importantes, esto a causa de los 140 millones de toneladas de combustible que consumen, que corresponden al 5% del consumo mundial total al año 2000, con lo cual aportan con un (ver referencia 13 en la página 91):

- 5% de la producción global de  $\text{CO}_2$  proveniente de combustibles, que corresponden a 450 millones de toneladas anuales.
- 13% de la producción de  $\text{NO}_x$  producto de la combustión de combustibles.
- 3 – 5% de las emisiones globales de  $\text{SO}_x$ .

Teniendo en cuenta los datos entregados además del funcionamiento básico de un motor diesel, antes presentado, se tiene que las emisiones de estos motores dependen de las siguientes variables (ver punto 9 en página 90):

1. Diseño de la cámara de combustión: el combustible puede ser inyectado directamente al cilindro (inyección directa) o en una cámara de precombustión o de combustión dividida (inyección indirecta).
2. Diseño del inyector del combustible: la cantidad total de combustible inyectado está controlado por la carga y velocidad del motor.
3. Composición del combustible, para más detalles ver 3.4 en la página 56.
4. Relación entre el aire y el combustible: esta se encuentra desde 100:1 a 15:1.
5. Si es de aspiración natural o forzada.
6. Condición del motor.

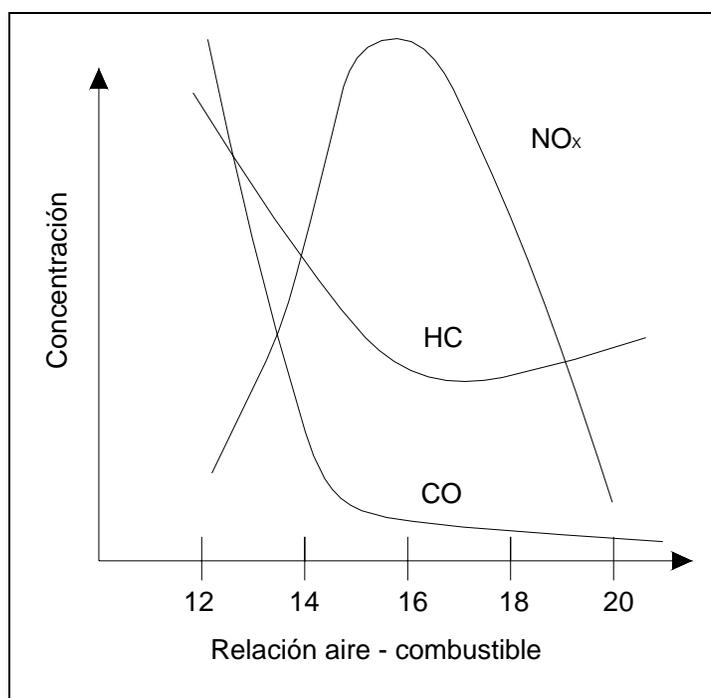
Las emisiones de los motores diesel marinos se componen como se muestra en la figura 3-2. Son de mayor importancia el oxígeno, nitrógeno, agua y dióxido de carbono por la cantidad y los óxidos de nitrógeno y de azufre junto al dióxido de carbono por afectar fuertemente a la salud humana y al medio ambiente, a pesar de que los óxidos de nitrógeno y los óxidos de azufre, junto a los hidrocarburos, monóxido de carbono y material particulado suman sólo un 0,25% promedio del total de las emisiones. Las figuras 3-2 y 3-3 y la tabla 3-1 muestran de forma más gráfica los compuestos de las emisiones de los motores diesel de combustión interna de diferentes formas, para a continuación presentar una descripción de los factores relativos a la formación de cada uno de estos gases.



**FIGURA 3-2:** emisiones típicas de un motor MAN B & W diesel lento para una relación aire:combustible de 49:1, donde g/kW-h es el consumo específico del motor (ver referencia 14 en página 91).

	<i>Low speed engines</i>	<i>Medium speed engines</i>
<b>NO<sub>x</sub></b>	18,7	13,8
<b>CO</b>	2,1	1,8
<b>HC</b>	0,5	0,6
<b>SO<sub>2</sub></b>	> 21,0 x contenido de azufre en el combustible	

**TABLA 3-1:** emisión de motores diesel marinos en g/kWh, donde esta relación g/kW-h indica el consumo específico del motor (ver referencia 14 en página 91).



**FIGURA 3-3:** composición de los gases de escape en función de la relación aire – combustible (ver referencia 10 en página 90).

➤ **Óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>).**

En la combustión existen 2 fuentes de formación de NO<sub>x</sub>: el aire (21% O<sub>2</sub> y 78% N<sub>2</sub>) y el combustible (para saber la composición del petróleo, a modo de ejemplo, vea la tabla 3-8 en la página 56). En una combustión en un motor diesel a mayor temperatura, mayor es la velocidad de producción de NO y, por lo tanto, más se produce. En cambio el NO<sub>2</sub> se ve favorecido a temperaturas más bajas, por lo que a temperaturas normales de combustión se forma una cantidad apreciable de NO y cantidades despreciables de NO<sub>2</sub>, cuya formación se hace cada vez menos probable sobre los 727° C (1.000K). Lo que indica que lo que se debe evitar es la formación de NO, que es un 95% de los NO<sub>x</sub> emitidos, para esto existen 2 caminos fundamentales: evitar las altas temperaturas y el tiempo de residencia de la mezcla en la alta temperatura.

Casi todos los métodos de reducción de NO<sub>x</sub> se basan en bajar la temperatura de la combustión con el mismo tiempo de residencia en esa temperatura. Es posible alcanzar temperaturas más bajas quemando el combustible más lentamente y realizando la combustión en varias etapas.

También se puede producir menos NO<sub>x</sub> reduciendo la cantidad de nitrógeno para reaccionar, lo que se puede lograr utilizando menos aire para la combustión. Sin embargo, es posible lograr buenos resultados sin disminuir la cantidad de aire de alimentación recirculando los gases de escape para diluir la mezcla de combustible y

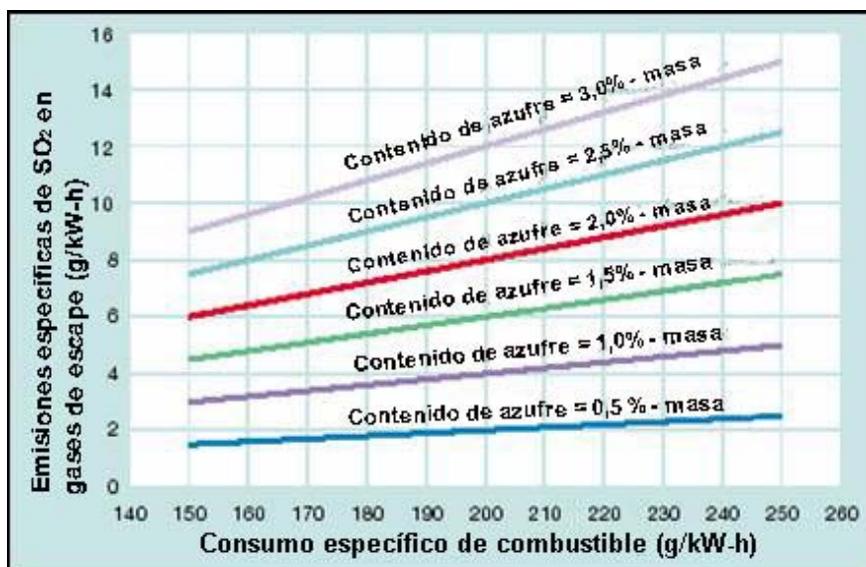
aire en la cámara de combustión, lo que tiene un efecto de reducción basado en que a mayor concentración de  $N_2$  en relación al  $O_2$  se producen menos ppm de NO (de acuerdo a referencia 9 de página 90). Sustentándose en la afirmación anterior y realizando una comparación de la composición del aire atmosférico con la de los gases de escape se tiene lo siguiente: el aire tiene una relación  $N_2 = 3,7 \cdot O_2$ , mientras que estos compuestos en los gases de escape están en relación  $N_2 = 5,8 \cdot O_2$ , con lo cual se concluye que los gases de escape tienen una concentración promedio mayor de  $N_2$  y, por lo tanto, se producirá menos NO en los motores diesel lentos. Es en estos principios en los que se fundamenta el sistema EGR que se detalla en la página 42.

Ante todos los métodos de reducción de contaminantes se debe tener presente que una variación de más o de menos  $10^\circ C$  puede causar una reducción en la eficiencia térmica de entre un 37% a un 40%, lo que representa un 7,5% de aumento en los costos del petróleo.

### ➤ Óxidos de azufre ( $SO_x$ ).

Las 2 principales fuentes de óxidos de azufre son la combustión del carbón y del petróleo, el que contiene cantidades variables de azufre dependiendo de qué derivado del petróleo se trate y de donde provenga (para mayor información ver el punto 3.4 en la página 56). Las emisiones producto del uso del carbón como combustible son importantes pero tienden a disminuir y, debido a que este producto ya no se utiliza en embarcaciones, las emisiones provenientes de él son sólo función del diesel usado.

De las emisiones de  $SO_x$ , un 95% son  $SO_2$  y el restante 5% son  $SO_3$ , por lo que la tabla 3-2 se ha realizado teniendo en cuenta sólo el primero de estos gases.



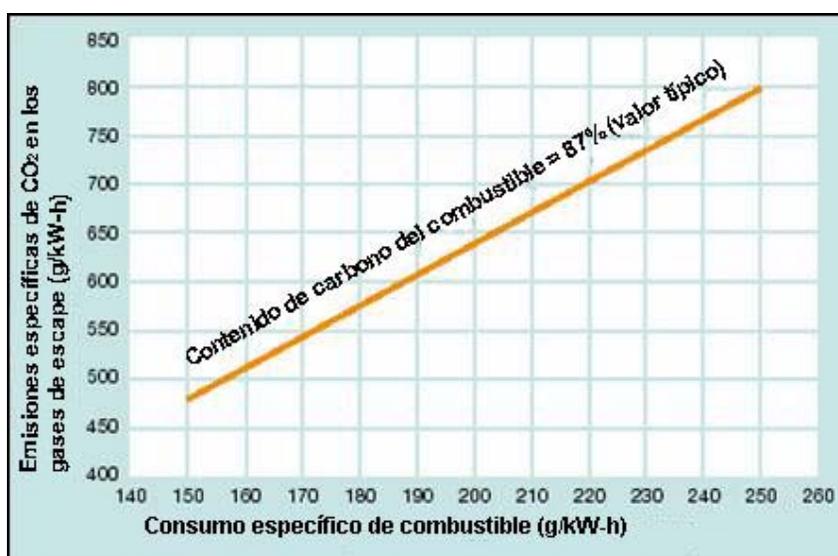
**TABLA 3-2:** emisiones de  $SO_2$  en relación al % de azufre del combustible (ref. 13).

➤ **Monóxido de carbono (CO).**

En motores diesel de carrera larga es función de la insuficiente cantidad de aire, esto es una relación pobre aire – combustible, y también es función de temperaturas de combustión bajas. Las emisiones de este gas son pequeñas debido a la alta relación aire – combustible por lo que no se han desarrollado métodos para evitar su formación.

➤ **Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).**

Depende del porcentaje de carbono que contienen los combustibles y del consumo del motor, el carbono es entre un 83 y un 87% del total de compuestos del petróleo. Las emisiones de CO<sub>2</sub> teniendo como base un combustible con 87% de carbono son las que se muestran a continuación.



**TABLA 3-3:** emisiones de escape de CO<sub>2</sub> de acuerdo al consumo específico de combustible (ref. 13).

➤ **Hidrocarburos (HC).**

La cantidad emitida depende del tipo de combustible, en los motores diesel de carrera larga de 2 tiempos hasta 300 ppm no son quemadas. Su formación en la cámara de combustión depende principalmente de la combustión incompleta debido al exceso de aire, a una temperatura local baja y también a que la mezcla aire – combustible es baja y en menor medida a la evaporación de combustible y lubricante no quemado, esta evaporación es mayor en combustibles livianos (LFO) que en los pesados (HFO).

En general las emisiones de hidrocarburos son bajas en los motores diesel al compararlos con otras fuentes como resultado de la buena eficiencia de estas máquinas.

➤ **Material particulado.**

Se origina por la combustión de combustible y de aceite con alto índice de cantidad de cenizas, así como también por depósitos en la cámara de combustión y en el sistema de gases de escape.

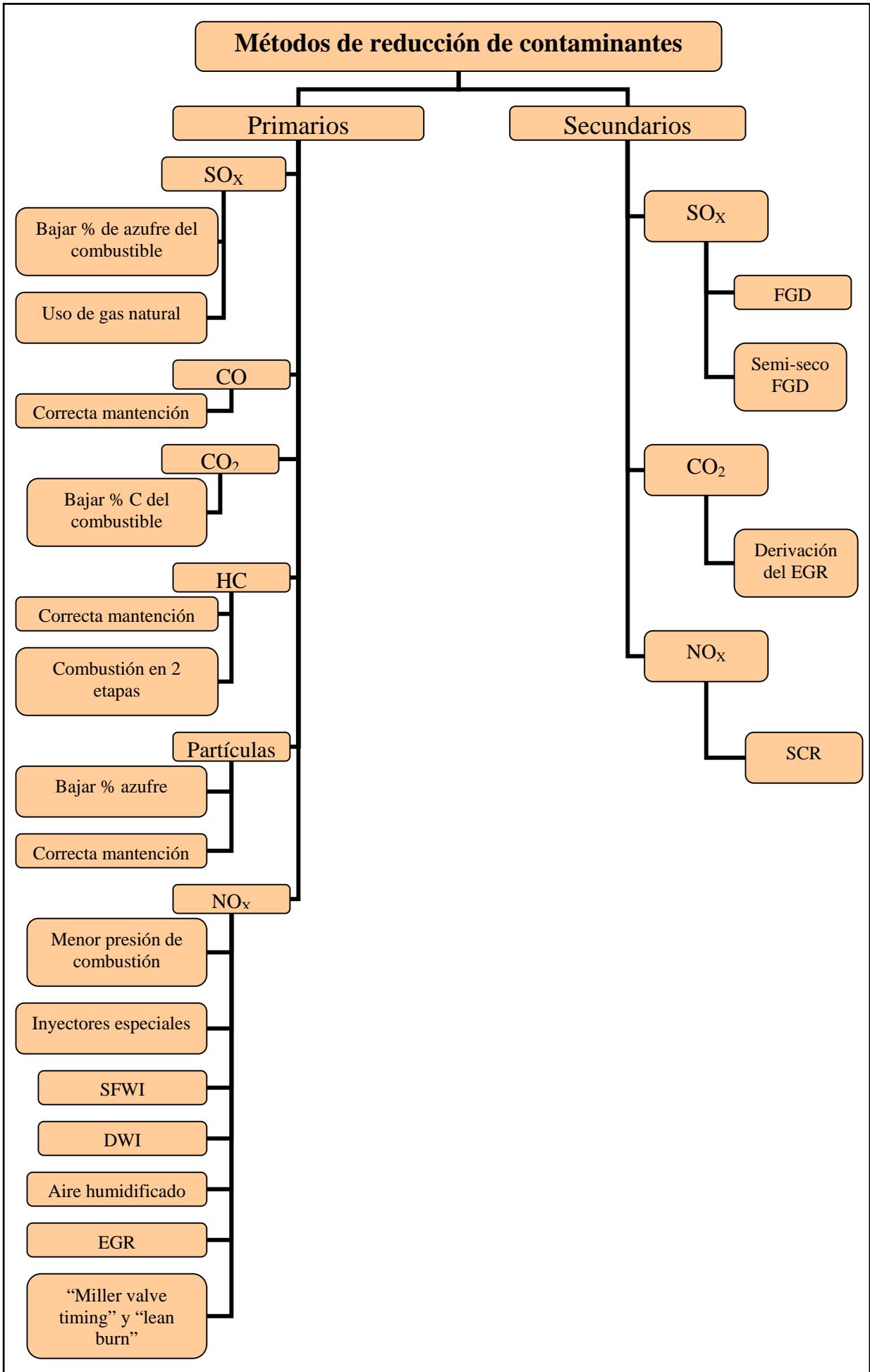
El material particulado que más se produce es el hollín, que es provocado en las zonas ricas en combustible como lo es la salida del inyector. Una parte de este hollín sobrevive al proceso de la combustión y no es oxidado, absorbiendo a los hidrocarburos que provienen del combustible y del lubricante. Las partículas además crecen por la oxidación de algo de azufre del combustible además de la adición de agua. Los combustibles pesados (HFO) que se usan en motores marinos contribuyen considerablemente con la emisión de partículas, típicamente más del 50% de la masa de partículas consiste de componentes de cenizas originados por estos combustibles.

### **3.1.2 Métodos de reducción de contaminantes.**

Para reducir las emisiones desde los motores diesel marinos existen dos caminos: métodos primarios y métodos secundarios. Es generalmente preferible aplicar métodos primarios para reducir las emisiones atmosféricas en sus fuentes en vez de tratar de removerlos de los gases de escape.

De lo anterior se concluye que el método primario tiene el objetivo de **reducir** la cantidad de contaminante formado durante el proceso de combustión, mientras que el secundario **remueve** al contaminante desde el gas de escape mediante un tratamiento en el recorrido de salida hacia la atmósfera. En la tabla 3-4 se aprecia un diagrama que presenta los métodos primarios y secundarios que existen para reducir o remover los distintos compuestos contaminantes.

Cabe hacer notar que los límites que establece el Anexo VI del MARPOL 73/78 serán tratados en el capítulo correspondiente al análisis de esta normativa y no se hará mención a ellos en este capítulo.



**TABLA 3-4:** métodos de reducción de contaminantes.

### 3.1.2.1 Métodos primarios.

Serán estudiados de acuerdo al contaminante que se desee remover.

#### ➤ **Óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>).**

En base a las afirmaciones antes realizadas respecto al funcionamiento de los motores diesel marinos y la producción de estos óxidos existen una serie de métodos para reducir sus emisiones, casi todos empíricos ya que la química que interviene en el proceso de la formación de los NO<sub>x</sub> resulta compleja y aún está abierta a discusión (ref. 14). A continuación se presentan los métodos primarios de reducción de NO<sub>x</sub>.

1. Reducir la presión de combustión mediante el retardo de la inyección del combustible baja la temperatura, pero también baja los rendimientos del motor, lo que conduce a un consumo más alto por lo que es sólo un método teórico y poco realizable en la práctica.
2. El uso de inyectores especiales con toberas especiales que permitan una inyección más pulverizada, así como la intensidad de la inyección tienen un gran impacto en la generación de NO<sub>x</sub>, humo y en la emisión de hidrocarburos. MAN B&W realizó pruebas con un motor diesel al 90% de la carga, dando los siguientes resultados:

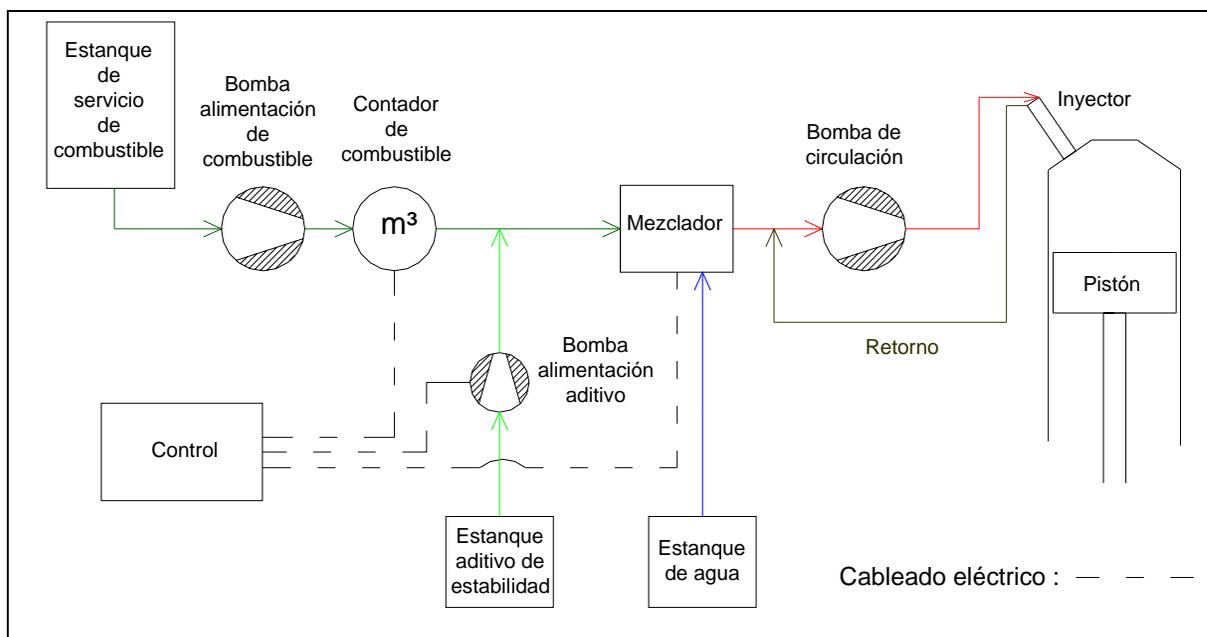
Tipo de tobera	Emisiones de NO <sub>x</sub> en ppm
Tobera de combustible normal	1.594
Tobera de combustible de 6 agujeros	1.494
Tobera de combustible "descendiente"	1.232

**TABLA 3-5:** emisiones del motor K90MC del fabricante MAN B&W al 90% de la carga con diferentes tipos de toberas (ref. 14).

3. También existen "métodos húmedos" de reducción de NO<sub>x</sub>, se conocen 3:
  - 3.1 el uso de un combustible emulsificado, que también se conoce como SFWI por su nombre en inglés. Que un combustible sea emulsificado quiere decir que es inyectado ya mezclado con una cierta cantidad de agua, de estos tres éste es el de construcción más simple,
  - 3.2 inyección directa de agua en la cámara de combustión mediante una tobera diferente a la de combustible, método que se conoce como DWI, y

**3.3** la humidificación del aire de alimentación que puede ser agregando agua o vapor en el enfriador del aire o en el turbo sobrealimentador.

**3.1** MAN B&W Diesel lleva un largo periodo de tiempo experimentando con combustibles emulsificados, método que se conoce por su abreviación en inglés como SFWI, que quiere decir: *stratified fuel – water injection*, concluyendo que un 1% de agua podría reducir hasta en un 15% los  $\text{NO}_x$ . El mismo fabricante de motores ha concluido que un motor estándar permite un 15% de agua a máxima carga, lo cual es posible gracias a la eficiencia volumétrica de la bomba inyectora. La misma empresa ha probado relaciones agua : combustible de hasta 50 : 50 con el mismo o similar impacto sobre la reducción de  $\text{NO}_x$  que con una adición de 15% de agua, además de que el motor debería sufrir modificaciones. Con el mismo método Wärtsila Sülzer ha logrado reducir las emisiones de este gas entre un 20% y un 30% en comparación con el uso de un combustible común, pero se debe destacar que en relación a este tema las diferentes empresas aún se encuentran en un periodo de pruebas por lo que no existen verdades absolutas al respecto.

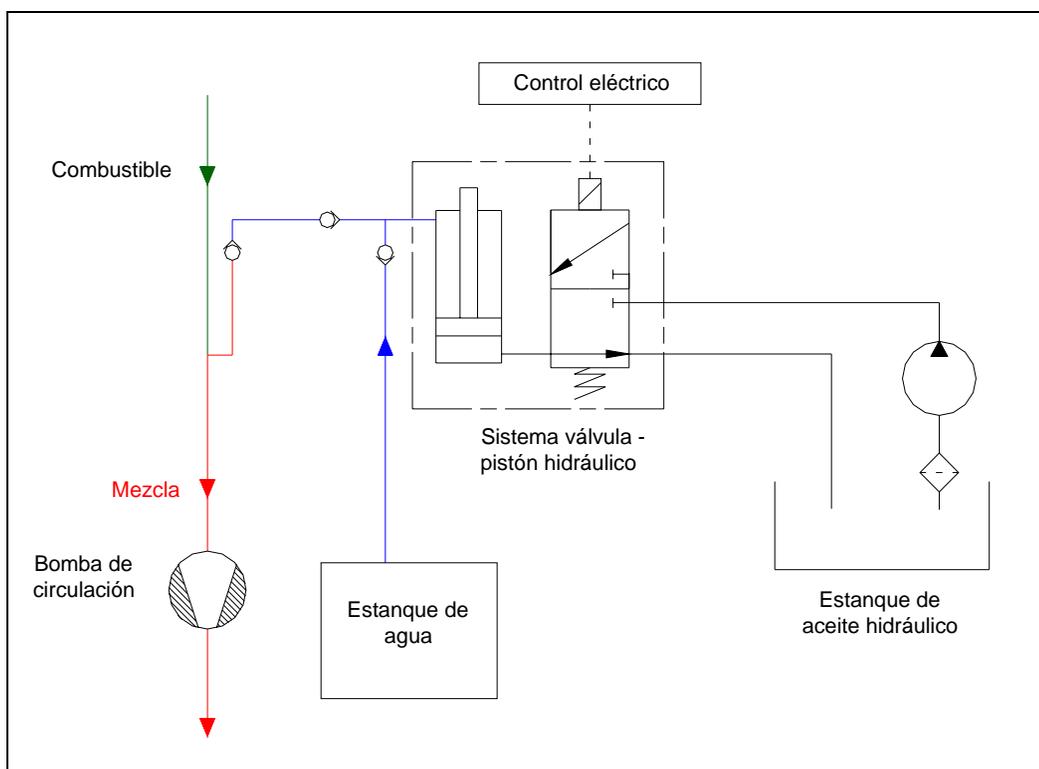


**FIGURA 3-4:** circuito de inyección de un combustible emulsificado con agua (ref. 14).

Como se aprecia en la figura anterior la mezcla combustible – agua es realizada antes de que el flujo de retorno desde el inyector se conecte al sistema alimentador de combustible para poder controlar de una manera más eficaz el flujo de agua, el que también puede ser controlado mediante un monitoreo continuo de los  $\text{NO}_x$  en el escape.

La inyección segregada y estratificada de agua y combustible es desde la misma tobera, aunque han llegado a ella desde caminos diferentes. El efecto de la adición del agua sobre el combustible trae consigo una disminución del gran calor latente de evaporación (cantidad de calor necesaria para producir un cambio de fase) y el calor específico del agua (cantidad de calor necesaria para aumentar en un grado la temperatura de una unidad de masa de una sustancia). Se cree que la temperatura de combustión baja por estos efectos en la cámara de combustión, lo cual contribuye a una disminución de la generación de  $\text{NO}_x$ .

El agua y el combustible son inyectados por el mismo inyector, lo que se controla mediante un pilotaje hidráulico con válvula solenoide, que está diseñado como se indica.



**FIGURA 3-5:** sistema mezclador del método SFWI (ref. 14).

En la figura se ve que el pistón tiene la particularidad que es accionado por la presión ejercida sobre su cara inferior por el sistema hidráulico, pero por su extremo opuesto entrega agua.

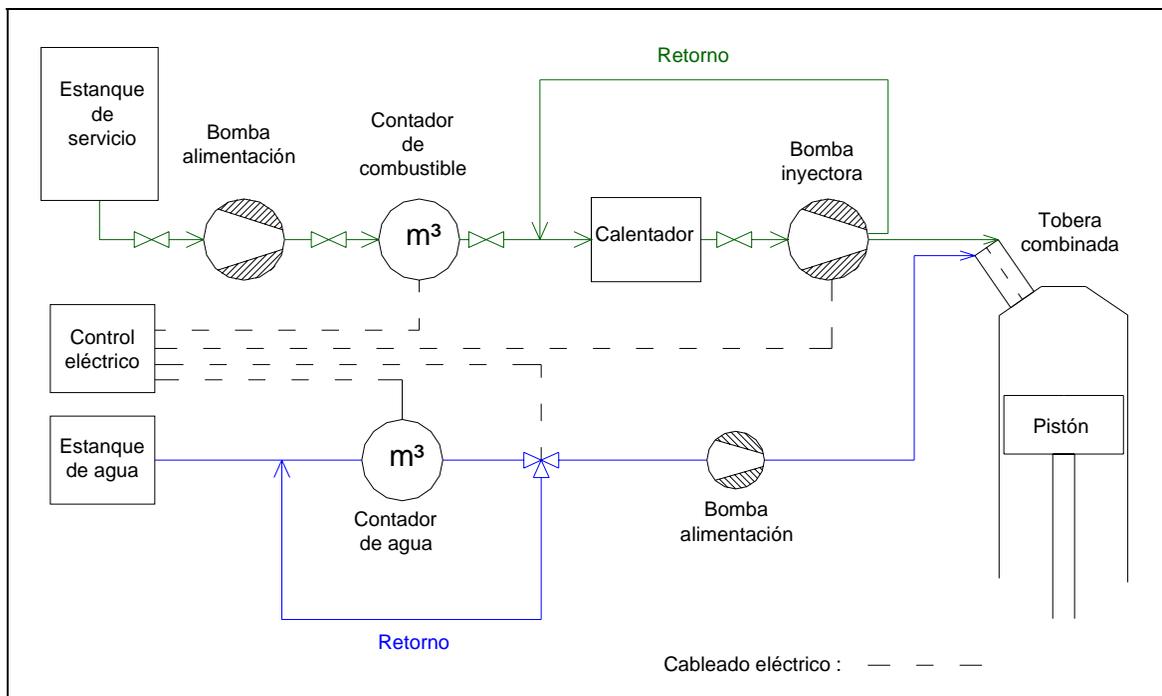
El sistema está regulado para que el agua sea inyectada a una presión mayor que la del combustible, con lo cual presiona al combustible deteniendo su paso antes de que llegue a la bomba de circulación. Es por esto que el agua y el combustible son inyectados al cilindro con el siguiente orden: combustible – agua – combustible.

**Un test realizado a un sistema que opera con este método de reducción de NO<sub>x</sub> arrojó las siguientes conclusiones:**

- El sistema trabajó en una condición estable durante toda la prueba.
- Cuando hubo anomalías los sistemas de protección funcionaron correctamente.
- El NO<sub>x</sub> se redujo en una cantidad proporcional al agua inyectada.
- Los componentes del motor no tuvieron inconvenientes.

**3.2** La inyección directa de agua (DWI) reduce las emisiones típicamente entre un 50 a 60%, lo que para un combustible marino (MDO) son emisiones entre los 4 y 6 g/kWh de NO<sub>x</sub> y para combustibles pesados (HFO) emisiones entre 5 y 7 g/kWh, sin afectar adversamente la potencia de salida del motor. Su mejor rendimiento es logrado cuando se utilizan combustibles bajos en contenido de azufre y esta tecnología no se recomienda para combustibles con contenido de azufre sobre 3%.

Los sistemas de seguridad incorporados en el caso de corriente de agua excesiva cierran automáticamente o bien, fugan la corriente y el motor puede operar sin inyección de agua sin ningún problema o, si es requerido, puede ser transferido manualmente al modo operacional "sin agua" a cualquier carga. La red de agua está completamente separada de la del sistema del combustible. Este sistema ocupa muy poco espacio y puede ser instalado en cualquier instalación. El agua y el combustible son inyectados típicamente en una proporción agua : combustible - 0,4 : 0,7.



**FIGURA 3-6:** circuito de inyección directa de agua DWI.



**FIGURA 3-7:** tobera combinada para inyección directa de agua (ref. 13).

**3.3** El otro sistema “húmedo” al que Wärtsila ha llamado CASS (*Combustion Air Saturation System*) consiste en introducir el aire de alimentación humidificada al cilindro, esto se realiza agregando agua presurizada después del turbo soplador. Debido a la alta temperatura del aire comprimido el agua ingresa al cilindro evaporada, bajando la temperatura de combustión y, por lo tanto, la formación de  $\text{NO}_x$ , que se ha reducido en un 50% con un consumo de agua de alrededor de 2 veces el consumo de combustible. Este método de reducción ha sido probado en motores Wärtsila 20, 32 y 46, entregando mejores resultados que el sistema DWI, lo que llevó a que el año 2003 fuera encargada la primera instalación piloto de este tipo.

**4.** Otros 2 métodos que ayudan a la reducción de la emisión de los óxidos de nitrógeno son:

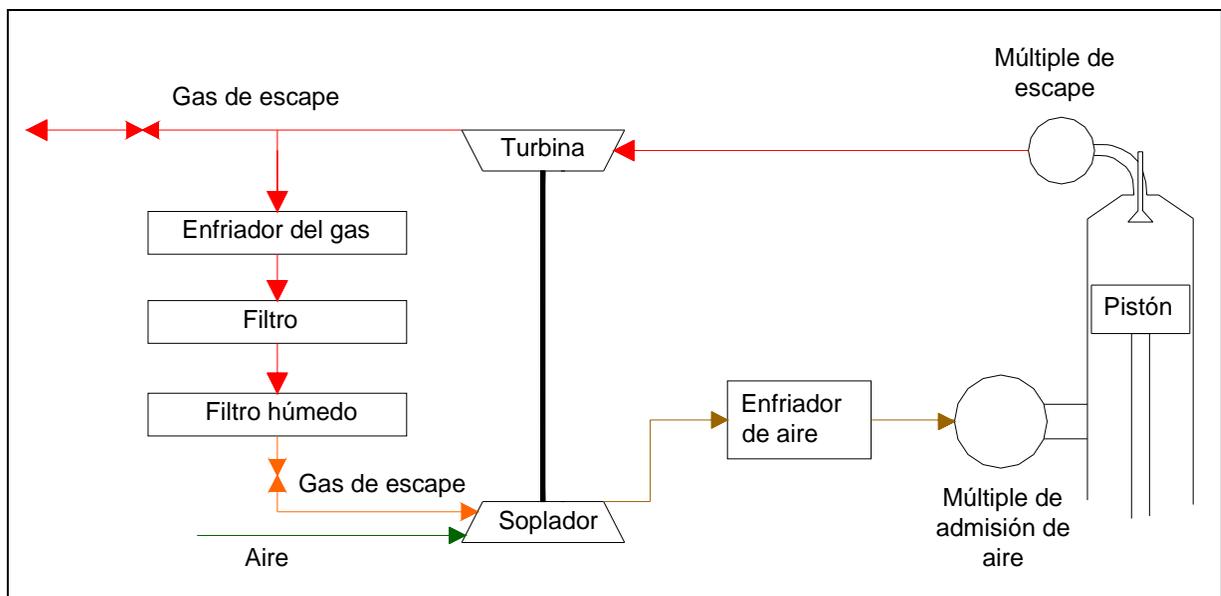
**4.1** la recirculación de los gases de escape, que se conoce como EGR por sus siglas en inglés, que significa *exhaust gas recirculation*, y

**4.2** la reducción del aire de alimentación.

**4.1** La EGR puede ser aplicada para regular la entrada de aire y con esto reducir las emisiones de  $\text{NO}_x$ , esta técnica es muy utilizada en los automóviles. Como se ve en la figura 3-8, después de haber pasado por la turbina del turbo sobrealimentador una parte de los gases son enfriados, filtrados y se les extrae las partículas de agua para a continuación ser llevados al soplador, por lo que ingresan al motor mezclados con el aire de alimentación. El efecto de este método es, en parte, debido a una reducción de la temperatura en la zona de combustión porque el aire de admisión tendrá menor cantidad de oxígeno, además de agua y dióxido de carbono ya que estos 2 constituyentes tienen un alto calor específico, con lo que se reduce la temperatura de combustión trayendo consigo una disminución en la generación de

los óxidos de nitrógeno. Además de que la mezcla que ingresará tendrá menos concentración de  $O_2$  en relación al  $N_2$  en comparación de que si fuese aire puro, lo que provoca menos ppm de NO.

Con este método de reducción se consiguen disminuir los óxidos de nitrógeno, pero se aumenta el monóxido de carbono y las partículas, así como levemente el consumo de combustible. Estas emisiones han sido disminuidas con un catalizador en motores bencineros, no así en los diesel ya que estos pueden oxidar el  $SO_2$  a  $SO_3$  y el catalizador podría quedar desactivado. Por lo que si el objetivo es sólo la reducción de los  $NO_x$  este método es muy efectivo, no así si además se desea disminuir el CO y el material particulado.



**FIGURA 3-8:** sistema de recirculación de los gases de escape, EGR (ref. 14).

**4.2** La reducción del aire de alimentación hasta ahora existe sólo como un método teórico y no se ha realizado porque, si bien, provocaría una disminución de los óxidos de nitrógeno emitidos, se podría producir una combustión incompleta del combustible, lo que traería consigo mayores emisiones de hidrocarburos y de material particulado, además de monóxido de carbono (ver figura 3-3).

5. Wärtsila Sulzer ha desarrollado otros dos métodos. El primero de ellos es el método "*Miller valve timing*", que se refiere a optimizar el momento del cierre de la válvula de admisión, lo que disminuye las temperaturas de combustión en el cilindro llevando a una reducción de la formación de  $NO_x$  en alrededor de un 35% elevando levemente el consumo específico del combustible. Este sistema existió sólo en etapa de pruebas, las que se realizaron a comienzos de 1990, pero han sido desplazadas por los mejores resultados de otros sistemas de la misma empresa.

Otro método desarrollado por esta empresa es “*lean – burn*”, que consiste en mezclar el aire de alimentación con gas natural antes de la entrada a los cilindros, lo cual resulta en una temperatura de combustión más baja, además de que aumenta la relación aire – combustible reduciendo eficientemente la producción de NO<sub>x</sub>, este método es para motores con encendido por chispa o para motores de ciclo combinado gas natural – petróleo, lo cual ha limitado su uso en la industria naviera.

➤ **Óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>).**

El método primario es el más efectivo y de fácil aplicación para la reducción de la emisión de óxidos de azufre, este consiste en utilizar combustibles con bajo contenido de azufre, ya que la formación de SO<sub>x</sub> es una relación casi directamente proporcional con la cantidad de azufre en el combustible empleado en la combustión y, en segundo lugar, casi despreciable, con el azufre del lubricante. Otro método primario es usar gas natural, combustible que contiene una cantidad despreciable de cenizas.

➤ **Monóxido de carbono (CO).**

Los métodos primarios para que estas emisiones sean bajas son básicamente realizar una mantención normal y mantener el perfil de operación de la maquinaria.

➤ **Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).**

Como se dijo anteriormente las emisiones de este compuesto dependen casi exclusivamente de la cantidad de carbono que contenga el combustible, por lo que el método primario de reducción de CO<sub>2</sub> es consumir combustibles de menor contenido carbonoso, pero esto implica un cambio del combustible utilizado y siempre será el carbono el mayor componente de los combustibles fósiles.

➤ **Hidrocarburos (HC).**

Al igual que lo que ocurre con el monóxido de carbono, las emisiones de hidrocarburos son bajas debido a la alta relación aire – combustible que hay en los motores diesel, por lo que no se ha invertido tiempo ni dinero en el desarrollo de métodos para evitar su formación. Por lo mismo, los métodos primarios fundamentales para mantener estas emisiones bajas son:

1. Principalmente realizar una correcta mantención y mantener un buen perfil de operación de la maquinaria.

2. También es posible evitar la formación de HC mediante la realización de la combustión en 2 etapas para que se realice de forma completa: consiste en realizar una primera etapa de la combustión rica en combustible y la segunda rica en aire, esto se conoce en los motores como carga estratificada, esta técnica se ha utilizado en motores de tipo otto con irregular éxito, aunque se sigue perfeccionando y en motores diesel se encuentra en etapa de ensayos.

➤ **Material particulado.**

El método primario para reducir el material particulado es el mismo que para evitar la formación de dióxidos de azufre, este es utilizar combustibles de bajo índice de azufre o también el uso de gas natural como combustible. También se reducen estas emisiones mediante una correcta mantención y operación de la maquinaria, evitando la formación de partículas tales como cenizas, hollín y humo.

**3.1.2.2 Métodos secundarios.**

➤ **Óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>).**

La reducción catalítica selectiva (SCR, que quiere decir *selective catalytic reduction*) es el único método secundario que puede reducir los niveles de NO<sub>x</sub> y lo hace entre un 85 y un 95%. Este contaminante se reduce a productos menos ofensivos como lo son el nitrógeno y el vapor de agua, además de que algo de hollín e hidrocarburos también son reducidos por oxidación en el reactor. Este método es el más efectivo, pues reduce los niveles de NO<sub>x</sub> fácilmente hasta 2 g/kWh.

En este método secundario los gases de escape pasan primero a través de una o varias capas de un catalizador especial (catalizador es una sustancia que produce una reacción química y que no se altera químicamente durante la reacción), generalmente urea, que se inyecta a una temperatura entre 290 y 450° C para que posteriormente la mezcla se transforme en amoníaco (NH<sub>3</sub>), una parte, y la otra salga a través del conducto de escape. El límite menor de temperatura con que funciona este sistema es determinado por el contenido de azufre del combustible: a temperaturas bajo los 270° C el amoníaco reacciona con los óxidos de azufre y se deposita como sulfato amónico y a temperaturas excesivamente altas, alrededor de los 450° C, el catalizador no cumple correctamente su función, condición que se debe tener muy presente ya que es común encontrar motores diesel en los que esta temperatura es sobrepasada.

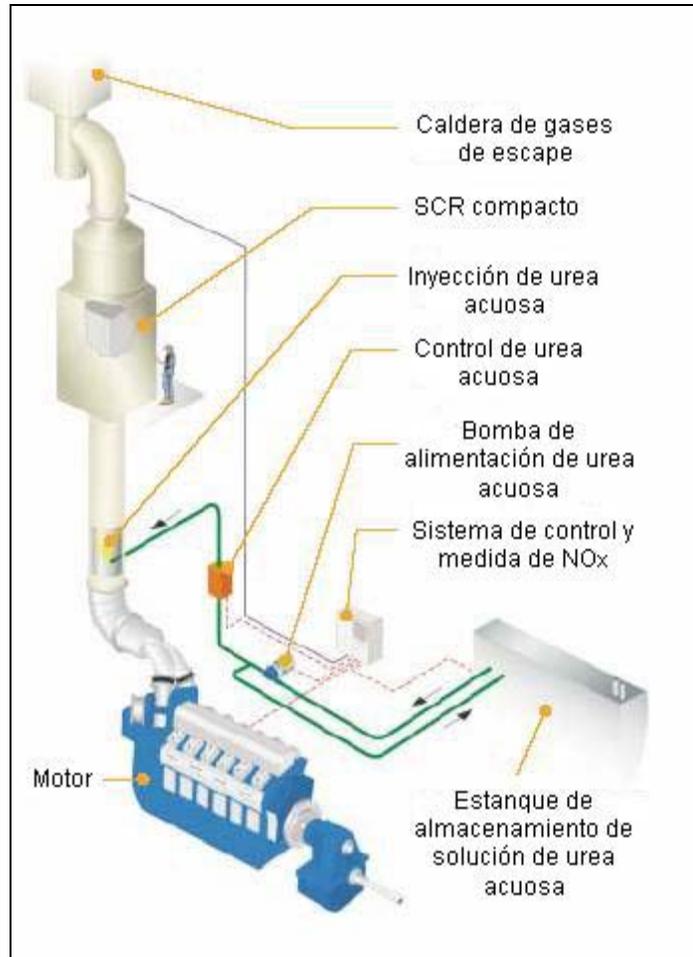
Cuando las condiciones del sistema están fuera del área que puede ser controlada por este reactor existe un *by – pass* a menos que se instale un sistema de control de temperatura más integral. Esto ocurre, por ejemplo, cuando el motor trabaja a menos de un 30% de la carga, caso en que el sistema no trabaja correctamente.

El gas que se evapora es controlado mediante un computador que envía al gas a la sala de máquinas por una cañería doble para prevenir las fugas de amoníaco, que también es contaminante. El amoníaco se guarda generalmente como un gas-líquido a una presión entre 5 y 10bar (tiene una presión de ebullición de 8,6bar) en un estanque de almacenamiento en cubierta protegido para prevenir su recalentamiento. De lo anterior se desprende que este equipo consiste de un reactor con varias capas de catalizador, un estanque de almacenamiento y dosificación para el agente y un sistema de control. Este sistema puede utilizar: amoníaco en estado líquido, amoníaco libre de agua bajo presión, una solución acuosa de amoníaco a presión atmosférica o en forma de urea ( $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ ) transportada de forma seca y disuelta en agua antes de su utilización.

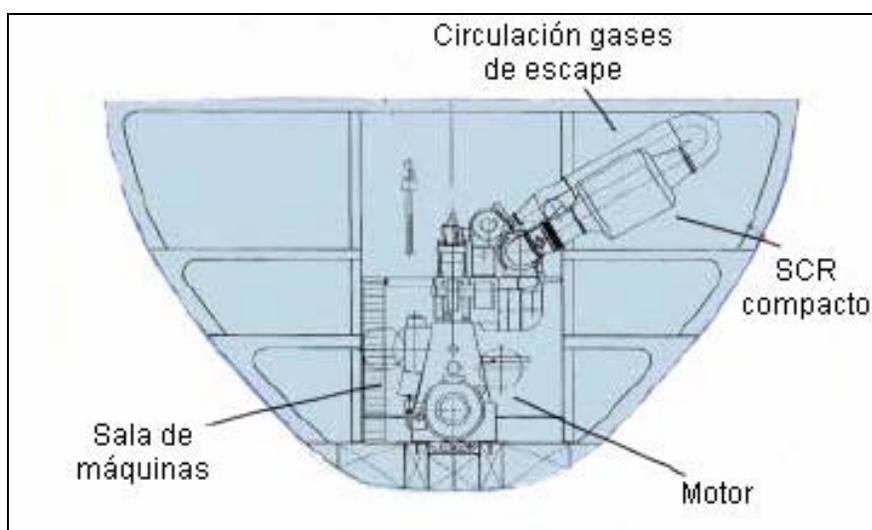
El catalizador tiene una duración que va entre 3 y 5 años para combustibles líquidos y más si trabaja con gas. El tipo de agente utilizado y su consumo, que depende de la carga del motor, determinarán el costo del catalizador, que dependerá de los límites de  $\text{NO}_x$  establecidos. El consumo de la urea es alrededor de 15 g/kWh.

Para el uso de este elemento se deben tener los siguientes cuidados:

- Se necesita un mínimo de temperatura para evitar la formación de sales en sus elementos.
- Algunos combustibles contienen metales que pueden actuar como “venenos catalizadores” y desactivar al catalizador.
- En el SCR compacto se debe instalar un sistema soplador de hollín, especialmente cuando se opera con combustibles líquidos.



**FIGURA 3-9:** unidad SCR en comparación al tamaño de una persona (ref. 13).



**FIGURA 3-10:** instalación de una unidad de reducción catalítica tipo, con respecto a su posición en un buque con motor de velocidad lenta (ref. 13).

➤ **Óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>).**

En caso de que no sea posible usar un combustible bajo en porcentaje de azufre o cambiar durante la navegación a uno de menor concentración, se deberá utilizar un método secundario de tratamiento de óxidos de azufre que puede ser alguno de los que se nombran a continuación aunque todos estos han sido usados sólo en plantas estacionarias.

La unidad desulfuradora húmeda del gas en la chimenea FGD remueve principalmente el SO<sub>2</sub>. Otra posibilidad es utilizar un equipo que además de remover el SO<sub>2</sub> remueva el material particulado, este equipo se conoce como semi – seco FGD.

Otros procesos funcionan haciendo pasar el dióxido de azufre por distintas “trampas químicas”, como por ejemplo de carbonato cálcico. También está en estudio el empleo de agua de mar como trampa de SO<sub>2</sub>, ambos compuestos reaccionan produciendo sulfato, después de lo cual esta agua es retornada al océano, principal reservorio de azufre del planeta en forma de sulfato inorgánico.

➤ **Monóxido de carbono (CO).**

En los motores bencineros se utilizan catalizadores para disminuir las emisiones de CO, lo que no se recomienda para motores diesel de 2 tiempos ya que debido al uso de combustibles que contienen azufre el catalizador podría oxidar una gran cantidad de SO<sub>2</sub> a SO<sub>3</sub> y el catalizador podría quedar desactivado. Es por esto que este método no es útil en motores diesel de 2 tiempos y es el motivo por el cual no existen métodos secundarios efectivos y comprobados que reduzcan estas emisiones.

➤ **Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).**

Un método similar al EGR puede ser utilizado para extraer al CO<sub>2</sub> desde los gases de escape. Tal como en ese sistema los gases son enfriados, filtrados y extraídas las partículas de agua y luego, en vez de ser llevados al soplador como ocurre en el EGR, son liberados a la atmósfera.

➤ **Hidrocarburos (HC).**

El uso de un convertido catalítico de tres vías es común en los motores de tipo otto, se llaman así porque eliminan las emisiones de monóxido de nitrógeno, monóxido de carbono e hidrocarburos que son reducidos a N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O. Pero no son de gran utilidad en motores de gran tamaño porque el convertidor resulta poco eficaz con temperaturas de funcionamiento sobre 300° C.

➤ **Material particulado.**

El control de la emisión de partículas es un tema de gran complejidad, ya que antes de crear un sistema recolector se deben estudiar las características de las partículas que se desea remover, lo que incluye su comportamiento físico y, lo más importante, su tamaño. Este análisis da como resultado equipos voluminosos y de gran costo operacional, el que se puede ampliar cuando son utilizados agentes reductores especiales. Estos factores explican que la mayoría de los sistemas que se encuentran en funcionamiento y en etapa de estudio sean para plantas estacionarias y no móviles, como lo es una embarcación. Es por esto que los métodos secundarios están en funcionamiento en tierra o bien son prototipos. Para mayor información se recomienda ver el texto “Ingeniería Ambiental”, que corresponde al número 11 de la bibliografía.

### **3.1.3 Concepto de “motor ambiental”.**

Este concepto ha aparecido motivado por las nuevas reglamentaciones internacionales y por la cada vez mayor conciencia mundial de que este problema debe ser abordado por autoridades, armadores, astilleros, fabricantes de insumos para buques. En este último grupo se encuentran las empresas, que motivadas por las nuevas reglamentaciones y por sus ganas de posicionarse en el mercado con sus nuevas tecnologías están invirtiendo tiempo, ganas y dinero en investigaciones para crear máquinas cada vez más “limpias”. En este sentido ha aparecido el novedoso concepto del “motor ambiental”, el que combina tecnologías innovadoras en cuanto a eliminar dentro de lo posible humos visibles y minimizar las emisiones de dióxido de carbono, azufre y óxidos de nitrógeno provenientes del proceso de combustión que ocurre en los motores.

Los “motores ambientales” creados por Wärtsila incluyen 3 sistemas para disminuir al máximo las emisiones, de los cuales dos ya fueron explicados: Inyección directa de agua (DWI) y el Reductor catalítico selectivo (SCR), los que sumados a un sistema basado en un motor controlado electrónicamente: *Common rail fuel injection*, conforman un motor más amigable con el medio ambiente.

El sistema *Common rail fuel injection* está disponible para motores de 2 y de 4 tiempos, siendo ambos diferentes en su funcionamiento, pero proporcionan beneficios similares. Los beneficios que entrega este sistema son:

- Liberar humos menos visibles bajo cualquier condición de carga y velocidad.

- Una combustión superior lograda gracias a la mantención de la presión de inyección del combustible a un nivel óptimo directamente a través del rango de velocidad del motor, factor que influye en la producción de menos contaminantes por una combustión más completa.
- Velocidades más bajas y estables, lo que es importante en motores de 2 tiempos que casi siempre están conectados a propulsores de paso fijo y se pueden obtener velocidades del motor de hasta 10 rpm.
- Consumo de combustible menor en una parte de la carga. Las altas presiones de inyección permiten una perfecta atomización, lo cual trae consigo mayores eficiencias y menores emisiones.

Para reducir las emisiones de los óxidos de nitrógeno, que son los gases que más preocupan a la industria naval, los métodos más efectivos y que pueden ser utilizados juntos son el sistema recién nombrado, junto al DWI y al SCR, según Wärtsilä que al menos con su método SCR (ref. 13) ha obtenido mejores resultados en comparación con Kawasaki, que ha experimentado con el motor MAN 5S70MC (ref. 14), esto se puede apreciar en la tabla 3-6.

Kawasaki ha llegado a las siguientes conclusiones con respecto al uso de nuevas tecnologías reductoras de la emisión de  $\text{NO}_x$ :

- El retardo de la inyección de combustible, que es fácilmente aplicable, reduce las emisiones de  $\text{NO}_x$  en un 10% con un aumento en el consumo específico de combustible de un 3%.
- Mediante la utilización de la tobera del inyector del tipo *slide* se reducen las emisiones de  $\text{NO}_x$  entre un 20 a 30%. Aunque se debe tener en cuenta el incremento local de la carga de calor.
- El combustible emulsificado con agua en una relación de 50% reduce la emisión de este gas en un 35%. La efectividad de este método se debe a que se disminuye el valor calorífico de la combustión provocado por una temperatura de flama menor.
- El sistema EGR fue confirmado como el método más efectivo por Kawasaki. Lo anterior se debe a que se reduce la temperatura de flama producto de que se agrandó la relación teórica aire – combustible, lo que reduce la temperatura final. Recirculando un 28% de los gases de escape se redujo en un 69% las emisiones de  $\text{NO}_x$ , con un leve aumento en el consumo de combustible y en el humo producido por la combustión, sin embargo, se ajustó la presión máxima del motor lo que eliminó prácticamente todo el aumento del consumo de combustible y aumentó levemente la emisión de  $\text{NO}_x$ .

El sistema de alimentación de aire analizado fue ligeramente ensuciado, por lo que Kawasaki sugiere que son necesarias nuevas investigaciones y más pruebas de servicio a motores para asegurar que están protegidos contra la corrosión y la suciedad antes de aplicar este sistema a motores navales, que queman combustibles pesados con un alto índice de azufre.

- La combinación de varios métodos trajo consigo grandes reducciones en las emisiones de los NO<sub>x</sub>. Una combinación de toberas del tipo “descendiente”, 49% del combustible emulsificado con agua y 20% de recirculación de los gases de escape, por ejemplo, bajó las emisiones en un 81%, lo que fue el mejor resultado en las pruebas realizadas.

	<b>Kawasaki</b>	<b>Wärtsila</b>
<b>SFWI</b>	35%	30%
<b>DWI</b>	-	60%
<b>Tobera “descendiente”</b>	23%	-
<b>EGR</b>	69%	-
<b>SCR</b>	-	95%
<b>Combinación de métodos</b>	81%	-

**TABLA 3-6:** comparación de la reducción de emisiones entre dos empresas líderes.

### **3.2 Calderas.**

Una caldera es cualquier artefacto que genera vapor del agua a una presión mayor que la atmosférica, absorbiendo calor de los productos de la combustión de un combustible. Las calderas navales tienen por objeto generar el vapor necesario para el servicio de un buque. Las calderas navales se clasifican en 2 grandes grupos: las que son utilizadas exclusivamente para propulsar un buque y las que proporcionan el vapor para los servicios del buque: como cocina, calefacción de espacios para habitabilidad, calefacción de estanques, pito, etc.

Las emisiones procedentes de una caldera dependen fundamentalmente del tipo de combustible que se queme, proceso en el que se producen, principalmente, partículas sólidas y líquidas y gases más o menos tóxicos muy similares a los que se producen en la combustión de un motor diesel naval, ya analizado. La temperatura final alcanzada en un fogón de una caldera depende del calor de combustión, del peso de

los productos de combustión formados, de la razón de combustión y de la razón de pérdida de calor al medio ambiente. Cuando esta última es pequeña el equilibrio químico puede controlar la temperatura final de combustión. La temperatura que se alcanza en una caldera es alrededor de  $1.580^{\circ}\text{C}$  y aproximadamente un 10 a 20% del calor es perdido en el ambiente o en la atmósfera.

Para que exista una combustión apropiada por una libra de combustible (0,453 kg) se necesitan alrededor de  $225\text{ pies}^3$  ( $6,37\text{ m}^3$ ) de aire a la presión atmosférica estándar.

En la actualidad existen una gran variedad de tipos de caldera en cuanto al combustible que utilizan para la combustión, pero para buques las más adecuadas son, obviamente, las calderas que queman petróleo pesado o diesel debido a que estos combustibles presentan mayores facilidades para el almacenamiento y a la vez se usan en los motores para propulsión, generación de energía eléctrica e incineradores.

Las emisiones de las calderas que funcionan con combustibles fósiles (gas y petróleo) son importantes y similares a las que producen los motores de combustión interna. Estas emisiones pueden ser reducidas a través de una construcción más efectiva de quemadores y de las mismas calderas y por el uso de sistemas de control precisos.

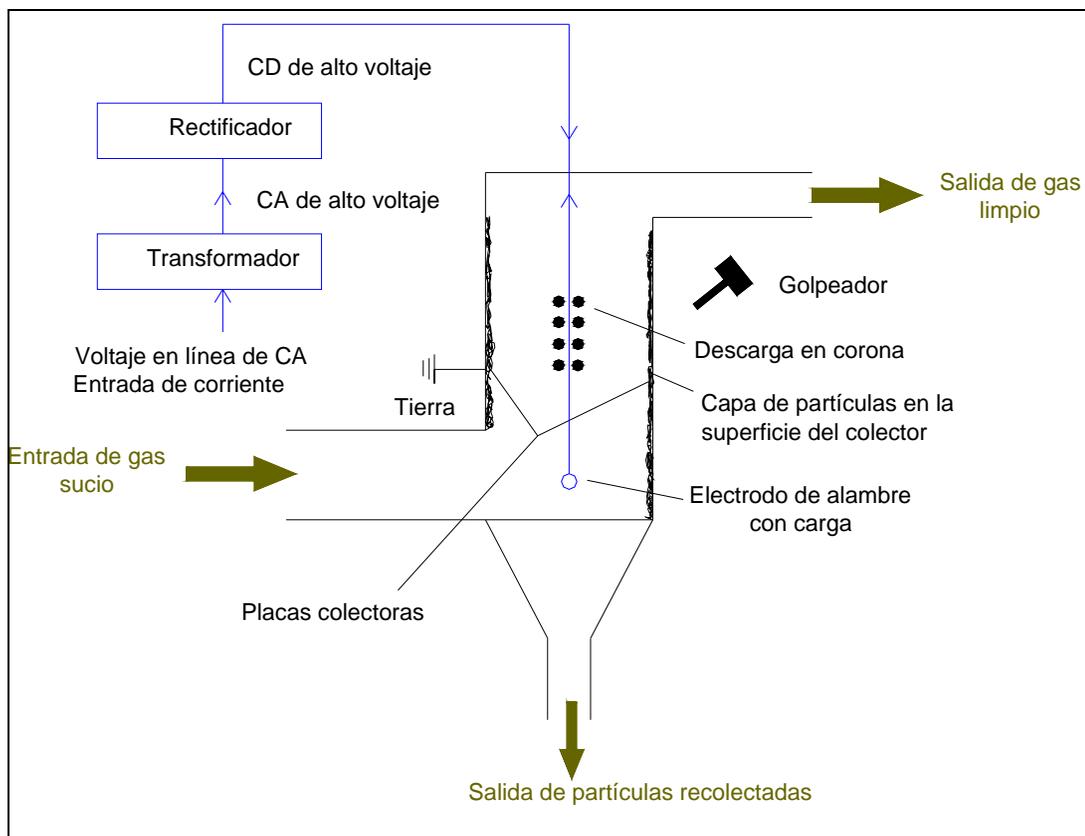
Los  $\text{NO}_x$  producidos por la combustión que sucede en una caldera pueden ser reducidos controlando el tiempo que demore la reacción y optimizando la estequiometría de las reacciones (la estequiometría es la ciencia que mide las proporciones según las cuales se deben combinar los elementos químicos). Las emisiones de CO pueden ser mantenidas bajas con una temperatura estable y suficientemente alta, esto se puede lograr utilizando robustos materiales refractarios para cubrir la cámara de combustión y extender la mezcla de combustión entre el aire y el gas de escape, las emisiones de este gas están siempre bajo los  $0,5\text{ g/kWh}$ , mientras que los hidrocarburos están típicamente bajo los  $0,072\text{ g/kWh}$ . El CO y el  $\text{NO}_x$  pueden ser minimizadas controlando el flujo de aire a la cámara de combustión lo que es posible lograr haciendo ingresar el aire en varias etapas. Métodos secundarios para reducir estos gases no son generalmente necesarios, pero en caso de serlos se puede utilizar el sistema de reducción catalítica selectiva (SCR).

Los  $\text{SO}_x$  dependen directamente del contenido de azufre que actúa como comburente, pero son generalmente bajos y no se requieren sistemas especiales para evitarlos. Este no es el caso del material particulado, que usan diferentes técnicas de acuerdo a las normas que se deben cumplir. Los elementos pueden ser un precipitador electrostático (ESP) cuando se necesita disminuir las concentraciones bajo  $0,18\text{ g/kWh}$ ,

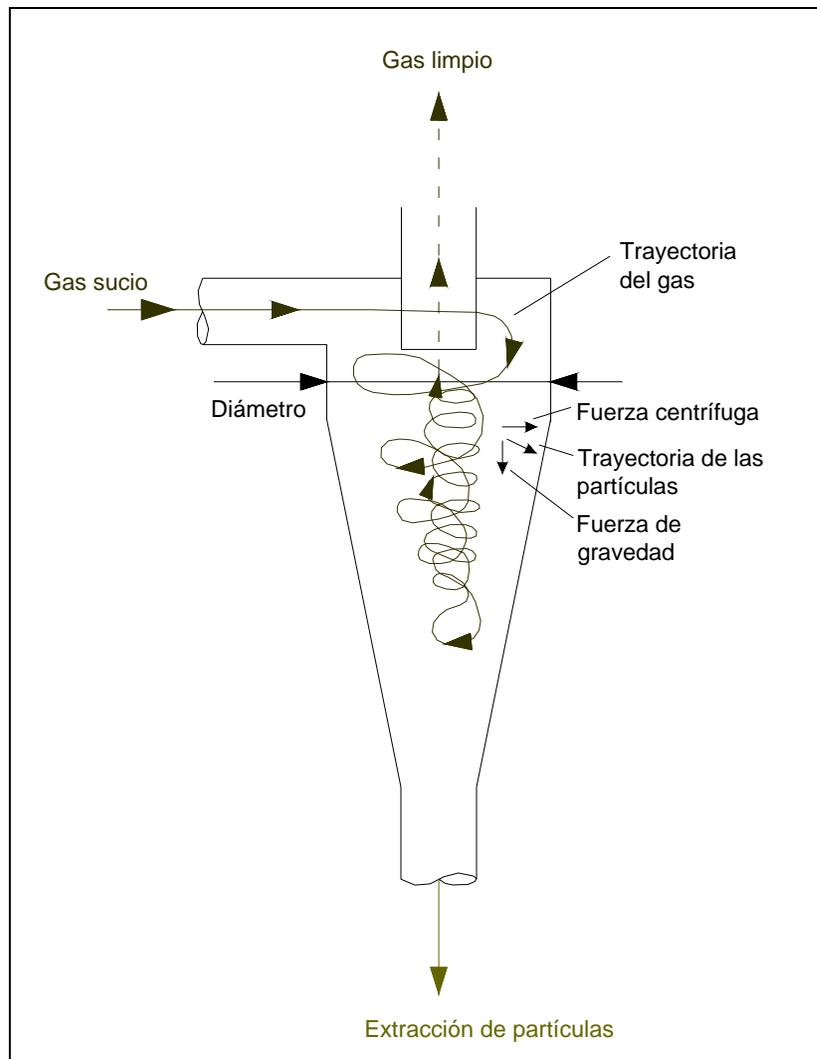
como el que se usa en los motores de combustión interna o cuando la normativa es un poco menos exigente se pueden usar el sistema de multiciclones, con lo que se obtienen emisiones de partículas de 0,72 g/kWh.

El ESP es un sistema que evita que las partículas salgan a la atmósfera provocando una diferencia de voltaje en su interior entre el electrodo y las placas colectoras, como se ve en la figura 3-11. El electrodo desprende electrones, en una descarga en corona, que se adhieren a las partículas cargándolas con iones de la misma polaridad que el electrodo y haciendo que el material particulado emigre hacia la superficie conectada a tierra.

El sistema de multiciclones se basa en dos principios: eliminar las partículas por la diferencia de densidad de éstas respecto a la del gas de escape y, por la fuerza centrífuga, que es necesaria para separar las partículas más pesadas de aquellas moléculas de gas que son más ligeras, como se ve en la figura 3-12.



**FIGURA 3-11:** precipitador electrostático elemental (ref. 11).



**FIGURA 3-12:** extracción de partículas en un multiciclón (ref. 11).

Combustible	LFO		HFO		Gas natural		Biomasa	
	mg/MJ	g/kWh	mg/MJ	g/kWh	mg/MJ	g/kWh	mg/MJ	g/kWh
CO	< 20	< 0,07	< 20	< 0,07	< 20	< 0,07	< 140	< 0,5
C <sub>x</sub> H <sub>x</sub>	< 7	< 0,03	< 13	< 0,05	< 7	< 0,03	< 20	< 0,07
NO <sub>x</sub>	< 60	< 0,18	< 235	< 0,9	< 50	< 0,2	< 90	< 0,32
SO <sub>2</sub>	< 10	< 0,03	< 500	< 1,8	-	-	< 20	< 0,07
Partículas	< 10	< 0,03	< 60	< 0,18	< 5	< 0,02	< 200	< 0,7

**TABLA 3-7:** compuestos emitidos desde el escape de las calderas (ref. 13).

### **3.3 Incineradores.**

El incinerador es una planta industrial en la que diversos tipos de residuos producidos a bordo son eliminados mediante la combustión. El proceso puede ser con o sin sistema de recuperación de calor, para motivos de la reducción de las emisiones es mejor que exista esta recuperación. En un buque el incinerador quema desperdicios del combustible producidos a bordo como líquido de sentinas, fango, combustible limpio y también sólidos inflamables tales como desperdicios de ropa, derivados de madera, papel, fango duro.

La quema de residuos como los antes nombrados produce más sustancias contaminantes peligrosas como metales pesados y ácidos por unidad de energía generada que cualquier otro combustible. Para no generar residuos peligrosos, en especial para determinado grupo de éstos (cianuros sólidos, líquidos orgánicos no halogenados, entre otros) la incineración se debe realizar a altas temperaturas, esto es a unos 900° C y debe contar además con unas cámaras de postcombustión que trabajen entre 1.000 y 1.100° C, con técnicas de lavado de gases. Las cámaras de postcombustión controlan la emisión de subproductos orgánicos no quemados (derivados del carbono) y los lavadores de gases les retiran la materia que quede en forma de partículas, gases ácidos y compuestos orgánicos residuales. Los gases que escapan a la atmósfera tienen una temperatura que está alrededor de los 400° C. En los incineradores de buques se produce la combustión por la inyección de combustible, que puede ir desde diesel hasta un combustible pesado (incluso algunos incineradores pueden ser operados con ambos combustibles), y por efecto de un electrodo de ignición, como las calderas.

Antes de quemar los desechos del combustible, éste se debe calentar en el estanque en que es almacenado con el fin de evaporar el agua que contiene, para que sean más fácilmente controlada la temperatura y la presión del gas de escape. También se remueve la suciedad desde el combustible haciéndolo pasar por un estrangulador antes de que ingrese al incinerador. Sustancias que se desean quemar como el aceite lubricante, que no es combustible, son mezcladas con los desechos del petróleo, sin exceder el 10% de éste, para que este material incombustible sea disminuido en algunos grados. El Anexo VI de MARPOL 73/78 ha reglado esto, como se ve en 4.3.4.

La ventaja de los incineradores es que reducen considerablemente el volumen de residuos y se logra una recuperación de energía que se puede destinar a producción de electricidad o de calefacción. Las desventajas son que generan considerables malos olores y partículas en suspensión, fundamentalmente cenizas, además de otros contaminantes, dependiendo de la concentración y tipo del petróleo quemado, lo que será estudiado a continuación.

### 3.4 Combustibles marinos.

El combustible se usa en los buques en los motores de combustión interna (principales y auxiliares), calderas e incineradores. En la actualidad el más utilizado en la industria naviera es el petróleo y sus derivados con cerca del 100% y se estima que para el año 2030 se mantendrá sobre el 90% del total del combustible usado, según proyecciones de ExxonMobil (ref. 13).

A modo de ejemplo se entrega la composición de cierto petróleo, la que varía de acuerdo a factores como la procedencia y el grado de refinación que tenga. Si es residual tendrá mayores porcentajes de azufre y de metales.

Elementos	Porcentaje
Carbono	85 – 87
Hidrógeno	11 – 15
Azufre	0,1 – 6,0
Oxígeno	0 – 0,5
Nitrógeno	0 – 0,7
Metales	0 – 0,1

**TABLA 3-8:** composición elemental del petróleo (ref. 9).

Teniendo en cuenta estos datos se realizará un análisis de los combustibles marinos más usados, su composición y las emisiones que ocurren después de la combustión.

#### 3.4.1 Características del petróleo.

El petróleo se clasifica de acuerdo al grado de refinación que tenga y a sus características, por lo que es posible encontrar una larga lista de tipos de combustibles y con diferentes nombres de acuerdo a quién los haya clasificado. Antes de conocer su clasificación es necesario conocer las características que permiten esto. Las características fundamentales de los combustibles, que los hacen tan diferentes unos de otros, son:

1. Viscosidad: cuando es absoluta es una medida de la resistencia interna del combustible a escurrir. Es fundamental para obtener la temperatura de precalentamiento para una buena atomización, ésta se mide en [centistokes, cst]. La

viscosidad cinemática es la absoluta dividida por la densidad del fluido, esta se mide con viscosímetros con diferentes unidades de medida, siendo las más usadas: [°Engel] a 50° C y [seconds saybolt universal, SSU] o [Redwood, RW] a 100° F (37,78° C).

2. Densidad o gravedad específica: es la masa en relación al volumen del combustible. Se mide a 15° C en [kg/lit], [t/m<sup>3</sup>], [kg/dm<sup>3</sup>], [g/cm<sup>3</sup>], las que son equivalentes.
3. Punto de inflamación: es la temperatura mínima a la cual el combustible comienza a desprender vapores que se pueden inflamar en presencia de aire, una llama o una chispa. Según SOLAS no debe ser inferior a 60° C. Se mide en [° C].
4. Punto de fluidez o escurrimiento: es la temperatura mínima a la cual el fuel oil puede continuar fluyendo. Se conoce también como *pour point* y se mide en [° C].
5. Residuo carbonoso: indicador de la tendencia del petróleo pesado que no se quema para producir depósitos en el motor. Generalmente se le llama *Carbon conradson residue* y se mide en [% en peso m/m].
6. Agua y sedimentos: son las partículas referidas al volumen, están contenidas en todos los combustibles [% v/v].
7. Cenizas: es la cantidad de materia no combustible. Están formadas por los materiales inorgánicos y sus mayores contribuyentes son el níquel, silicio, fierro, sodio y aluminio [% m/m].
8. Sodio (Na): es introducido por la contaminación del agua de mar a los combustibles fósiles, no debe ser más de 0,2% en peso. [% m/m].
9. Inestabilidad: se presenta en el almacenamiento de petróleos de destilación intermedia, puede ser causada por la mezcla de petróleos incompatibles entre sí, a pesar de que cada uno de ellos sea estable. Los asfaltenos causan inestabilidad, son derivados no volátiles del petróleo, son sólidos y combustibles. Son asfaltenos el níquel, vanadio, azufre, carbono, hidrógeno.
10. Vanadio (V): su concentración está dada por su procedencia, así como sucede con otros compuestos de los combustibles fósiles. Los combustibles que vienen del caribe tienen un alto contenido de este metal.
11. Azufre (S): contiene sulfuros metálicos que recubren las paredes internas del equipo inyector del combustible, incluyendo a las bombas de combustible y a los inyectores. También es problemático porque puede causar corrosión en frío además de ser un contaminante ácido del aceite lubricante. Estos efectos pueden ocurrir cuando los productos de la combustión del azufre son enfriados bajo su punto de rocío formando ácido sulfúrico.

Además, la importancia de este compuesto está en su relación con la emisión de contaminantes, en este sentido el Anexo VI del MARPOL 73/78 en su regulación 14 (ver 4.3.4) limita el contenido de este elemento para los combustibles usados en buques, lo que provoca que antes de utilizar un cierto combustible se convierta en una necesidad conocer el porcentaje de azufre de él. Es por esto que el uso de combustibles con un alto índice de azufre es cada vez menor, lo que a su vez incrementa los costos operacionales en combustible debido al mayor precio de aquellos de mejor calidad con bajo índice de azufre. Los combustibles bajos en cantidad de azufre son, normalmente, de viscosidad baja, es por esto que se deben planificar cuidadosamente los niveles de mantenimiento ya que este nuevo combustible, menor en contenido de azufre, tendrá menor poder calorífico. Las limitaciones del contenido de este elemento en los combustibles marinos, así como las áreas protegidas del uso de combustibles con un alto índice de azufre se verán en el siguiente capítulo.

### **3.4.2 Clasificación de los combustibles marinos.**

El combustible es una mezcla homogénea de hidrocarburos provenientes del refinamiento del petróleo. Para el mejoramiento de las características del combustible se le agregan pequeñas cantidades de aditivos.

El petróleo usado se clasifica de acuerdo a las diferencias en las características mencionadas en 3.4.1, las que varían principalmente por la zona de procedencia del combustible y por el grado de refinación que éste tenga. Los combustibles se clasifican en los tres grandes grupos que se entregan a continuación y en las siguientes tablas se entregan otros nombres con los que se conocen y luego algunas equivalencias de los LMFO con los IFO:

- Gas oil: pertenece a los “destilados puros”. Se trata de combustibles con un contenido relativamente bajo de azufre y propiedades de encendido parcialmente buenas.
- Marine diesel oil: destilados o carburantes mixtos. Se distinguen del anterior por valores, en general, más altos de la viscosidad, la densidad y el contenido de azufre, así como también por unas tolerancias notablemente mayores.
- Light marine fuel oil (LMFO) y marine fuel oil (MFO): son los “aceites pesados”. Son compuestos en esencia por aceites residuales.

Nombre internacional	Sigla	Otros nombres
Gas oil	G.O.	Light diesel oil Light marine diesel fuel Marine diesel light
Marine diesel oil	M.D.O.	Heavy diesel oil Marine diesel fuel oil Marine diesel heavy
Light marine fuel oil	L.M.F.O.	Intermedial fuel oil Light fuel oil Intermediate bunker
Marine fuel oil	M.F.O.	Bunker C Residual fuel Fuel oil n° 6

**TABLA 3-9:** nombres y siglas de los combustibles marinos (ref. 20).

Nombre LMFO (cst a 50° C)	Nombre IFO (RW a 40° C)
LMFO 038	IFO 200
LMFO 100	IFO 800
LMFO 240	IFO 2000
LMFO 460	IFO 4500

**TABLA 3-10:** equivalencia entre LMFO e Intermediate fuel oil (IFO) (ref. 20).

La Organización Internacional de Estandarización (ISO) ha clasificado a los combustibles (IFO) marinos, antes nombrados, de la forma que se muestra en la siguiente tabla, donde no se incluyen los parámetros de calidad no cubiertos por ISO 8217, tales como: sodio, plomo, calcio, zinc.

Tipos combustible	IFO 40			IFO 80	IFO 180	
	RMA10	RMB10	RMC10	RMD15	RME25	RMF25
<b>Azufre %</b>	3,5	3,5	3,5	4,0	5,0	5,0

**TABLA 3-11:** equivalencia entre combustibles IFO y RM, junto al porcentaje de azufre respectivo (ref. 14).

Tipos combustible	IFO 380			
	RMG35	RMH35	RMK35	RML35
Azufre %	5,0	5,0	5,0	5,0

**TABLA 3-12:** equivalencia entre combustibles IFO y RM, junto al porcentaje de azufre respectivo (ref. 14).

Los combustibles marinos que se usan en Chile provienen, en su gran mayoría, del exterior, pero son refinados en el país, para lo que deben basarse de acuerdo a las Normas Chilenas NCh 64-Of2000 y NCH 2286/2.Of95 que están referidas a petróleo diesel para uso marino y petróleo residual para uso marino, respectivamente. Ambas normas están basadas en la norma internacional ISO 8217, "*Petroleum Products – Fuels (class F)*", concordando la primera con los grados DMA y DMB, mientras que el segundo concuerda con los grados RMF – 25 y RMH – 35 de combustibles residuales, de los que el porcentaje de azufre está nombrado en las tablas 3-10 y 3-11. Las características de los diesel marinos usados en Chile al año 1995 se pueden ver en la tabla 3-12, mientras que la Norma Chilena exige los porcentajes de azufre dado por ISO, mostrados arriba.

Características	Grados	
	DMA	DMB
1. Densidad a 15° C, kg/m <sup>3</sup> , máx.	0,85	0,87
2. Viscosidad cinemática a 40° C, cst <sup>1</sup> , mín máx.	1,9 4,1	1,9 5,5
3. Punto de inflamación, °C, mín.	52	52
4. Punto de escurrimiento °C, máx. Calidad de invierno <sup>2</sup> Calidad de verano	-1 -	-1 -
6. Carbon Conradson, % (m/m) máx.	0,2	0,34
7. Cenizas, % (m/m), máx.	0,01	0,01
8. Sedimento por extracción, % (m/m), máx.	0,1	0,1
9. Agua, % (m/m), máx.	0,1	0,1
10. Número de cetano, mín. <sup>3</sup>	50	45
11. Azufre, % (m/m), máx.	0,005	0,3

Donde:

- 1)  $1 \text{ cSt} = 1 \text{ mm}^2/\text{s}$ .
- 2) La calidad de invierno debe aplicarse entre el 1 de mayo y el 30 de septiembre de cada año.
- 3) Alternativamente, puede usarse el índice de cetano calculado, según norma NCh1988, pero en caso de desacuerdo o arbitraje debe preferirse el valor del número de cetano.

**TABLA 3-13:** especificaciones para el petróleo diesel para uso marino según NCh 62-Of2000 (ref. 21).

Las norma chilena arriba mencionada establece los requisitos que deben cumplir los petróleos para uso marino. Esa norma, junto a la NCH 2286/2.Of95 se aplican a combustibles que se utilizan en los motores y calderas navales y no a los combustibles que se utilizan en turbinas de gas en aplicaciones en buques.

Lo que más interesa es el porcentaje de azufre contenido en los combustibles, porcentaje que debemos comparar con el especificado en el Anexo VI del MARPOL 73/78. Algunas conclusiones son que los combustibles más refinados tienen un menor porcentaje de azufre, por lo que producirán menores emisiones de  $\text{SO}_x$  a diferencia de los menos refinados, que son combustibles más pesados y se usan principalmente en motores lentos, como los usados en la industria naviera, y en calderas por lo que se ha debido regular respecto al tema en MARPOL 73/78.

De la comparación entre lo arriba mostrado y aquello que se ve en el punto 4.3.4 se deduce que los combustibles marinos residuales (RM) y más aún los MFO que tiene porcentajes mayores de azufre, deberán ser adaptados para su uso en motores marinos o bien, dejar de ser usados. En el caso de las áreas protegidas de emisiones de  $\text{SO}_x$  donde se deberán usar combustibles con características similares a las que se pueden ver en la tabla 3-12 de la Norma Chilena NCh 62-Of2000, este es el diesel que usan embarcaciones menores en Chile y cumplen con el Anexo VI a cabalidad.

Esto constituye un cambio rotundo en el costo operacional del buque, ya que implicará comprar combustibles de mejor calidad, que a la vez son más caros para cumplir con los requerimientos del Anexo VI. También traerá consigo mayores responsabilidades por parte de: armadores en comprar combustibles que cumplan la norma, tripulaciones de buques que deben hacer que esto sea cumplido, suministradores que tienen que asegurar que el producto que venden está de acuerdo a la ley, la Administración de cada Estado Parte que debe fiscalizar que todo lo anterior sea cumplido por todas las partes.

### **3.5 Equipos de refrigeración y de aire acondicionado.**

En los equipos de refrigeración y de aire acondicionado se emplean fluidos que se conocen como refrigerantes, los que tienen como objetivo absorber calor, en el primer caso, o ser un agente enfriador, en el segundo. Algunas aplicaciones de estos fluidos en el área naval son trabajar como enfriadores de agua, solventes limpiadores de cañerías, en sistemas de aire acondicionado, refrigeración y congelación de alimentos.

Refrigerantes como el R-11, R-12, R-22 y el R-114 son los más usados en sistemas de aire acondicionado y de refrigeración en el área naval. El R-12 y el R-22 son usados en compresores recíprocos para los dos sistemas: refrigeración y aire acondicionado, mientras que el R-11 y el R-114 son usados en compresores centrífugos para plantas de aire acondicionado. Otros refrigerantes son el amoníaco, hidrocarburos (propano, etano, etileno, etcétera), dióxido de carbono, aire (en el acondicionamiento de aire de aviones) e incluso agua (en aplicaciones arriba del punto de congelación).

Para seleccionar el refrigerante a utilizar se deben tener en cuenta una serie de características como la volatilidad, la transferencia de calor, su estabilidad, punto de congelación, punto de evaporación, puntos de condensación y vaporización con las respectivas presiones, toxicidad y los efectos ambientales que pueda ocasionar. Es en este sentido que ha surgido preocupación por el uso del refrigerante más utilizado, los clorofluorcarbonos o CFC, que ocupan más del 90% del mercado en Estados Unidos (ref. 12) y son más conocidos con el nombre comercial de Freón, siendo algunos de ellos el R-11, R-12, R-502, R-113, R-115, R-114, todos los que una vez liberados van a la estratosfera destruyendo a la capa de ozono y exponiendo a la Tierra a grandes radiaciones ultravioletas (para mayor información ver el capítulo I).

Para revertir los daños provocados por los CFC se ha ratificado el Protocolo de Montreal (ver 1.7), tratado que impuso estrictos límites a la fabricación de estos compuestos y que presionó a que se diseñen sistemas que usen hidroclorofluorcarbonos (HCFC) o hidrofluorcarbonos (HFC), como el R-134<sup>a</sup> que se espera sustituya al R-12, u otros más “exóticos” como el fluorcarbono E-134, que antes no eran considerados por su mayor costo frente a los CFC. Los HCFC tienen un efecto menos dañino hacia la capa de ozono, cerca del 5% de la capacidad de destrucción de los CFC, mientras que el E-134 no tiene este efecto. Es por esto que los HCFC están en una etapa en que pueden ser utilizados, pero hasta ciertas fechas, por ejemplo, de acuerdo al Protocolo de Montreal hasta el año 2.030 y de acuerdo al Anexo VI de MARPOL 73/78 hasta el 1 de enero del año 2.020 después de lo cual deberán ser reemplazados por los HFC o por los fluorcarbonos.

Otra posibilidad ante las nuevas normativas internacionales es el amoníaco, refrigerante muy utilizado durante comienzos del siglo XX y que se dejó de utilizar por ser muy tóxico, pero tiene mayor detectabilidad en el caso de una fuga y no daña a la capa de ozono.

### **3.6 Equipos extintores de incendio.**

En un buque existen elementos portátiles y fijos contra incendio. Los fijos utilizan en su gran mayoría CO<sub>2</sub>, mientras que los portátiles pueden funcionar a base de agua: agua pura; agua húmeda o agua liviana (espuma o AFFF), a base de polvo químico seco: forfatomonoamonio; bicarbonato de potasio; cloruro sódico; bicarbonato de sodio; grafito o carbonato de sodio o a base de gas: dióxido de carbono; halón 1211 o halón 1311. En los extintores de polvo químico seco se utiliza como propelente un gas, que es generalmente nitrógeno o dióxido de carbono, en los de agua se utiliza como propelente aire comprimido y los de halón utilizan al nitrógeno con este fin.

Los halones tienen un enorme efecto contaminante por estar formados por bromo (Br), flúor (F) y carbono (C) (ver 2.4.2) con una enorme capacidad destructora del ozono. Técnicamente todos los compuestos que contienen esos tres elementos son halones, pero en muchas partes se les llama halón, por haber sido registrado el nombre, a aquellas sustancias extinguidoras de incendios. Algunos halones son el 1311 (que es el bromotriclorometano, CF<sub>3</sub>Br), el halon 1301 o el halon 1211.

En el mencionado Protocolo de Montreal se concordó en que los halones no sean usados después del año 2000 y dejados de fabricar al año 1995. Ante esto en el año 1991 la IMO planteó lo siguiente:

- Que no se instalen en nuevas máquinas después de julio del año 1992.
- Al año 1992 sean probados los sistemas prohibidos en espacios requeridos.
- La confección de un registro del stock de Halones.
- Que los sistemas existentes de Halón dejen de ser usados al año 2000.

Con respecto al segundo punto, las pautas indican que ese Halón debe ser sólo utilizado como un medio de lucha contra el fuego en un espacio donde no hay otros medios convenientes para extinguir el fuego y proteger al personal y a la propiedad. Esta pauta fue válida sólo hasta enero del 2000, después de lo cual este compuesto está fuera de uso. También se llamó a las compañías a reemplazar el Halón con una alternativa conveniente, que puede ser alguna de las nombradas al comienzo de este punto, siendo un requisito que cuenten con un método alternativo al sistema. Todo lo anterior ya está realizado y se espera que este causante de problemas ambientales ya no se esté utilizando por lo que este problema se asume como superado.

## Capítulo IV. Análisis del Anexo VI del MARPOL 73/78.

### 4.1 Antecedentes históricos.

#### 4.1.1 MARPOL 73/78.

La Organización Marítima Internacional es un organismo especializado de la Organización de las Naciones Unidas creado por medio de un Convenio en 1948, entró en vigor en 1958 y se reunió por primera vez en enero de 1959. En la actualidad está compuesto por 156 Estados miembros y es encargado de adoptar medidas para la seguridad del transporte marítimo internacional y prevenir la contaminación del ambiente marino por buques. También está encargado de asuntos de carácter jurídico, entre ellos la responsabilidad civil y la indemnización y la facilitación del tráfico marítimo internacional, además de dictar normativas para promover la seguridad de los usuarios de las naves. La serie de normas dictadas se conocen como Convenios, uno de ellos es el Convenio Internacional Para la Prevención de la Contaminación por Buques, MARPOL 73/78.

Este Convenio nació en el año 1954 con el nombre de Convenio Internacional sobre Prevención de la Contaminación del Mar por Hidrocarburos, siendo enmendado en 1962 y en 1969, por lo que se llamó OILPOL 54/69, éste surgió luego de que el transporte marítimo haya aumentado en tamaño y en complejidad a partir de la década del sesenta, lo que consecuentemente provocó un incremento en la contaminación del medio marino. Entró en vigor en 1978 y llegó a estar ratificado en 1982 por 68 países, que constituían un 95% del tonelaje de la flota mundial (ref. 19). Teniendo en cuenta lo anterior es destacable la preocupación de la comunidad internacional, en especial del Reino Unido, ante el problema de la contaminación acuática, ya que incluso 4 años antes de la entrada en vigor de la OMI se adoptó este Convenio. Éste comprendía solamente medidas para evitar la contaminación por hidrocarburos debido sólo por la operación del buque, sin incluir ninguna norma para prevenir la contaminación por colisiones o varadas, por ejemplo.

El naufragio del “Torrey Canyon” en 1967 en el Canal de la Mancha hizo ver la necesidad de un nuevo Convenio Internacional que cubriese la prevención de la contaminación operativa por lo que la OMI convocó en 1973 la Conferencia Internacional del Mar donde se gestó el Convenio Internacional para Prevenir la Contaminación por los Buques, MARPOL 73 (ref. 17) el que amplió la protección del medio marino incluyendo a otras fuentes de contaminación originadas por los buques, además de los hidrocarburos. Este Convenio no tuvo una rápida ratificación por parte

de la comunidad marítima internacional, lo que junto a los nuevos cambios en la modalidad del tráfico marítimo y algunos accidentes graves producidos en la costa de Estados Unidos, hizo que se convocara a una nueva conferencia en el año 1978 para modificar, en base a la experiencia, el Convenio MARPOL 73, esto produjo un Protocolo, que contiene normas orientadas a prevenir los accidentes para disminuir los derrames accidentales y por operaciones de los buques tanques. Dado que cuando se convocó la conferencia de 1978 el MARPOL 73 aún no había sido ratificado se decidió que dicho Convenio entrara en vigor conjuntamente con su Protocolo de 1978, lo que ocurrió en el año 1983, pasando a llamarse MARPOL 73/78.

#### **4.1.2 Anexo VI.**

La historia de este Anexo comienza cuando el Comité de Protección del Medio Marino (CPMM, MEPC en inglés) a mediados de la década de los ochenta estudió la calidad del fuel oil en relación al estudio del Anexo I y, de paso, también abordó el tema de la contaminación atmosférica.

En 1990 Noruega presentó una visión general de esta contaminación al MEPC, que planteaba lo siguiente:

- Emisiones de SO<sub>x</sub> desde buques: dichas emisiones se han estimado entre 4,5 y 6,5 millones de toneladas por año, o sea, 4% de las emisiones mundiales.
- Emisiones de NO<sub>x</sub> desde buques: se han estimado en unos 5 millones de toneladas al año, o sea, un 7% del total mundial.
- Emisiones de CFC desde buques: se estima que son entre 3.000 a 6.000 toneladas, esto es entre el 1% y el 3% anual de emisiones.
- Emisiones de halones desde buques: se estiman entre 300 y 400 toneladas, o sea, un 10% del total.

A partir de estos antecedentes en el año 1991 y al proyecto elaborado por un grupo de trabajo se adoptó la resolución OMI A.719 (17). Esta resolución pidió al MEPC que redactara un proyecto de nuevo Anexo al MARPOL 73/78 (Anexo VI) sobre la prevención de la contaminación atmosférica, el cual fue adoptado definitivamente en la Conferencia celebrada entre el 15 y el 26 de septiembre del año 1997, mediante un Protocolo, que además llamaba a los gobiernos a:

- Prohibir el uso de CFC<sub>s</sub> en sistemas fijos de refrigeración, acondicionamiento de aire y en aislamientos a bordo de buques construidos después del 6 de noviembre de 1992.
- Prohibir el uso de halones en sistemas nuevos de extinción de incendios en los buques después del 1 de julio de 1992.

- Reducir las emisiones de NO<sub>x</sub> y SO<sub>x</sub>. (ref. 18)

Este Protocolo entró en vigor el 19 de mayo de 2005, 12 meses después de que Samoa sea el decimoquinto Estado en ratificar el Convenio, con lo cual este instrumento cubrió al 55,57% del tonelaje mundial de buques mercantes y pasó a ser el Anexo VI con el nombre de “Regulaciones para la Prevención de la Contaminación Atmosférica por Buques”. Este se puede ver en su forma original en el **anexo 1**.

#### **4.2 Características del MARPOL 73/78.**

El MARPOL 73/78 es un instrumento jurídico integrado por varios documentos que deben ser considerados como una unidad. Este Convenio está compuesto por textos básicos y por textos complementarios (ref. 17).

Los textos básicos son:

- Convenio de 1973: compuesto de 20 Artículos.
- Protocolo de 1978: compuesto por 9 Artículos.
- Protocolos I y II: el primero compuesto por 5 Artículos y el segundo por 10 Artículos.
- Protocolo de 1997: compuesto por 9 Artículos.
- 6 Anexos.

Los textos complementarios son:

- Resoluciones de las Conferencias de 1973 y 1978: contienen, por lo general, recomendaciones a los Gobiernos o a la OMI orientadas a la pronta aplicación del Convenio y a la realización de los estudios y desarrollos normativos necesarios para la puesta en práctica del mismo.
- Resoluciones de la Asamblea de la OMI: las Asambleas de la OMI se realizan de forma bianual, muchas de las Resoluciones adoptadas en estas Asambleas contienen normas que desarrollan determinados aspectos del Convenio.
- Resoluciones del MEPC: algunas de estas Resoluciones contienen normas de desarrollo del Comité. El MEPC (que significa *Marine Environment Protection Comitee*) es el Comité de Protección del Medio Marino (CPMM, en español), éste es un órgano permanente de la Asamblea de la OMI, creado en noviembre de 1973 y se encarga de coordinar las actividades de la OMI para la prevención y control de la contaminación del medio marino ocasionada por los buques (ref. 19). Una de sus facultades principales es la de generar recomendaciones y preparar directrices, que luego son presentadas al Consejo y la Asamblea de la OMI para su aprobación final, las que son dirigidas a los Gobiernos Parte del Convenio mediante Circulares.

- Circulares del MEPC: se dirigen a los Gobiernos realizando recomendaciones de, por ejemplo, la aplicación de enmiendas a Reglas.

El Convenio de 1973 se compone de 20 Artículos en los que se establecen los parámetros dentro de los cuales regirá el acuerdo, Artículos tales como Obligaciones Generales de las Partes, Aplicación del Convenio, la forma de expedir los certificados, Promoción de Cooperación Técnica entre Partes, la forma en que se realizará la Entrada en Fuerza del Convenio o la Entrada en Fuerza de los Anexos, entre otros.

En este Convenio después de los Artículos se encuentran los Protocolos. Primero está el de 1978 que trata de disminuir las dificultades existentes para la ratificación del Convenio. El Protocolo I entrega las “Disposiciones Concernientes a Reportes sobre Incidentes que Involucran Sustancias Peligrosas” desde buques, mientras que el Protocolo II es sobre “Arbitrajes” entre 2 o más Partes de la Convención. El Protocolo de 1997 es el que agregó el Anexo VI al Convenio, por lo tanto, es el que más interesa para este estudio.

Los 6 Anexos que componen esta Convención están compuestos por Regulaciones, ordenadas en Capítulos, donde se entregan las reglas a seguir para el cumplimiento de MARPOL 73/78. Cada Anexo está acompañado de Apéndices en los que se entrega la información necesaria para hacerlo cumplir. Los Anexos I: “Regulaciones para la Prevención de la Contaminación por Hidrocarburos” y II: “Regulaciones para el Control de la Contaminación por Sustancias Nocivas Líquidas Transportadas a Granel” son de cumplimiento obligatorio, mientras que los Anexos III, IV, V y VI son facultativos y entrarán en vigor 12 meses después de la fecha en la que 15 Estados que su flota mercante combinada constituya no menos del 50% del tonelaje del comercio marino mercante mundial ratifiquen el respectivo Anexo, lo que ha sucedido con el Anexo V: “Regulaciones para Prevenir la Contaminación por las Basuras de los Buques” y con el Anexo VI.

El Anexo VI tiene la misma forma que todos los demás, pero, a diferencia de los otros está acompañado del “Código Técnico sobre el Control de las Emisiones de Óxidos de Nitrógeno provenientes desde Motores Diesel Marinos” que es un documento donde se entregan los requerimientos para las pruebas, inspección y certificación de esos motores para asegurar que se encuentran dentro de los límites establecidos, necesarios para minimizar la contaminación proveniente de ellos.

En el final del Convenio se entrega Información Adicional, donde se puede encontrar la siguiente información: Lista de interpretaciones unificadas de los Anexos I, II y III; Lista de documentos relacionados al Convenio; Lista de resoluciones MEPC; Estado del MARPOL 73/78, enmiendas e instrumentos relacionados; Implementación del Anexo IV (versión revisada); Potenciales enmiendas al Anexo I; Plan de evaluación

de condiciones para regulación enmendada 13G del Anexo I; Resolución MEPC.82 (43), Directrices para el monitoreo del promedio mundial del azufre contenido en hidrocarburos residuales suministrados para su uso en buques.

### **4.3 Comentarios del Anexo VI.**

#### **4.3.1 Definiciones de importancia para este Anexo.**

Todas las definiciones que se entregan a continuación están desarrolladas de acuerdo al contexto de esta tesis, esto es relativo al MARPOL 73/78 y a su Anexo VI y su finalidad es sólo hacer más claro y comprensivo este trabajo.

1. Etapa similar de la construcción: se refiere a la etapa en la cual: comienza una construcción identificable a un buque específico o, la condición menor entre, el comienzo del montaje de ese buque comprendiendo al menos 50 toneladas o el 1% de la masa estimada de todo el material estructural.
2. Alimentación continua: es el proceso por el cual es alimentado combustible en una cámara de combustión sin la asistencia humana mientras el incinerador está en condiciones normales de operación con la cámara de combustión funcionando a temperaturas operativas que van entre 850° C y 1.200° C.
3. Emisión: se refiere a cualquier liberación de sustancias, sujetas al control de este Anexo, desde buques, ya sea a la atmósfera o al mar.
4. Instalaciones nuevas: en relación a la Regla 12 de este Anexo sobre sustancias reductoras del ozono, se refiere a la instalación de equipamientos, sistemas, incluyendo unidades extintoras de incendio portátiles nuevas, aislantes u otros materiales presentes en buques después de la fecha de entrada en fuerza de este Anexo, pero excluyendo la reparación o recarga de sistemas instalados previamente, equipamientos, aislantes u otros materiales o recargas de unidades portátiles extintoras de incendio.
5. Código Técnico de NO<sub>x</sub>: es el código técnico sobre el control de las emisiones de óxidos de nitrógeno desde motores diesel marinos.

6. Sustancias reductoras del ozono: son las sustancias controladas definidas en el párrafo 4, artículo 1 del Protocolo de Montreal sobre Sustancias Reductoras de la Capa de Ozono, nombrados en sus Anexos A, B, C o E. Algunas sustancias reductoras del ozono que se pueden encontrar en buques son:
- Halon 1211.
  - Halon 1301.
  - Halon 2402.
  - CFC-11.
  - CFC-12.
  - CFC-113.
  - CFC-114.
  - CFC-115.
7. Residuos de hidrocarburos: son los residuos del combustible o de aceites lubricantes como resultado de su separación, o por pérdidas de aceite lubricante desde la maquinaria principal o auxiliar o de los separadores del agua de sentinas, filtraciones de equipos de combustible o de las bandejas de goteo.
8. Incineración a bordo: es la incineración de desperdicios u otras materias a bordo de buques si éstas son generadas durante la operación normal del buque en un incinerador, que es el aparato diseñado para el propósito primario de la incineración.
9. Buques construidos: son aquellos en los que la quilla está colocada o bien que están en una etapa similar de la construcción.
10. Área de control de emisiones de SO<sub>x</sub>: es un área donde la adopción de medidas especiales obligatorias para la emisión de óxidos de azufre desde buques es necesario prevenir, reducir y controlar la polución del aire de SO<sub>x</sub> y sus impactos adversos adjuntos sobre áreas de tierra o mar. Las áreas de control de las emisiones de SO<sub>x</sub> son:
- El Mar Báltico, limitado por el Golfo de Botnia al norte, el Golfo de Finlandia al este y por el sur con la entrada al Mar Báltico en el paralelo 57°44.8' N. Lo se aprecia mejor en la figura 4-1.
  - Cualquier otra área marina, que también pueden ser áreas portuarias, designada por la Organización de acuerdo con el criterio y procedimientos para la designación de áreas de control de emisiones de SO<sub>x</sub>, lo que se

- puede ver en detalle en el apéndice III del Anexo VI del MARPOL 73/78, que corresponde al **anexo 1** de esta tesis.



**FIGURA 4-1:** Mar Báltico (ref. 8).

- 11. Buque tanque:** como dice el Anexo I, se refiere a un buque petrolero construido o adaptado para transportar principalmente hidrocarburos a granel en sus espacios de carga; este término incluye a los buques de carga combinados y a los quimiqueros cuando están transportando hidrocarburos a granel como se define en el Anexo II, el que dice que los buques quimiqueros son buques construidos o adaptados para transportar principalmente sustancias nocivas líquidas a granel.
- 12. Protocolo de 1997:** es el Protocolo redactado el año 1997 que enmienda a la Convención Internacional para la Prevención de la Contaminación desde Buques, MARPOL 73/78.
- 13. Administración:** es el Gobierno del Estado donde está registrado y bajo cuya autoridad opera el buque. Es decir, es el Gobierno del Estado de pabellón del buque. Es, en general, la institución de Gobierno encargada de supervisar las actividades de transporte marítimo en el país y que generalmente representa la

Gobierno en las reuniones de la OMI. En Chile es la Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante, DIRECTEMAR.

**14. Transformación importante:** es cuando se dan las siguientes condiciones en un buque existente: la transformación altere considerablemente las dimensiones o la capacidad de carga del buque; o hace que cambie el tipo de buque; o se efectúa, en opinión de la Administración, con la intención de prolongar considerablemente la vida del buque; o altera de tal modo al buque que si fuera nuevo debería cumplir con disposiciones que no le son aplicables como buque existente (19). Para el propósito de la Regla 13 del Anexo VI, este término se refiere a una modificación del motor cuando:

- el motor es reemplazado por uno nuevo construido en o después del 1 de enero de 2000.
- se realiza al motor cualquier modificación sustancial, como las definidas en el Código Técnico de NO<sub>x</sub> (ver 4.3.4.6.).
- la velocidad máxima continua del motor se incrementa más que un 10%.

**15. Modificación sustancial:** de un motor diesel marino se refiere:

- para motores instalados en buques construidos el o después del 1 de enero de 2000, a cualquier modificación que podría causar potencialmente que el motor exceda las normas de emisión fijadas en la Regla 13 de este Anexo.
- para motores instalados en buques construidos antes del 1 de enero de 2000, a cualquier modificación realizada a un motor que incremente sus características de emisión existentes. Estos cambios incluyen, pero no limitan a cambios en sus operaciones o en sus parámetros técnicos, lo que se refiere a, por ejemplo, cambio del eje de levas, del sistema de inyección de combustible, del sistema de alimentación de aire, configuración de la cámara de combustión, calibración del *timing* del motor.

**16. Potencia de salida:** se refiere a la potencia que se mide en el acoplamiento del motor al eje y se indica en el catálogo del motor. Se conoce como *Brake Horse Power*, BHP, o potencia al freno.

**17. Tonelada de registro bruto (GT):** es una medida de todos los espacios cerrados del buque, se expresa usualmente en *gross tons* (GT) y según el Convenio Internacional de Arqueo (1969) se determina por la siguiente fórmula:

$$GT = K1 * V$$

Donde:

$V = V \text{ casco} + V \text{ superestructura} = \text{volumen total de todos los espacios cerrados del buque.}$

$$K1 = 0,2 + (0,02 * \log V)$$

18. Organización: de acuerdo al Artículo 2, párrafo 7 del MARPOL 73/78, desde el año 1982 se refiere a la Organización Marítima Internacional.
19. Estado Rector del Puerto: se refiere al Estado en uno de cuyos puertos o terminales marítimos se encuentra un buque voluntariamente (ref. 19).
20. Parte: es un Estado miembro del Convenio MARPOL 73/78.

#### 4.3.2 Aplicación.

Este Anexo se aplica a todo buque, a cualquier plataforma petrolera perforadora fija o flotante y a otras plataformas; todos los que viajen a puertos, a terminales costeros o hacia aguas bajo la soberanía o jurisdicción de otros países que son Parte del Protocolo de 1997. En buques de menos de 400 GT la Administración establecerá medidas apropiadas para **asegurar que se cumple** con las disposiciones de este Anexo. Para que se aplique en buques que realizan cabotaje cada Estado debe aprobar esta norma, en el caso chileno debe ser aprobada por el Congreso para que luego sea ratificada por el Presidente de la República, cosa que no ha ocurrido a la fecha de impresión de este trabajo.

No se aplicará cuando existan emisiones necesarias para mantener a salvo el buque o a la tripulación de éste, así como cuando ocurran por el daño del buque o de sus equipamientos. La regla establece que cuando la tripulación se percate de las emisiones se deben tomar las medidas necesarias para prevenir o minimizar la emisión, por lo tanto, serán consideradas como violaciones a este Anexo si el capitán o el armador actuaron con intención para causar daño o imprudentemente y con conocimiento de que el daño podría ocurrir.

En los casos de las sustancias perjudiciales para la atmósfera abajo nombradas la regulación se aplicará de acuerdo a los parámetros que ahí se indican, mientras que para aquellas sustancias que no se nombran a continuación se aplicará el criterio general arriba presentado.

1. Óxidos de nitrógeno: se aplica a todo motor diesel de potencia de salida mayor de 130kW instalado en buques construidos el o después del 1 de enero de 2000 o a motores que hayan sufrido una transformación importante en esa fecha o después de ella, con las excepciones que se indican a continuación.

Esta regla no se aplica:

- A cualquier aparato o equipo destinado para ser usados sólo en casos de emergencia, como motores diesel de emergencia o motores instalados en botes salvavidas.
- A motores instalados en buques que se ocupen solamente en viajes en aguas bajo la soberanía o jurisdicción del Estado de bandera que el buque enarbola, pero con la condición de que dichos motores estén sujetos a medidas de control alternativas que establezca la Administración de cada Estado.
- Cuando la Administración haya dejado excluidos de la aplicación de esta regla a motores diesel instalados en buques construidos o que hayan sufrido una transformación importante antes del 19 de mayo de 2005 (fecha en que entró en fuerza el Protocolo), con la condición de que el buque sea ocupado solamente en viajes hacia puertos o terminales costa afuera del Estado de bandera que el buque enarbola.

2. Compuestos orgánicos volátiles: estas emisiones podrán ser controladas en todos los buques tanques, pero variará dependiendo de qué puerto o terminal se trate, ya que cualquier Parte del Protocolo de 1997 designará y luego notificará a la Organización cuales son aquellas instalaciones donde realizará el control de estas sustancias. La Organización enviará circulares a las Partes del Protocolo de 1997 y a los Estados Miembros en donde aparezcan los puertos y terminales designados por las otras Partes del mismo Protocolo para informarles las instalaciones en donde se realizará este control.

Se aplicará esta regla a los buques gaseros sólo cuando el tipo de carga y los sistemas de contención del buque permitan una retención segura de los COV a bordo, sino es así serán regresados de forma segura a tierra.

Plataformas fijas y flotantes y plataformas petroleras perforadoras: este Anexo es aplicable a las emisiones que se establecen en la Regla 19, que son las siguientes:

- Emisiones que sean producto de la incineración de sustancias que son sólo y directamente resultado de la exploración, explotación y procesos asociados de recursos minerales del lecho marino que ocurran costa afuera, incluyendo pero no limitando a llamaradas de hidrocarburos y al quemado de retazos, lodo y/o fluidos

estimuladores durante el llenado completo del pozo y operaciones de prueba, así como de llamaradas surgidas por contratiempos.

- Liberación de gases y compuestos volátiles producto de fluidos que estimulen la perforación y retazos.
- Emisiones asociadas única y directamente con el tratamiento, manejo o almacenamiento de minerales del lecho marino.
- Emisiones provenientes desde motores diesel que están únicamente dedicados a la exploración, explotación y procesos de recursos minerales del lecho marino que se realizan costa afuera.

### **4.3.3 Inspecciones y Certificación.**

#### **4.3.3.1 Plazos de inspección.**

Para buques de 400 GT o superiores y a cualquier plataforma, sea petrolera perforadora fija o flotante u otra plataforma la Administración deberá realizar las siguientes inspecciones obligatorias:

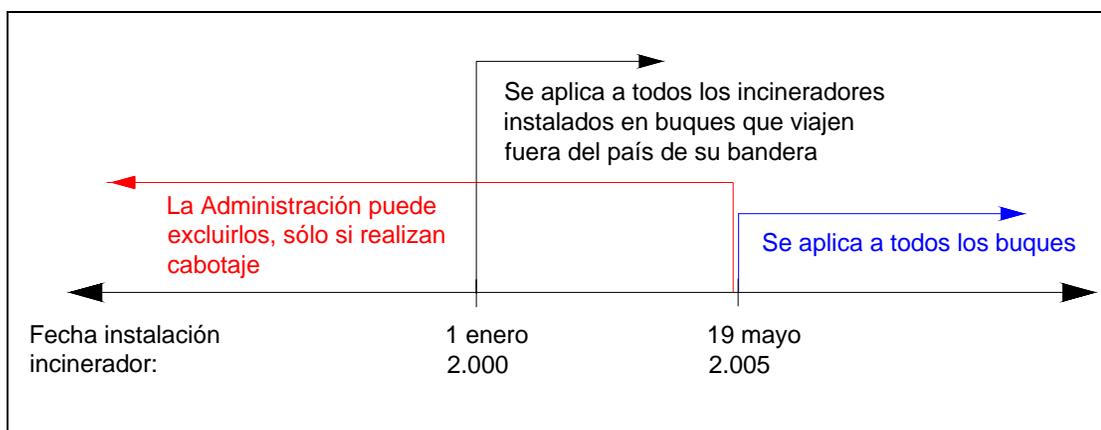
- Una inicial antes de que el buque esté en servicio o después del certificado requerido en la Regla 6 de este Anexo (ver 4.3.3.4).
- Periódicas, en los intervalos en que especifique la Administración, pero no mayores a 5 años.
- Como mínimo, una intermedia durante el periodo de validación del certificado, el que debe asegurar que todos los requisitos de este Anexo se cumplen.

Durante el periodo de validación del certificado la Administración establecerá inspecciones no programadas, las que tienen el fin de asegurar que el equipamiento quede totalmente satisfactorio para el servicio que está destinado. En el caso en que la Administración establezca inspecciones anuales obligatorias, las inspecciones no programadas no serán obligatorias.

Para estar en conformidad con la Regla 13, la inspección de motores y equipamientos se debe realizar de acuerdo al Código Técnico de NO<sub>x</sub> que será tratado más adelante y si se desea se puede ver en el **anexo 4** de esta tesis.

Para los incineradores usados a bordo los plazos de aplicación serán de acuerdo a lo que indica la Regla 16 de este Anexo, en la que se establece que todo incinerador que sea instalado después de la fecha de entrada de este Protocolo y aquellos que hayan sido instalados después del 1 de enero de 2000 que naveguen en viajes fuera de las aguas sujetas a la soberanía o jurisdicción del Estado del que el buque enarbola

bandera deberán cumplir con los requerimientos contenidos en el apéndice IV del Anexo VI del MARPOL 73/78, que se puede ver en el **anexo 2** de esta tesis. A aquellos que hayan sido instalados antes del 19 de mayo de 2005 y que naveguen únicamente en viajes dentro de las aguas sujetas a la soberanía del Estado del que el buque enarbola bandera la Administración podrá excluirlos de la aplicación de la Regla 16, lo que se aprecia con mayor claridad a continuación.



**FIGURA 4-2:** aplicación de la Regla 16.

#### 4.3.3.2 Inspectores.

La Administración tendrá oficiales que son los encargados de hacer cumplir las disposiciones de este Anexo, estos son los inspectores de la Administración. Sin embargo, la Administración puede confiar la inspección a inspectores nominados para tal propósito o a organizaciones reconocidas por ella, las que deben cumplir con las directrices adoptadas por la Organización (en las Resoluciones A.739 (18) y A.789 (ref. 19)). En cualquier caso la Administración es la entidad que concederá completa garantía de la realización y de la eficiencia de la inspección. En el caso específico de las inspecciones no programadas también pueden ser realizadas por otras Partes del Protocolo, por petición de la Administración respectiva.

En todas las inspecciones el inspector deberá asegurarse que todo está en orden de acuerdo a los requerimientos de este Anexo.

Cuando oficiales inspectores de una Parte que no es de la bandera que el buque enarbola tengan clara razón para creer que el Capitán o la tripulación no están familiarizados con procedimientos esenciales a bordo que tengan relación con la prevención de la contaminación del aire desde buques pueden inspeccionar el buque y esta Parte se asegurará que el buque no navegará bajo la situación que traía.

#### 4.3.3.3 Faltas.

Para verificar que un buque al que se le aplica este Anexo cumple con sus disposiciones está sujeto a inspecciones en cualquier puerto o terminal costero de una Parte por oficiales nombrados o autorizados por la misma. Para que esto sea realizado con eficacia las Partes deberán cooperar en la inspección usando todas las medidas apropiadas y practicables de detección de faltas y monitoreo ambiental necesarias para el reporte y la acumulación de evidencia.

Si un inspector o una organización reconocida determina que la condición del equipamiento no corresponde sustancialmente con las determinadas en el certificado, debe asegurarse que la acción correctiva está tomada y se dará curso a la notificación a la Administración. Si no se ha tomado la acción correctiva la Administración deberá retirar el certificado, en el caso en que el buque esté en otro país se le informará al Estado Rector del Puerto inmediatamente, esta autoridad dará todas las facilidades para que se realice todo lo que corresponde.

En el caso de que una Parte descubra que un buque tiene emisiones de cualquier sustancia cubierta por este Anexo, violando sus disposiciones, le suministrará dicha evidencia a la Administración y si es practicable hacerlo se notificará al Capitán del buque por haber pretendido una violación. Ante la recepción de la evidencia la Administración informará al Armador de la realización de una investigación y a la otra Parte para que suministre evidencia adicional o mejor de la contravención.

La Parte que reciba una solicitud para una investigación junto con suficiente evidencia de que un buque al que se le aplica este Anexo emite cualquiera de las sustancias que cubre esta norma podrá inspeccionar a dicho buque cuando entre al puerto o terminal costero bajo su jurisdicción. El reporte de la investigación se enviará a la Parte que lo solicite y a la Administración para que tome las acciones apropiadas de acuerdo a este Convenio.

Cuando la Administración esté satisfecha de que la evidencia suficiente está disponible para permitir procedimientos asegurándose respecto a la violación, se realizarán los trámites correspondientes de acuerdo a las leyes de su Estado lo antes posible, informando de la acción tomada a las Partes que tengan reportes de la violación y a la Organización.

En caso contrario, cuando ocurra un accidente o sea descubierto un defecto que afecte a la eficiencia o al cumplimiento de este Anexo el Capitán o el Armador informará a la Administración o al inspector correspondiente lo antes posible para que se promulgue el certificado pertinente.

#### 4.3.3.4 Certificado Internacional de Prevención de la Polución del Aire (IAPPC).

Un IAPPC será promulgado después de realizada una inspección (que se detalla en 4.3.3.1) a buques sobre 400 GT ocupados en viajes a puertos o terminales costeros bajo la jurisdicción de otras Partes y a plataformas petroleras perforadoras y a otras plataformas que viajen hacia aguas bajo la soberanía o jurisdicción de Partes del Protocolo de 1997, siempre que enarboles la bandera de un Estado que es Parte de este Protocolo.

Para buques nuevos se promulgará antes de que el buque esté en servicio y para buques construidos antes del 19 de mayo de 2005 en la primera entrada a dique después de esta fecha, pero en ningún caso más allá de 3 años después de la misma fecha, esto es el 19 de mayo de 2008.

El Certificado será promulgado por la Administración o por cualquier persona u organización autorizado por ella, incluso por petición de la Administración otro Gobierno que sea Parte del Protocolo de 1997 podrá inspeccionar el buque y si cumple con las disposiciones de este Anexo promulgar el Certificado y tan pronto como sea posible enviará una copia de él y del reporte de la inspección a la Administración. En todo caso la Administración asume toda la responsabilidad por el Certificado.

El Certificado será en el idioma oficial del país que lo promulga, si este idioma no es inglés, francés o español se deberá incluir una traducción en uno de estos idiomas. El IAPPC tendrá la forma que corresponde al modelo que se muestra en el **anexo 3**.

El IAPPC no durará más de 5 años desde la fecha de su promulgación. Sólo se permitirá una prórroga de ese plazo si el buque no se encuentra en un puerto del Estado del que enarbola bandera en el momento en que expire el Certificado, esta prórroga será de 5 meses como máximo y sólo en casos donde sea justo y razonable y con el objetivo de que el buque se acerque para completar su viaje al Estado del que enarbola bandera. Una vez que ha llegado al Estado del que enarbola bandera no deberá abandonar el puerto al que arribó sin haber obtenido un nuevo Certificado.

Este Certificado cesará su validación en cualquiera de los siguientes casos:

- Si las inspecciones no son realizadas de acuerdo a los plazos expresados.
- Si se han realizado alteraciones significantes en equipamientos, cañerías, arreglos o materiales a los que se les aplica este Anexo sin autorización de la Administración, excepto si se han reemplazado por otros que estén conformes a los requerimientos de este Anexo. En el caso de las emisiones de NO<sub>x</sub> alteraciones significantes son cualquier cambio o ajustes al sistema, cañerías o arreglos de un motor diesel que resulten en límites de este gas sobre la norma.

- Cuando un buque es transferido de bandera se debe promulgar un nuevo Certificado IAPP.

#### 4.3.4 Requerimientos para el Control de las Emisiones desde Buques.

1. Sustancias reductoras del ozono: está prohibida cualquier emisión intencionada que ocurran durante la mantención, servicio, reparación o eliminación de sistemas o equipos, excepto cuando hayan liberaciones mínimas asociadas con la recuperación o reciclado de una de estas sustancias. Las fugas serán reguladas por este Anexo, sean o no voluntarias.

En todas las instalaciones nuevas están prohibidas las sustancias que se detallan en 4.3.1.6, excepto aquellas que contienen HCFCs, los que están permitidos hasta el 1 de enero de 2020.

Al ser removidas desde los buques las sustancias reductoras del ozono y los equipos que las contienen serán entregadas en tierra para lo que se facilitará su recepción apropiada. Para esto cada Parte del Protocolo de 1997 se compromete a entregar facilidades para recibir sustancias reductoras del ozono y equipos que contengan dichas sustancias sin causar demoras excesivas a los buques.

2. Óxidos de azufre: el porcentaje de azufre en cualquier combustible usado a bordo de buques no excederá 4,5% m/m, para lo que el promedio mundial de azufre contenido en el combustible residual será monitoreado. Dentro de las áreas de control (ver 4.3.1.10) de emisión de SO<sub>x</sub> el contenido de azufre del combustible usado a bordo de buques no será mayor de 1,5% m/m o en caso contrario deberá ser utilizado cualquier método tecnológico de limpieza de los gases de escape para motores de propulsión principal y auxiliar aprobado por la Administración. El peso total de las emisiones de dióxidos de azufre será como máximo 6,0 gSO<sub>x</sub>/kW-h.

Los desechos derivados del uso de tales equipos serán descargados sólo si son documentados informando que no provocan impacto adverso sobre los ecosistemas de "puertos cercados", puertos o estuarios, basado en criterios del Estado del Puerto comunicados a la Organización, la que lo circulará a todas las Partes de la Convención.

Está permitido que los buques usen combustibles de porcentaje de azufre mayor a 1,5% antes de entrar a las áreas de control de SO<sub>x</sub>, pero deberán dejar suficiente tiempo para que el sistema de servicio de combustible sea limpiado completamente previo a la entrada al área de control para en esa área usar sólo aquellos que cumplan el límite de azufre. Todos los datos deberán ser registrados en la bitácora de máquinas,

tales como el volumen de los estanques de combustible bajo en azufre y la fecha, hora y posición del buque cuando se complete cada operación de cambio de combustible.

Durante los 12 meses después de: la entrada en fuerza del Protocolo (19 de mayo de 2006) o de una enmienda al presente Protocolo para designar un área específica de control de emisión de SO<sub>x</sub>, no es obligatorio que los buques que ingresen a una de estas áreas ocupen combustibles bajo 1,5% m/m de azufre y se registrarán sólo por el límite de 4,5% m/m.

**3. Compuestos orgánicos volátiles:** El control que se realice de estas sustancias variará dependiendo de en qué instalaciones se realice, ya que cada Parte designará los parámetros bajo las cuales realizará dicho control, habiendo notificado al menos 6 meses antes de la fecha efectiva del control a la Organización sobre el tamaño del buque tanque a ser controlado, las cargas que necesiten sistemas de control de emisión y la fecha efectiva de cada control.

Los sistemas para realizar el control de emisiones aprobados por el Gobierno respectivo en puertos o terminales deben tener en cuenta los estándares de seguridad desarrollados por la Organización, estándares que también debe cumplir el sistema colector de vapores que los buques tanques que están sujetos a dicho control deben tener obligatoriamente y dentro de un plazo máximo de 3 años desde la fecha efectiva, el sistema debe ser usado durante las faenas de cargamento de dicha carga. La utilización de métodos de control de emisiones de vapores usados en puertos o terminales deben ser operados de forma segura evitando excesivas demoras al buque.

**4. Incineración a bordo:** se permitirá sólo en un incinerador a bordo, excepto cuando se trate de agua de sentinas y de residuos de hidrocarburos (ver 4.3.1.7.) generados durante la operación normal del buque que se podrán incinerar en calderas o la planta de poder principal o auxiliar, pero sólo fuera de puertos y estuarios.

Está prohibida la incineración de las siguientes sustancias:

- Restos de carga producto de la aplicación de los Anexos I, II y III de esta Convención, incluyendo a, por ejemplo, residuos de hidrocarburos, residuos de sustancias nocivas líquidas a granel, mezclas de sustancias nocivas líquidas a granel, materiales contaminantes embalados relacionados a los anteriores.
- Bifenilos policlorados (PCBs), para mayor información se recomienda ver 2.4.5.
- Basuras que contengan más que rastros de metales pesados, como las que se indican en el Anexo V.
- Productos refinados del petróleo que contengan compuestos halogenados.

- Policloruro de vinilo (PCV<sub>s</sub>), que están permitidos en incineradores que cuenten con el Certificado IMO de Aprobación Tipo, ver 2.4.4.

La temperatura de la cámara de combustión será diseñada para que alcance 600° C dentro de 5 minutos después de encendida y en el escape deberá estar entre 850 y 1.200° C, esta temperatura siempre será monitoreada en el ducto de escape y cuando se detecte que está bajo los 850° C el incinerador no será alimentado de basura. Otros límites de compuestos del escape desde el incinerador se pueden ver en el apéndice IV del Anexo VI del MARPOL 73/78, que corresponde al **anexo 2** de esta tesis, donde también se pueden ver los límites específicos de los componentes de residuos de hidrocarburos y desperdicios sólidos permitidos al incinerar. Para operar dentro de estos límites todos los buques con incineradores sujetos a esta Regla poseerán un manual de operación del fabricante. Esta Convención permite el desarrollo, instalación y operación de diseños técnicos alternativos a bordo, siempre que se encuentren dentro de los requerimientos de la Regla 16 del Anexo VI del MARPOL 73/78.

Nada en la Regla 16 del Anexo VI afecta los requerimientos de la Convención sobre la Prevención de la Polución Marina por Eliminación de Aguas y Otras Materias de 1972, enmendado por el Protocolo de 1996.

**5. Calidad del combustible:** este Anexo no se aplica al carbón ni a combustibles nucleares, sí a aquellos combustibles entregados y usados para propósitos de combustión que cumplan con los siguientes requisitos:

- Será una mezcla de hidrocarburos derivados del refinamiento del petróleo, lo que no impide la incorporación de pequeñas cantidades de aditivos destinados a mejorar algunos aspectos del rendimiento.
- Estará libre de ácidos inorgánicos.
- No incluirá cualquier sustancia ni pérdidas químicas que pongan en peligro la seguridad del buque, que afecten adversamente el rendimiento de la maquinaria, que sean dañinas para el personal o contribuyan en su totalidad a la polución.

Combustibles obtenidos para propósitos de la combustión obtenidos por métodos diferentes al refinamiento del petróleo no:

- Excederán la cantidad de azufre que establece la Regla 14 del Anexo VI y que se puede ver en el punto 2 de este apartado.
- Causarán un motor excedido en los límites de emisión de NO<sub>x</sub> fijados en la Regla 13 (3) (a), que se pueden ver en el punto 6 de este apartado.
- Contendrán ácidos inorgánicos.

- Pondrán en peligro la seguridad del buque o afectar adversamente al rendimiento de la maquinaria.
- Serán peligrosos para el personal.
- Contribuirán en conjunto a contaminación atmosférica adicional.

Los detalles de combustibles entregados y usados para propósitos de la combustión en buques de 400 GT o mayores serán registrados por medio de una “nota de entrega de combustible pesado”, la que contendrá la información que aparece en el apéndice 5 del Anexo VI, que es la que se muestra a continuación:

- Nombre y número IMO del buque recibido.
- Puerto.
- Fecha del comienzo de la entrega.
- Nombre, dirección y número telefónico del suministrador del combustible marino.
- Nombre del producto.
- Cantidad en toneladas métricas.
- Densidad a 15° C en (kg/m<sup>3</sup>), de acuerdo a la prueba ISO 3675.
- Contenido de azufre en (% m/m), probado de acuerdo con ISO 8754.
- Una declaración firmada y certificada por el representante del suministrador de combustible de que el combustible entregado está conforme con la Regla 14(1) o (4)(a) y a la Regla 18(1) del Anexo VI del MARPOL 73/78.

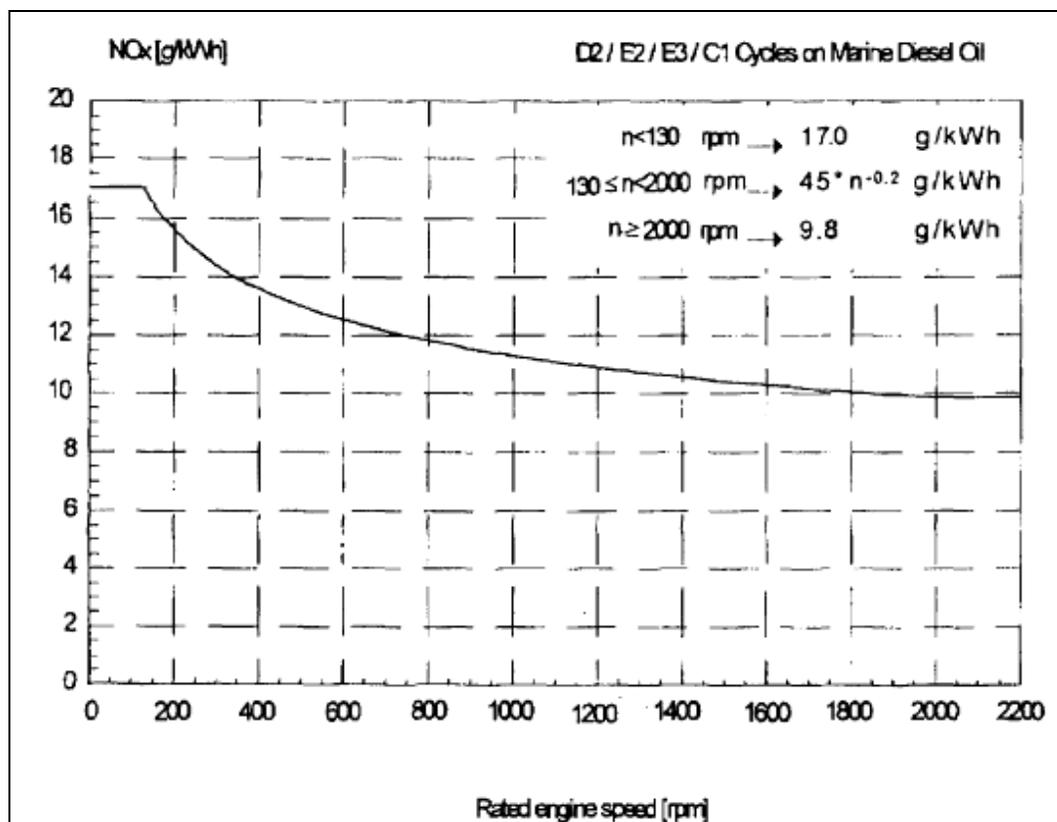
La “nota de entrega de combustible pesado” será mantenida por 3 años después de que el combustible ha sido entregado a bordo y debe estar disponible para ser leída por inspectores, como la autoridad gubernamental que también puede hacer una copia de la nota y consultar al Capitán sobre la veracidad de la copia y al puerto donde la nota fue emitida. En caso de ser esto realizado deberá ser lo más expedito posible sin causar el atraso del buque. Al momento de emitir la nota se deberá tomar una muestra del combustible entregado, la que debe ser sellada y firmada por el representante del distribuidor y el Capitán o el oficial a cargo de la faena de combustible, dicha nota será mantenida por el buque hasta que el combustible esté sustancialmente consumido, pero en cualquier caso, por un periodo no menor a 12 meses desde la fecha de entrega.

Cuando la Administración lo apruebe, la Regla 18 sobre Calidad del Combustible no se aplicará en los casos en que hidrocarburos, como el combustible, sean producidos y usados posteriormente en el sitio en plataformas y plataformas petroleras perforadoras.

6. Óxidos de nitrógeno: está permitida la operación de cada motor diesel cuando las emisiones de óxidos de nitrógeno (calculadas como el peso total de emisiones de NO<sub>2</sub>) desde el motor estén bajo los siguientes límites:

- 17,0 g/kW-h, cuando  $n < 130$  rpm.
- $45,0 * n^{-0,2}$  g/kW-h, cuando  $130 \leq n < 2.000$  rpm.
- 9,8 g/kW-h, cuando  $n \geq 2.000$  rpm.

Donde  $n$  = razón de velocidad del motor en revoluciones del eje cigüeñal por minuto (rpm). Estos límites se aprecian de mejor forma en el siguiente diagrama.



**FIGURA 4-3:** curva de límites máximos permitidos de emisión de NO<sub>x</sub> para motores diesel marinos de acuerdo a los valores arriba expresados, ver **anexo 4**.

Está permitida la operación de un motor diesel cuando cuente con cualquier sistema de reducción de emisión de los gases de escape, sea de limpieza de los gases de escape u otro, siempre que sea aprobado por la Administración de acuerdo al Código Técnico de NO<sub>x</sub> para reducir las emisiones a bordo a lo menos a los límites antes especificados. Este Código se encuentra disponible en el **anexo 4** de esta tesis.

Aspectos relevantes del “Código Técnico sobre el Control de las Emisiones de Óxidos de Nitrógeno desde Motores Diesel Marinos”.

Cada motor diesel marino al que se la aplique la Regla 13 de este Anexo, deberá cumplir con las disposiciones de este Código. Éste tiene como objetivo establecer procesos obligatorios para las pruebas, inspección y certificación de motores diesel marinos lo que permitirá a fabricantes de motores, armadores y a Administraciones asegurar que todos los motores diesel marinos a los que se aplica cumplen con los valores límites relevantes de emisión de NO<sub>x</sub> como se especifican en la Regla 13 del Anexo VI del MARPOL 73/78.

La inspección de motores diesel marinos se deberá realizar de acuerdo al Código Técnico de NO<sub>x</sub> y cada uno de estos motores estará expuesto a la siguiente inspección:

- Una inspección de pre – certificación que estará sujeta a asegurar que cumple con los límites de emisión de NO<sub>x</sub>, que están en 4.3.4.6, si la inspección está conforme se emitirá un Certificado EIAPP, que significa *Engine International Air Pollution Prevention*, este Certificado se puede ver en el **anexo 5**.
- Una inspección de certificación inicial que se realizará a bordo del buque después que el motor está instalado, pero antes de que sea puesto en servicio. Esta inspección puede traer consigo la emisión de IAPPC o una enmienda al vigente IAPPC.
- Inspecciones periódicas e intermedias para asegurar el continuo cumplimiento completo del motor de acuerdo a este Código.
- Una inspección de certificación inicial del motor que se llevará a cabo a bordo del buque siempre que una modificación sustancial (ver 4.3.1.15) haya sido hecha al motor, para asegurar que el motor modificado cumple con los límites de emisión.

El Código entrega, además, todos los pasos para certificar como conformes a una familia y a un grupo de motores. Una familia de motores está compuesta por motores de similares características de emisión y de diseño. Mientras que un grupo de motores son aquellos utilizados primariamente para propulsión principal y que normalmente requieren de modificaciones para ajustarlos a las condiciones de operación a bordo, pero que no resultarán en emisiones que excedan los límites de NO<sub>x</sub> establecidos en la Regla 13.

En el Código también se entregan todos los procedimientos de medidas de la emisión de NO<sub>x</sub> en un banco de pruebas y los procedimientos para demostrar que se está conforme de acuerdo a los límites de emisión de NO<sub>x</sub> a bordo, en este caso se

entregan parámetros y características que el inspector deberá tener en cuenta para la inspección, diferentes métodos de prueba, características de equipos de medición de emisiones.

También se entrega la forma en que se utilizarán los analizadores de gases, como se calibrarán, sus rangos de medida, desviaciones permisibles. Cuando se usen combustibles compuestos de mezclas de hidrocarburos derivados del refinamiento de petróleos se realizarán procedimientos de análisis y métodos de medida de acuerdo a este código.

#### **4.4 Exigencias del Anexo VI.**

##### **4.4.1 Responsabilidades de los Gobiernos de Estados Partes del Protocolo de 1.997.**

Los Gobiernos a través de la firma del Protocolo se comprometen a cumplir las disposiciones del Anexo VI, en este caso, para prevenir la emisión de contaminantes a la atmósfera. El Gobierno de cada Estado Parte del Protocolo confía a la Administración la fiscalización marítima en cada país y ésta se compromete a cumplir y a exigir a los buques que están autorizados a enarbolar la bandera de su Estado el cumplimiento de las disposiciones del Convenio (ref. 19).

En Chile le corresponde ejercer como Administración a la Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante (DIRECTEMAR) y como tal aplicará y fiscalizará el cumplimiento de la Ley de Navegación, de los Convenios Internacionales y de las normas legales o reglamentarias relacionadas con sus funciones, con la preservación de la ecología en el mar y con la navegación en las aguas sometidas a la jurisdicción nacional. La DIRECTEMAR tendrá la representación oficial del Estado en asuntos o reuniones internacionales relativas a las materias profesionales y técnicas.

Con respecto a este Anexo las siguientes son funciones de la Administración correspondiente:

1. En caso de ser reemplazados equipamiento, arreglos, sistemas no deben ser cambiado sin la aprobación de la Administración de acuerdo a las disposiciones de este Anexo. En este sentido la Administración puede permitir cualquier equipamiento, material, aplicación o aparato a ser colocado en buques como una alternativa a los que son necesarios según este Anexo, siempre que tales materiales cumplan con lo requerido por éste. Esta Administración debe informar

esto a la Organización para que se informe a las demás Partes para su información y acción apropiada, si corresponde.

2. Establecer medidas apropiadas para asegurar que buques de menos de 400 GT cumplen con las disposiciones de este Anexo, como se indica en 4.3.2.
3. Inspeccionar de acuerdo a lo establecido en las reglas del Anexo VI, lo que se indica en 4.3.3.1, para esto la Administración tendrá oficiales encargados de hacer cumplir las disposiciones de este Anexo. También deberá recabar evidencia suficiente cuando se sospeche una violación para permitir procesos de acuerdo a las leyes de su Estado.
4. Deberá promulgar certificados IAPP o autorizar a personas u organizaciones para que cumplan esta tarea, en todo caso la Administración asume toda la responsabilidad por las tareas encargadas a terceros.
5. Cada Gobierno que es Parte del Protocolo de 1997 designará puertos o terminales portuarios en los cuales serán controladas las emisiones de COV, notificando a la Organización.
6. Puede pedir la “nota de entrega de combustible pesado” y hacer una copia de ella. Esto debe ser realizado lo más expeditamente posible sin causar el atraso del buque.
7. Puede aprobar que la Regla 18 sobre Calidad del Combustible no se aplique en los casos en que hidrocarburos, como el combustible, sean producidos y usados posteriormente en el sitio en plataformas y plataformas petroleras perforadoras.
8. Todas las Partes del Protocolo de 1997 deben designar a las autoridades apropiadas para: mantener un registro de distribuidores locales de combustible; solicitar a los distribuidores locales para que proporcionen la nota y las muestras certificadas de que se cumple con las exigencias de este Anexo, manteniendo la nota por al menos 3 años para que sea verificada e inspeccionada por el Estado Rector del Puerto; tomar las acciones apropiadas contra los distribuidores de combustible cuyos combustibles no cumplen con lo afirmado en la nota; informar a la Administración de cualquier buque que haya recibido combustible que no cumple con los requerimientos de este Anexo; informar a la Organización de todos los

casos de distribuidores que no cumplan con los requerimientos especificados en las Reglas 14 o 18 del Anexo VI del MARPOL 73/78 para que lo transmita a las demás Partes del Protocolo de 1997.

9. En el mismo tema, con relación a la entrega de combustible, las Partes se comprometen a: informar a la Parte o no-Parte bajo cuya jurisdicción fue promulgada la “nota de entrega de combustible pesado” de aquellos combustibles no conformes a la nota y; asegurarse que la acción correctiva apropiada es tomada para provocar que el combustible descubierto no conforme cumpla con los requerimientos.
10. En el caso del control de los óxidos de nitrógeno es función de la Administración establecer medidas de control alternativas a motores instalados en buques que se ocupen solamente en viajes en aguas bajo la soberanía o jurisdicción del Estado de bandera que el buque enarbola. En este sentido tiene la facultad de dejar excluidos de la aplicación de esta regla a motores diesel instalados en buques construidos o que hayan sufrido una conversión mayor antes del 19 de mayo de 2005, con la condición de que el buque sea ocupado solamente en viajes hacia puertos o terminales costa afuera del Estado de bandera que el buque enarbola (para información adicional se recomienda ver 4.3.2.1.).
11. La Administración (de acuerdo al Código Técnico de NO<sub>x</sub>) puede aprobar cualquier sistema de reducción de emisión de los gases de escape, sea un método primario o secundario.
12. La Administración puede aprobar transformaciones importantes realizadas al motor siempre que cumplan con los requisitos de las emisiones de NO<sub>x</sub>, que se pueden ver en 4.3.4.6.

#### **4.4.2 Responsabilidades del Armador, Capitán y oficiales del buque.**

Es obligación que el buque al que se le debe aplicar esta norma cumpla con sus disposiciones, lo cual es responsabilidad del Armador y del Capitán, los que ayudados por sus Oficiales deben operar el buque de acuerdo a las disposiciones de este Anexo. Además es responsabilidad de los dos primeros facilitar la inspección del buque por parte de cualquier Estado Rector del Puerto o Estado Ribereño, facilitar la supervisión

por parte del Estado Rector del Puerto, exigir derecho a indemnización por demoras innecesarias y notificar sobre sucesos relacionados con descargas perjudiciales.

Las autoridades del buque arriba mencionadas tienen las siguientes responsabilidades con respecto a la aplicación de este Anexo:

1. Cuando ocurra un accidente o sea descubierto un defecto que afecte a la eficiencia o al cumplimiento de este Anexo en el buque el Capitán o el Armador informará a la Administración o al inspector correspondiente lo antes posible para que se promulgue un certificado pertinente.
2. Facilitar la inspección del buque en cualquier puerto o terminal costero de una Parte para verificar si el buque está emitiendo alguna de las sustancias cubiertas por este Anexo.
3. No se realizarán emisiones voluntarias de sustancias prohibidas reductoras del ozono. Los equipos que contienen dichas sustancias serán removidos desde buques.
4. Cuando se cambie el uso de un combustible de mayor índice de azufre a uno de menor índice deberán ser registrados en la bitácora de máquinas datos como el volumen de los estanques de combustible bajo en azufre y la fecha, hora y posición del buque cuando se complete cada operación de cambio de combustible.
5. Exigir la “nota de entrega de combustible pesado” al suministrador del combustible y asegurarse que lo expresado en ella coincido con la calidad del combustible suministrado.
6. Se deberá mantener la “nota de entrega de combustible pesado” durante los 3 años siguientes desde que el combustible ha sido entregado a bordo, junto a la muestra del combustible, firmada por el representante del distribuidor y el Capitán o el oficial a cargo de la faena de combustible.
7. Para la operación del incinerador de a bordo todo el personal responsable de su operación será entrenado y capacitado para implementar las directrices proporcionadas en el manual de operación del fabricante y se deberá poseer un manual de operación del fabricante que especificará como se opera el incinerador dentro de los límites correspondientes.

### **Conclusión.**

Del análisis del comportamiento de los contaminantes atmosféricos primarios (producidos por la fuente) y secundarios (producidos por reacciones químicas posteriores en la atmósfera) se concluye que, si bien los compuestos contaminantes son muchos, los elementos característicos son pocos y menos aún si nos fijamos en aquellos que tienen una real importancia producto de las emisiones desde buques y, principalmente, desde los motores de combustión interna, por lo que un tema como este, que en un comienzo puede parecer engorroso y complejo por la cantidad de factores que influyen no lo es si es analizado de forma ordenada. Los contaminantes atmosféricos que más destacan son los  $\text{NO}_x$  y  $\text{SO}_x$ , ya que son las emisiones provenientes de buques que mayores problemas causan.

Para analizar las emisiones de los buques fue necesario ver el funcionamiento de cada máquina que los emite, en este punto se aprecia que los motores diesel lentos generan una gran cantidad de óxidos de nitrógeno debido a factores como la alta temperatura y el tiempo de residencia en esa alta temperatura, factor fundamental en el resto del estudio. Es de gran importancia controlar las emisiones de  $\text{NO}_x$  desde buques ya que éstos aportan grandes cantidades de él, por lo cual se presentaron varios métodos de reducción de sus emisiones creados y fabricados por distintas empresas, indicando que los  $\text{NO}_x$  han sido reducidos hasta en un 95%.

En cuanto a los óxidos de azufre se concluye que el método de reducción más efectivo es utilizar combustibles de bajo índice de azufre, aunque eleva los costos operacionales de buques es un método de fácil operación porque cada vez existen en el mercado combustibles de mejor calidad, con lo que se evita la instalación de un equipo de reducción a bordo. Esto queda absolutamente claro cuando comparamos los petróleos diesel del año 1997 con los del 2004 donde se puede ver que el contenido de azufre ha disminuido, por ejemplo en los DA desde 1,5% a 0,005%.

Las calderas e incineradores navales modernos no tienen las altas emisiones que tienen los motores de combustión interna, debido a que los mismos fabricantes han desarrollado tecnologías reductoras, es por esto que han pasado a ser una preocupación secundaria en este tema. Los equipos de refrigeración, aire acondicionado y los de extinción de incendios tienen sus elementos más contaminantes limitados por las leyes vigentes debido a la alta peligrosidad de sus emisiones. En este punto queda una tarea pendiente a las empresas fabricantes de estos productos para la creación de compuestos nuevos cada vez más inocuos al medio ambiente.

Emisiones provenientes de fuentes como las nombradas son las que cubre el Anexo VI del MARPOL 73/78. Convenio que a lo largo de su corta pero intensa historia ha restringido la contaminación que provocan los buques, con lo cual la IMO muestra su preocupación por mantener a un medio ambiente "sano", demostrando que se pueden lograr acuerdos internacionales importantes en esta materia. En cuanto a las emisiones al aire ha logrado fijar límites, que si bien no son tan altos, son suficientes para disminuir las emisiones sin afectar al negocio marítimo, en este sentido el Anexo VI del MARPOL 73/78 cuenta con párrafos que intentan que los buques no sean demorados excesivamente en puertos y promueven el uso de nuevas tecnologías para reducir las emisiones y no transformarse, de esta forma, en un Convenio que limite el comercio, sino que lo guíe al camino correcto para que el mundo se desarrolle sustentablemente.

En este sentido el Anexo VI ha limitado de manera importante las emisiones de, por ejemplo, las sustancias reductoras del ozono, los SO<sub>x</sub> y los NO<sub>x</sub>. Favoreciendo que las empresas fabricantes desarrollen nuevas tecnologías para disminuir las emisiones de sus máquinas, las que ya han cumplido con lo exigido por el Anexo VI y han seguido invirtiendo tiempo y recursos para continuar disminuyendo las emisiones debido a las exigencias del mercado, esto es una población y leyes cada vez más estrictas.

La forma de la ley frente a los COV demostrará con el paso de los años cuáles son los países que están realmente interesados en liberar sus aires de contaminantes ya que de acuerdo a la Regla 15 cada Gobierno designará los puertos y terminales donde se realizará el control de esas sustancias demostrando la preocupación particular frente al tema.

No se debe finalizar sin señalar que este Convenio debe ser estudiado por todas las partes a las que afecta, para que pueda ser respetado, esto toma mayor importancia al ser avalado por el desinterés y desinformación por parte de personas que son las encargadas de tomar decisiones importantes para en el transporte marítimo nacional, las que ven a este tema como algo muy lejano y de poca importancia. Cosa errónea, ya que por sus características es importante para todo el globo y por lo mismo debe ser atacado por todos sus frentes, ya sean legales, informativos o científicos, y es en este punto donde aparece un elemento importante, la trans-disciplinariedad de él, lo que quiere decir que debe ser abordado por diferentes disciplinas, incluida la Ingeniería Naval, para trabajar en conjunto y lograr resultados óptimos y transversales.

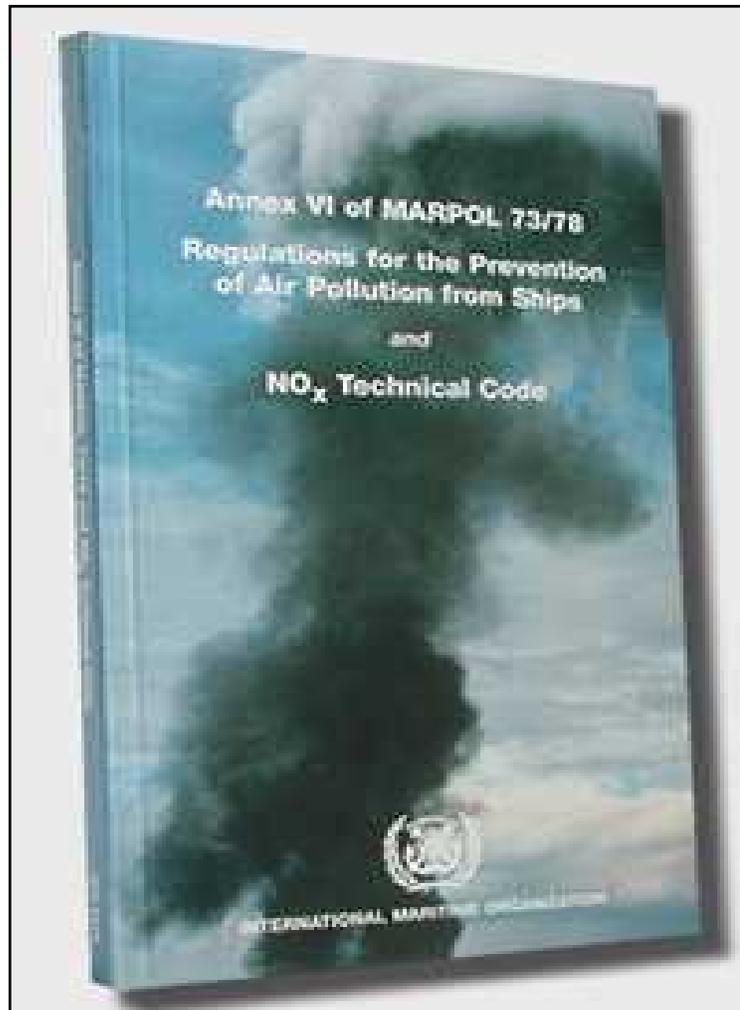
**Bibliografía.**

1. [http://www.puc.cl/sw\\_educ/contam/](http://www.puc.cl/sw_educ/contam/)
2. “El cambio global en el medio ambiente. Introducción a sus causas humanas”.  
Manuel Ludevid Anglada.  
1998.
3. “Ingeniería del medio ambiente. Aplicada al medio natural continental”.  
Dr. Mariano Seoanez Calvo y colaboradores.  
1996.
4. “Contaminación del aire y ruido”.  
Dr. Juan Grau.  
Sin fecha.
5. “Ingeniería del Medio Ambiente, Clasificación de los contaminantes atmosféricos según su composición”.  
1996.
6. “Enciclopedia de la Salud y Seguridad en el Trabajo”.  
Oficina Internacional del Trabajo. Ministerio de Trabajo y Seguridad Social.  
Dr. Luigi Parmeggiani.
7. “Diccionario de Química y de Productos Químicos”.  
Gessner G. Hawley.  
1975.
8. Enciclopedia virtual “Biblioteca de Consulta Microsoft Encarta 2004”.
9. “Contaminación del Aire. Origen y Control”.  
Kenneth Wark, Cecil F. Warner.  
1999.
10. “Química medioambiental”.  
Thomas G. Spiro, William M. Stigliani.  
2004.

11. "Ingeniería Ambiental".  
J Glynn Henry, Gary W. Heinke.  
1999.
12. "Termodinámica". Tomo II, Segunda Edición.  
Yunus A. Çengel. Michael A. Boles.  
Editorial Mc Graw Hill.  
2001.
13. <http://www.wartsila.com>
14. <http://www.marineengineering.org.uk>
15. Normas chilenas NCh 2286/1.Of95 y NCh 2286/2.Of95.  
Instituto Nacional de Normalización.
16. "Marine Engineering".  
Roy Harrington.  
1992.
17. "El Convenio Internacional MARPOL 73/78".  
Francisco Archanco Fernández.  
Revista Ingeniería Naval, Junio 1.987.
18. "Prevención de la Contaminación Atmosférica por los Buques".  
Manuel Berríos Rojas.  
Revista Bitácora, año 2001.
19. "Manual para la Aplicación del MARPOL 73/78".  
Ignacio Vergara.  
Segunda edición, 1988.
20. Apuntes asignatura "Máquinas Marinas y Auxiliares".
21. <http://www.copec.cl>

**Anexos.**

**Anexo 1.**



Si se desea ver el Anexo VI del MARPOL 73/78 éste se encuentra disponible en versión virtual que acompaña a esta tesis.

## Anexo 2.

### **Type approval and operating limits for shipboard incinerators (Regulation 16)**

(1) Shipboard incinerators described in regulation 16(2) shall possess an IMO type approval certificate for each incinerator. In order to obtain such certificate, the incinerator shall be designed and built to an approved standard as described in regulation 16(2). Each model shall be subject to a specified type approval test operation at the factory or an approved test facility, and under the responsibility of the Administration, using the following standard fuel/waste specification for the type approval test for determining whether the incinerator operates within the limits specified in paragraph (2) of this appendix:

Sludge oil consisting of:	75% sludge oil from HFO; 5% waste lubricating oil; and 20% emulsified water
Solid waste consisting of:	50% food waste 50% rubbish containing approx. 30% paper, approx. 40% cardboard, approx. 10% rags, approx. 20% plastic
	The mixture will have up to 50% moisture and 7% incombustible solids.

(2) Incinerators described in regulation 16(2) shall operate within the following limits:

O <sub>2</sub> in combustion chamber:	6–12%
CO in flue gas maximum average:	200 mg/MJ
Soot number maximum average:	Bacharach 3 or Ringelman 1 (20% opacity) (A higher soot number is acceptable only during very short periods such as starting up)
Unburned components in ash residues:	maximum 10% by weight
Combustion chamber flue gas outlet temperature range:	850–1200°C

**Anexo 3.**

**INTERNATIONAL AIR POLLUTION PREVENTION CERTIFICATE**

Issued under the provisions of the Protocol of 1997 to amend the International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973, as modified of the Protocol of 1978 related thereto (hereinafter referred to as "the Convention") under the authority of the Government of:

.....

*(full designation of the country)*

by .....

*(full designation of the competent person or organization  
authorized under the provisions of the Convention)*

<b>Name of ship</b>	<b>Distinctive number or letters</b>	<b>IMO number</b>	<b>Port of registry</b>	<b>Gross tonnage</b>

Type of ship:     tanker  
                       ships other than a tanker

**THIS IS TO CERTIFY:**

1. That the ship has been surveyed in accordance with regulation 5 of Annex VI of the Convention; and
2. That the survey shows that the equipment, systems, fittings, arrangements and materials fully comply with the applicable requirements of Annex VI of the Convention.

This certificate is valid until ..... subject to surveys in accordance with regulation 5 of Annex VI of the Convention.

Issued at .....

*(Place of issue of certificate)*

.....  
*(Date of issue)*

.....  
*(Signature of duly authorized official  
issuing the certificate)*

*(Seal or stamp of the authority,  
as appropriate)*

**ENDORSEMENT FOR ANNUAL AND INTERMEDIATE SURVEYS**

THIS IS TO CERTIFY that at a survey required by regulation 5 of Annex VI of the Convention the ship was found to comply with the relevant provisions of the Convention:

Annual survey: Signed .....

(Signature of duly authorized official)

Place .....

Date .....

*(Seal or stamp of the authority, as appropriate)*

Annual\*/Intermediate\* survey: Signed .....

(Signature of duly authorized official)

Place .....

Date .....

*(Seal or stamp of the authority, as appropriate)*

Annual\*/Intermediate\* survey: Signed .....

(Signature of duly authorized official)

Place .....

Date .....

*(Seal or stamp of the authority, as appropriate)*

Annual survey: Signed .....

(Signature of duly authorized official)

Place .....

Date .....

*(Seal or stamp of the authority, as appropriate)*

\_\_\_\_\_  
\* Delete as appropriate.

**SUPPLEMENT TO  
INTERNATIONAL AIR POLLUTION PREVENTION CERTIFICATE  
(IAPP CERTIFICATE)**

**RECORD OF CONSTRUCTION AND EQUIPMENT**

In respect of the provisions of Annex VI of the International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973, as modified by the Protocol of 1978 relating thereto (hereinafter referred to as "the Convention").

*Notes:*

- 1 This Record shall be permanently attached to the IAPP Certificate. The IAPP Certificate shall be available on board the ship at all times.
- 2 If the language of the original Record is not English, French or Spanish, the text shall include a translation into one of these languages.
- 3 Entries in boxes shall be made by inserting either a cross (x) for the answer "yes" and "applicable" or a (-) for the answers "no" and "not applicable" as appropriate.
- 4 Unless otherwise stated, regulations mentioned in this Record refer to regulations of Annex VI of the Convention and resolutions or circulars refer to those adopted by the International Maritime Organization.

**1 Particulars of ship**

- 1.1 Name of ship .....
- 1.2 Distinctive number or letters .....
- 1.3 IMO number .....
- 1.4 Port of registry .....
- 1.5 Gross tonnage .....
- 1.6 Date on which keel was laid or ship was at a similar stage of construction .....
- 1.7 Date of commencement of major engine conversion (if applicable) (regulation 13): .....

## 2 Control of emissions from ships

### 2.1 Ozone-depleting substances (regulation 12)

2.1.1 The following fire-extinguishing systems and equipment containing halons may continue in service: .....

System equipment	Location on board

2.1.2 The following systems and equipment containing CFCs may continue in service:.....

System equipment	Location on board

2.1.3 The following systems containing hydro-chlorofluorocarbons (HCFCs) installed before 1 January 2020 may continue in service:....

System equipment	Location on board

### 2.2 Nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>) (regulation 13)

2.2.1 The following diesel engines with power output greater than 130 kW, and installed on a ship constructed on or after 1 January 2000, comply with the emission standards of regulation 13(3)(a) in accordance with the NO<sub>x</sub> Technical Code: .....

Manufacturer and model	Serial number	Use	Power output (kW)	Rated speed (rpm)

2.2.2 The following diesel engines with power output greater than 130 kW, and which underwent major conversion per regulation 13(2) on or after 1 January 2000, comply with the emission standards of regulation 13(3)(a) in accordance with the NO<sub>x</sub> Technical Code: .....

Manufacturer and model	Serial number	Use	Power output (kW)	Rated speed (rpm)

2.2.3 The following diesel engines with a power output greater than 130 kW and installed on a ship constructed on or after 1 January 2000, or with a power output greater than 130 kW and which underwent major conversion per regulation 13(2) on or after 1 January 2000, are fitted with an exhaust gas cleaning system or other equivalent methods in accordance with regulation 13(3), and the NO<sub>x</sub> Technical Code: .....

Manufacturer and model	Serial number	Use	Power output (kW)	Rated speed (rpm)

2.2.4 The following diesel engines from 2.2.1, 2.2.2 and 2.2.3 above are fitted with NO<sub>x</sub> emission monitoring and recording devices in accordance with the NO<sub>x</sub> Technical Code: .....

Manufacturer and model	Serial number	Use	Power output (kW)	Rated speed (rpm)

### 2.3 Sulphur oxides (SO<sub>x</sub>) (regulation 14)

2.3.1 When the ship operates within an SO<sub>x</sub> emission control area specified in regulation 14(3), the ship uses:

- .1 fuel oil with a sulphur content that does not exceed 1.5% m/m as documented by bunker delivery notes; or .....

- .2 an approved exhaust gas cleaning system to reduce SO<sub>x</sub> emissions below 6.0 g SO<sub>x</sub>/kW h; or .....
- .3 other approved technology to reduce SO<sub>x</sub> emissions below 6.0 g SO<sub>x</sub>/kW h .....

**2.4 Volatile organic compounds (VOCs) (regulation 15)**

2.4.1 The tanker has a vapour collection system installed and approved in accordance with MSC/Circ.585.....

2.5 The ship has an incinerator:

- .1 which complies with resolution MEPC.76(40) as amended .....
- .2 installed before 1 January 2000 which does not comply with resolution MEPC.76(40) as amended.....

THIS IS TO CERTIFY that this Record is correct in all respects.

Issued at.....

*(Place of issue of the Record)*

.....  
*Date of issue*

.....  
*(Signature of duly authorized official  
issuing the Record)*

*(Seal or stamp of the authority, as appropriate)*

**Anexo 4.**

**TECHNICAL CODE  
ON CONTROL OF EMISSION OF NITROGEN OXIDES  
FROM  
MARINE DIESEL ENGINES**

Este Código se encuentra disponible en una versión virtual que acompaña a esta tesis.

## Anexo 5.

**Form of EIAPP Certificate**  
(Refer to 2.2.9 of the NO<sub>x</sub> Technical Code)

**ENGINE INTERNATIONAL AIR POLLUTION PREVENTION CERTIFICATE**

Issued under the provisions of the Protocol of 1997 to the International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973, as modified by the Protocol of 1978 related thereto (hereinafter referred to as "the Convention") under the authority of the Government of:

.....  
*(full designation of the country)*

by.....  
*(full designation of the competent person or organization  
authorized under the provisions of the Convention)*

Engine Manufacturer	Model number	Serial number	Test Cycle(s)	Rated Power (kW) and Speed (RPM)	Engine Approval number

THIS IS TO CERTIFY:

1. That the above-mentioned marine diesel engine has been surveyed for pre-certification in accordance with the requirements of the Technical Code on Control of Emission of Nitrogen Oxides from Marine Diesel Engines made mandatory by Annex VI of the Convention; and
2. That the pre-certification survey shows that the engine, its components, adjustable features, and Technical File, prior to the engine's installation and/or service on board a ship, fully comply with the applicable regulation 13 of Annex VI of the Convention.

This certificate is valid for the life of the engine subject to surveys in accordance with regulation 5 of Annex VI of the Convention, installed in ships under the authority of this Government.

Issued at .....  
*(Place of issue of certificate)*

.....20..  
*(Date of issue)*

.....  
*(signature of duty authorized official  
issuing the certificate)*

*(Seal or Stamp of the authority, as appropriate)*

**Supplement to Engine International Air Pollution Prevention Certificate  
(EIAPP Certificate)**

**RECORD OF CONSTRUCTION, TECHNICAL FILE AND MEANS OF VERIFICATION**

In respect of the provisions of Annex VI of the International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973, as modified by the Protocols of 1978 and 1997 relating thereto (hereinafter referred to as "the Convention") and of the Technical Code on Control of Emission of Nitrogen Oxides from Marine Diesel Engines (hereinafter referred to as the "NO<sub>x</sub> Technical Code").

*Notes:*

- 1 This Record and its attachments shall be permanently attached to the **EIAPP** Certificate. The **EIAPP** Certificate shall accompany the engine throughout its life and shall be available on board the ship at all times.
- 2 If the language of the original Record is neither English nor French, the text shall include a translation into one of these languages.
- 3 Unless otherwise stated, regulations mentioned in this Record refer to regulations of Annex VI of the Convention and the requirements for an engine's Technical File and means of verifications refer to mandatory requirements from the NO<sub>x</sub> Technical Code.

**1 Particulars of the engine**

- 1.1 Name and address of manufacturer .....
- 1.2 Place of engine build .....
- 1.3 Date of engine build .....
- 1.4 Place of pre-certification survey .....
- 1.5 Date of pre-certification survey .....
- 1.6 Engine type and model number .....
- 1.7 Engine serial number .....
- 1.8 If applicable, the engine is a parent engine  or a member engine  of the following engine family  or engine group  .....
- 1.9 Test cycle(s) (see chapter 3 of the NO<sub>x</sub> Technical Code) .....
- 1.10 Rated Power (kW) and Speed (RPM) .....
- 1.11 Engine approval number .....
- 1.12 Specification(s) of test fuel .....

1.13 NO<sub>x</sub> reducing device designated approval number (if installed) .....

1.14 Applicable NO<sub>x</sub> Emission Limit (g/kWh) (regulation 13 of Annex VI) .....

1.15 Engine's actual NO<sub>x</sub> Emission Value (g/kWh) .....

**2 Particulars of the Technical File**

2.1 Technical File identification/approval number .....

2.2 Technical File approval date .....

2.3 The Technical File, as required by chapter 2 of the NO<sub>x</sub> Technical Code, is an essential part of the EIAPP Certificate and must always accompany an engine throughout its life and always be available on board a ship.

**3 Specifications for the On-board NO<sub>x</sub> Verification Procedures for the Engine Parameter Survey**

3.1 On-board NO<sub>x</sub> verification procedures identification/approval number .....

3.2 On-board NO<sub>x</sub> verification procedures approval date .....

3.3 The specifications for the on-board NO<sub>x</sub> verification procedures, as required by chapter 6 of the NO<sub>x</sub> Technical Code, is an essential part of the EIAPP Certificate and must always accompany an engine through its life and always be available on board a ship.

THIS IS TO CERTIFY that this Record is correct in all respects.

Issued at .....  
(Place of issue of the record)

.....20.. .....  
(Date of issue) (signature of duly authorized official issuing the Record)

(Seal or Stamp of the authority, as appropriate)