



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI DI TRIESTE

Vittorio BUCCI

Progetto di impianti di propulsione navale

3.6 EMISSIONI

Anno Accademico 2017/2018

New European Ferry – Attività 8.1

Contenimento delle emissioni inquinanti delle navi

1. Introduzione

Negli ultimi anni è notevolmente aumentata l'attenzione verso gli aspetti ambientali e le variazioni percentuali dei componenti dell'atmosfera nonché il decadimento della qualità dell'aria e dell'acqua sono considerati problematiche da tenere sotto controllo.

Le emissioni industriali ed i gas di scarico dei motori a combustione interna sono tra le cause più importanti delle variazioni atmosferiche in quanto il combustibile più utilizzato per produrre energia è di origine fossile.

I motori propulsivi delle navi utilizzano combustibili residuati ad elevata viscosità che sono altamente inquinanti per il loro elevato contenuto di zolfo e di componenti aromatici. Le emissioni dei gas di scarico di tali motori hanno un serio crescente impatto ambientale sia per l'aumento della potenza installata su ogni nave sia per l'aumento del traffico marittimo negli ultimi 20 anni.

Le normative di controllo delle emissioni sono in continua evoluzione sia a livello internazionale sia regionale. Conseguentemente, tutti in costruttori di motori e di altri macchinari inquinanti sono alla continua ricerca di soluzioni tecniche idonee a ridurre le emissioni ed a migliorare il trattamento delle acque di scarico.

In questa breve nota sono descritti:

- i principali componenti inquinanti dei gas di scarico;
- i livelli di emissione attuali tipici dei motori;
- lo stato dell'arte delle normative in vigore o di prossima applicazione;
- i provvedimenti per ridurre le emissioni adottati sui motori e sull'impiantistica esterna ai motori;

2. Emissioni in aria

2.1. Composizione tipica dei gas di scarico

I gas di scarico dei motori diesel normalmente contengono azoto (N_2), ossigeno (O_2), anidride carbonica (CO_2) ed acqua (H_2O) per una percentuale totale minima del 99,5% in volume.

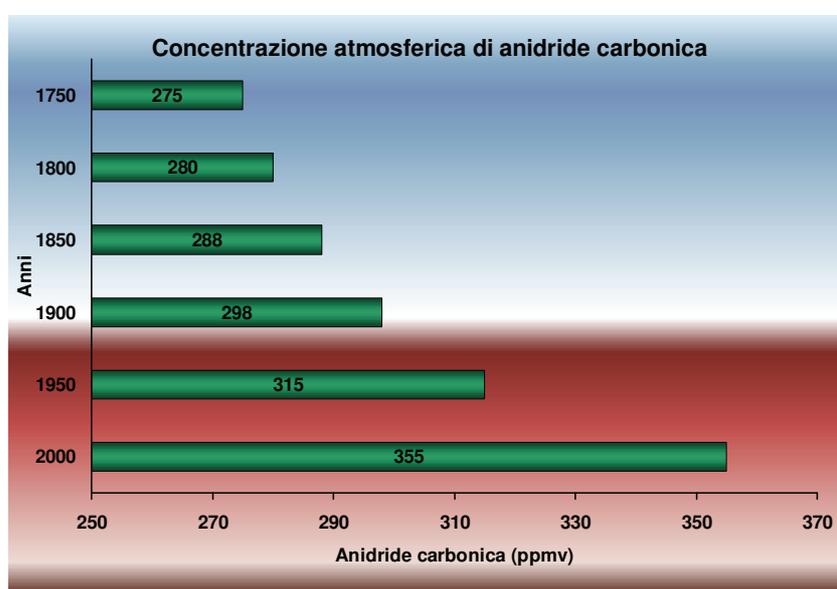
La restante percentuale è costituita dai componenti ritenuti inquinanti, precisamente:

- Ossidi di azoto (NO_x);
- Ossidi di zolfo (SO_x): dipendente dal tenore di zolfo del combustibile;
- Monossido di carbonio (CO): Tenuto sotto controllo con una buona combustione;
- Idrocarburi (THC): Tenuti sotto controllo con una buona combustione;
- Componenti organici volatili (VOC): Tenuti sotto controllo con una buona combustione;
- Particolati (PM): Bassi in condizioni stazionarie ed elevati durante i transitori di carico;
- Fumosità visibile (FV): Elevata a bassi carichi e durante i transitori di carico.

2.1.1. Ossidi di carbonio

L'anidride carbonica (CO₂) è prodotta in tutti i processi di combustione di fluidi ad elevato contenuto di carbonio. E' un gas incolore, inodore, non tossico ed è un componente naturale dell'atmosfera. L'emissione di CO₂ è praticamente direttamente proporzionale al contenuto di carbonio del combustibile che viene ossidato durante il processo di combustione. Una parte di CO₂ è anche prodotta dall'ossidazione del carbonio contenuto nell'olio lubrificante, ma è di entità trascurabile rispetto alla precedente.

L'industrializzazione dalla seconda metà del XIX^o secolo ha portato ad un continuo aumento esponenziale della concentrazione di anidride carbonica nell'atmosfera, come indicato nel grafico seguente che riassume i valori medi misurati in alcune zone del mondo:



Tale aumento di anidride carbonica è il fattore che contribuisce maggiormente ad aumentare il riscaldamento globale dell'atmosfera, noto come effetto serra, che provoca cambi climatici ed ha una potenziale influenza nella distribuzione delle precipitazioni e nel sistema delle correnti marine.

Il programma di riduzione della CO₂ è regolato dall'accordo di Kyoto, che è stato ratificato da molti stati ma non dagli USA.

L'ossido di carbonio (CO) è un gas incolore, inodore e molto tossico. E' presente nei gas di scarico dei motori solo come risultato di una cattiva combustione del combustibile, cioè combustione con sacche locali di insufficienza d'aria e bassa temperatura.

Pertanto, le emissioni di CO dei motori marini sono molto basse e non hanno un significativo impatto ambientale.

2.1.2. Ossidi di azoto

L'anidride nitrosa (NO_2) e l'ossido di azoto (NO) sono indicati come ossidi di azoto (NO_x). Il primo è molto tossico e colorato mentre il secondo è incolore.

La principale fonte di azoto è ovviamente l'aria di aspirazione ed il processo di formazione degli ossidi di azoto è chimicamente molto complesso. La percentuale di ossidi dipende dal livello di temperatura della combustione: maggiore è la temperatura e maggiore è la formazione di NO_x .

Gli impatti ambientali degli NO_x sono la formazione di piogge acide, l'eccessiva fertilizzazione degli strati superficiali del suolo e dei laghi, la formazione di ozono e smog negli strati inferiori dell'atmosfera, specialmente nei centri urbani, ecc.

Il principale mezzo di controllo per ridurre l'emissione di NO_x è l'ottimizzazione della combustione.

2.1.3. Ossidi di zolfo

L'anidride solforosa (SO_2), molto tossica, e quella solforica (SO_3), molto corrosiva, sono indicate come ossidi di zolfo (SO_x). Tali ossidi sono formati dallo zolfo contenuto nel combustibile che viene ossidato durante il processo di combustione. Il loro livello nei gas di scarico è pertanto direttamente proporzionale al contenuto di zolfo nel combustibile.

Normalmente, gli SO_x hanno una percentuale di SO_2 superiore al 90 %, contribuiscono alla formazione di piogge acide ed hanno effetti dannosi sulla salute umana, sulla vegetazione, sugli edifici.

2.1.4. Idrocarburi e componenti volatili

La determinazione della presenza di idrocarburi (TCH) e di componenti volatili (VOC) nelle emissioni dei gas di scarico è molto difficoltosa a causa della differente composizione dei combustibili commerciali. Essi sono presenti nei gas di scarico solo come risultato di una cattiva combustione del combustibile, in questo caso o per combustione con sacche locali di aria in eccesso oppure per successiva evaporazione di incombusti.

In generale, tali emissioni per i motori marini sono molto basse, sia per le buone condizioni di combustione sia per l'utilizzo di combustibile pesante (HFO) che ha meno componenti volatili, e non hanno un significativo impatto ambientale.

2.1.5. Particolati e fumosità

La determinazione dei livelli di particolati e della fumosità è molto complessa e difficoltosa a causa della condensazione od evaporazione dei campioni oggetto della misura, influenzate dalla pressione e temperatura ambientali, della dimensione dei particolati, del colore del fumo ecc.

Pertanto i risultati sono molto influenzati dal metodo di misura utilizzato e più risultati possono essere confrontati solo se le misure sono state eseguite con la stessa metodologia e nelle stesse condizioni di riferimento.

I particolati, chiamati normalmente anche “fuliggine”, in condizioni di funzionamento stazionarie del motore si formano nelle zone della camera di combustione con alta insufficienza di ossigeno oppure in condizioni transitorie per elevato rapporto combustibile/aria.

I particolati di piccole dimensioni, inferiori a 0,2 µm, si distribuiscono su vaste aree trasportati dalle correnti di aria ed hanno un elevato impatto ambientale in quanto sono considerati cancerogeni.

2.2.1 Riepilogo emissioni in aria motori diesel marini

Le emissioni dei motori diesel che hanno un sensibile impatto ambientale sono, per quanto detto nei paragrafi precedenti, gli ossidi di azoto (NO_x), l’anidride solforosa (SO₂) e l’anidride carbonica (CO₂).

Il peso ponderale dei consumi e delle emissioni di tali motori, in percentuale rispetto al globale dei sistemi industriali, è stimato come segue:

Item	%
Consumo totale combustibile ed olio lubrificante	5
Emissione CO ₂ prodotta da combustibile ed olio lubrificante	5
Consumo di combustibile fossile, gassoso, liquido o solido	2-3
Emissione NO _x prodotta dal combustibile	13
Emissione SO _x prodotta dal combustibile considerando un contenuto medio di zolfo di circa il 2,8%	3-5

Inoltre, la produzione totale di anidride carbonica dei motori diesel marini è stimata intorno alle 500 milioni di tonnellate per anno.

Come si può notare l’influenza delle emissioni in aria dei motori marini è attualmente di entità trascurabile rispetto a quella degli impianti industriali. Tuttavia, con le legislazioni già in vigore per gli impianti industriali che impongono forti riduzioni delle emissioni e con l’incremento annuale di circa 4-5 % del traffico marino, la percentuale delle emissioni marine è in continuo aumento. Conseguentemente, nei prossimi anni saranno richieste ulteriori riduzioni delle emissioni dei motori marini.

2.3. Scenario delle normative

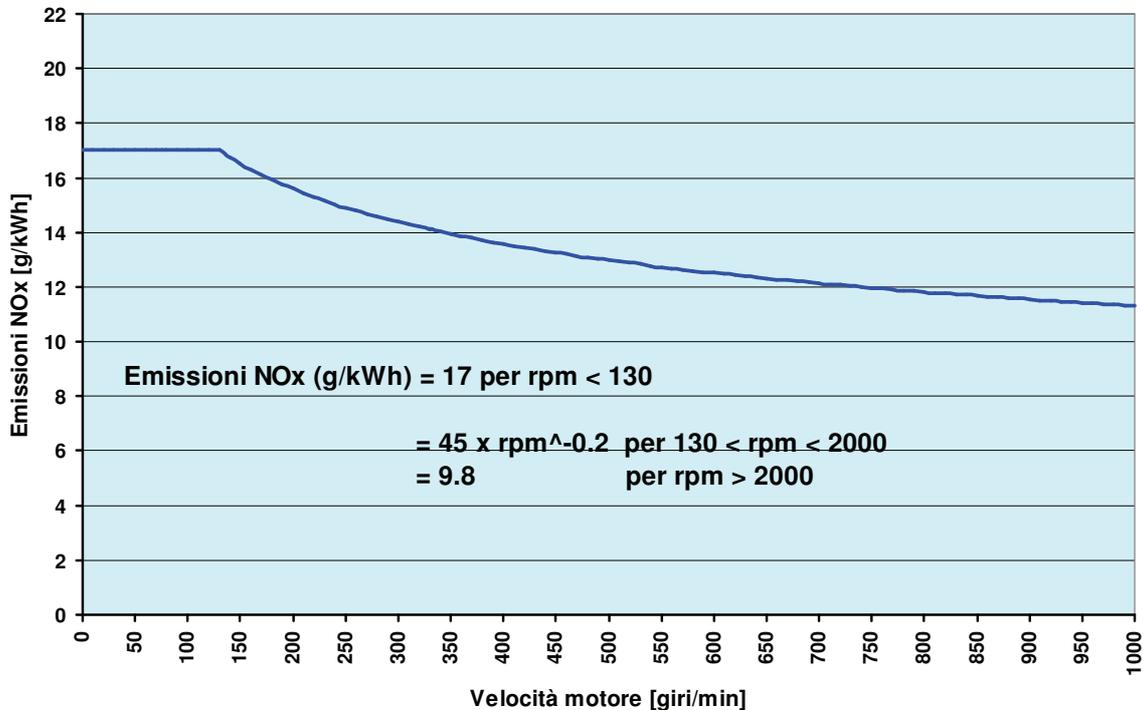
Le normative relative alle emissioni si possono catalogare in internazionali, regionali, nazionali. Sono inoltre importanti i programmi di controllo delle emissioni definiti o proposti dalle Società di Classifica e dall’EPA.

Le normative principali attuali sono le seguenti:

2.3.1 Normativa internazionale

L’unica normativa a validità internazionale è la IMO Marpol 73/78 Annex VI, ratificata definitivamente ed entrata in vigore il 19 maggio 2005. Definisce i limiti delle emissioni NO_x e SO_x per i gas di scarico dei motori diesel, rispettivamente in funzione della velocità di rotazione del motore e del contenuto di zolfo del combustibile;

I limiti delle emissioni NO_x in g/kWh sono indicati nel grafico seguente, limitato fino alla velocità di 1000 giri/min che è la massima dei motori installati sui traghetti:



Tali limiti sono applicabili per tutte le navi già costruite, o ancora in costruzione, con la chiglia impostata dopo il 1° gennaio 2000 o per navi che hanno sostituito completamente il motore o che hanno apportato modifiche sostanziali al motore o che hanno aumentato più del 10 % la potenza del motore.

La IMO ha programmato inoltre di introdurre nei prossimi anni (2010?) una normativa IMO II con prescrizione di valori più bassi delle emissioni NO_x di circa il 33 %.

Le emissioni SO_x sono regolate dalla IMO attraverso la limitazione del contenuto di zolfo nel combustibile, considerando che tutto lo zolfo che entra con il combustibile nel motore è emesso con il gas di scarico come SO_x. Tale limite è attualmente il 4,5 % in peso.

2.3.2 Normative nazionali

- La Environmental Protection Agency (EPA) ha emesso una nuova normativa agli inizi del 2003 relativa ai limiti delle emissioni dei gas di scarico dei motori marini per la navigazione all'interno delle acque territoriali degli USA. L'EPA ha inoltre già annunciato l'emissione nel 2007 di un'ulteriore legge con limiti più stringenti.

Tale norma prescrive i limiti per NO_x, PM e CO. E' valida anche per motori con cilindrata superiore a 30 litri/cilindro e per questi motori i limiti di NO_x sono gli stessi della norma IMO.

La seguente tabella riepiloga le prescrizioni della norma EPA:

Cilindrata [litri/cilindro]	HC + NO _x [g/kWh]	PM [g/kWh]	CO [g/kWh]	Data prevista aggiornamento
C < 0,9	7,5	0,4	5,0	2005
0,9 < C < 1,2	7,2	0,3	5,0	2004
1,2 < C < 2,5	7,2	0,2	5,0	2004
2,5 < C < 5,0	7,2	0,2	5,0	2007
5,0 < C < 15,0	7,8	0,27	5,0	2007
15,0 < C < 20,0 Per potenza < 3300 kW	8,7	0,5	5,0	2007
15,0 < C < 20,0 Per potenza > 3300 kW	9,8	0,5	5,0	2007
20,0 < C < 25,0	9,8	0,5	5,0	2007
25,0 < C < 30,0	11,0	0,5	5,0	2007
C > 30,0	IMO	----	----	2004

- L'Unione Europea (EU), considerata un'unica nazione per semplicità, sta sviluppando una normativa per limitare le emissioni di NO_x e SO_x in alcune aree di mare particolari e vie di acqua interne (fiumi, canali e laghi). Tale normativa non è stata ancora emessa.

2.3.3 Normative regionali

- Svezia e Norvegia hanno in studio o in vigore normative che differenziano le tariffe portuali e di navigazione nei canali interni in funzione del livello di emissione degli NO_x.
- L'Alaska ha in vigore una normativa che limita, in modo articolato e non semplice, l'incremento della fumosità visibile all'interno di tre miglia dalle coste.
- Fiume Reno: Dal 2003 è in vigore una normativa con gli stessi limiti NO_x della norma IMO Marpol 73/78 Annex VI per motori con velocità inferiore a 2000 giri/min. E' prevista per il 2007 una diminuzione di tale limite di 3 g/kWh.

2.3.4 Programmi di controllo delle emissioni (Società di Classifica ed EPA)

- Le principali SC, American Bureau of Shipping - Bureau Veritas – Det Norske Veritas – Lloyd's Register – Registro Italiano Navale ecc, hanno aggiunto una notazione di classe relativa alla prevenzione dell'inquinamento da NO_x ed SO_x.
Le prescrizioni per le emissioni NO_x sono abbastanza complesse e prevedono o l'accettazione dei limiti IMO o richiedono riduzioni fino al 40 %.
Le prescrizioni per le emissioni SO_x prevedono sia un limite in peso al contenuto dello zolfo nel combustibile sia, in alternativa, un limite di contenuto nei gas di scarico in g/kWh. Sono previste inoltre limitazioni ulteriori per servizio in Mar Baltico, nel Mare del Nord ed in generale in porto.
Tali normative sono riassunte nella seguente tabella:

Programma controllo emissioni					
Società di Classifica	Notazione di classe	Navigazione	Limite NO _x	Limite SO _x	
				Zolfo in peso nel comb.	Emissioni in g/kWh
American Bureau of Shipping	Environmental Safety (ES)	Libera	IMO	< 3,0 %	< 12
		Aree controllate o in porto		< 1,5 %	< 6
Bureau Veritas	Clean Air	Libera	IMO	< 4,5 %	---
		Aree controllate o in porto		< 1,5 %	< 6
Det Norske Veritas	Clean	Libera	IMO	< 3,0 %	< 12
		Aree controllate o in porto		< 1,5 %	< 6
	Clean Design	Libera	IMO - 40 %	< 3,0 %	< 12
		Aree controllate o in porto		< 0,5 %	< 2
Lloyd's Register	"N" character	---	IMO - 20 %	---	---
	"S" character	---	---	< 1,0 %	---
Registro Italiano Navale	Clean Air	Libera	IMO	< 3,0 %	---
		Aree controllate o in porto		< 1,5 %	---

- Anche l'EPA ha aggiunto prescrizioni particolari sulle emissioni per i motori della "Blu Sky Series". La seguente tabella riassume le nuove prescrizioni evidenziando la riduzione in percentuale rispetto alla tabella precedente:

Cilindrata [litri/cilindro]	HC + NO _x [g/kWh]	Riduzione [%]	PM [g/kWh]	Riduzione [%]
C < 0,9	4,0	47	0,24	40
0,9 < C < 1,2	4,0	44	0,18	40
1,2 < C < 2,5	4,0	44	0,12	40
2,5 < C < 5,0	5,0	30	0,12	40
5,0 < C < 15,0	5,0	36	0,16	40
15,0 < C < 20,0 Per potenza < 3300 kW	5,2	40	0,30	40
15,0 < C < 20,0 Per potenza > 3300 kW	5,9	40	0,30	40
20,0 < C < 25,0	5,9	40	0,30	40
25,0 < C < 30,0	6,6	40	0,30	40
C > 30,0	IMO	---	---	---

2.3.5 Normative per il Mar Baltico e per il Mare del Nord

- Entrambe prescrivono o una percentuale massima in peso dell'1,5 % del contenuto di zolfo nel combustibile o un trattamento di lavaggio dei gas di scarico (Scrubbers) con l'obiettivo di ridurre le emissioni di SO_x che, come già detto nei precedenti paragrafi, sono direttamente proporzionali a tale contenuto di zolfo. Tale prescrizione è parte integrante della norma IMO Marpol 73/78 Annex VI ed entrerà presumibilmente in vigore a novembre del 2007. Il rispetto di tale normativa non richiede modifiche sui motori, ma le navi che navigano in tali aree devono avere a bordo o un combustibile con tali requisiti e gli impianti predisposti per eseguire tutti i trattamenti ed i travasi oppure un sistema di lavaggio di gas di scarico per ridurre le emissioni a meno di 6,0 g/kWh

La figura seguente delimita le aree oggetto di tale normativa:

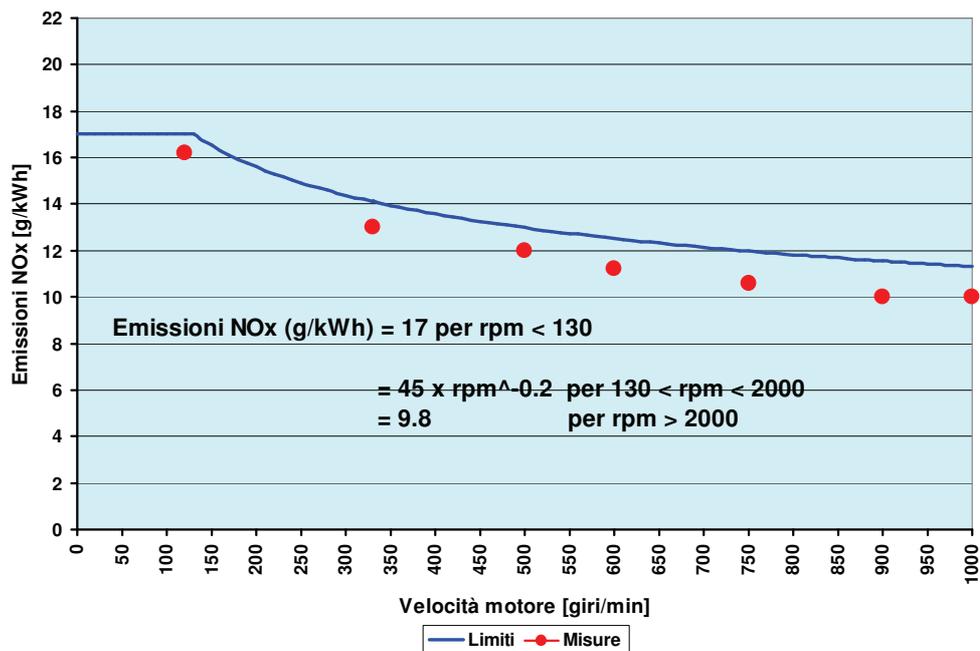


2.4. Emissioni dei motori diesel attuali

Tutti i motori dei principali costruttori, Caterpillar Mak, MAN B&W e Wärtsilä, installati attualmente a bordo di navi hanno il ciclo di combustione con tutti i parametri ottimizzati per ottenere emissioni NO_x inferiori ai limiti prescritti dalla norma IMO Marpol 73/78 Annex VI.

Tali motori hanno la certificazione EIAPP (Engine International Air Pollution Prevention) con indicati i valori delle emissioni NO_x rilevate su un motore della stessa serie e con la stessa configurazione dei componenti elencati dalla IMO.

Il seguente grafico riassume i valori delle emissioni rilevate su alcuni motori in confronto con i limiti:



Per quanto riguarda le emissioni di CO₂ e SO_x, esse dipendono rispettivamente dal contenuto percentuale di carbonio e di zolfo del combustibile, o dal sistema di lavaggio dei gas di scarico, e pertanto gli eventuali valori rilevati non sono significativi se non associati a tali percentuali ed al tipo di lavaggio.

2.5. Provvedimenti per ridurre le emissioni

In previsione di ulteriori normative più restrittive delle attuali, tutti i costruttori principali di motori diesel hanno programmato interventi atti a ridurre i valori delle emissioni più significative, cioè NO_x, SO_x, CO, particolati e fumosità visibile. I principali interventi già sperimentati e attuati o in corso di sperimentazione sono i seguenti:

2.5.1 Riduzione NO_x

Il primo intervento di tutti i costruttori è stato quello di ottimizzare alcuni parametri del motore per avere un processo di combustione con bassi valori di NO_x senza penalizzare i consumi. Principalmente, per un motore quattro tempi medium speed i parametri ottimizzati per avere un valore di NO_x inferiore con sufficiente margine ai limiti IMO sono i seguenti:

- Iniezione ritardata per abbassare il picco di temperatura della combustione e ridurre la formazione “termica” di NO_x. Il ritardo attuato è sempre un compromesso fra la desiderata riduzione di NO_x e l’inevitabile effetto collaterale dell’aumento del consumo;
- Aumento del rapporto di compressione e ottimizzazione della combustione, piccolo ritardo di combustione-riduzione del periodo di iniezione e di combustione ecc., con l’obiettivo di ridurre il picco di pressione e di temperatura della combustione. La soluzione ottimale è sempre un compromesso come nel caso precedente;
- Adozione del ciclo “Miller”, cioè chiusura anticipata della valvola di aspirazione prima del punto morto inferiore, con l’obiettivo di abbassare la temperatura di fine compressione;

Con tali misure si ottiene generalmente una riduzione di NO_x fra il 10 e il 20 %.

Per ulteriori riduzioni devono essere realizzati altri provvedimenti che vengono distinti in primari se attuati all’interno del motore e secondari se effettuano post-trattamenti del gas di scarico.

La riduzione dell’emissione agendo all’interno del motore può, in teoria, seguire due metodologie differenti: diminuzione dell’ossigeno immesso nella camera di combustione oppure aumento della massa immessa. La diminuzione di ossigeno può essere realizzata o riducendo la quantità di aria immessa, provvedimento classico per motori due tempi attuato mediante la chiusura ritardata della valvola di scarico, o ricircolando parte dei gas di scarico. Questo secondo metodo è stato sperimentato ma è stato anche abbandonato a causa dello sporco e dell’azione corrosiva provocata dai gas di scarico.

Pertanto, l’aumento di massa immessa è il metodo più sperimentato e tale aumento è ottenuto introducendo “umidità” in vari modi nella camera di combustione. Le alternative più sperimentate sono le seguenti:

➤ **Iniezione diretta di acqua (DWI):** Le prime sperimentazioni di questa metodologia iniziarono circa 10 anni fa e venne sviluppato un sistema d'iniezione per iniettare urea, cioè lo stesso reagente chimico usato nelle marmitte catalitiche. Il sistema fornì risultati positivi ma venne poi semplificato iniettando acqua al posto dell'urea.

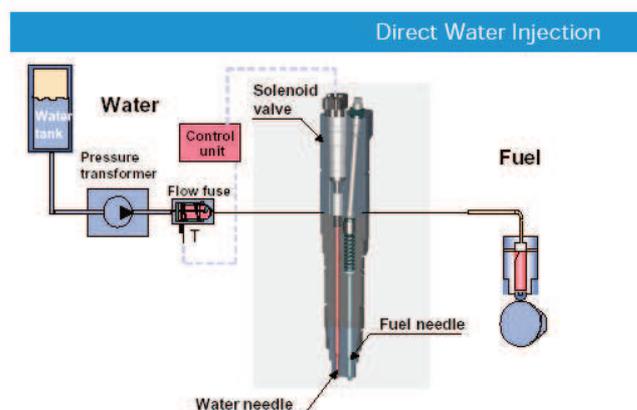
L'acqua è iniettata ad alta pressione (circa 500 bar) all'interno della camera di combustione da un sistema di iniezione indipendente. E' possibile regolare il ritardo di iniezione, la quantità di acqua e la sua pressione in funzione del carico e del ciclo del motore: questo permette di iniettare una grande quantità di acqua senza ridurre la potenza nominale del motore.

L'iniezione di acqua riduce le emissioni NO_x per due ragioni: la prima è legata all'immissione di massa addizionale che assorbe calore e riduce la temperatura di combustione, la seconda deriva dall'assorbimento ulteriore di calore necessario all'acqua per evaporare. Quest'ultima ha però l'effetto negativo di aumentare il consumo di combustibile e pertanto l'iniezione di acqua è normalmente utilizzata per ottenere una riduzione di NO_x di circa 5/6 g/kWh, cioè per ridurre di circa il 50 % il valore di un motore a 500 giri/min. La quantità di acqua iniettata varia tra il 40 e il 70 % in peso del consumo di combustibile.

Vantaggi	Svantaggi
<ul style="list-style-type: none"> • Possibilità di iniettare elevate quantità di acqua ed ottenere riduzioni del 50 % di NO_x; • Con l'iniezione di acqua disattivata il motore può erogare la potenza nominale; • Possibilità di applicarlo come retrofit su motori già in esercizio. 	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento del consumo di combustibile; • Importanti modifiche di componenti del motore; • Ridotta durata dell'iniettore; • Costi di investimento ed operativi elevati; • Necessità di immagazzinare grandi quantità di acqua a bordo.

La DWI è il sistema sviluppato ed applicato dalla Wärtsilä che ha circa 50 motori già in esercizio o in ordine.

Lo schema dell'iniezione di acqua realizzato dalla Wärtsilä è rappresentato nella figura seguente:



L'iniettore è del tipo combinato, cioè inietta sia combustibile sia acqua. E' fornito generalmente insieme al motore anche il modulo di pressurizzazione dell'acqua, che è molto compatto e di peso limitato. L'aspetto negativo impiantistico di tale soluzione è la quantità di acqua necessaria per il funzionamento. Per un traghetto con quattro motori 12V46C per un totale di 50400 kW di potenza, il consumo di combustibile all'85% del carico per un viaggio di 8 ore è di circa 68 ton.

Questo significa che devono essere disponibili per ogni viaggio circa 50 ton di acqua che possono essere imbarcati oppure prodotti con gli evaporatori o con un trattamento delle acque grigie.

In ogni caso, si hanno pesi e ingombri in più (acqua), ulteriori costi e pesi per l'impiantistica necessaria per produrre l'acqua se non viene imbarcata.

- **Emulsione acqua combustibile (FWE):** E' una tecnologia testata da oltre 20 anni. Esistono due differenti metodologie, precisamente l'emulsione e la microemulsione di acqua nel combustibile, che richiedono entrambe la modifica di alcuni componenti del motore.

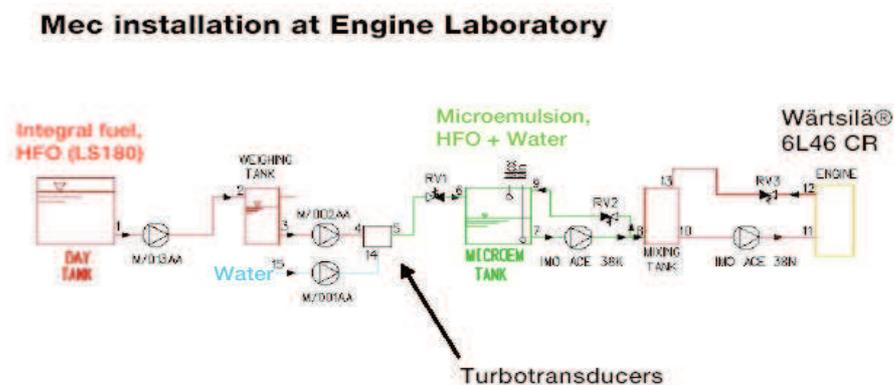
Con il primo metodo l'acqua è emulsionata con il combustibile nella linea di alimentazione del motore prima del sistema di iniezione. L'emulsione prodotta non è molto stabile e pertanto il fluido emulsionato non può essere immagazzinato ma deve essere consumato direttamente dopo essere stato prodotto.

La microemulsione (MAC System) produce invece un fluido stabile nel tempo che può essere immagazzinato e consumato quando necessario. Per entrambi i sistemi l'impiantistica non è molto complessa e costosa.

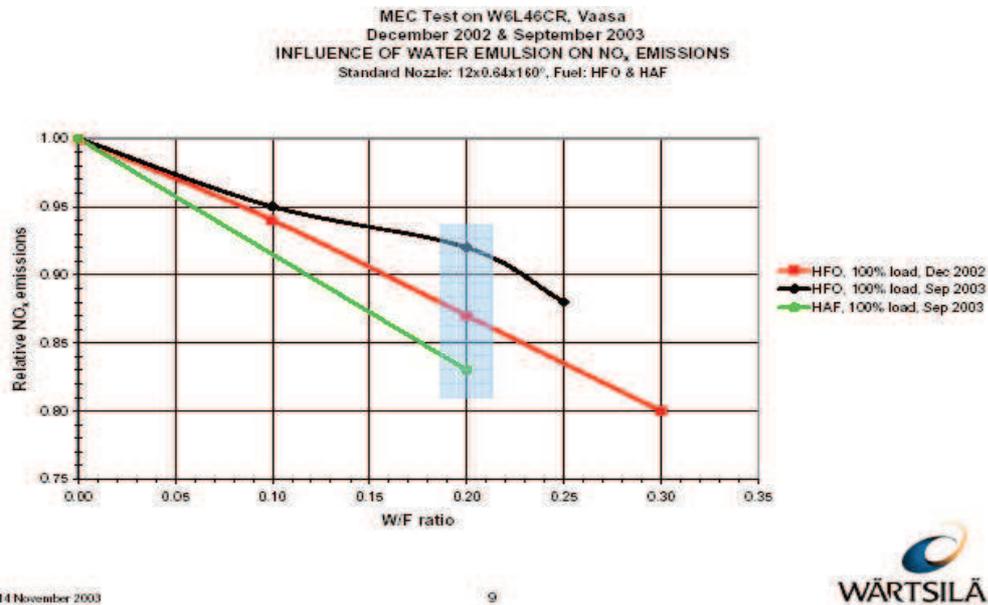
Il primo è stato sperimentato dalla MAN mentre il secondo dalla Wärtsilä. In genere la quantità di acqua emulsionata al massimo è circa il 20 % in volume del combustibile ottenendo una riduzione di NO_x tra il 20 e il 30 %.

I primi test con il MAC System sono stati eseguiti a bordo della nave da crociera Veendam alla fine del 2002 sui motori 12ZA40S, direttamente dalla Società Armatrice Carnival in collaborazione con la Wärtsilä, ottenendo all'80 % del carico una riduzione dell'NO_x da 12,7 a 9,7 (23,6 %) con una percentuale di acqua di circa il 24 %.

La figura seguente mostra lo schema combustibile dell'impianto con il MEC System utilizzato nella sala prove sperimentale della Wärtsilä per proseguire le ricerche:



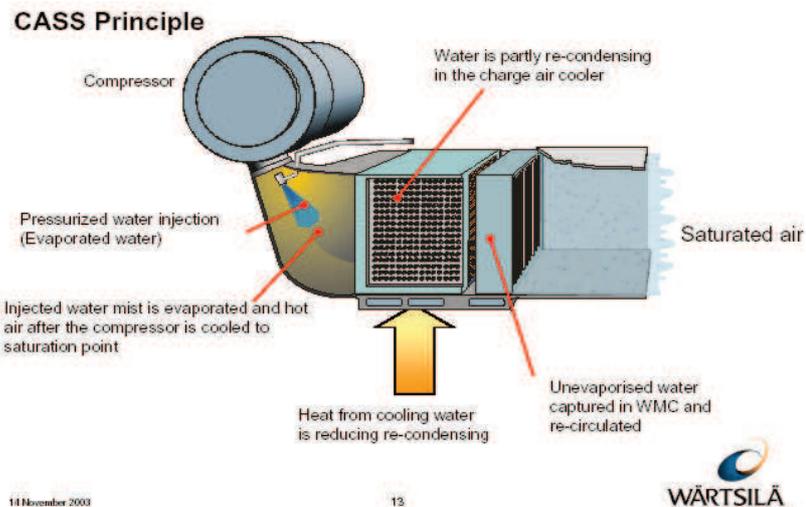
Il grafico seguente mostra i risultati di tali ricerche:



Vantaggi	Svantaggi
<ul style="list-style-type: none"> • Riduzione dei particolati (PM) fino al 10 %; • Modifiche limitate sui componenti del motore; • Minore influenza sulla durata dell'iniettore; 	<ul style="list-style-type: none"> • Limitata riduzione dell' NO_x; • Costo di investimento medio ed aumento dei costi operativi; • Aumento del momento torcente sull'asse a camme; • Non è possibile funzionare senza emulsionare l'acqua; • Incertezza sulla possibilità di emulsionare qualsiasi tipo di combustibile;

Lo svantaggio principale è la limitata riduzione dell'NO_x che non soddisfa le richieste delle applicazioni marine. Pertanto il metodo sembra più applicabile a motori di autoveicoli e ad impianti industriali.

- **Saturazione dell'aria di combustione (CASS):** E' lo sviluppo naturale del metodo di umidificazione dell'aria sperimentato alcuni anni fa. Il metodo è stato sperimentato dalla Wärtsilä i quanto con suoi motori dotati di "antipolishing ring" è possibile immettere molta più umidità e quindi quantità di acqua all'interno del cilindro. L'acqua è iniettata nell'aria di aspirazione, dopo la turbosoffiante e prima del refrigerante aria, per mezzo di un ugello del tipo HI-FOG, che produce uno spray con goccioline della dimensione di alcuni microns. La quantità di acqua iniettata è circa di 60 grammi per chilogrammo di aria e la temperatura dell'aria aspirata dal cilindro è di circa 80° C, per mantenere l'acqua evaporata. Lo schema del sistema è rappresentato nella figura seguente:



Alcuni tests sono stati eseguiti con un rapporto acqua/combustibile prossimo a due ottenendo un valore di NO_x ridotto a circa 4 g/kwh, cioè pari ad una riduzione del 66 %.

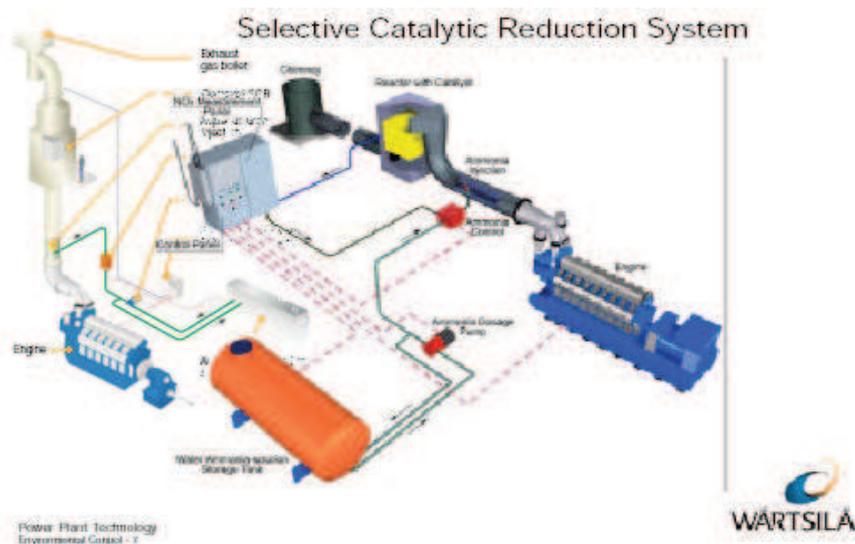
Se i risultati di applicazioni industriali confermeranno questi valori, questo è il metodo più promettente per ottenere forti riduzioni di NO_x .

Vantaggi	Svantaggi
<ul style="list-style-type: none"> • Potenziali forti riduzioni di NO_x (fino al 66 %); • Possibilità di usare acque tecniche, cioè acque grigie trattate; 	<ul style="list-style-type: none"> • Necessità di immagazzinare grandi quantità di acqua a bordo; • Costo di investimento medio ed aumento dei costi operativi;

- **Iniezione di vapore (STID):** In tutti i metodi precedenti l'acqua era immessa all'interno della camera di combustione con varie metodologie. Un altro metodo è di introdurre la stessa quantità di acqua sotto forma di vapore direttamente nella camera di combustione. I tests di ricerca hanno mostrato che l'aumento di umidità genera una buona riduzione di NO_x , ma il metodo sembra meno efficiente dei precedenti in quanto per ottenere le stesse riduzioni è necessaria una maggiore percentuale di umidità. Il metodo è oggetto comunque di molte ricerche perchè sembra molto promettente.
- **Trattamento dei gas di scarico:** E' eseguito con una marmitta catalitica SCR (Selective Catalytic Reduction) installata sulla tubazione gas di scarico dopo la turbosoffiante del motore. Il principio di lavoro della SCR è il seguente:
 - Nella tubazione gas di scarico alcuni metri prima della SCR viene iniettata una soluzione acquosa di urea, solitamente con circa il 40 % di urea;
 - Tale soluzione si decompone in ammoniaca e anidride carbonica, reazione aiutata dalla temperatura dei gas che deve essere tra circa 340 e 450° C. Naturalmente, in sostituzione di tale soluzione potrebbe essere utilizzata direttamente ammoniaca;

- All'interno della SCR l'ammoniaca si combina poi con gli NO_x (NO e NO₂) generando acqua e azoto;

Questo è in estrema sintesi il modo di lavoro della SCR, che è un impianto molto complesso la cui descrizione non può essere inserita nella presente relazione.



Come si può vedere, oltre all'ingombro e peso propri del catalizzatore SCR, ci sono notevoli ingombri e pesi dei quadri elettrici di controllo e del serbatoio della miscela acqua urea. Questi sono evidentemente, oltre al costo, i fattori limitativi dell'impiego a bordo di tale sistema.

I vantaggi tecnici sono invece indiscutibili poiché si possono ottenere riduzioni fino al 90 % del valore di NO_x.

Vantaggi	Svantaggi
<ul style="list-style-type: none"> • Potenziali forti riduzioni di NO_x (fino al 90 %) fino ad avere valori di 1-2 g/kWh; • Possibilità accoppiare la SCR con il silenziatore in modo da avere abbattimenti di rumorosità aerea fino a 35 (dB(A)); • Possibilità di poter navigare in aree con richieste di bassissimi valori di NO_x. 	<ul style="list-style-type: none"> • Volume medio richiesto di circa 3,5 m³ per MW; • Consumo di urea di circa 20 litri/MWh; • Elevati costi di investimento (circa 30.000-60.000 Euro/MW); • Costi operativi e di manutenzione non trascurabili (circa 4 Euro/MWh); • Aggiunta di pesi nella parte alta del tragheto;

L'appendice 1 mostra l'installazione tipica di una SCR fornita dalla Munters.

2.5.2 Riduzione SO_x

Il metodo più applicato per ridurre le emissioni di SO_x è quello di utilizzare un combustibile a basso tenore di zolfo poiché, come già detto in precedenza, tutto lo zolfo immesso nella camera di combustione con il combustibile si trasforma in SO_x.

Il metodo di lavaggio dei gas di scarico con una soluzione di soda caustica (Scrubbers) è attualmente utilizzato solo in impianti industriali a causa del peso, del costo e della complessità dell'impiantistica. E' da prevedere tuttavia in futuro un suo impiego a bordo alternativo all'impiego di combustibile a basso tenore di zolfo, che diverrà sempre più costoso e difficile da approvvigionare.

2.5.3 Riduzione CO e TCH

Le emissioni dei motori marini di questi due componenti sono molto basse e non sono regolamentate da normative.

2.5.4 Riduzione della fumosità visibile

La fumosità di un motore diesel medium speed è generalmente ridotta a valori minimi operando alcune scelte progettuali, di gestione dei carichi e di manutenzione, precisamente:

- Adozione di regolatori di velocità elettronici dotati di algoritmi per la limitazione del combustibile (Fuel limiter) durante la fase di avviamento e di aumenti di carico;
- Funzionamento con elevato eccesso di aria ed efficiente omogeneizzazione dell'aria e del combustibile all'interno della camera di combustione;
- Funzionamento con elevate pressioni di iniezione per assicurare un'azione di "spray" con goccioline di combustibile molto piccole;
- Regolare manutenzione/sostituzione del sistema di iniezione (iniettore-pompa);
- Ottimizzazione della ripartizione del carico di gruppi di gruppi elettrogeni nel campo di potenza 60-85 % della potenza nominale;
- Possibilità di convertire rapidamente da alimentazione a combustibile pesante, tipo IFO 380 normalmente utilizzato a bordo, a combustibile leggero, MDO o gasolio, in casi di transito in aree regolate da normative particolari.

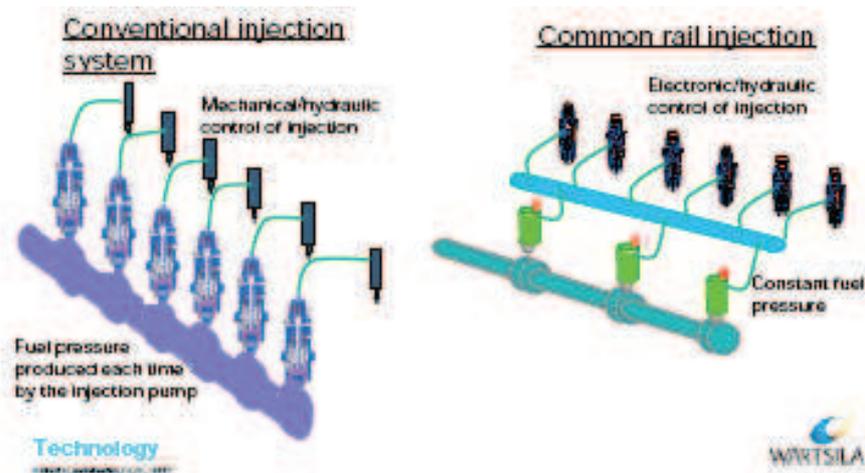
Tutti i provvedimenti elencati limitano però la fumosità a valori che non sono più accettati in alcune aree, come ad esempio in Alaska ed in altre regioni. Questo dato di fatto e l'aumento della sensibilità delle istituzioni pubbliche e dei cittadini verso le problematiche ambientali, hanno accelerato la decisione dei costruttori di motori di introdurre soluzioni più efficaci per la riduzione della fumosità e dei particolati, specialmente a bassi carichi.

Negli ultimi anni i principali costruttori di motori diesel hanno sperimentato ed adottato vari sistemi tra i quali i due più importanti sono:

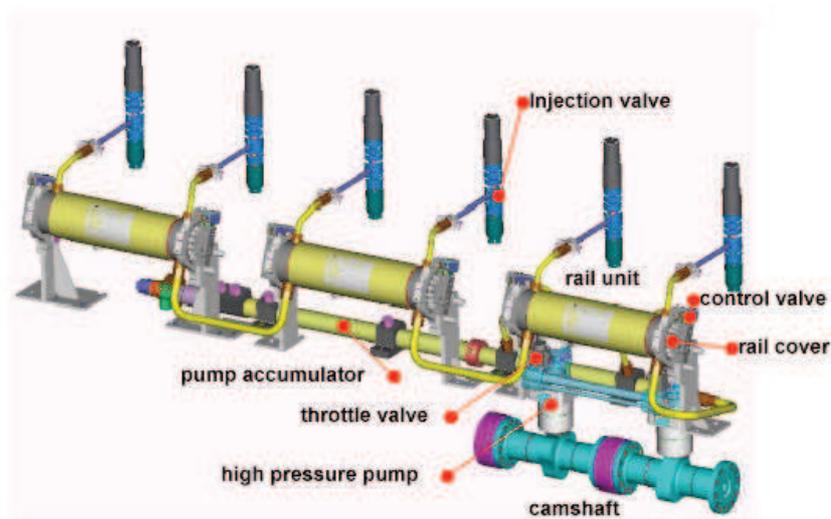
- La Wärtsilä e la MAN hanno adottato il sistema di iniezione "Common Rail" (CR), costituito da un collettore ad alta pressione, volume comune a tutti gli iniettori ed alimentato da una o più pompe di iniezione in funzione del numero di cilindri;
- La MAK ha adottato il sistema "Flexible Camshaft Technology" (FCT), che attua o una variazione meccanica dell'anticipo di iniezione per ridurre la fumosità o una

variazione della fasatura delle valvole di aspirazione e di scarico per diminuire le emissioni di NO_x .

La figura seguente (Wärtsilä) illustra schematicamente la differenza tra l'iniezione tradizionale, costituita da un sistema pompa-iniettore per ogni cilindro con l'apertura dell'iniettore comandata dalla pressione del combustibile, ed il CR che, come detto, ha un collettore comune a tutti gli iniettori alimentato da una o due pompe. Gli iniettori inoltre sono aperti elettricamente:



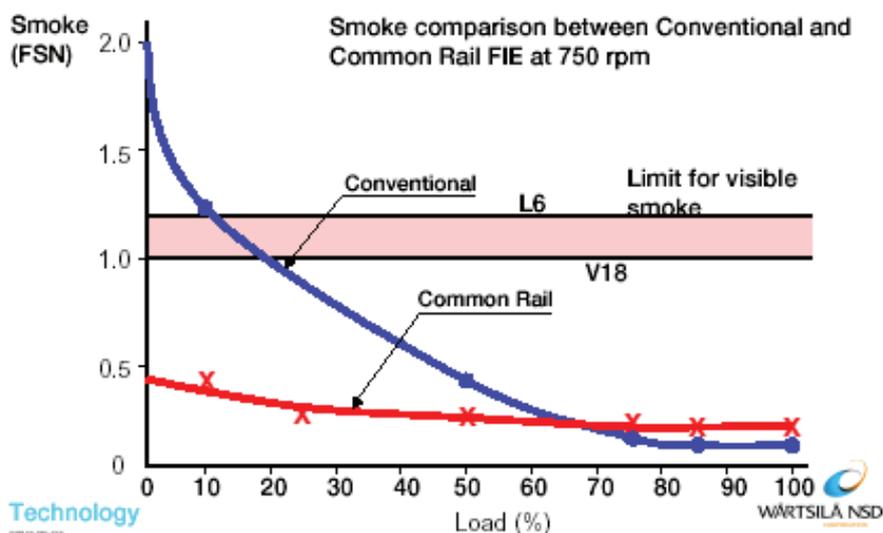
La prossima figura illustra invece il sistema come realizzato effettivamente dalla MAN: come si può vedere, l'asse a camme aziona due pompe di iniezione che alimentano un accumulatore, il quale a sua volta alimenta il collettore comune. Quest'ultimo è realizzato da collettori grandi comuni a due iniettori collegati da tubi più piccoli per bilanciare la pressione. Un sistema simile è stato adottato anche da Wärtsilä.



Indipendentemente dal tipo di realizzazione pratica, il sistema CR ha i seguenti vantaggi:

- Possibilità di ottimizzare la prestazione ed i consumi del motore regolando in funzione del carico/giri la pressione e l'anticipo d'iniezione, che sono svincolati dalla posizione dell'asse a camme;
- Momento torcente sull'asse a camme più continuo, cioè senza picchi, e quindi asse più piccolo;
- Aumento dell'efficienza della combustione e quindi del rendimento del motore;
- Pompaggio ad alta pressione della sola quantità di combustibile iniettato e quindi aumento del rendimento;

La riduzione di fumosità che si ottiene con il sistema CR è sensibile ai bassi carichi e durante i transitori di presa del carico del motore, come illustrato dalla seguente figura:

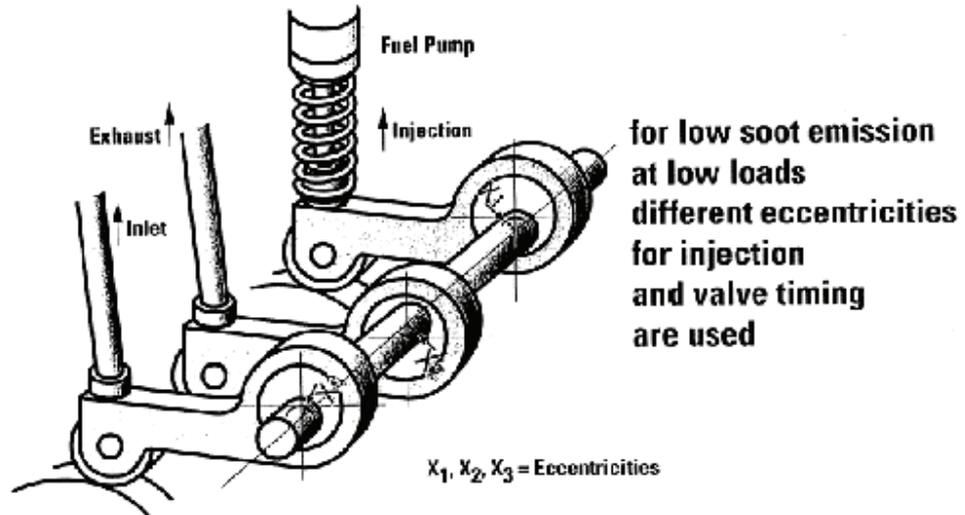


Il sistema CR oltre a ridurre la fumosità ha un'effetto positivo anche nella riduzione delle emissioni NO_x specialmente a carichi intermedi.

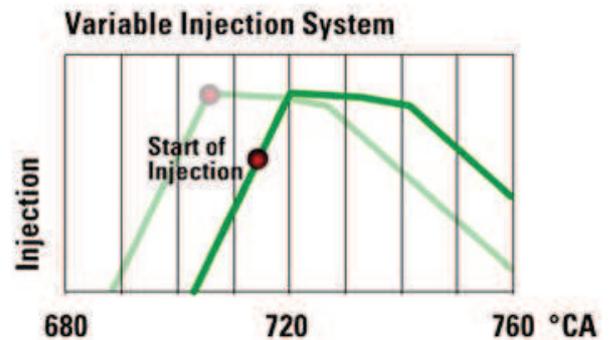
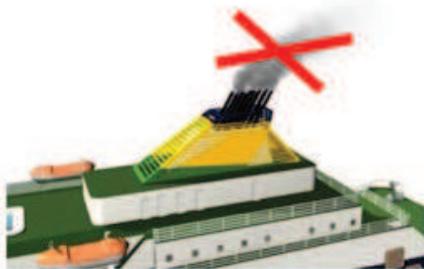
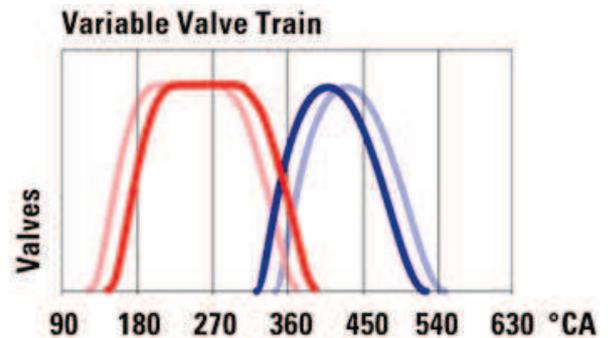
La MAK, terzo costruttore importante di motori diesel medium speed di grande potenza (maggiore di 700 kW/cil.), non ha adottato il CR ed ha sviluppato un sistema meccanico/idraulico per variare in funzionamento sia l'anticipo di iniezione sia la fasatura delle valvole. Questa duplice possibilità di regolazione permette una flessibilità di intervento per adattare le emissioni/fumosità del motore alle esigenze del momento.

Il sistema di regolazione è costituito da un albero, fatto ruotare da un pistone idraulico, che per mezzo di eccentrici sposta la posizione dei tre rulli dell'asse a camme della pompa di iniezione, delle valvole di scarico e di aspirazione, come rappresentato nella seguente figura:

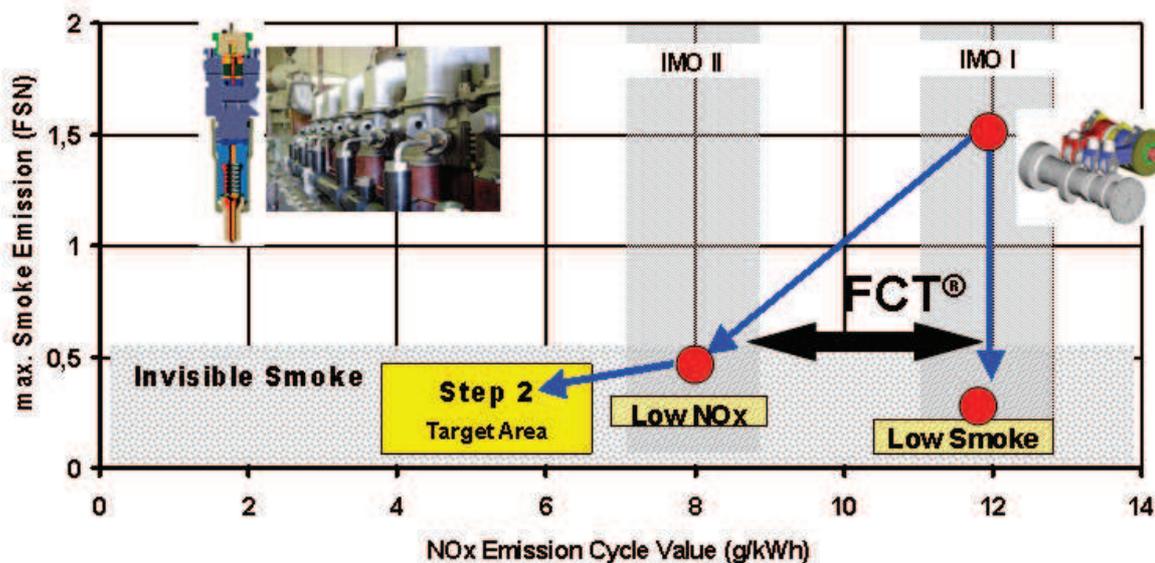
The FCT® (Flex Camshaft Technology) System for MaK Engines



Il dispositivo può variare la fasatura di entrambe le valvole per diminuire le emissioni NO_x o/e l'anticipo di iniezione per diminuir la fumosità, come illustrato nella figura seguente.

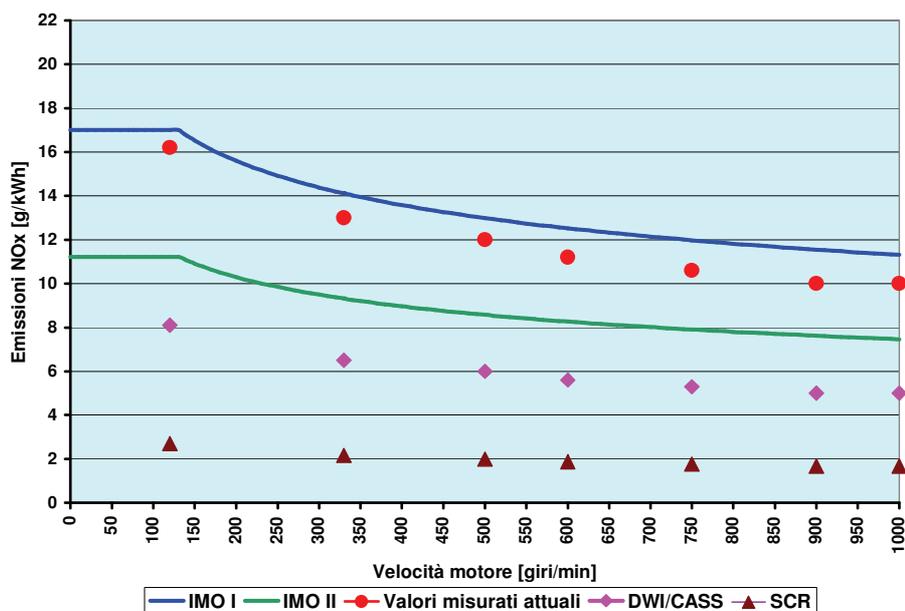


Riepilogando, il sistema MAK permette di ridurre o la fumosità oppure l'emissione NO_x e la fumosità come illustrato nella figura seguente:



3. Conclusioni

In base a quanto esposto, la situazione attuale delle emissioni è sintetizzata nel grafico seguente:



Come si può notare, si possono trarre le seguenti conclusioni:

- I motori diesel marini nella configurazione attuale hanno un livello di emissioni inferiori a quelli prescritti dalla normativa IMO in vigore (IMO I) e pertanto sono idonei ad ottenere la certificazione EIAPP;
- Ulteriori riduzioni possono essere ottenute con sistemi di umidificazione dell'aria comburente (CASS) o con iniezione diretta di acqua nella camera di combustione (DWI). Tali sistemi sono in grado di soddisfare anche i regolamenti IMO attualmente in fase di studio (IMO II);
- I sistemi attuali di emulsione di acqua nel combustibile non sembrano in grado di ottenere risultati inferiori a tale normativa futura (IMO II);
- Ulteriori riduzioni possono essere ottenute solo con l'adozione di convertitori catalitici (SCR), che sono in grado di soddisfare tutte le normative vigenti o ancora in fase di studio ma che comportano notevoli aggravii di costi, pesi ed ingombri.

Riduzioni delle emissioni SO_x possono essere ottenute o limitando la percentuale di zolfo nel combustibile oppure con un idoneo trattamento di lavaggio dei gas di scarico.

La riduzione della fumosità visibile è ottenuta o con sistemi "Common Rail" (CR), studiati e sperimentati da MAN e Wärtsilä, oppure con il variatore di anticipo iniezione e fasatura valvole (FCT) proposto dalla MAK.

4. Bibliografia

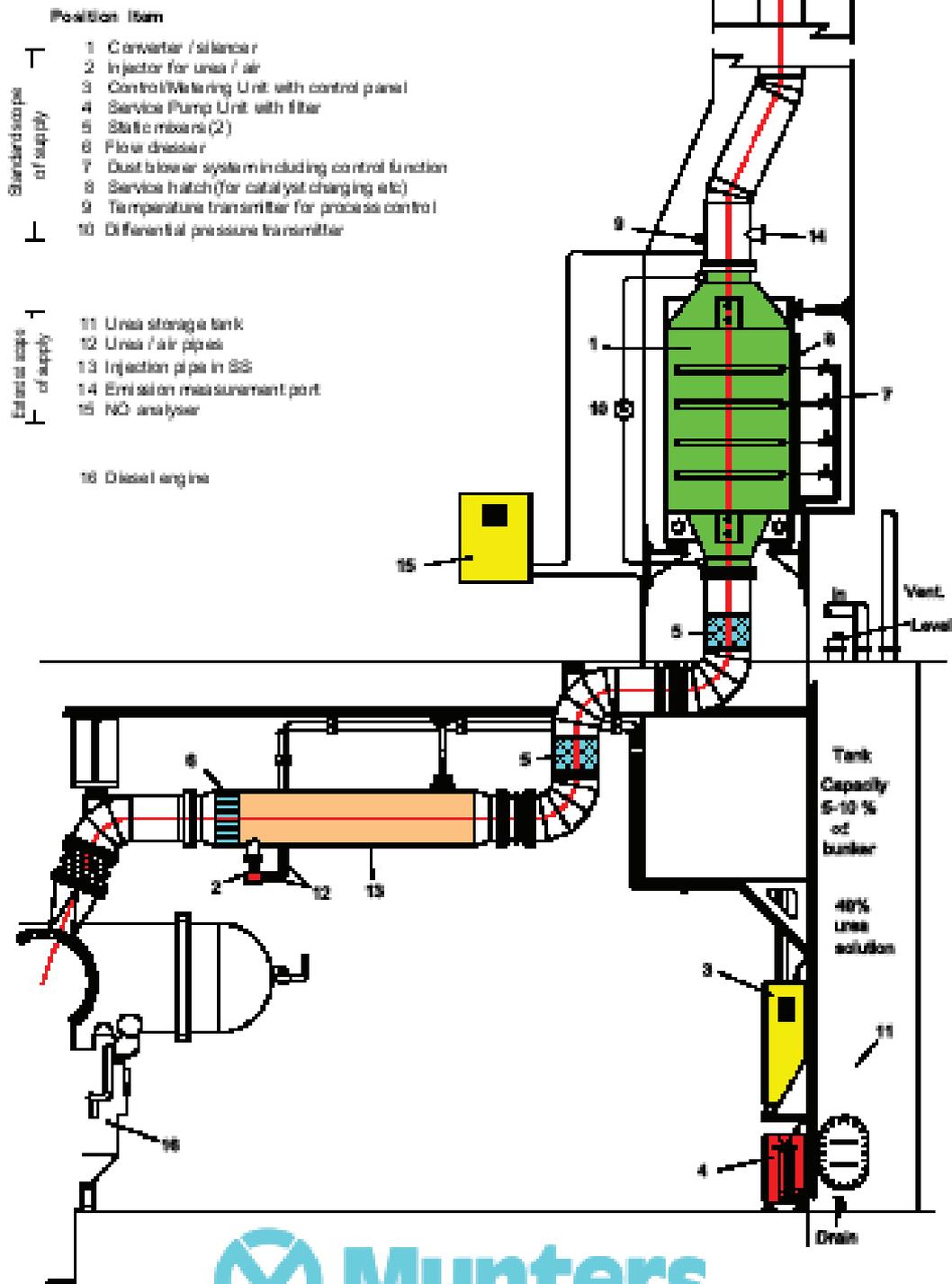
- Daniel Paro (Wärtsilä): Effective, evolving and envisaged emission control technologies for marine propulsion engines;
- Daniel Paro (Wärtsilä): The really smokeless engines;
- Piiia Takala (Wärtsilä): Mec Microemulsion & CASS test at Wärtsilä – SafEnvShip Meeting, Glasgow, 17-18 November 2003;
- Det Norske Veritas: Regulations for the Prevention of Air Pollution from Ships-Technical and Operational implications;
- Det Norske Veritas: Class Notation Clean Design;
- Marpol 73/78 Annex VI: Regulation for the prevention of air pollution from ships;
- MAN B&W: New HFO Common Rail System for Medium-speed Diesel Engines;
- MAN B&W: Green Ship Presentation for Fincantieri – Trieste, 7th October 2004;
- Udo Schlemmer (Caterpillar): Inside the Engine Technology for Low Emissions;
- Caterpillar: Caterpillar Marine Technology Workshop – Rostock, 2nd September 2004.

TR-AMV
F. Sacchi

Data: Settembre 2004
Agg. Maggio 2005

Munters SCR Converter / silencer

Typical Arrangement



Indice

1. Introduzione	1
2. Emissioni in aria	1
2.1. Composizione tipica dei gas di scarico	1
2.1.1. Ossidi di carbonio	2
2.1.2. Ossidi di azoto	3
2.1.3. Ossidi di zolfo	3
2.1.4. Idrocarburi e componenti volatili	3
2.1.5. Particolati e fumosità	3
2.2. Riepilogo emissioni in aria motori diesel marini	4
2.3. Scenario delle normative	4
2.3.1. Normativa internazionale	4
2.3.2. Normative nazionali	5
2.3.3. Normative regionali	6
2.3.4. Programmi di controllo delle emissioni (Soc. Class. ed EPA)	6
2.3.5. Normative per il Mar Baltico e per il Mare del Nord	7
2.4. Emissioni dei motori diesel attuali	8
2.5. Provvedimenti per ridurre le emissioni	9
2.5.1. Riduzione NO _x	9
2.5.2. Riduzione SO _x	15
2.5.3. Riduzione CO e TCH	15
2.5.4. Riduzione della fumosità visibile	15
3. Conclusioni	19
4. Bibliografia	20
Appendice 1	21