



Agenzia Regionale per la Prevenzione
e Protezione Ambientale del Veneto

Direzione Tecnica
Servizio Osservatorio Aria
Via Lissa, 6
30174 Venezia Mestre Italy
Tel. +39 041 5445542
Fax +39 041 5445671
e-mail: orar@arpa.veneto.it
Responsabile del Procedimento: Salvatore Patti



REGIONE DEL VENETO

[Documento redatto a Gennaio 2013]

Risposta al 3° quesito della Procura di Venezia N. 1257 08 R.G.n.r./Mod. 45

Si formula preghiera:

c) di voler chiarire in quali termini percentuali il maggior tonnellaggio di una nave possa incidere sulle emissioni in atmosfera.

Secondo la metodologia di stima EMEP/EEA (*Guidebook* 2009, aggiornamento Marzo 2011) di riferimento a livello europeo, le emissioni in atmosfera di una nave dipendono dal suo tonnellaggio, con emissioni maggiori, a parità di tutte le altre condizioni, per tonnellaggi maggiori. Le altre condizioni che influiscono sulle emissioni sono: la categoria di nave, il tipo di motore, il tipo di combustibile e la fase di viaggio.

Come verrà di seguito descritto, seguendo la metodologia di stima EMEP/EEA si dimostra che ad un aumento relativo della stazza lorda di una data percentuale corrisponde un aumento relativo dell'emissione oraria di una percentuale inferiore.

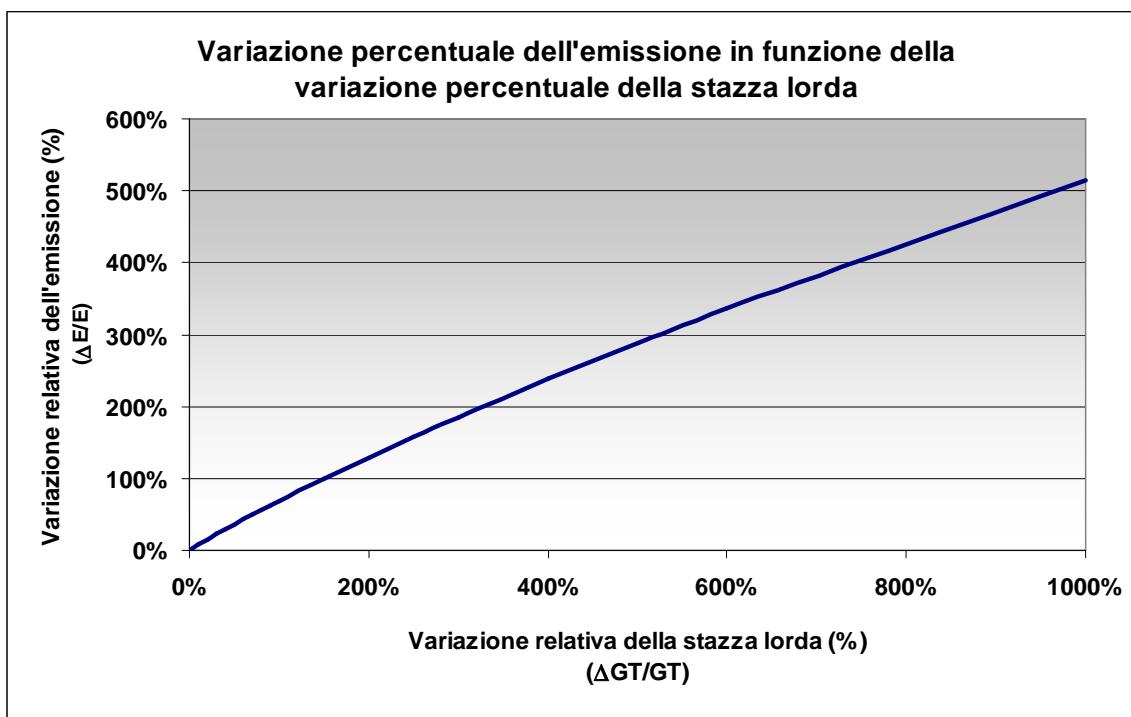
Nella procedura *Tier 3* della metodologia citata, dal tonnellaggio della nave (*Gross Tonnage o Stazza Lorda*) si ricavano la potenza dei motori principale e ausiliario.

Le emissioni si calcolano come prodotto delle potenze dei motori per specifici fattori di emissione che sono espressi in massa su potenza del motore (g/kWh) e che dipendono dall'inquinante considerato, dal tipo di motore, dal combustibile (secondo le due semplici classi BFO e MDO/MGO) e dalla fase di viaggio (ormeggio, manovra e crociera). Inoltre a seconda della fase di viaggio vengono applicati differenti coefficienti moltiplicativi (*load factor*) che pesano l'effettiva potenza impiegata dai motori nelle diverse fasi. L'emissione associata ad una singola nave è infine la somma del contributo emissivo del motore principale e del motore ausiliario per i rispettivi tempi di utilizzo nelle fase di stazionamento, manovra e crociera.

Pur essendo l'emissione in termini assoluti variabile a seconda dell'inquinante considerato, della categoria nave, del tipo motore, del combustibile e della fase di viaggio, se si considera la variazione relativa dell'emissione oraria al variare della stazza lorda (a parità di tutte le altre condizioni o variabili) si ottiene un'unica funzione che esprime tale dipendenza.

Tale funzione dipende dalla categoria di nave e in Figura 1 è rappresentato il caso delle navi passeggeri.

Fig.1. Variazione relativa dell'emissione in funzione della variazione relativa della stazza lorda, navi passeggeri.



Come si osserva in figura, ad un aumento relativo della stazza lorda di una data percentuale, corrisponde un aumento relativo dell'emissione di una percentuale inferiore.

Nella seguente tabella (Tab. 1) sono riprodotti alcuni casi di tale proporzionalità per la tipologia navi passeggeri.

Tab.1 Variazione relativa del tonnellaggio (GT) per navi passeggeri e corrispondente variazione relativa dell'emissione(E)

$\Delta GT/GT$	$\Delta E/E$
0%	0%
10%	7%
20%	15%
30%	22%
40%	29%
50%	36%
60%	43%
70%	49%
80%	56%
90%	63%
100%	69%
150%	100%
200%	130%
250%	158%
300%	186%
400%	238%
500%	288%
600%	336%
1000%	514%

Alcuni esempi possono essere esplicitivi del significato di questa tabella:

- ad un aumento relativo del 10% del tonnellaggio, GT, corrisponde un aumento relativo dell'emissione del 7%;
- ad un aumento relativo del 100% del tonnellaggio, ovvero un raddoppio, corrisponde un aumento relativo dell'emissione del 69%;
- ad un aumento relativo del 1000% del tonnellaggio, ovvero 10 volte tanto, corrisponde un aumento relativo dell'emissione del 514%.

Si ribadisce che le percentuali di tabella 1 si riferiscono alla tipologia navi passeggeri e sottointendono che al variare della stazza rimangano invariati tipo di motore e tipo di combustibile.

Conclusioni

Secondo la metodologia di stima EMEP/EEA (*Guidebook* 2009, aggiornamento Marzo 2011) di riferimento a livello europeo, le emissioni in atmosfera di una nave dipendono dal suo tonnellaggio, con emissioni maggiori, a parità di tutte le altre condizioni, per tonnellaggi maggiori.

In particolare, ad un aumento relativo della stazza lorda di una data percentuale corrisponde un aumento relativo dell'emissione oraria di una percentuale inferiore.

Le altre condizioni che influiscono sulle emissioni, sempre secondo la metodologia EMEP/EEA sono: la categoria di nave, il tipo di motore, il tipo di combustibile e la fase di viaggio.

Approfondimento metodologico

Di seguito si propongono gli elementi analitici della dipendenza delle emissioni dal tonnellaggio.

Come già citato, secondo la procedura *Tier 3* EMEP/EEA per la stima delle emissioni è innanzitutto necessario stimare la potenza installata del motore principale e del motore ausiliario, a partire dalla stazza lorda di ciascuna nave.

Più specificatamente, viene dapprima calcolata la potenza installata del motore principale, secondo le funzioni dipendenti dal *Gross Tonnage* (GT o Stazza Lorda) e dalla categoria di appartenenza della nave presenti in tabella 3-12 del *Guidebook*. Successivamente viene calcolata la potenza installata per il motore ausiliario secondo una percentuale della potenza installata del motore principale (tab. 3-13 del *Guidebook*), sempre per categoria nave.

In particolare le funzioni per il calcolo della potenza dei motori sono funzioni empiriche derivate dai dati dei registri internazionali (come il Lloyds register) e riferite a specifiche flotte; la metodologia EMEP/EEA specifica funzioni leggermente diverse per la flotta mondiale 2010, 1997 e la flotta mediterranea del 2006.

Facendo riferimento alla flotta mondiale 2010, nel seguente grafico (Fig. 2) si riporta la potenza del motore principale ed ausiliario calcolata secondo le formule di tabella 3.12 *Guidebook* per le navi passeggeri in funzione della stazza lorda della nave.

Table 3-12 Installed main engine power as a function of gross tonnage (GT)

Ship categories	2010 world fleet	1997 world fleet	Mediterranean Sea fleet (2006)
Liquid bulk ships	$14.755*GT^{-0.6082}$	$29.821*GT^{-0.5552}$	$14.602*GT^{-0.6278}$
Dry bulk carriers	$35.912*GT^{-0.5276}$	$89.571*GT^{-0.4446}$	$47.115*GT^{-0.504}$
Container	$2.9165*GT^{-0.8719}$	$1.3284*GT^{-0.9303}$	$1.0839*GT^{-0.9617}$
General Cargo	$5.56482*GT^{-0.7425}$	$10.539*GT^{-0.6760}$	$1.2763*GT^{-0.9154}$
Ro Ro Cargo	$164.578*GT^{-0.4350}$	$35.93*GT^{-0.5885}$	$45.7*GT^{-0.5237}$
Passenger	$9.55078*GT^{-0.7570}$	$1.39129*GT^{-0.9222}$	$42.966*GT^{-0.6035}$
Fishing	$9.75891*GT^{-0.7527}$	$10.259*GT^{-0.6919}$	$24.222*GT^{-0.5916}$
Other	$59.049*GT^{-0.5485}$	$44.324*GT^{-0.5300}$	$183.18*GT^{-0.4028}$
Tugs	$54.2171*GT^{-0.6420}$	$27.303*GT^{-0.7014}$	

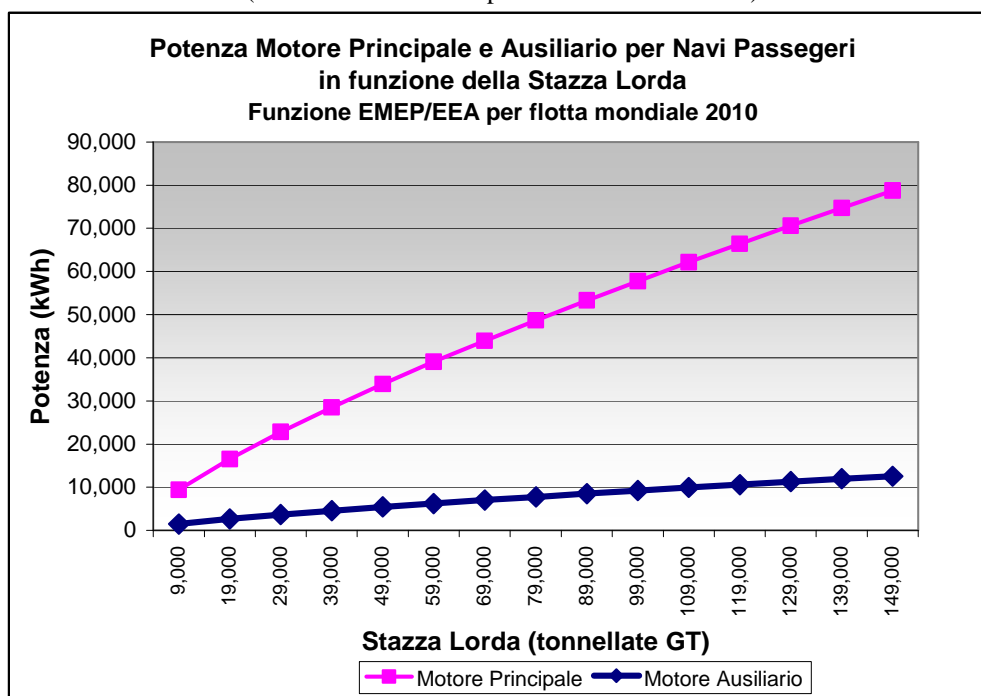
Source: Trozzi (2010) for 2010 and 1997 world fleets; Entec (2007) for 2006 Mediterranean Sea fleet (for 1997 fleet was used the conversion 1 GT = 1.875 GRT)

Table 3-13: Estimated average vessel ratio of Auxiliary Engines / Main Engines by ship type

Ship categories	2010 world fleet	Mediterranean Sea fleet (2006)
Liquid bulk ships	0.30	0.35
Dry bulk carriers	0.30	0.39
Container	0.25	0.27
General Cargo	0.23	0.35
Ro Ro Cargo	0.24	0.39
Passenger	0.16	0.27
Fishing	0.39	0.47
Other	0.35	0.18
Tugs	0.10	

Source: Trozzi (2010) for 2010 world fleet; Entec (2007) for 2006 Mediterranean Sea fleet

Fig.2. Potenza del motore principale delle navi passeggeri in funzione del tonnellaggio (funzioni EMEP/EEA per flotta mondiale 2010)



Si osserva che all'aumentare della stazza lorda aumentano le potenze installate sia del motore principale che ausiliario, ma secondo una dipendenza che attenua l'aumento relativo della potenza rispetto a quello del tonnellaggio (matematicamente questo tipo di dipendenza non lineare deriva dal coefficiente inferiore ad 1 a cui è elevato il tonnellaggio nelle formule di tabella 3.12).

Definito il tonnellaggio e dunque la potenza del motore principale e ausiliario della singola nave, la stima emissiva, secondo la metodologia EMEP/EEA, come già accennato, dipende dal tipo di motore, dal combustibile e dalla fase di viaggio.

L'algoritmo di calcolo delle emissioni è quello riportato nella seguente equazione (Eq.1):

$$E_{Trip,i,j,m} = \sum_p \left[T_P \sum_e \left(P_e \times LF_e \times EF_{e,i,j,m,p} \right) \right] \quad (Eq.1)$$

- Dove
- E_{Trip} =Emissione di un viaggio (tonnellate)
 - EF = Fattore di Emissione (g/Kwh), dipendente dal tipo di nave
 - LF =fattore di carico del motore (%)
 - P =potenza nominale del motore (kW)
 - T =tempo (h)
 - e =categoria motore (principale, ausiliario)
 - i =inquinante (NOx, NMVOC, PM)
 - j =tipo motore (diesel a bassa, media e alta velocità, turbina a gas, turbina a vapore)
 - m =tipo di combustibile (olio combustibile, olio diesel marino, gasolio marino, benzina)
 - p =fase di navigazione (crociera, stazionamento, manovra)

L'emissione viene dunque calcolata moltiplicando il tempo trascorso da ciascuna nave nella specifica fase per il prodotto tra lo specifico fattore di emissione (specifico per tipo motore, tipo di combustibile), la potenza del motore e il fattore di carico.

Nel caso del motore principale e della fase di stazionamento viene ulteriormente utilizzato un fattore diminutivo che descrive per la percentuale di tempo di utilizzo del motore in fase di ormeggio.

Il fattore di carico e la percentuale di tempo di utilizzo sono quelli della tabella 3-15 del *Guidebook*, di seguito riportata.

Table 3-15 Estimated % load of MCR (Maximum Continuous Rating) of Main and Auxiliary Engine for different ship activity

Phase	% load of MCR Main Engine	% time all Main Engine operating	% load of MCR Auxiliary Engine
Cruise	80	100	30
Manoeuvring	20	100	50
Hotelling (except tankers)	20	5	40
Hotelling (tankers)	20	100	60

Source: Entec (2002)

La metodologia Tier 3 EMEP/EEA propone i fattori di emissioni riportati nella seguente tabella (Tab.3-10 *Guidebook*) e riprodotti in forma grafica anche nelle figure seguenti (Fig. 3 e 4).

Table 3-10 Tier 3 emission factors for NO_x, NMVOC, PM and Specific Fuel Consumption for different engine types/fuel combinations and vessel trip phases (cruising, hotelling, manoeuvring) in g/kWh

Engine	Phase	Engine type	Fuel type	NO _x EF 2000 (g/kWh)	NO _x EF 2005 (g/kWh)	NMVO C EF (g/kWh)	TSP PM ₁₀ PM _{2.5} EF (g/kWh)	Specific fuel consumption (g fuel/kWh)	
Main	Cruise	Gas turbine	BFO	6.1	5.9	0.1	0.1	305.0	
			MDO/MGO	5.7	5.5	0.1	0.0	290.0	
		High-speed diesel	BFO	12.7	12.3	0.2	0.8	213.0	
			MDO/MGO	12.0	11.6	0.2	0.3	203.0	
		Medium-speed diesel	BFO	14.0	13.5	0.5	0.8	213.0	
			MDO/MGO	13.2	12.8	0.5	0.3	203.0	
		Slow-speed diesel	BFO	18.1	17.5	0.6	1.7	195.0	
			MDO/MGO	17.0	16.4	0.6	0.3	185.0	
		Steam turbine	BFO	2.1	2.0	0.1	0.8	305.0	
			MDO/MGO	2.0	1.9	0.1	0.3	290.0	
		Manoeuvring Hotelling	Gas turbine	BFO	3.1	3.0	0.5	1.5	336.0
				MDO/MGO	2.9	2.8	0.5	0.5	319.0
	High-speed diesel		BFO	10.2	9.9	0.6	2.4	234.0	
			MDO/MGO	9.6	9.3	0.6	0.9	223.0	
	Medium-speed diesel		BFO	11.2	10.8	1.5	2.4	234.0	
			MDO/MGO	10.6	10.2	1.5	0.9	223.0	
	Slow-speed diesel		BFO	14.5	14.0	1.8	2.4	215.0	
			MDO/MGO	13.6	13.1	1.8	0.9	204.0	
Steam turbine	BFO		1.7	1.6	0.3	2.4	336.0		
	MDO/MGO		1.6	1.6	0.3	0.9	319.0		
Auxiliary	Cruise Manoeuvring Hotelling		High-speed diesel	BFO	11.6	11.2	0.4	0.8	227.0
				MDO/MGO	10.9	10.5	0.4	0.3	217.0
		Medium-speed diesel	BFO	14.7	14.2	0.4	0.8	227.0	
			MDO/MGO	13.9	13.5	0.4	0.3	217.0	

BFO –Bunker Fuel Oil, MDO –Marine Diesel Oil, MGO –Marine Gas Oil

Source: Entec (2002), Entec (2007), the emission factors for NMVOC was been derived as 98 % of the original HC emission factors value, based on reported CH₄ factors from IPCC (1997).

Note. See Table 3-1 and Table 3-2 for emission factors for other pollutants.

Fig.3. Fattori di emissioni procedura Tier 3 EMEP/EEA. Motore principale, fase di manovra e stazionamento.

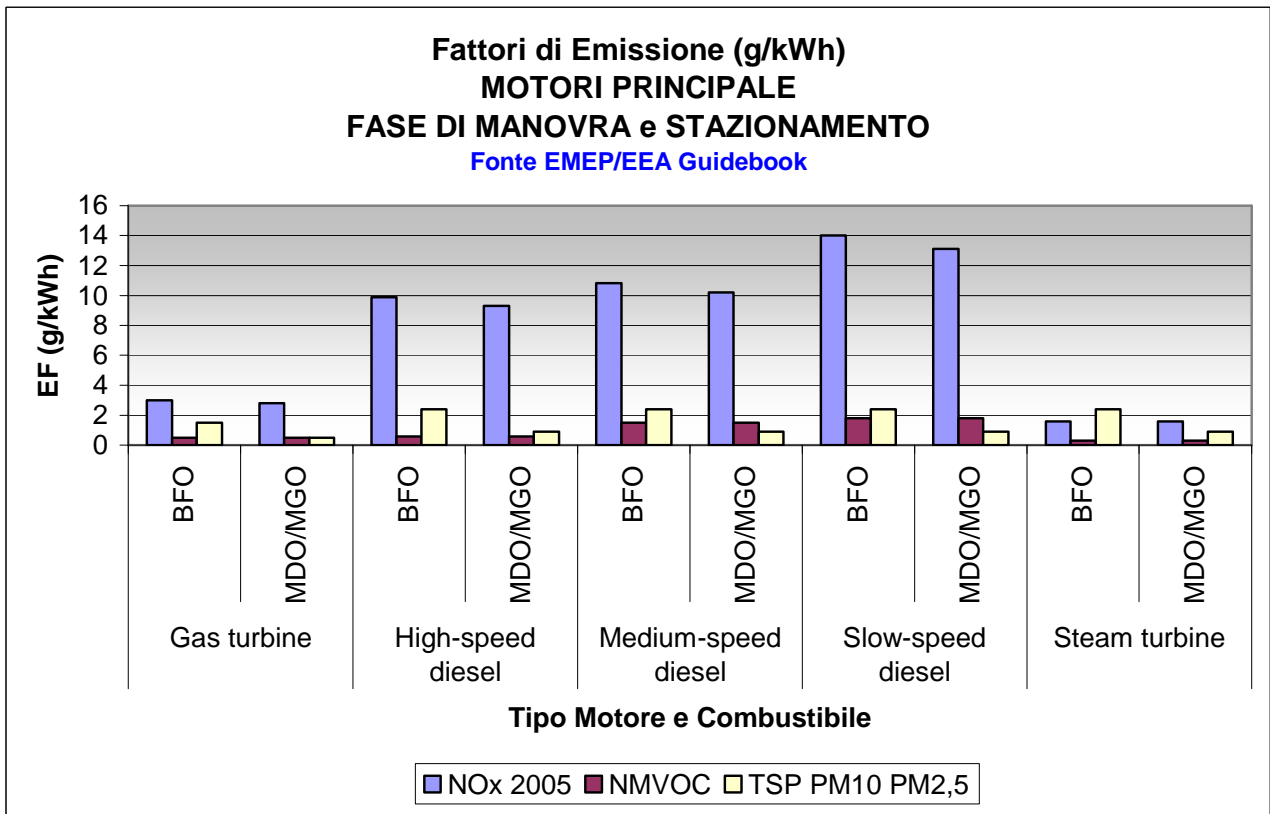
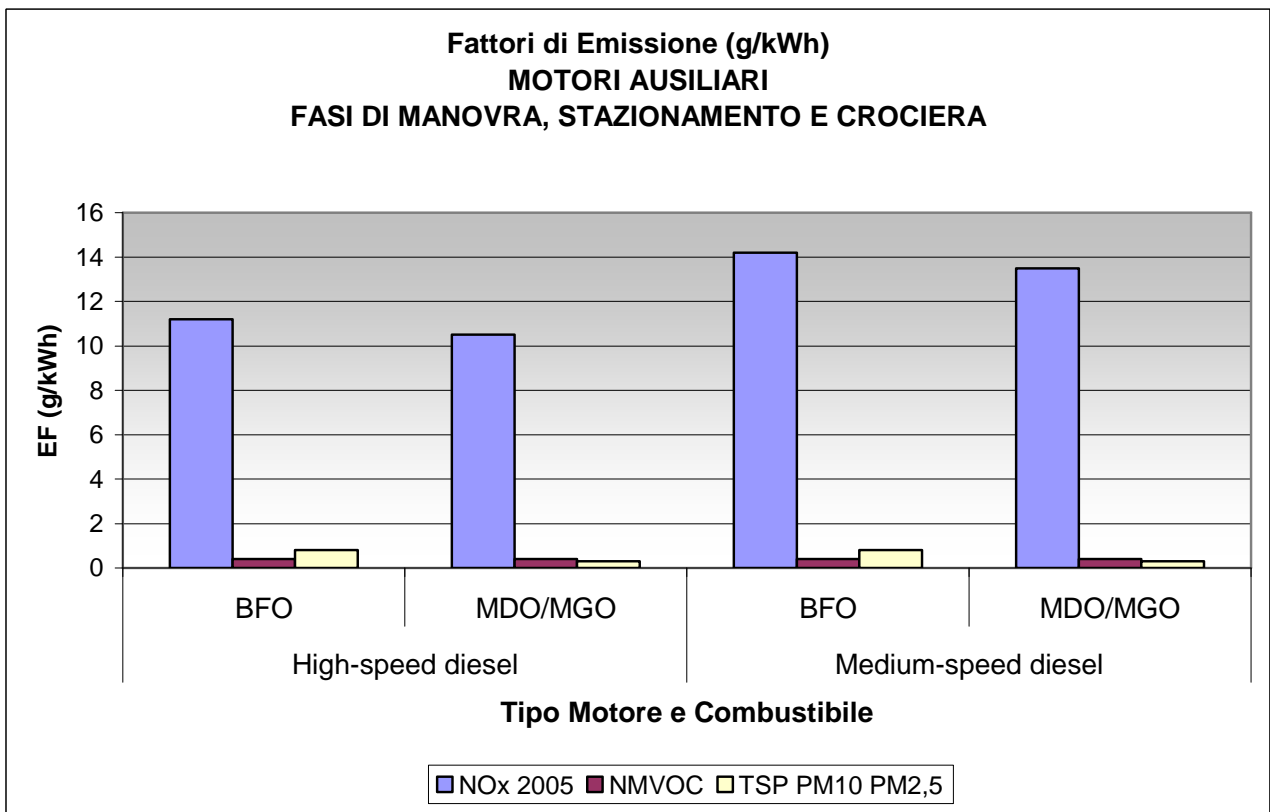


Fig.4. Fattori di emissioni procedura Tier 3 EMEP/EEA. Motori ausiliari, tutte le fasi.



Si osserva come tali fattori di emissione si differenzino innanzitutto per il tipo di combustibile, secondo le due semplici categorie MDO/MGO e BFO, in secondo luogo per il tipo di motore

(motori diesel a bassa, media e alta velocità, turbine a gas e a vapore). Per i motori principali i fattori di emissione si distinguono anche per la fase di viaggio (stazionamento/manovra rispetto a crociera), mentre per i motori ausiliari non è prevista tale distinzione.

Per CO e SO₂, inquinanti per i quali la tabella *Guidebook* 3.10 non fornisce fattori di emissione, la stima viene svolta utilizzando i fattori di emissione espressi in funzione del consumo di combustibile della procedura *Tier 1* (Tab. 3.1 e Tab. 3.2 *Guidebook*), dopo aver calcolato il consumo di combustibile utilizzano i consumi specifici riportati dalla medesima tabella 3.10 *Guidebook* e l'equazione di calcolo della procedura *Tier 3* (Eq.1).

Nello specifico, sia per BFO che per MDO/MGO, il fattore di emissione è di 7,4 kg/tonnellate di combustibile per CO, mentre per SO₂ il fattore di emissione è da calcolarsi con la formula:

$$20 \cdot S, \text{ con } S = \text{percentuale di tenore di zolfo in massa nel combustibile.}$$

Per l'applicazione della procedura *Tier 3*, in mancanza di specifiche informazioni sul tipo di motore e combustibile usato dalle singole navi, la metodologia medesima propone di fare riferimento ad una distribuzione statistica delle classi motori e combustibili registrate nelle flotte di riferimento.

La metodologia propone, ad esempio, la distribuzione percentuale per la flotta mondiale 2010, di tabella 3-7 *Guidebook*.

Table 3-7 Percentage of installed Main Engine power by engine type/fuel class (2010 fleet)

Ship category	SSD MDO /MGO	SSD BFO	MSD MDO /MGO	MSD BFO	HSD MDO /MGO	HSD BFO	GT MDO /MGO	GT BFO	ST MDO /MGO	ST BFO
Liquid bulk ships	0.87	74.08	3.17	20.47	0.52	0.75	0.00	0.14	0.00	0.00
Dry bulk carriers	0.37	91.63	0.63	7.29	0.06	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
Container	1.23	92.98	0.11	5.56	0.03	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00
General cargo	0.36	44.59	8.48	41.71	4.30	0.45	0.00	0.10	0.00	0.00
Ro Ro Cargo	0.17	20.09	9.86	59.82	5.57	2.23	2.27	0.00	0.00	0.00
Passenger	0.00	3.81	5.68	76.98	3.68	1.76	4.79	3.29	0.00	0.02
Fishing	0.00	0.00	84.42	3.82	11.76	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Others	0.48	30.14	29.54	19.63	16.67	2.96	0.38	0.20	0.00	0.00
Tugs	0.00	0.00	39.99	6.14	52.80	0.78	0.28	0.00	0.00	0.00

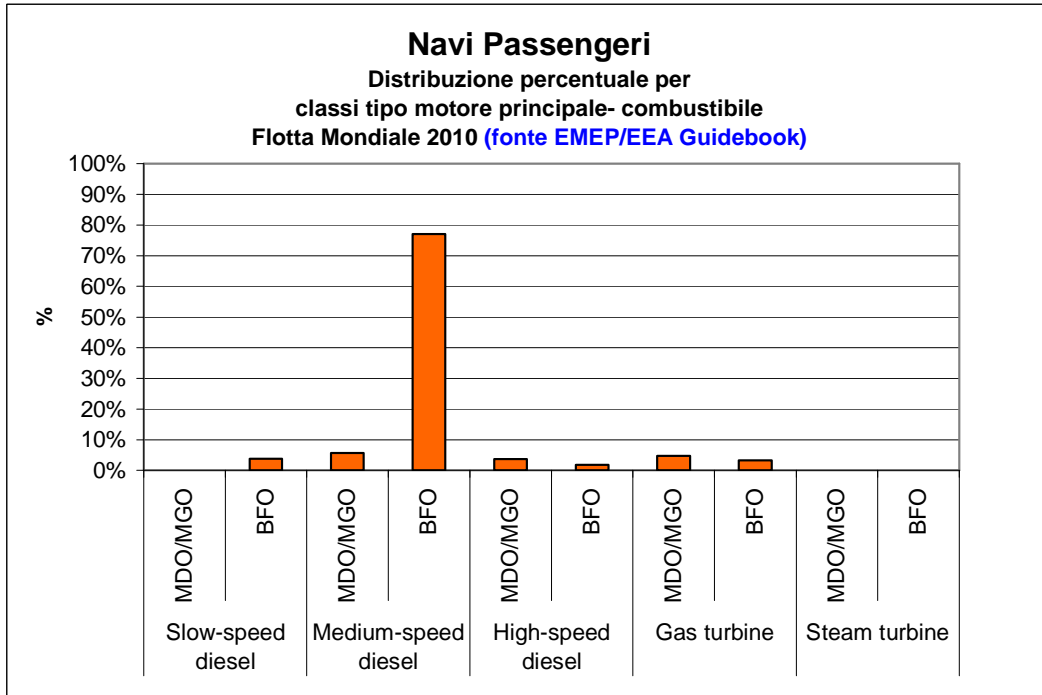
SSD - Slow Speed Diesel, MSD - Medium Speed Diesel, HSD - High Speed Diesel, GT - Gas Turbine,

ST - Steam Turbine; MDO - Marine Diesel Oil, MGO - Marine Gas Oil, BFO - Bunker Fuel Oil

Source: Trozzi, 2010

In figura 5 la distribuzione percentuale nelle classi motore/combustibile di tabella 3-7 *Guidebook* è riprodotta per il caso delle navi passeggeri. Si osserva come la classe più numerosa sia quella dei motori diesel a media velocità, alimentati a BFO.

Fig.5. Fattori di emissioni procedura Tier 3 EMEP/EEA. Motori ausiliari, tutte le fasi.



Il calcolo di stima pesa dunque, secondo le distribuzioni percentuali di tab. 3-7 Guidebook, i diversi fattori di emissione.

Nei seguenti grafici (Fig.6-7) si riportano le emissioni orarie per la fase di manovra e di stazionamento delle navi passeggeri, calcolate considerando la distribuzione tipo motore e combustibile della flotta mondiale 2010.

Fig.6. Emissioni orarie delle navi passeggeri in funzione del tonnellaggio. Fase di manovra.

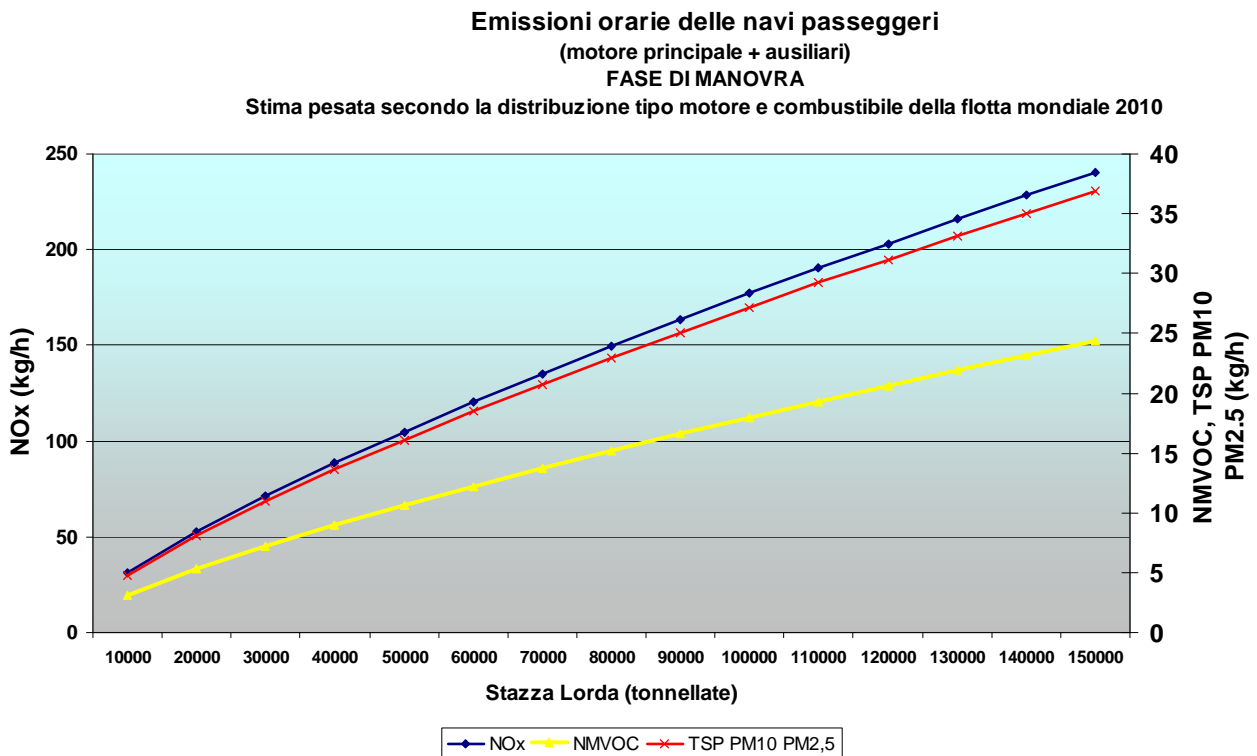
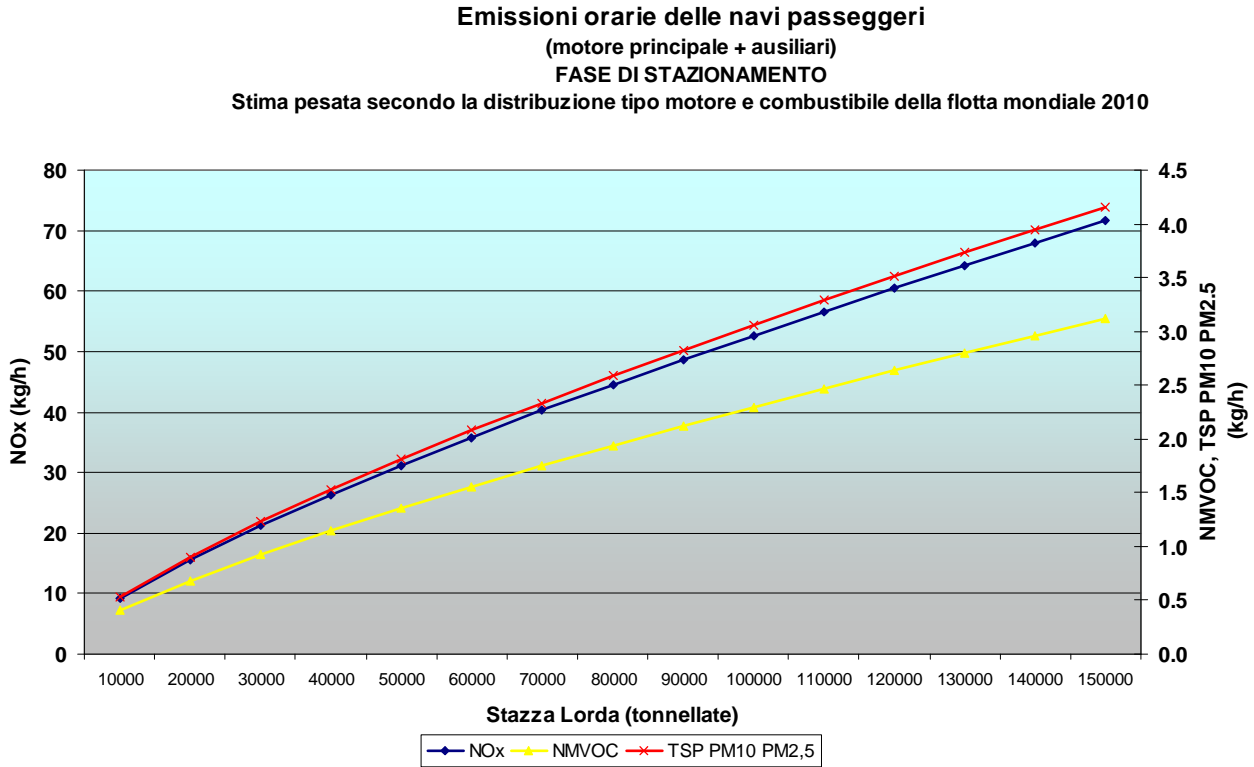


Fig.7. Emissioni orarie delle navi passeggeri in funzione del tonnellaggio. Fase di stazionamento.



Si noti il diverso fondo scala per i due grafici, con la fase di manovra che fa registrare emissioni maggiori a quella della fase di ormeggio.

Nel computo totale dell'emissione, dovendo infine moltiplicare per le ore trascorse in ciascuna fase, il bilancio tra emissioni di manovra e di stazionamento terrà tipicamente a bilanciarsi, in quanto le ore di stazionamento sono tipicamente molto maggiori rispetto a quelle spese in manovra.

Si conclude questo *excursus* metodologico, dimostrando come dall'Eq.1 di calcolo dell'emissione, si giunga all'equazione che esprime la variazione relativa dell'emissione in funzione della variazione relativa della stazza lorda (funzione mostrata in Figura 1 per il caso delle navi passeggeri).

$$E_{Trip,i,j,m} = \sum_p \left[T_P \sum_e \left(P_e \times LF_e \times EF_{e,i,j,m,p} \right) \right] \quad (\text{Eq.1})$$

- Dove
- E_{Trip} =Emissione di un viaggio (tonnellate)
 - EF= Fattore di Emissione (g/Kwh), dipendente dal tipo di nave
 - LF=fattore di carico del motore (%)
 - P=potenza nominale del motore (kW)
 - T=tempo (h)
 - e=categoria motore (principale, ausiliario)
 - i=inquinante (NOx, NMVOC, PM)
 - j=tipo motore (diesel a bassa, media e alta velocità, turbina a gas, turbina a vapore)
 - m=tipo di combustibile (olio combustibile, olio diesel marino, gasolio marino, benzina)
 - p=fase di navigazione (crociera, stazionamento, manovra)

Per ciascuna fase di navigazione, a partire dall'Eq.1 si può esprimere l'emissione oraria E_T come nella seguente Eq.2:

$$E_T = \gamma \cdot \alpha \cdot GT^\beta \quad (\text{Eq.2})$$

con $GT = \text{Gross Tonnage o Stazza Lorda}$

α e β coefficienti di Tab.3-12 *Guidebook*, diversi a seconda della categoria nave.

$$\gamma = LF_m \cdot EF_m + LF_a \cdot EF_a \cdot \rho$$

dove $\rho = \text{rapporto tra potenza del motore ausiliario e potenza del motore principale (Tab. 3-13 Guidebook)}$.

γ quindi è un coefficiente che dipende dai parametri

$e = \text{categoria motore (principale, ausiliario)}$

$i = \text{inquinante (NOx, NMVOC, PM)}$

$j = \text{tipo motore (diesel a bassa, media e alta velocità, turbina a gas, turbina a vapore)}$

$m = \text{tipo di combustibile (olio combustibile, olio diesel marino, gasolio marino, benzina)}$

$p = \text{fase di navigazione (crociera, stazionamento, manovra)}$

ma indipendente dalla stazza lorda.

A partire dall'Eq.2 si calcola la variazione relativa di E_T , $\frac{\Delta E_T}{E_T}$, in termini di variazione relativa di GT , come di seguito:

$$\frac{\Delta E_T}{E_T} = \frac{E_T(GT + \Delta GT) - E_T(GT)}{E_T(GT)} \quad (\text{Eq.3})$$

Ponendo la variazione relativa della stazza lorda, GT , $\frac{\Delta GT}{GT} = \nu$, l'Eq.3 diviene:

$$\frac{\Delta E_T}{E_T} = \frac{\gamma \cdot \alpha \cdot (GT \cdot (1 + \nu))^\beta - \gamma \cdot \alpha \cdot GT^\beta}{\gamma \cdot \alpha \cdot GT^\beta}$$

$$\frac{\Delta E_T}{E_T} = \frac{GT^\beta \cdot (1 + \nu)^\beta - GT^\beta}{GT^\beta} = (1 + \nu)^\beta - 1 \quad (\text{Eq.4})$$

Per cui si dimostra che la variazione relativa $\frac{\Delta E_T}{E_T}$ non dipende da γ , mentre assume curvatura diversa in dipendenza da β che è legato alla categoria di nave (tab. 3-12 *Guidebook*).

Poiché i valori di β sono sempre inferiori ad 1 per tutti i tipi di nave, ad una variazione relativa del tonnellaggio corrisponde una variazione relativa dell'emissione più attenuata.

Nel caso delle navi passeggeri $\beta = 0.757$, da cui la curva di Figura 1.