UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI NAPOLI "FEDERICO II"

FACOLTA' DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA NAVALE

(CLASSE DELLE LAUREE IN INGEGNERIA INDUSTRIALE N.10)

ELABORATO DI LAUREA

IL PROBLEMA DELL'INQUINAMENTO NEI PORTI DOVUTO ALLA PRESENZA CONTEMPORANEA DI NAVI DA CROCIERA

RELATORE

Ch. Mo Prof. Ing. Franco Quaranta

CANDIDATO

Francesco Pastore

Matr. N48/29

ANNO ACCADEMICO 2011/2012

Al mio papà e alla mia mamma.

INDICE

CAPITOLO I - L'INQUINAMENTO NEI PORTI: CAUSE, FORME, EFFETTI E METODI DI RIDUZIONE ……1

I.I CAUSE PRINCIPALI DELL' INQUINAMENTO PORTUALE……..1

I.II FORME DI INQUINAMENTO NELLE AREE PORTUALI……2

L'inquinamento atmosferico……2

L'inquinamento delle acque…….5

L'inquinamento acustico……5

I.III METODI INDIRETTI DI RIDUZIONE DELLE EMISSIONI……5

I.IV EFFETTI SULL'UOMO……7

I.V LA NORMATIVA VIGENTE……8

Regolamentazioni SO_x……10

Regolamentazioni NO_x……11

I.VI METODI DI RIDUZIONE EMISSIONI SO_x, NO_x e PM……..12

Metodi di riduzione emissioni di SO_x……12

Metodi di riduzione emissioni di NO_x……14

CAPITOLO II – CARATTERISTICHE D'IMPIANTO, POTENZE ED EMISSIONI DELLE NAVI DA CROCIERA ……17

II.I CARATTERISTICHE SALIENTI DELLE NAVI DA CROCIERA……17

Impianti di potenza diesel elettrici……17

I motori elettrici……19

Propulsione……21

II.II CARNIVAL "ELATION" & ROYAL CARIBBEAN INTERNATIONAL "VOYAGER OF THE SEAS" CASE STUDY: POTENZA PROPULSIVA E PER I SERVIZI DI BORDO……23

Cruise Ship "Elation"……23

Cruise Ship “Voyager of the Seas”……..24

II.III VALUTAZIONE DELLE EMISSIONI DAI GENERATORI DI BORDO……25

II.IV QUADRO FINALE DELLE EMISSIONI……33

CAPITOLO III – QUALITÁ DELL’ARIA: IL CASO DEL PORTO DI NAPOLI……35

III.I ANALISI DELLE RILEVAZIONI……35

III.II CONCLUSIONI IN MERITO ALLE ANALISI DELLE RILEVAZIONI……37

CAPITOLO IV – POSSIBILI RIMEDI……39

IV.I DISPOSIZIONE ORMEGGI……39

IV.II IL SISTEMA “COLD IRONING”……39

PREFAZIONE

L'attività del settore navale costituisce circa il 3% di quella industriale a livello internazionale. Il consumo di energia, l'emissione dei gas nocivi e il relativo impatto ambientale incidono secondo tale percentuale.

Si tratta di numeri piccoli che, messi a confronto con le aree estese in cui si svolgono le attività marinare, sembrano non tali da giustificare specifiche strategie.

Tuttavia, in alcune aree ad elevato livello di conurbazione come i porti, l'attività marinara diventa devastante in termini di impatto ambientale.

Il porto di Napoli, per esempio, costituisce un caso limite sia per le sue dimensioni, sia per l'alta densità del traffico marittimo in esso svolto e sia per la vicinanza alle aree residenziali e storico-monumentali della città.

Alle attività classiche che si svolgono in esso, quali: imbarco e sbarco merci, manovre svolte dalle svariate tipologie di navi e altre attività che danno contributo non trascurabile all'inquinamento, si aggiungono quelle dei generatori di energia elettrica presenti nelle navi da crociera che, in alcune condizioni, raggiungono valori di potenza dell'ordine delle centinaia di MegaWatt.

Ci si accinge allo studio dell'inquinamento dovuto all'attività portuale con particolare riferimento alle attività crocieristiche, allo scopo di individuare condizioni critiche per la salute umana.

CAPITOLO I – L'INQUINAMENTO NEI PORTI: CAUSE, FORME, EFFETTI E METODI DI RIDUZIONE.

I.I CAUSE PRINCIPALI DELL' INQUINAMENTO PORTUALE

Le aree portuali sono quelle più esposte al problema dell'inquinamento.

Una configurazione tipica di porto vede più navi presenti all'ormeggio contemporaneamente con tutte le attività associate ad esse.

Molte navi, quando sono all'ormeggio, hanno bisogno di potenze che servono a ad alimentare servizi di bordo, di carico, di scarico e di scafo e che gli vengono fornite dai motori presenti a bordo. Questo implica che la nave, seppur ferma, ha i motori accesi. A questa fonte inquinante si aggiungono poi quelle dei veicoli a sostegno delle attività portuali, quelle delle industrie e quelle urbane limitrofe. Il risultato sull' impatto ambientale costituisce quindi un problema molto serio in aree vicine ai centri abitati e ai centri storici i cui monumenti subiscono il deterioramento dovuto all'azione delle piogge acide. Un esempio è proprio il porto di Napoli che, come quello di Venezia, presenta una intensa attività crocieristica dovuta al fatto questi porti sono vicini ai centri città più esposti al turismo. L'attenzione cade su questo tipo di nave in quanto questa ha perennemente bisogno, anche quando è ormeggiata, di energia elettrica per i servizi a bordo quali quelli alberghieri, quelli legati al funzionamento dell'aria condizionata (praticamente ovunque), quelli che servono al riscaldamento delle piscine e via dicendo fino alle stesse attività di scafo. Il problema risiede nel fatto che la potenza richiesta da questi servizi, per ogni singola nave, è molto elevata (è dell'ordine dei MegaWatt), se poi alla colonna d'ormeggio sono presenti più navi da crociera, i consumi del combustibile, dovuto al funzionamento dei motori, e le relative emissioni allo scarico si sommano e il risultato finisce col diventare preoccupante nei termini dell' impatto ambientale.

I.II FORME DI INQUINAMENTO NELLE AREE PORTUALI

Le forme di inquinamento nelle aree portuali sono: inquinamento atmosferico, inquinamento delle acque e inquinamento acustico.

L'inquinamento atmosferico, il più dannoso in termini di salute umana, è dovuto alla presenza nell'aria di polveri sottili e gas nocivi emessi dai motori Diesel a bordo delle navi e da quei veicoli di lavoro che vengono utilizzati nei porti. Senza contare poi che a questi si sommano i gas emessi da altre fonti inquinanti come le industrie e gli stessi autoveicoli urbani.
La potenza installata sulla quasi totalità delle navi, è erogata da motori Diesel a due e quattro tempi.
Su questi motori, quindi, viene ad essere studiato il problema in esame.

I gas di scarico di questi si compongono per la maggioranza di sostanze non nocive quali: Azoto (N_2), Ossigeno (O_2), Acqua (H_2O) e Anidride Carbonica (CO_2) la quale, anche se non considerata inquinate, contribuisce però all'effetto serra. I gas serra sono trasparenti alla luce ultravioletta proveniente dal sole, mentre assorbono e riflettono le radiazioni a maggiore lunghezza d'onda (luce visibile, infrarossi) tipiche della riflessione da parte della superficie terrestre e marina. La conseguenza diretta dell'effetto serra è la riduzione del calore disperso per irraggiamento dal pianeta e l'aumento della sua temperatura media.

Le emissioni inquinanti rivestono invece una percentuale più piccola rispetto alle non-inquinanti, ma non sono trascurabili se si considerano i valori assoluti delle quantità emesse in relazione alla durata di esercizio e in base alle potenze installate.
Tali sostanze sono: Ossidi di zolfo (SO_x), Ossidi di Azoto (NO_x), Idrocarburi incombusti (HC o VOCs – benzene, formaldeide, toluene, ecc.), Ossido di Carbonio (CO), Particolato (Particulate Matters PM).

Gli ossidi di zolfo presenti nei gas allo scarico di un motore diesel, generalmente indicati come SO_x, sono costituiti per il 95% da anidride solforosa o biossido di zolfo (SO_2) e per il rimanente 5% da anidride solforica o triossido di zolfo(SO_3).

L'anidride solforosa deriva dall'ossidazione dello zolfo, contenuto nel combustibile, durante i processi di combustione: $S_{(s)} + O_{2(g)} = SO_{2(g)}$.

Questa, reagendo con l'acqua, dà origine all'acido solforoso, responsabile delle "piogge acide": $SO_{2(g)} + H_2O = H_2SO_{3(aq)}$. Dall'ossidazione dell'anidride solforosa, si origina l'anidride solforica:

$2SO_{2(g)} + O_{2(g)} = 2SO_{3(g)}$.

Il triossido di zolfo reagendo con l'acqua, sia in forma liquida che in forma vapore, dà origine all'acido solforico, anch'esso responsabile delle "piogge acide":

$SO_{3(g)} + H_2O = H_2SO_{4(aq)}$.

La scarsa quantità di anidride solforica emessa, rispetto all'anidride solforosa, è data dal fatto che la reazione di ossidazione dell'anidride solforosa in anidride solforica è molto lenta. Quindi l'inquinante di riferimento resta l'anidride solforosa SO_2.

Le piogge acide possono inquinare le acque sotterranee e corrodere le tubazioni dell'acqua potabile, danneggiano la vegetazione e la salute umana, esercitano una dannosa azione corrosiva su monumenti e costruzioni in genere. In generale gli ossidi di zolfo sono irritanti.

Gli ossidi di azoto presenti nei gas allo scarico di un motore diesel, generalmente indicati come NO_x, sono costituiti per il 95% da ossido nitrico o ossido di azoto (NO) e per il rimanente 5% da ossido nitroso o biossido di azoto (NO_2).

Sia l'ossido nitrico che l'ossido nitroso sono originati da reazioni che avvengono nelle zone della camera di combustione ad elevata temperatura (1500K e oltre).

Queste temperature elevate facilitano prima la dissociazione dell'ossigeno (O_2) e dell'azoto (N_2), presente sia nell'aria comburente che nel combustibile, poi la formazione dell'ossido nitrico NO.

L'ossido nitrico è un gas incolore non tossico. Questo, dopo la sua immissione nell'atmosfera, reagisce con l'ossigeno dell'aria e forma l'ossido nitroso NO_2, gas tossico, irritante e di colore rossastro: $4NO + 2O_2 = 4NO_2$

Per questo, quando si parla di NOx nell'atmosfera, si allude all' NO_2. L'ossido nitroso è un ossidante molto reattivo e quindi altamente corrosivo, può reagire con l'acqua e dare luogo all'acido nitrico: $4NO_2 + O_2 + 2H_2O = 4HNO_{3(aq)}$, principale responsabile, insieme agli acidi solforico e solforoso, delle piogge acide.

La riduzione dell'ossido nitroso, ad opera dei raggi solari, produce ossido nitrico e ossigeno atomico che, combinandosi con l'ossigeno molecolare, dà come risultato l'ozono (O_3), potente inquinante a livello del suolo in quanto attacca vernici, gomme e plastiche ed è irritante per le vie aeree e per gli occhi.

Gli idrocarburi incombusti (HC) sono originati dalla combustione incompleta del combustibile e dell'olio lubrificante. Hanno odore sgradevole e alcuni di essi possono essere cancerogeni.

Il monossido di carbonio (CO) è originato dalla combustione incompleta del carbonio nelle zone della camera di combustione nelle quali si verifica un difetto d'aria oppure può provenire dalla dissociazione della CO_2. È altamente tossico ma solo in concentrazioni elevate.

Il particolato (PM) è un insieme complesso di particelle di carbone di diametro minore di 1 µm, note con il nome di "soot", che hanno origine in quelle zone della camera di combustione dove c'è maggiore ricchezza di combustibile e che non riescono poi a essere ossidate.
Su queste particelle solide e insolubili si deposita, per condensazione e assorbimento, uno strato di idrocarburi, allo stato liquido, costituente la parte organica solubile di ciascuna particella ed è denominata "sof" (frazione organica solubile). Questi idrocarburi sono sempre generati dalla combustione incompleta del combustibile e dell'olio lubrificante.
Sul nucleo grafitico si depositano anche solfati, nitrati, ossidi di metallo, particelle asportate a causa dell'usura di alcuni organi metallici del motore e solfati con aggiunta d'acqua. Solfati e solfati legati con l'acqua costituiscono parte predominante in massa del particolato. Si può quindi dire che il particolato emesso dipende, in grossa percentuale, dal contenuto di zolfo nel combustibile. Quindi del particolato si distingue una parte, originata dal processo di combustione che ha luogo nel motore, costituita da soot e idrocarburi, mentre un'altra parte -costituita da solfati, acqua e ceneri- originata esclusivamente dalla composizione del combustibile.

Altre forme d'inquinamento:

L'inquinamento delle acque nelle aree portuali, è provocato dallo sversamento di liquami e oli, generati dal funzionamento degli organi di propulsione e governo delle navi che effettuano, in queste zone, un certo numero di manovre. Senza contare poi quelli che possono essere gli incidenti in mare che costituiscono causa di incremento dell'inquinamento marino. Ci sono poi le operazioni di manutenzione delle carene tramite pitturazione. Questo processo consiste nell'uso di additivi antivegetativi che hanno effetti negativi sull'ambiente marino.

L'inquinamento acustico nelle aree portuali è provocato dai rumori dei motori sia delle navi che di tutti gli altri mezzi che servono a svolgere le attività in porto nonché dalle attività stesse.

I.III METODI INDIRETTI DI RIDUZIONE DELLE EMISSIONI

I motori Diesel, tra gli impianti motori primi termici, sono caratterizzati da valori elevati di rendimento e quindi, a parità di potenza erogata e combustibile utilizzato, bruciano una quantità di combustibile minore rispetto agli altri impianti di minore rendimento e immettono nell'atmosfera una minore quantità di anidride carbonica.
Allo stato attuale della tecnologia, grazie agli elevati valori dell'eccesso d'aria utilizzati, i rendimenti di combustione sono molto alti. Quindi gli HC ed il CO emessi sono su valori molto contenuti.
L'emissione di particolato, data la sua composizione, dipende da vari parametri.
Nella figura 1 si nota che le emissioni di particolato crescono al crescere della percentuale di ceneri ma, a parità di queste, all'aumentare della concentrazione di zolfo nel combustibile si hanno notevoli emissioni di particolato.

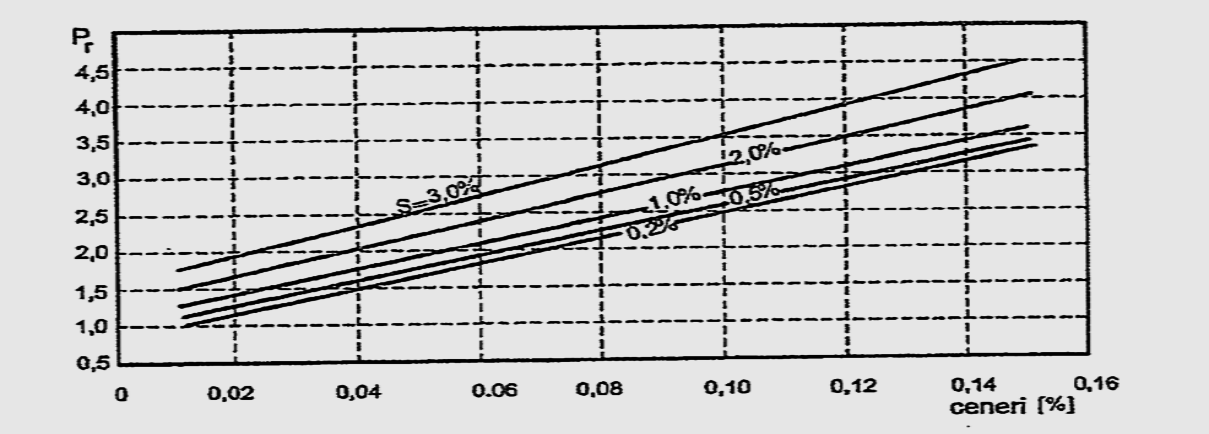


Figura 1: *andamento delle emissioni di particolato al variare del contenuto in massa delle ceneri nel combustibile, per combustibili caratterizzati da differenti valori del contenuto di zolfo.*

Nella figura 2 si nota che, per combustibili ad elevato contenuto di zolfo, diversamente da quelli a basso contenuto di zolfo (BTZ, contenenti meno dello 0,005% in massa di zolfo), si ha una massiccia presenza di solfati e di acqua legata ai solfati e come, riducendosi il carico, la percentuale di HC cresca sensibilmente. La formazione del soot e degli HC dipende dal carico del motore. Essa è trascurabile ai carichi medi e alti mentre assume valori significativi ai bassi carichi.

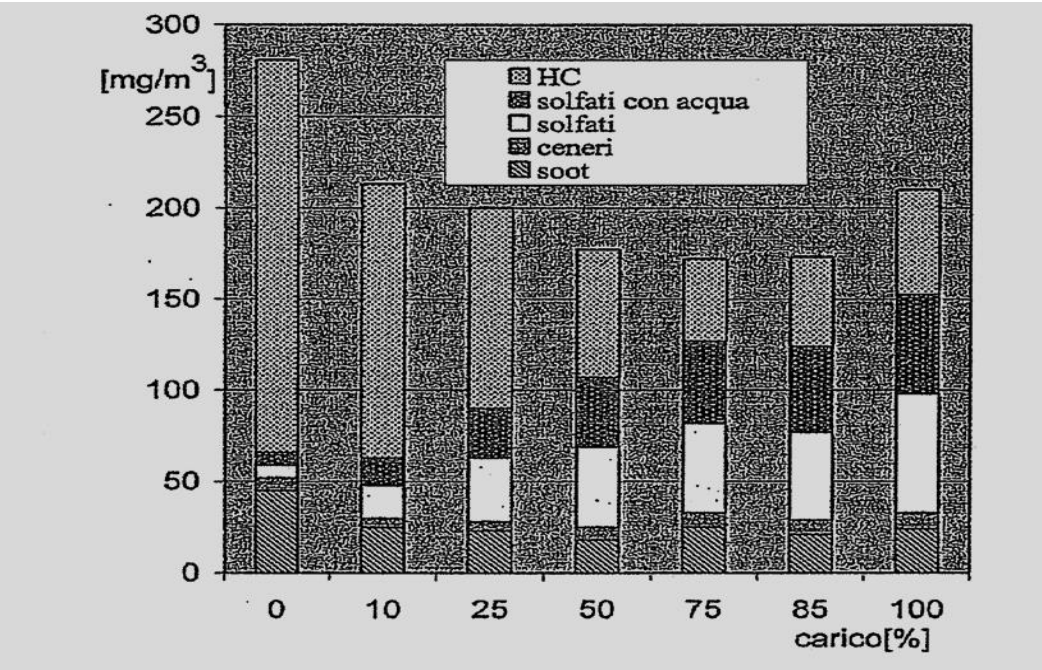


Figura 2: *composizione media del particolato allo scarico di un motore diesel in funzione del carico utilizzando un combustibile ad elevato tenore di zolfo.*

Il motivo risiede nel fatto che, ai bassi carichi, la turbosoffiante, progettata e ottimizzata per il funzionamento a carico nominale, fornisce una quantità d'aria insufficiente con conseguente combustione incompleta e formazione di soot e HC. In queste condizioni anche la pompa di iniezione del combustibile, a velocità di rotazione modesta, conferisce minore pressione al gasolio con conseguente minore polverizzazione dello stesso e combustione più difficoltosa. Il problema esaminato è molto sentito nelle aree portuali dove le operazioni di manovra delle navi impongono bassi carichi ai motori.

La soluzione risiede nell'utilizzo di motori provvisti di sistema di iniezione di tipo "common rail" e di controllo elettronico dell'iniezione nonché turbosoffianti ausiliarie comandate elettronicamente che intervengono ai bassi carichi insieme con la pratica di alimentare il motore con un emulsione di acqua-combustibile che consente anche di ridurre la formazione degli NO_x. Sono soluzioni che servono non soltanto a ridurre le emissioni ai bassi carichi ma servono anche a ridurre i consumi specifici in tali condizioni, il che è sempre cosa gradita nel campo navale.

Tutto questo è servito a dimostrare che basta regolamentare le sole emissioni di SO_x , attraverso disposizioni di legge riguardanti la concentrazione di zolfo nei combustibili, e di NO_x , attraverso suggerimenti circa il funzionamento e l'equipaggiamento dei motori, per mettersi ai ripari di quelli che sono i rischi legati a tutte le altre sostanze inquinanti.

I.IV EFFETTI SULL'UOMO

Primo fra tutti ad essere particolarmente dannoso per la salute umana è il particolato. Le sue particelle hanno diametri quasi sempre inferiori a 1 µm e dunque passano attraverso le vie respiratorie raggiungendo i polmoni comportando effetti tossici e cancerogeni. Possono provocare danni al sistema respiratorio e cardiaco. Il peso di queste particelle è modestissimo, per cui esse possono essere trasportate dal vento e vengono a costituire un danno anche per coloro che si trovano lontani dalla fonte che le genera.

L'Organizzazione Mondiale della Sanità (WHO) si è interessata di sottolineare quali sono gli effetti nocivi delle principali sostanze inquinanti emesse allo scarico e quali sono le dosi massime che si prendono a riferimento per i casi di esposizione continuativa alle emissioni.

Per l' NO_2 la WHO raccomanda il limite orario di 200 µg/m^3 (con estensione fino a 560 µg/m^3 quando l'esposizione non supera i 30 minuti), il limite per la media annuale è invece 40 µg/m^3.

Esposizioni maggiori sono da considerare pericolose. Esposizioni anche brevi a concentrazioni di 50÷150 mg/m^3 possono provocare risentimenti polmonari, l'inalazione a 100 mg/m^3 può generare danni seri all'apparato respiratorio. Inalazioni brevi a 300÷400 mg/m^3 possono essere letali.

L'istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) ha emesso una indicazione di massima dose tollerabile di NO_2 per gli operatori industriali che è di 9,5 µg/m^3 in un ciclo di otto ore lavorative al giorno per cinque giorni alla settimana.

Per le emissioni di SO_x il WHO fornisce le seguenti indicazioni:

esposizioni a 0,06 mg/m^3 possono provocare bronchite o infezione alle vie respiratore, a 0,3 mg/m^3 possibili danni respiratori, a 0,8÷2,6 mg/m^3 percezione olfattiva della sostanza con esigenza di maschera antigas e ricerca di un ricovero. Per esposizioni a maggiori concentrazioni si hanno danni più gravi: esposizioni a 3 mg/m^3 con durata superiore a 10 minuti generano aumento del ritmo respiratorio e del battito cardiaco, a 25 mg/m^3 aumento della frequenza cardiaca e forti irritazioni agli occhi, naso e gola, a 5 g/m^3 asfissia tossica e collasso cardiocircolatorio.

L' INFN suggerisce 0,06 mg/m^3 come massima esposizione a giornate lavorative di 8 ore per 5 giorni alla settimana per gli operatori industriali.

I.V LA NORMATIVA VIGENTE

Per quanto riguarda la regolamentazione degli inquinanti, bisogna tener conto del fatto che il traffico marittimo è svolto da tipologie di navi che differiscono tra loro per valori della potenza installata a bordo, per la propulsione e per il tipo di rotta da percorrere. Le navi, infatti, che collegano porti ubicati in continenti diversi quali, ad esempio, bulk carrier, petroliere e portacontainers, quasi sempre propulse da motori diesel due tempi, percorrono rotte oceaniche, per cui una lunghissima parte del tragitto, anche superiore al 90% del totale, si svolge in mare aperto, con la nave, fonte di inquinamento, lontanissima da coste eventualmente abitate. Bisogna allora tener conto di tale circostanza quando si

voglia emanare un dispositivo di legge che stabilisca i valori massimi di NO_x emessi dai motori diesel e contemporaneamente fare in modo che le regolamentazioni emanate abbiano validità, per evidenti motivi, in tutto il mondo. Analogo discorso vale in relazione al contenimento degli SO_x che si ottiene essenzialmente riducendo la percentuale di zolfo presente nel combustibile. Se si stabilisce una determinata concentrazione di zolfo, bisogna anche garantire, in tutti i porti del globo, la reperibilità di un combustibile con tali caratteristiche il che comporta un ingente onere a quelle raffinerie che devono adeguare i loro impianti a tale esigenza.

Le navi, invece, che non attraversano gli oceani, quali, ad esempio, i traghetti passeggeri, le roll on/roll off, le cruise ships, percorrono rotte piuttosto brevi, che per lunghi tratti possono svilupparsi lungo coste abitate, toccando numerosi porti con frequenza a volte giornaliera. È dunque ragionevole che i motori adibiti alla propulsione di tali navi, in genere diesel a quattro tempi, siano sottoposti a limitazioni più stringenti in merito alle emissioni inquinanti.

Alla luce di quanto esposto, risulta evidente che, in campo marittimo, debba essere previsto un Organismo Internazionale ufficialmente riconosciuto da tutti i paesi dotati di flotte mercantili, al quale debba essere demandato il compito di emanare direttive, non solo in merito all'inquinamento, sia lato mare che lato aria, ma anche in relazione a tutti gli altri aspetti della navigazione con particolare riferimento alla sicurezza della stessa. Tale organismo internazionale fu costituito a Ginevra nel 1948 con il nome di "Inter-Governmental Maritime Consultative Organization" (IMCO) che nel 1982 fu mutato nell'attuale "International Maritime Organization" (IMO).

In occasione della conferenza internazionale che ebbe luogo a Londra nel Settembre del 1997, nell'ambito della convenzione MARPOL (MARine POLlution) fu emanato l'Annesso VI, relativo alle emissioni allo scarico dei motori diesel i cui obiettivi possono sintetizzarsi nei punti che seguono:

1) Ridurre le emissioni allo scarico dei motori diesel di nuova costruzione limitatamente agli NO_x
2) Limitare la percentuale in massa di zolfo presente nel combustibile utilizzato (riducendo, in questo modo, le emissioni di SO_x e PM)
3) Limitare l'immissione nell'ambiente di sostanze quali gli HFC (idrofluorocarburi) che impoveriscono lo strato dell'ozono.

Da notare che i motivi che hanno spinto l' IMO a porre limitazioni alla produzione di NO_x piuttosto che alla produzione di CO_2 sono dovuti alla circostanza che la quantità di NO_x prodotta dai traffici marini, pur risultando più contenuta della quantità di CO_2, ha un'azione venti volte più efficace in relazione all'impoverimento dello strato dell'ozono. Si prevede comunque che, in tempi brevi, anche la CO_2 entrerà a far parte delle sostanze regolamentate.

È interessante precisare che l'Annesso VI è entrato in vigore solo nel Maggio del 2005, vale a dire otto anni dopo la sua promulgazione, in quanto le proposte dell' IMO diventano legge solo dodici mesi dopo che siano state accettate perlomeno da quindici Paesi aderenti all' IMO che però, tutti insieme, dispongano di più del 50% del tonnellaggio esistente (GRT). Poiché tale condizione si è verificata solo nel Maggio del 2004, ecco giustificato il lungo intervallo di tempo intercorso tra promulgazione e applicazione dell' Annesso VI.

Regolamentazioni SO_x: sono definite dal regolamento 14 dell' Annesso VI della MARPOL 73/78. In esso sono state definite le SECA (Sulphur Emission Control Area) ossia aree in cui vengono applicati limiti per le emissioni di solfati, quindi per le percentuali in massa di zolfo contenute nei combustibili impiegati, più severi rispetto ai limiti impiegati globalmente:

PERIODI	AREE NON SECA	AREE SECA
<1/1/2012	4,5%	
>1/1/2012	3,5%	
>1/1/2020	0,5%	
<1/1/2015		1,0%
>1/1/2015		0,1%

Rientrano nella categoria SECA le aree del Mar Baltico, Mare del Nord, Canale della Manica. Le aree SECA sono entrate in vigore tra il 2006 e il 2007. Più recentemente, nel 2010, sono state introdotte le ECA (Emission Control Area), aree che raccolgono zone costiere e portuali di varie nazioni, tra cui quelle europee, dove sono state imposte limitazioni ancora più restrittive alle emissioni di SO_x, NO_x e PM al fine di salvaguardare la drammatica situazione ambientale che si era venuta a creare nelle città marinare. A tal proposito la "EU DIRECTIVE 2005/33/EC", limitatamente all' Unione Europea, impone l'uso, a partire dal 1 Gennaio 2010, di combustibili con appena lo 0,1% in massa di zolfo per i motori delle navi

che effettuano navigazione interna (entro le 12 miglia dalla costa) e per tutti i diesel generatori e caldaie a combustibile di tutte le navi, quando queste sono all'ormeggio nei porti comunitari. La norma prevede anche il caso in cui il combustibile a bordo non risponda ai requisiti posti e permette, in alternativa alle specifiche del combustibile, di contenere le emissioni dai motori, in zone ECA, entro i 6 g/KWh per il tramite di opportune installazioni. I flussi di scarico, derivanti dall' utilizzo di questi sistemi, non devono essere scaricati in porti chiusi, baie o estuari a meno che non sia documentato che tali reflui non hanno alcun impatto negativo sugli ecosistemi di tali ambienti.

Regolamentazioni NO_x: sono definite dal regolamento 13 dell' Annesso VI della MARPOL entrato in vigore nel 2005. Questo sancisce che i controlli relativi agli NO_x si applicano ai motori diesel superiori ai 130 KW installati sulle navi dopo il 1 Gennaio 2000 oppure soggetti a "rilevanti trasformazioni" dopo il 1 Gennaio 2000. Con "rilevanti trasformazioni" si intende quando un motore è sostituito da uno nuovo oppure quando gli output di questo sono cresciuti del 10%. La revisione dell' Annesso VI, in vigore dal Luglio del 2010 e approvata nel corso del meeting IMO MEPC 58, contiene le progressive restrizioni per le emissioni di NO_x dei motori diesel marini. Per questo motivo, su questi gas, l'odierno regolamento 13 divide l'applicazione temporale della norma in tre fasi nominate "Tier". Inoltre, dato che le emissioni di NO_x dipendono dai regimi di funzionamento del motore, i limiti massimi vengono espressi in funzione del numero di giri del suo albero a gomiti:

Tier I (fino al 1/1/2011)	rpm<130	17 g/KWh
	130<rpm<2000	$45/rpm^{0,2}$ g/KWh
	rpm>2000	9,8 g/KWh
Tier II (dal 1/1/2011 al 1/1/2016)	rpm<130	14,4 g/KWh
	130<rpm<2000	$44/rpm^{0,23}$ g/KWh
	rpm>2000	7,7 g/KWh
Tier III (dopo il 1/1/2016 nelle aree ECA)	rpm<130	3,4 g/KWh
	130<rpm<2000	$9/rpm^{0,2}$ g/KWh
	rpm>2000	2,0 g/KWh

Da notare che ai bassi regimi cioè a rpm<130 le emissioni permesse di NO_x sono più alte. Questo è dovuto al fatto che il numero di giri nominale dei motori in questione è più basso

quindi il combustibile permane più tempo nella camera di combustione ed è più soggetto alle alte temperature, causa della formazione degli NO_x. Il fenomeno va a ridursi nei motori veloci o semi-veloci.

La conferenza MARPOL del 1997 introduce inoltre un Codice Tecnico per il controllo delle emissioni di NO_x dei motori diesel marini. In accordo con questo codice, il regolamento richiede l'ispezione dei motori e degli equipaggiamenti allo scopo di verificare il rispetto dei limiti previsti e per l'ottenimento della certificazione. Da questi controlli sono esentati: i motori diesel di emergenza, quelli installati sulle scialuppe di salvataggio, quelli installati su piattaforme off-shore dedicate all'esplorazione del fondale marino, ai motori delle navi utilizzate per viaggi all'interno delle acque territoriali per i quali l' amministrazione ha stabilito misure alternative.

Sono obbligatorie ispezioni periodiche per il controllo della conformità dei motori con le prescrizioni del Codice Tecnico per tutte le navi con tonnellaggio maggiore di 400GT utilizzate per i viaggi internazionali. L'attestazione della conformità dei motori con i limiti imposti dal regolamento 13 viene sancita con il rilascio del certificato EIAPP (Engine International Air Pollution Prevention) e/o di un certificato IAPP (International Air Pollution Prevention). Essi certificano inoltre il rispetto di tutti gli altri requisiti dell'Annesso VI riguardanti: sostanze dannose per l'ozono, contenuto di zolfo nei combustibili utilizzati, inceneritori di bordo.

I.VI METODI DI RIDUZIONE EMISSIONI SO_x, NO_x e PM

Metodi di riduzione emissioni di SO_x

Il regolamento 14 della MARPOL prevede anche il caso in cui la nave non sia provvista del combustibile avente le specifiche suggerite, il che è possibile soprattutto per le navi che percorrono tratte oceaniche i cui motori vengono alimentati con combustibile di tipo HFO (Heavy Fuel Oil) ad alta concentrazione di zolfo. La nave in tal caso dovrebbe disporre di due serbatoi, uno adibito al combustibile pesante e uno adibito al combustibile "pulito". Una situazione un po' difficile da gestire perché lo zolfo costituisce un lubrificante per i meccanismi di motore e di conseguenza il cambio combustibile va fatto con una certa

cautela su impianti opportunamente progettati. Inoltre la differenza di densità tra i due tipi di combustibile può causare il grippaggio delle pompe di iniezione. Può succedere che le navi dispongano di un solo serbatoio adibito all' HFO oppure può succedere che siano provvisoriamente non provviste di combustibile avente le specifiche richieste nelle aree ECA. In casi simili le emissioni di SO_x vanno comunque contenute ad almeno 6 g/KWh. Si provvede quindi all'installazione, a bordo, di opportuni "scrubbers". I sistemi più usuali, i "Sea Water Scrubbing" (SWS), sfruttano l'alcalinità dell'acqua di mare. Si stima che un litro di essa è in grado di neutralizzare circa 300 mg di zolfo. Il problema delle emissioni di SO_x, infatti, non si pone i mare aperto data la modesta distanza tra il fumaiolo e il pelo libero del mare. L'impianto è fatto in modo che l'acqua di mare mescolandosi a cascata con i gas combusti, sottrae a questi i gas acidi ed il particolato che successivamente vengono allontanati dall'acqua di mare.

Un altro sistema usato è il "Dry Scrubbing" dove soluzioni di reagenti alcalini, quali la calce spenta, vengono nebulizzate nella corrente di gas esausti in modo tale che la componente acquosa evapori all'interno dello scrubber e i prodotti della reazione vengano rimossi sotto forma di polvere secca. In alternativa è possibile utilizzare additivi per il combustibile per modo che, durante la combustione, vengano a formarsi solfati inerti, come il solfato di calcio, che a seguito di trattamenti di post combustione, possono facilmente essere rimossi dalla corrente. Un altro metodo ancora sarebbe quello di miscelare i gas di scarico con composti di calcio per modo che gli SO_x vengano convertiti in solfato di calcio (gesso). Sono tutti metodi di derivazione terrestre che riscontrano talvolta problemi, nelle installazioni a bordo, dal punto di vista economico o di spazi. Il problema viene risolto con l'applicazione di "retrofit", strumenti che iniettano, nei tratti preesistenti del percorso dei gas di scarico, sorbenti secchi o leggermente umidi come il calcare, la calce, la calce idrata, la soda in polvere e il bicarbonato di sodio. Chiaramente a questi ultimi vanno integrati opportuni sistemi di cattura delle frazioni solide e hanno efficienze variabili in funzione della temperatura di saturazione ed del rapporto ponderale calce-zolfo. Poche navi, specialmente quelle da crociera, sono dotate di scrubber a bordo. Viste le lunghe tratte sotto costa, una nave da crociera è sempre dotata, salvo imprevisti, di combustibile "pulito". Il combustibile cosiddetto "pulito" è un desolforato. Nelle raffinerie il greggio viene separato in due categorie di prodotti quali i residui e i distillati. I combustibili marini sono costituiti da miscele di residui. Lo zolfo che resta nei distillati può essere ridotto fino a

livelli molto bassi. Lo zolfo estratto può diventare zolfo elementare, utilizzato come fertilizzante, o acido solforico, usato per la pulizia di superfici. In generale conviene non avere zolfo nei combustibili perché il risultato della sua combustione produce logoranti per gli impianti che servono a ridurre le emissioni di particolato e NO_x. La desolforazione dei residui è più complessa e per poter essere realizzata è necessaria molta energia (questo spiega perché i desolforati hanno un costo superiore). I residui sono infatti costituiti da lunghe catene molecolari con lo zolfo profondamente intrappolato, per cui, per rimuovere lo zolfo, occorrono grosse quantità di energia e l'adduzione di molecole di idrogeno. Il risultato è un prodotto a molecole più semplici adatto alla miscelazione con combustibili meno pregiati. Un processo più economico è il "coking" che consiste nell'estrarre dai residui, distillati più pregiati e carbone.

Metodi di riduzione emissioni di NO_x

Per ridurre le emissioni degli NO_x si ricorre a metodi atti ad impedire alti picchi di temperature nella camera di combustione. I metodi primari sono quelli che intervengono sul progetto del motore, non comportano costi elevati, fanno rientrare le emissioni allo scarico nei limiti stabiliti dalla MARPOL ma comportano un leggero aumento di consumo specifico del combustibile. Rientrano in questa categoria:

1) Raffreddamento dell'aria di lavaggio mediante refrigeratore (ad acqua di mare) posto a valle del gruppo di sovralimentazione.
2) Chiusura della valvola di aspirazione prima che il pistone abbia raggiunto il PMI in modo che l'aria, intrappolata nel cilindro, espanda con conseguente abbassamento della temperatura. Si fa attenzione al livello di raffreddamento per evitare la formazione del soot. Si introduce un gruppo di sovralimentazione con rapporto di compressione elevato a garantire la giusta introduzione d'aria.
3) Ritardo di iniezione (circa 2 o 3 gradi) per evitare che i gas combusti della fase precedente vengano ulteriormente compressi. In tal modo però, oltre alla temperatura, si riduce anche la pressione. Di conseguenza aumentano i consumi.
4) Modifica dei polverizzatori: riducendo l'area dei fori dell'iniettore si riduce la portata di combustibile e, a parità di massa iniettata, il rilascio del calore di combustione rallenta.

Modifiche riguardano anche angoli di inclinazione dell'asse del getto al fine di migliorare la penetrazione, la turbolenza e l'evaporazione del combustibile.

5) I metodi illustrati consentono, singolarmente o in combinazione tra loro, di contenere la formazione di NO_x nel rispetto dei limiti imposti dall' Annesso VI della MARPOL. Metodi che consentono di raggiungere valori più ristretti di emissioni di NO_x, consistono nell'immettere acqua nella camera di combustione. Questa può essere immessa o insieme al combustibile (Fuel Water Emulsion), realizzando un'emulsione acqua-combustibile, oppure separatamente dall'aria e dal combustibile (Direct Water Emulsion), a mezzo di apposito iniettore. In ogni caso l'acqua viene iniettata allo stato vapore per evitare di squarciare il velo di lubrificante che aderisce alla parete del cilindro.

I metodi primari sono già sufficienti a mettersi in linea con le disposizioni di legge. Ma è anche vero che il loro uso comporta un aumento del consumo specifico di combustibile e quindi un aumento delle emissioni di CO_2. Talvolta, inoltre, è necessario ridurre ancora di più le emissioni degli ossidi di azoto e allora si ricorre a metodi secondari che vanno ad agire non più sul motore ma a valle di esso ossia sui gas combusti. A valle del collettore di scarico si installa un reattore "Selective Catalytic Reactor" (SCR) nel quale gli ossidi di azoto vengono fatti reagire con un agente riducente quale l'ammoniaca dando origine a acqua e azoto:

$4NO + 4NH_3 + O_2 \rightarrow 6H_2O + 4N_2$

$6NO_2 + 8NH_3 \rightarrow 7N_2 + 12H_2O$

Tuttavia, essendo l'ammoniaca una sostanza tossica e, se in fase gassosa, in opportune concentrazioni con l'aria può essere esplosiva, allora bisogna adottare speciali precauzioni per il suo immagazzinamento a bordo e questo non conviene in termini sia economici che di spazi. Si ricorre perciò all'uso dell' "urea", granuli bianchi contenuti in serbatoi più economici depositati nella stiva, portatrice di ammoniaca perché a 160°C, reagendo con l'acqua, fornisce ammoniaca e anidride carbonica:

$CO(NH_2)_2 + H_2O \rightarrow 2NH_3 + CO_2$

Tutto questo potrebbe essere evitato scegliendo motori alimentati a metano. Lo zolfo sarebbe praticamente assente, gli ossidi di azoto di gran lunga più contenuti insieme con l'anidride carbonica, emissioni modestissime di particolato. Ma l'introduzione di questo

motore in campo navale è ancora in via di accettazione da parte degli armatori per difficoltà riscontrate nell'immagazzinamento del metano a bordo, reperibilità nei porti, costi di installazione.

Oggi si può dire che i metodi di riduzione delle emissioni di SO_x è affidata quasi interamente all'utilizzo di un combustibile "più pulito" in quanto i metodi citati sopra sono utilizzati dalle poche navi che attraccano in particolari porti. È da sottolineare che in genere la scelta dell'armatore delle navi da crociera ricade sull'utilizzo di combustibili puliti ovunque dato il profilo di missione di queste navi. Quanto alle emissioni dell' NO_x, queste vengono ridotte tramite fasatura del motore (metodi primari) e di questo se ne occupano proprio le case costruttrici del motore.

CAPITOLO II – CARATTERISTICHE D'IMPIANTO, POTENZE ED EMISSIONI DELLE NAVI DA CROCIERA

II.I CARATTERISTICHE SALIENTI DELLE NAVI DA CROCIERA

Impianti di potenza diesel elettrici

Le navi da crociera sono tutte dotate di impianti di propulsione e potenza diesel elettrici. Una delle caratteristiche peculiari della propulsione elettrica è certamente la totale indipendenza nel posizionamento del motore termico, destinato alla produzione di energia elettrica, rispetto a quello elettrico di propulsione installato in prossimità dell'elica; non è necessaria quindi la linea d'assi tra i due motori ma è sufficiente un semplice collegamento elettrico mediante cavo. Non sono presenti generatori elettrici per i servizi di bordo in quanto l'energia elettrica per tali servizi viene prodotta dallo stesso impianto che produce l'energia elettrica occorrente alla propulsione e dunque viene previsto solo qualche diesel generatore di emergenza. La scelta arbitraria, da parte del progettista, nel posizionamento dei motori termici (medium speed diesel quattro tempi) unitamente all'assenza dei generatori elettrici, fa si che su queste navi venga ad essere recuperato spazio e ciò comporta l'aumento del numero di cabine a disposizione dei passeggeri o dell'equipaggio.

Un tipico impianto diesel elettrico è quello di figura 4: i nove motori diesel provvedono alla generazione di potenza a bordo, sull'albero a gomiti di ciascun motore è installato l'alternatore dove avviene la trasformazione dell'energia meccanica in elettrica. Questa energia elettrica viene in parte destinata ai servizi di bordo e in parte destinata alla propulsione. Cavi opportunamente dimensionati portano la corrente ai motori elettrici, che, come si vede, occupano uno spazio molto contenuto e sono posti in linea con le eliche. Nello specifico, le navi da crociera hanno uno specchio di poppa quasi verticale e la linea d'assi del motore elettrico ha una lunghezza modesta. Quanto alla disposizione dei motori termici sulla nave, il progettista deve sempre adeguarsi a quelle che sono le disposizioni di bordo e poiché, in genere, sull'ultimo ponte delle navi da crociera sono poste piscine e solarium, il posizionamento del fumaiolo è quasi strategico.

La potenza richiesta per la propulsione (circa il 60% di quella installata) e per i servizi della nave (circa il 40% di quella installata) viene quindi prodotta da un unico impianto termico e

poiché quasi mai sono richieste a bordo contemporaneamente la massima potenza per la propulsione e la massima potenza per i servizi, è possibile installare una potenza che può essere del 10%÷15% inferiore rispetto a quella da installare se la potenza per la propulsione e quella per i servizi fossero generate da due impianti separati.

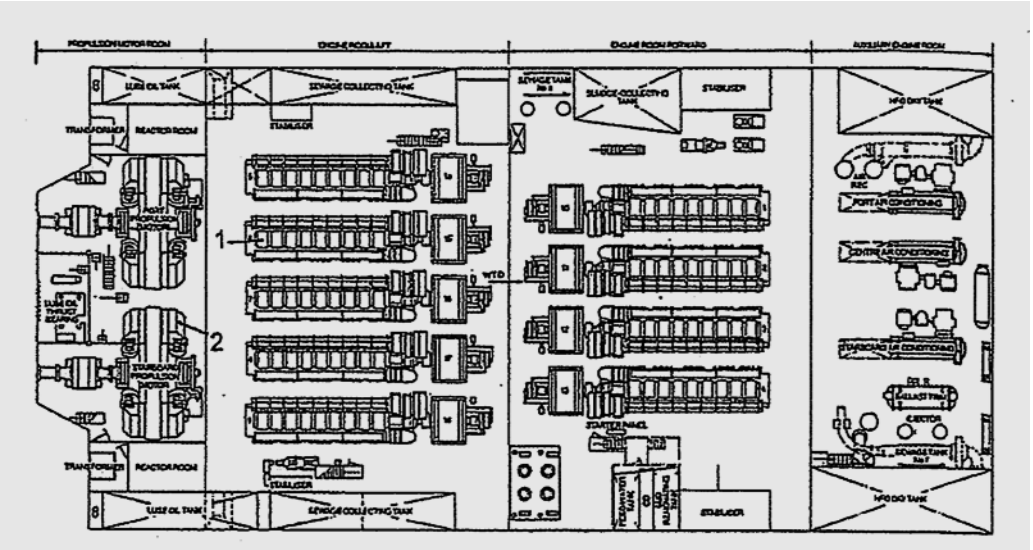


Figura 3: *Vista in pianta di nove motori diesel a quattro tempi (1) installati a bordo della cruise ship "Queen Elizabeth 2" e dei due motori elettrici di propulsione (2).*

Questa soluzione consente di far funzionare soltanto i motori necessari ad erogare la potenza che la velocità della nave e i servizi di bordo di volta in volta richiedono. In questo modo i motori in servizio funzioneranno tutti ad un valore del carico pari a quello di progetto o di poco discosto da esso e a una velocità di rotazione costante.

I vantaggi di questi regimi sono rilevanti perché comportano: condizioni di massimo rendimento e minimo consumo specifico; assenza di fumo nero allo scarico, cosa basilare per una nave da crociera che sull'ultimo ponte ospita piscine e solarium; possibilità di contenere le emissioni di NO_x e di realizzare un più efficace funzionamento dei dispositivi di abbattimento degli inquinanti comunque presenti allo scarico. Questo tipo di impianto può essere equipaggiato di ulteriori motori di tipo common rail che saranno gli unici a funzionare ai bassi carichi, senza emettere fumo, quando si naviga ad andatura ridotta sotto costa o quando si manovra in porto. L'assenza dei motori che occorrono alla sola produzione di energia elettrica per i servizi di bordo comporta minori spese di manutenzione in quanto si tratterebbe di motori piccoli e veloci ed inoltre alimentati da combustibile non troppo scadente. La presenza di più motori conferisce sicurezza di

funzionamento in quanto, in caso di avaria ad uno o più motori, rimane comunque potenza sufficiente a governare la nave. Un vantaggio importante per questo tipo di impianto è legato all' inversione della marcia, in questo caso infatti per invertire la marcia non è necessario fermare il motore diesel e rimetterlo in moto facendolo ruotare in verso opposto, il che comporta sollecitazioni notevoli agli organi di motore, ma basta invertire il motore elettrico. Questo si traduce in una maggiore semplicità d'impianto del motore termico che ne vede ridotte le dimensioni perchè non deve più sopperire alle inversioni. Le inversioni del motore elettrico avvengono in maniera veloce e la potenza a marcia indietro è la stessa della marca avanti. Il motore elettrico presenta una coppia costantemente elevata anche a velocità di rotazioni prossime allo zero, per cui il verso di rotazione si può invertire senza dover attendere rallentamenti significativi della nave. Vengono a ridursi in questo modo anche i "crash stop" ovvero gli spazi di fermata della nave a partire dalla massima velocità. La capacità del motore elettrico di erogare una coppia elevata anche a basse velocità consente l'utilizzo di eliche a passo fisso con un valore del rendimento più alto e manutenzione molto ridotta rispetto alle eliche a passo variabile. Valori di coppia elevati alle basse velocità sono necessari durante le manovre laddove non sia possibile l'ausilio del rimorchiatore o quando si deve tener ferma la nave in posizione rigorosamente assegnata. I motori elettrici consentono anche una maggiore capacità di accelerazione e decelerazione, il che è a tutto vantaggio per le navi crociera che di notte navigano a velocità elevate (25÷26 nodi) e di giorno a velocità moderate (12÷14 nodi). Per navi di questo tipo è rigoroso il rispetto degli orari, per non compromettere ai crocieristi il programma della giornata. Con la propulsione diesel elettrica è possibile continuare la navigazione senza ridurre la velocità della nave anche in condizioni di mare avverse o di avaria a uno dei motori.

Ulteriore aspetto positivo di quest'impianto consiste in una navigazione confortevole per i passeggeri e per l'equipaggio grazie alla silenziosità dovuta essenzialmente all'eliminazione del rumore proveniente dagli ingranaggi del riduttore e all'assenza delle vibrazioni che dal motore primo non vengono trasmesse all'elica.

I motori elettrici oggi utilizzati nella propulsione elettrica sono quasi tutti trifase a corrente alternata, hanno un peso che è circa la metà di quelli a corrente continua, un rendimento più alto e una contenuta esigenza di manutenzione. Quelli lenti (fino a 200 rpm) possono

essere accoppiati direttamente all'elica, quelli veloci (oltre 1000 rpm) hanno bisogno di un riduttore. I motori elettrici asincroni sono caratterizzati da una velocità di rotazione inferiore a quella di sincronismo $n_s=60f/p$ (con f= frequenza e p= numero delle coppie polari). Questi motori sono detti "ad induzione" perché la corrente che circola nei conduttori rotorici è indotta dal campo magnetico rotante generato dalla corrente che circola nei conduttori statorici. I motori elettrici sincroni sono caratterizzati da una velocità di rotazione pari a quella di sincronismo, sono più costosi ma hanno valori di coppia e rendimenti più alti e ingombrano meno. La regolazione della velocità di rotazione si effettua variando la frequenza f della corrente alternata mediante appositi convertitori di frequenza, utili questi anche a variare il verso di rotazione dei motori elettrici. Sulle navi da crociera si utilizzano, a tal proposito, i "Cycloconverter" i quali consentono variazioni della frequenza piuttosto contenute ($\Delta f= 0 \div 20$ Hz) e sono adatti a motori lenti, fino a 300 rpm. Non danno luogo a brusche variazioni di coppia ed i motori forniscono la coppia piena anche a velocità di rotazione prossime allo zero il che è importante quando si effettuano le manovre.

Nella propulsione diesel elettrica, la trasformazione intermedia dell'energia meccanica in energia elettrica ha conseguenze negative sull'aliquota di energia meccanica disponibile sull'asse del motore di propulsione. Se tale aliquota è del 97% nel caso di motore diesel a quattro tempi accoppiato all'elica mediante giunto e riduttore, nel caso della propulsione elettrica essa scende all' 89,5%. Questo è il risultato del prodotto delle seguenti aliquote:

1) Rendimento legato alle perdite meccaniche nei cuscinetti e lungo la linea d'assi del motore termico: circa il 99%
2) Rendimento del generatore elettrico: 96%
3) Rendimento trasformatori e convertitori: 98%
4) Rendimento del motore elettrico di propulsione: 98%
5) Rendimento riduttore motore elettrico-elica: 98% (se c'è)

Si tratta di un rendimento che in parte viene a essere comunque recuperato grazie alla maggiore capacità della propulsione diesel elettrica di gestire l'esercizio a carico variabile e all'assenza di generatori elettrici il cui rendimento è sempre più basso di quello del motore di propulsione. Un discorso analogo viene fatto in relazione ai pesi dell'impianto.

<u>Propulsione</u> Tra le aliquote di energia richieste a bordo di una nave da crociera se ne aggiunge un'altra. I numerosi ponti e le numerose ed estese sovrastrutture generano ampie superfici che in presenza di vento forte (35÷40 nodi) rendono ardue le operazioni di manovra; pertanto talvolta si richiede la presenza di tre eliche trasversali prodiere e due eliche trasversali poppiere che vengono azionate da motori elettrici assorbenti ognuno una potenza di oltre 1500 KW. Al fine di migliorare ancora di più la manovrabilità di queste navi, si ricorre spesso all'installazione di un impianto di propulsione elettrica mediante AZIPOD (AZImuthing POdded Drive). Si tratta di un involucro a forma di ogiva di buone caratteristiche idrodinamiche che racchiude un motore elettrico a corrente alternata ed un corto albero che aziona un elica, in genere a passo fisso, che può essere applicata sull'una delle due estremità dell'ogiva o su entrambe. Il gruppo è posizionato sotto la carena (gavone di poppa) ed è immerso nell' acqua. Grazie alla presenza di una ralla girevole esso ha la possibilità di ruotare di 360° intorno al proprio asse verticale:

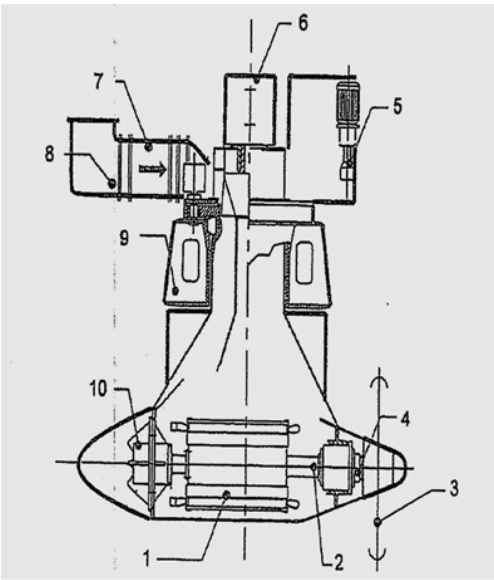


Figura 4: *Principio di funzionamento di un gruppo Azipod:*
1) Motore elettrico
2) Albero
3) Elica a passo fisso
4) Cuscino portante e tenuta
5) Comando oleodinamico per la rotazione
6) Ralla girevole
7) Aria di raffreddamento
8) Unità di ventilazione
9) Lanterna
10) Cuscino reggispinta

Il sistema, che come si vede evita l'uso del timone, permette grande manovrabilità anche a velocità basse (dove l'azione del timone non sarebbe efficace), riduce del 30% il raggio di virata dando ottimi risultati nei cambi bruschi di direzione e riduce del 20% il tempo e lo spazio di arresto rispetto alla manovra che prevede di invertire la rotazione dell'elica. Il vantaggio sta nella sicurezza nei confronti della navigazione in acque strette e trafficate o con mare avverso e un alto livello di manovrabilità nei porti stretti o laddove non è possibile l'ausilio dei rimorchiatori. Inoltre, eliminando il timone, cresce l'efficienza

idrodinamica, si riduce il consumo di combustibile e aumenta la velocità della nave a parità di consumo. Rumori e vibrazioni sono ancora più contenuti rispetto alla propulsione elettrica tradizionale perché il motore elettrico è interamente immerso nell'acqua. Le eliche trasversali poppiere non sono più necessarie ma rimangono quelle prodiere:

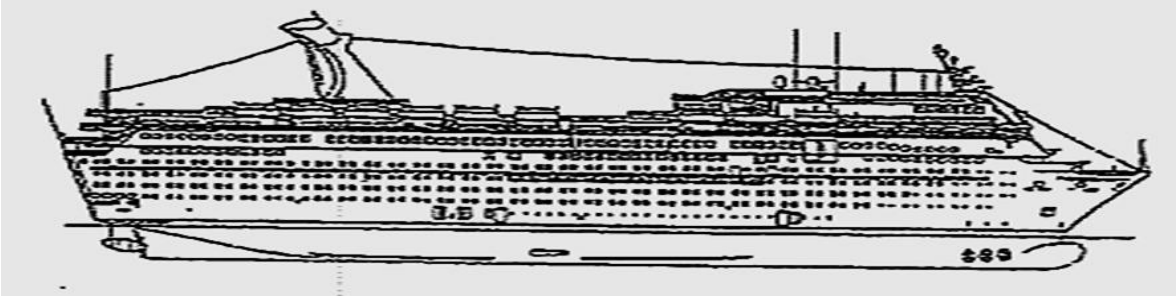


Figura 5: *Assenza delle eliche trasversali poppiere e del timone sulla Carnival Elation, prima nave da crociera ad essere munita del sistema Azipod (1998).*

Oggi un impianto di potenza tipico delle navi da crociera si presenta come quello riportato in figura 6.

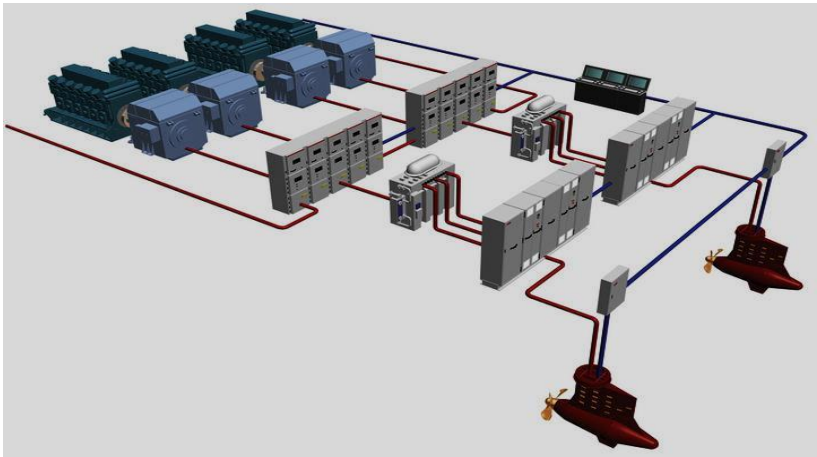


Figura 6: *Impianto di potenza di tipo diesel-elettrico per una nave da crociera dotata di propulsione Azipod.*

II.II CARNIVAL "ELATION" & ROYAL CARIBBEAN INTERNATIONAL "VOYAGER OF THE SEAS" CASE STUDY: POTENZA PROPULSIVA E PER I SERVIZI DI BORDO

Occorre ora stimare quale sia il valore della potenza generata a bordo di una nave da crociera e quanta di questa venga destinata ai servizi di bordo. Il problema circa la valutazione di queste potenze, insieme con quelle delle emissioni, è legato alla conoscenza dei dati di base le cui fonti spesso non sono attendibili. Si prendono, a tal proposito, due navi da crociera di cui si conoscono alcuni dati certi. La prima è la *cruise ship Elation* della *Carnival Cruise Lines* mentre la seconda è la *cruise ship Voyager of the Seas* della *Royal Caribbean International.*

Cruise Ship Elation: ha una lunghezza fuori tutto di 260 m, larghezza 31 m e pescaggio 7,8 m. Ospita circa 2600 persone con un equipaggio di 900 membri. La propulsione è destinata a due unità Azipod (ABB) da 14 MW ciascuna. A prua della nave 3 bow thrusters di manovra da 1,5 MW ognuno. La nave è dotata di un impianto diesel elettrico costituito da 6 motori diesel 4 tempi "Medium Speed" modello 12V38 della Wärtsilä. Ad ogni motore diesel è accoppiato un alternatore da 11000 KVA che genera corrente elettrica, alla tensione di 6,6 KV e alla frequenza di 60 Hz, trifase, di cui una parte va ai motori di propulsione sopra citati che vengono controllati da Cycloconverter sempre forniti dalla ABB, mentre un'altra parte va ai servizi alberghieri e di scafo. La potenza totale in uscita dall'impianto diesel elettrico è di 47520 KW.

Ogni gruppo diesel elettrico, costituito ciascuno da un motore 12V38, eroga una potenza di 7920 KW (le perdite alle macchine elettriche sono trascurabili dati gli elevati rendimenti). Dei 47520 KW prodotti a bordo 32500 KW sono destinati alla propulsione:

$$\underset{\substack{\uparrow \\ \text{(3 bow thrusters)}}}{(3 \times 1500)} + \underset{\substack{\uparrow \\ \text{(2 unità Azipod)}}}{(2 \times 14000)} = \underset{\substack{\uparrow \\ \text{(potenza propulsiva)}}}{32500 \text{ KW}} \rightarrow P_p = 32{,}5 \text{ MW}$$

La differenza tra la potenza in uscita dall'impianto diesel elettrico (P_{de}) e la potenza propulsiva (P_p) rende la potenza insallata per i servizi di bordo (P_s) :

$$P_{de} - P_p = P_s \sim 15 \text{ MW}$$

È vero che la nave quando è ferma in porto non produce mai tutti i 15 MW e che il carico a bordo non è mai costante, ma è anche vero che questi valori di potenza sono comunque elevatissimi per qualsiasi percentuale di carico.

Da notare in figura 7 che la nave considerata è di dimensioni relativamente moderate e ha un numero di ponti limitato:

Figura 7: *Cruise Ship Elation*

Fatto diverso accade per l'altra nave considerata che all'atto del varo (nel 2000) era la nave da crociera più grande del mondo:

<u>Cruise Ship Voyager of the Seas:</u> ha una lunghezza fuori tutto di 311 m, larghezza di 47,4 m e immersione 8 m. Può ospitare circa 3200 persone e 1200 membri dell'equipaggio. La propulsione è destinata a 3 unità Azipod da 14 MW ciascuna di cui una fissa; 4 bow thrusters (eliche trasversali di prora) e 2 stern thrusters (eliche trasversali di poppa), per le operazioni di manovra, da 1500 KW (circa) ciascuno. La nave è dotata di un impianto diesel elettrico costituito da 6 motori Wartsila 12V46 diesel quatto tempi semi-veloci con i relativi alternatori ABB, per una potenza in uscita dall'impianto di 75600 KW.

La potenza propulsiva (P_p) si articola di:

$$\underset{\uparrow}{(3 \times 14000)} + \underset{\uparrow}{(2 \times 1500)} + \underset{\uparrow}{(4 \times 1500)} = \underset{\uparrow}{51000\ KW} \rightarrow P_p = 51\ MW$$

(3 unità Azipod) (2 stern thrusters) (4 bow thrusters) (Potenza propulsiva)

La potenza installata per i servizi di bordo sarà la differenza tra la potenza in uscita dall'impianto diesel elettrico (P_{de}) e la potenza propulsiva (P_p) :

$$P_s = P_{de} - P_p \sim 24{,}6 \text{ MW}.$$

Quindi anche quando la nave è ferma in porto, i valori di potenza prodotti a bordo sono elevatissimi e lo sono sempre di più quanto più grandi sono le navi (in termini non solo di lunghezza ma anche in numero di ponti).

Figura 8: *Cruise Ship Voyager of the Seas*

II.III VALUTAZIONE DELLE EMISSIONI DAI GENERATORI DI BORDO

È possibile fare una prima valutazione delle emissioni di NO_x e SO_x sui dati forniti per singolo motore: un WARTSILA 12V38 e un WARTSILA 12V46. Le specifiche di entrambi i motori assicurano il loro attenersi alle emissioni di NO_x secondo la normativa del regolamento 13 dell' ANNESSO VI della MARPOL riferita al Tier 2. Il numero di giri è fissato per entrambi nell'intervallo: 130 < rpm < 2000. Pertanto le emissioni specifiche di NO_x si ricavano mediante la formula: $44/rpm^{0,23}$. Per quanto riguarda l'SO_x si prospettano due possibili casi: il primo caso è quello in cui i motori delle navi, all'interno delle zone ECA, vengono alimentati da combustibili puliti contenenti lo 0,1% di zolfo, il secondo caso è

quello in cui la nave, non essendo fornita a bordo di combustibile pulito, utilizza quello ad alto contenuto di zolfo facendo però uso degli scrubbers e portando a 6 g/KWh l'emissione specifica degli ossidi di zolfo. Il primo è quello che avviene nella maggior parte dei casi, poche navi da crociera infatti sono dotate di scrubbers ed inoltre, poiché queste effettuano tratte molte vicine alle coste, dispongono quasi sempre del combustibile richiesto in queste aree. Nel secondo caso si valuta l'emissione degli ossidi di zolfo semplicemente moltiplicando l'emissione specifica suddetta per il carico e per le ore di funzionamento del motore (a tal proposito si fa riferimento alle ore di ormeggio della nave in porto, in genere sono 8 o 10). Nel primo caso invece, bisogna prima valutare il consumo di combustibile assoluto, tenendo conto del carico e delle ore di funzionamento, a partire dal consumo specifico di combustibile, dato fornito dalle specifiche dei motori; poi si valuta la concentrazione di zolfo nel combustibile consumato e poiché il rapporto ponderale tra zolfo contenuto nel combustibile ed SO_x è 1:1 (trascurando la piccola percentuale di H_2SO_3 e H_2SO_4 che si forma nell'ambiente umido dei condotti di scarico) allora resta determinata la massa di SO_x emessa allo scarico. Le tabelle 1 e 2 riportano quanto appena descritto.

Tabella 1

CONSUMI ED EMISSIONI AL VARIARE DEL CARICO PER UN SINGOLO MOTORE WARTSILA 12V38						
POTENZA(KW)	7920		ORE ORMEGGIO (h)		8	10
N(rpm)	600		[S](%)	0,1		
CARICO(%)	CARICO(KW)	NO_x(g/KWh)	NO_x(Kg/h)	NO_x in 8 ore (Kg)	NO_x in 10 ore (Kg)	
100	7920	10,1	79,99	639,9	799,9	
85	6732	10,1	67,99	543,9	679,9	
75	5940	10,1	59,99	480,0	599,9	
50	3960	10,1	40,00	320,0	400,0	
Cs(g/KWh)	Cp(t/h)	Cp in 10 ore (t)	Cp in 8 ore (t)	SO_x (Kg/h)	SO_x in 8 ore (Kg)	SO_x in 10 ore (Kg)
182 (100%)	1,44	14,4	11,5	1,44	11,5	14,4
178 (85%)	1,20	12,0	9,6	1,20	9,6	12,0
179 (75%)	1,06	10,6	8,5	1,06	8,5	10,6
185 (50%)	0,73	7,3	5,9	0,73	5,9	7,3

[S](%)	3,5					
CARICO(%)	CARICO(KW)	Cp(t/h)	S(Kg/h)	SO_x (Kg/h) ridotto	SO_x in 10 ore (Kg)	SO_x in 8 ore (Kg)
100	7920	1,44	50,4	47,5	475,2	380,2
85	6732	1,2	42	40,4	403,9	323,1
75	5940	1,06	37,1	35,6	356,4	285,1
50	3960	0,73	25,7	23,8	237,6	190,1

Figura 9

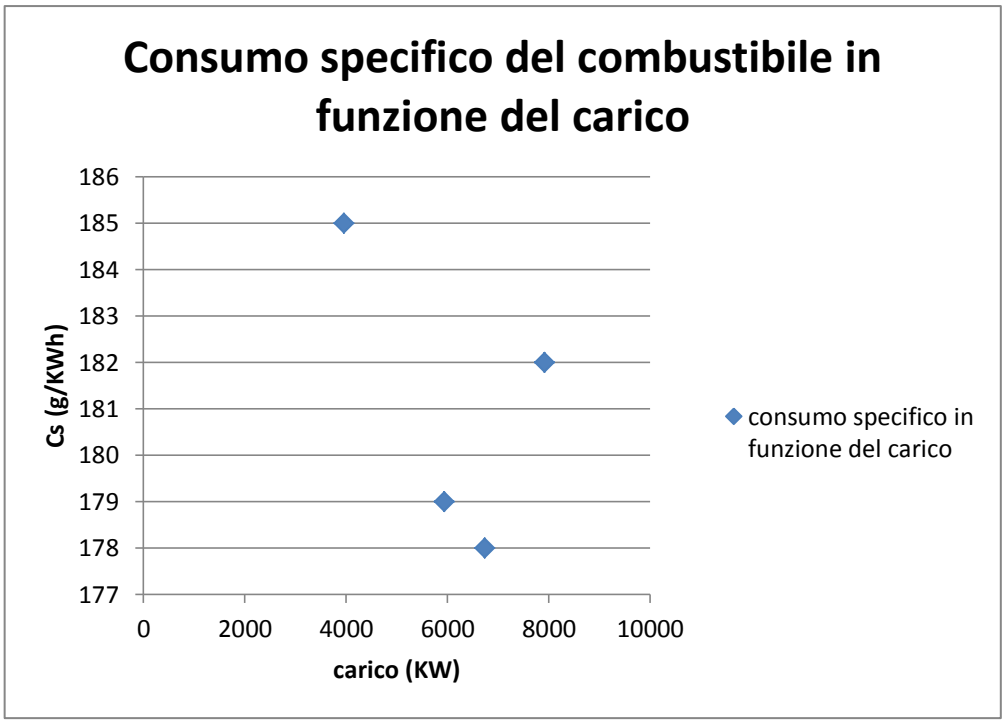


Figura 10

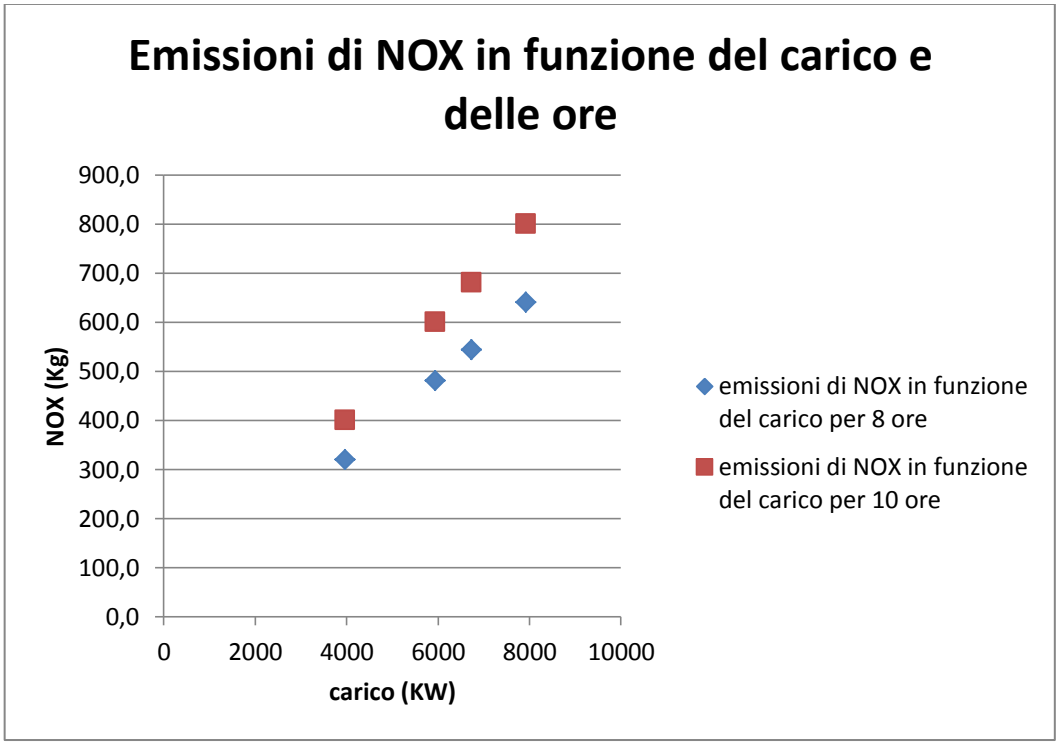


Figura 11

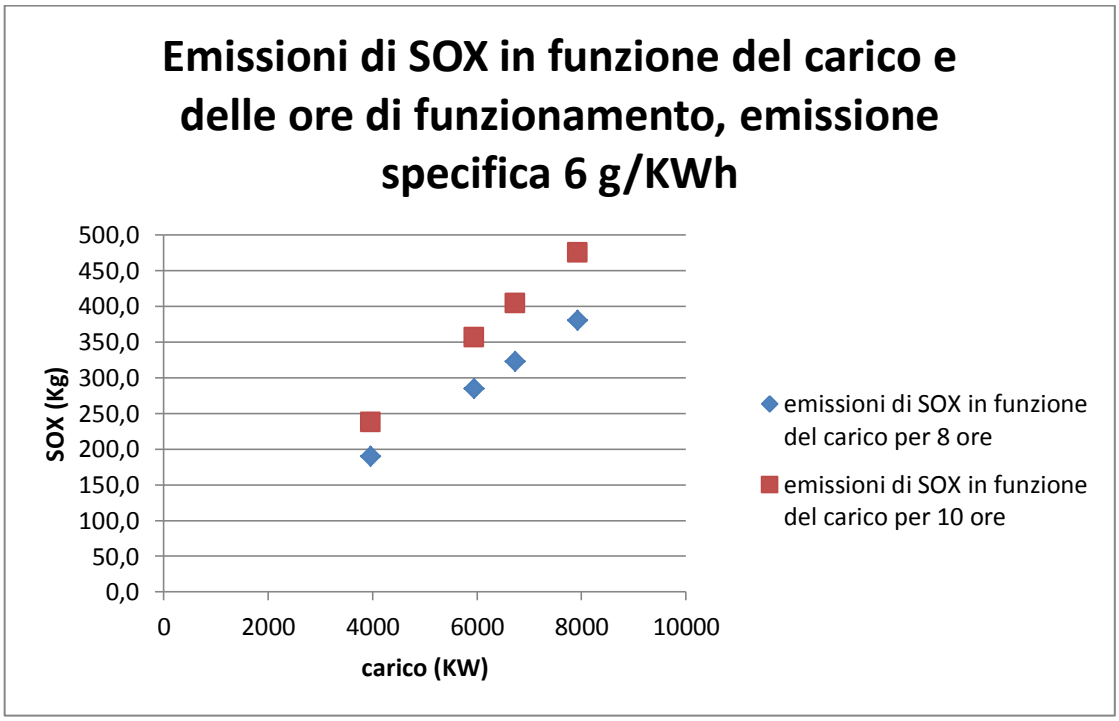


Figura 12

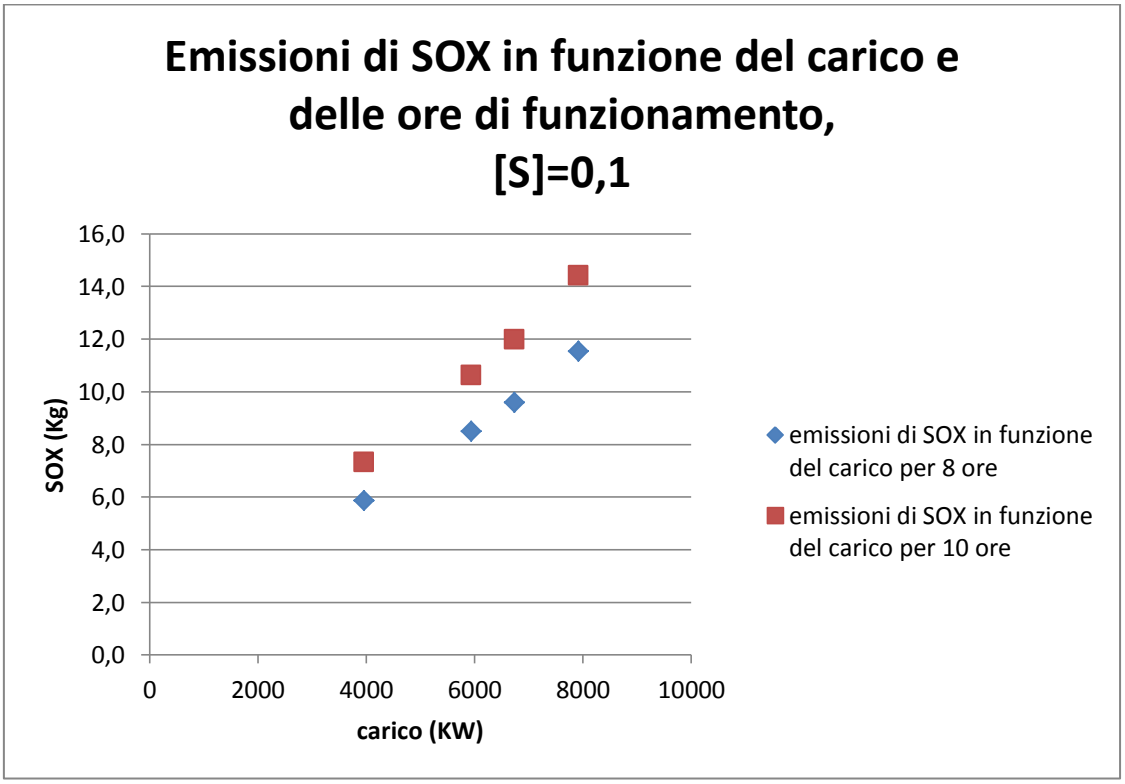


Tabella 2:

CONSUMI ED EMISSIONI AL VARIARE DEL CARICO PER UN MOTORE WARTSILA 12V46						
POTENZA(KW)		12600	ORE DI ORMEGGIO (h)		8	10
n(rpm)	514		[S](%)	0,1		
CARICO(%)	CARICO(KW)	NO_x(g/KWh)	NO_x(Kg/h)	NO_x in 8 ore (Kg)	NO_x in 10 ore (Kg)	
100	12600	10,5	132,3	1058	1323	
85	10710	10,5	112,5	900	1125	
75	9450	10,5	99,2	794	992	
50	6300	10,5	66,2	529	662	
Cs(g/KWh)	Cp(t/h)	Cp in 8 ore (t)	Cp in 10 ore (t)	SO_x (Kg/h)	SO_x in 8 ore (Kg)	SO_x in 10 ore (Kg)
176 (100%)	2,2	17,7	22,2	2,2	17,7	22,2
172 (85%)	1,8	14,7	18,4	1,8	14,7	18,4
172 (75%)	1,6	13,0	16,3	1,6	13,0	16,3
176 (50%)	1,1	8,9	11,1	1,1	8,9	11,1

[S](%)	3,5					
CARICO(%)	CARICO(KW)	Cp (t/h)	S (Kg/h)	SO_x (Kg/h)	SO_x in 8 ore (Kg)	SO_x in 10 ore (Kg)
100	12600	2,2	77	75,6	604,8	756
85	10710	1,8	63	64,26	514,08	642,6
75	9450	1,6	56	56,7	453,6	567
50	6300	1,1	38,5	37,8	302,4	378

Figura 13

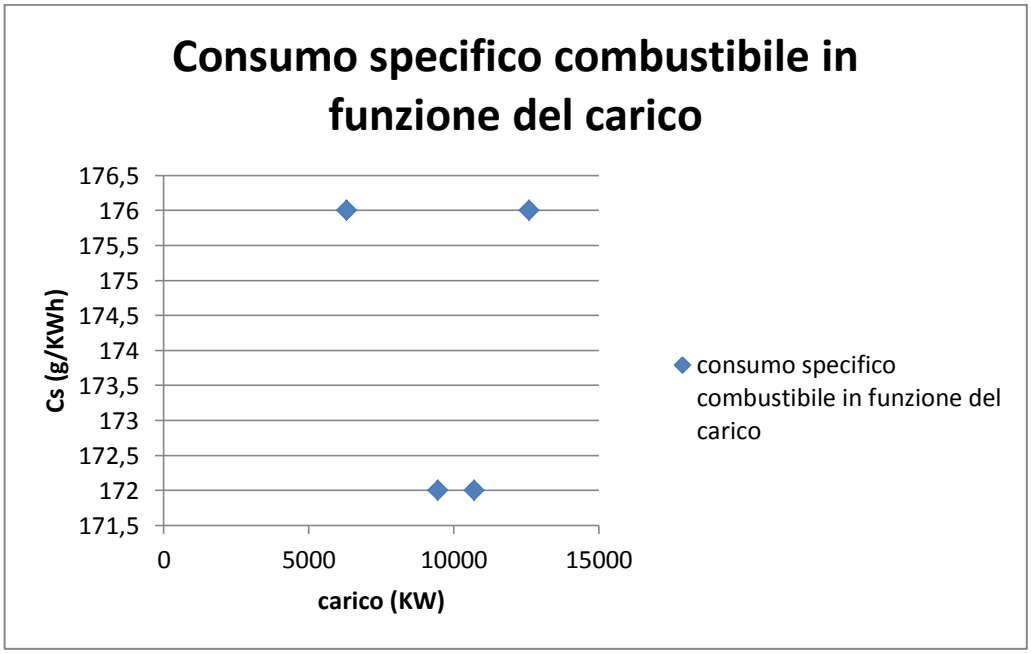


Figura 14

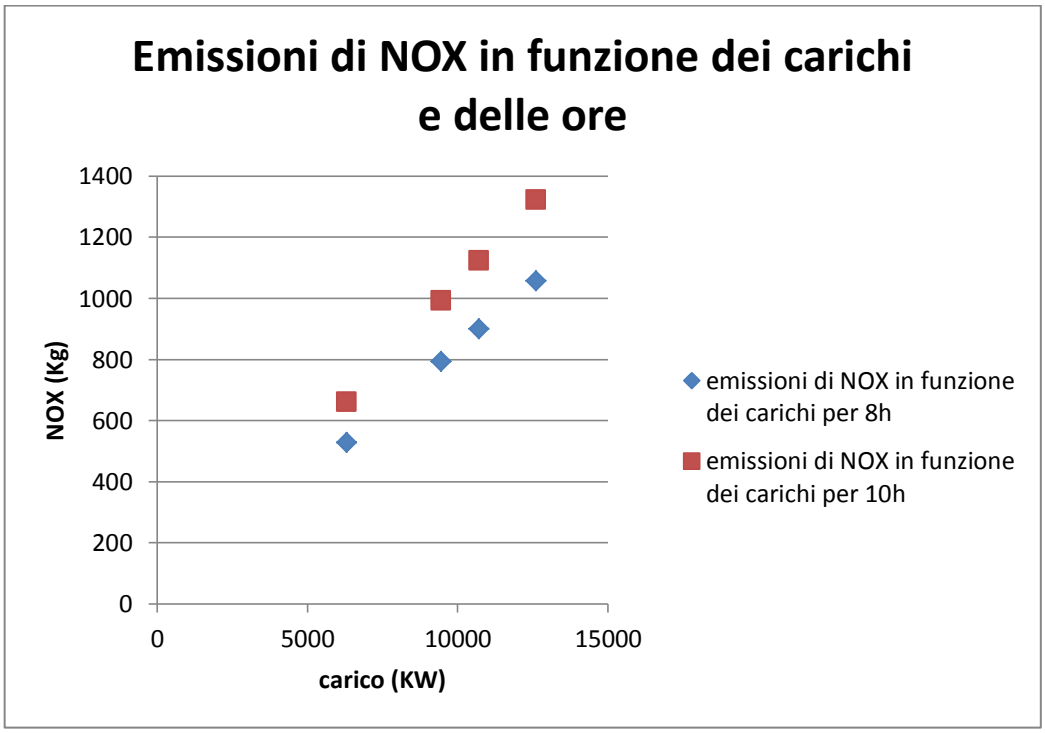


Figura 15

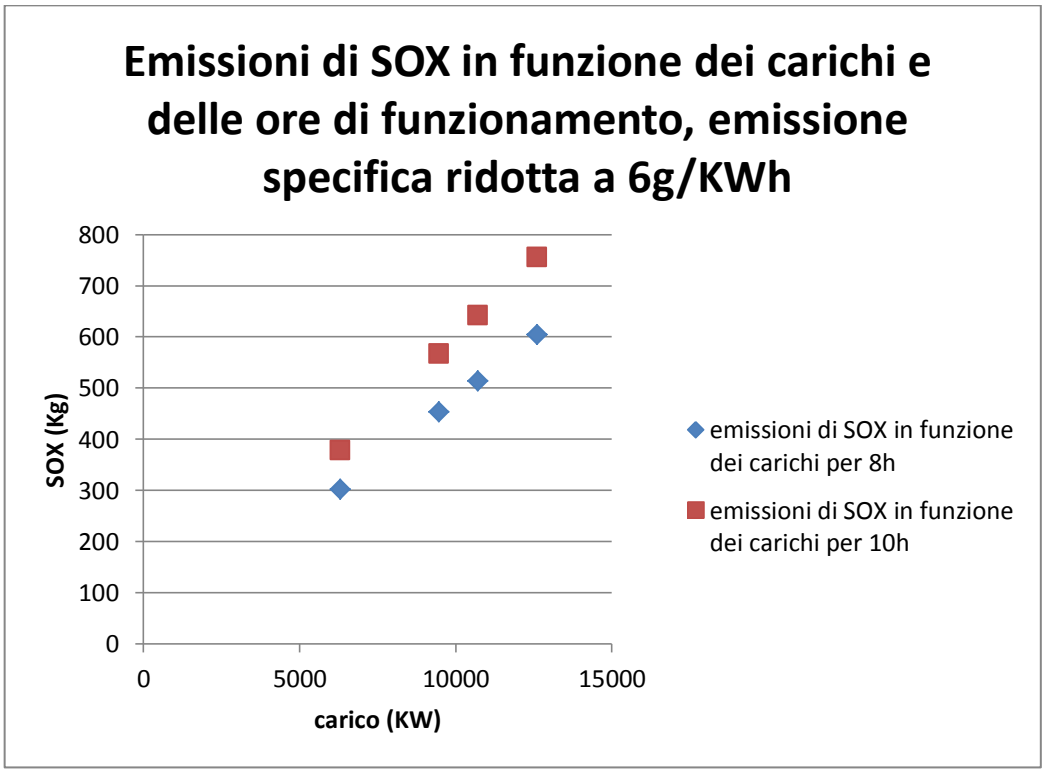
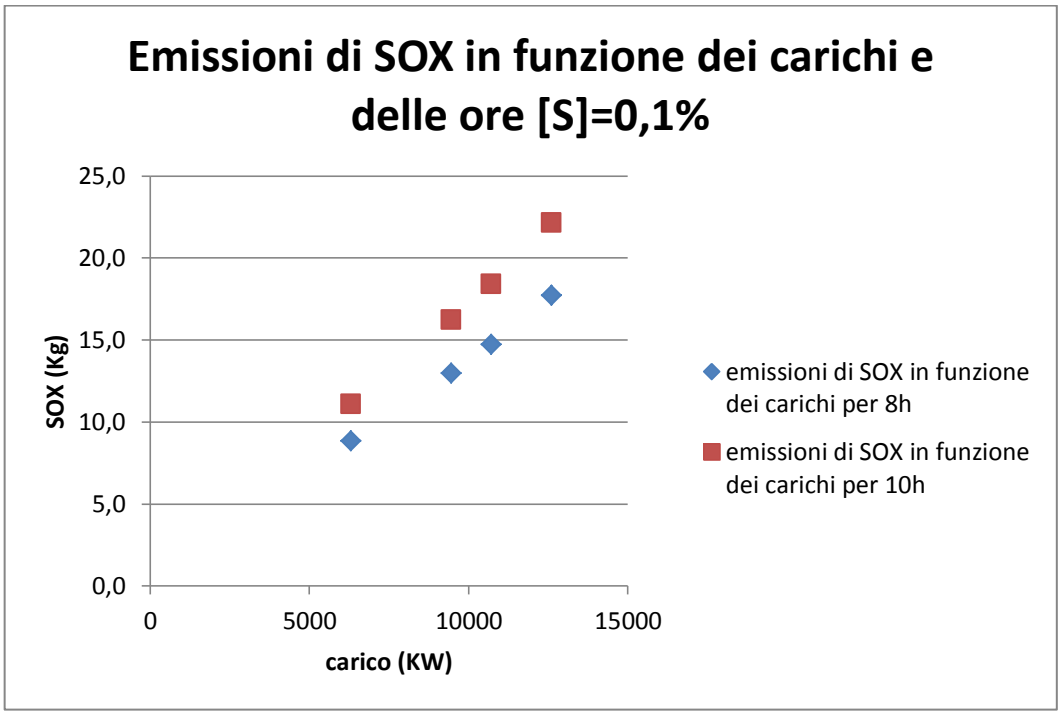


Figura 16



I grafici relativi alle tabelle riportano l'andamento delle emissioni di NO_x e SO_x in funzione del carico e delle ore di sosta delle navi da crociera nel porto. Si nota che, sebbene il consumo specifico di combustibile diminuisca all'aumentare del carico, il consumo assoluto e con esso le emissioni tendono comunque ad aumentare data l'entità del carico.

A questo punto occorre stimare i valori di emissioni di NO_x e SO_x allo scarico di una nave da crociera quando è ferma in porto. Il carico, destinato essenzialmente ai servizi alberghieri e di scafo, durante le ore di ormeggio, non è costante ma è soggetto a variazioni continue non certo prevedibili in via diretta. Per questo motivo, per fare una corretta valutazione dei consumi di combustibile e delle relative emissioni, è necessario fare riferimento ad un carico medio. Per valutare il carico medio si usa un fattore di carico (load factor) che consiste, nel caso considerato, nel rapporto tra il carico medio e la potenza installata per i servizi a bordo. Il fattore di carico varia a seconda del tipo di nave che si considera e lo si è ricavato attraverso un indagine che ha visto partecipi comandanti, comandanti di macchina e piloti. Si è stimato che questo coefficiente per le navi da crociera vale 0,64 ed è uno dei più elevati tra quelli stimati per le altre tipologie di navi (insieme a quello delle navi

petroliere il cui valore è di 0,67, con la differenza che però su una petroliera la potenza per i servizi è di circa 2 MW).

Risulta quindi che per la Cruise Ship Elation il carico medio vale circa 9,6 MW e per la Voyager of the Seas vale 15,7 MW. È su questi carichi che si fanno i calcoli per valutare le emissioni allo scarico. Per le emissioni di NO_x si fa riferimento alla normativa appartenente al regolamento 13 dell' ANNESSO VI della MARPOL (il certificato IAPP assicura che la nave si attiene alle disposizioni di legge circa le emissioni degli ossidi di azoto) con riferimento al Tier 2. I giri del motore sono sincronizzati: il 12V38 a n=600 rpm e il 12V46 a n=514 rpm, quindi la formula per valutare le emissioni specifiche di NO_x sarà $44/rpm^{0,23}$ g/KWh:

MOTORE	GIRI	CARICO MEDIO	EMISSIONI NO_X
12V38	600 rpm	9,6 MW	97 Kg/h
12V46	514 rpm	15,7 MW	165 Kg/h

ORE FUNZIONAMENTO	12V38 E.ASSOLUTE DI NO_x	12V46 E.ASSOLUTE DI NO_x
8	776 Kg	1320 Kg
10	970 Kg	1650 Kg

Nota: *le ore di funzionamento considerate coincidono con le ore di sosta delle navi da crociera in porto.*

Un discorso analogo viene fatto per valutare le emissioni allo scarico degli SO_x. Si prospettano innanzi due casi. Un primo caso quando la nave, non essendo dotata del combustibile contenente lo 0,1% di zolfo, fa ugualmente servizio in porto essendo dotata dei retrofit in grado di portare a 6 g/KWh le emissioni allo scarico di SO_x. Allora in questo caso:

MOTORE	CARICO MEDIO	EMISSIONI SO_X
12V38	9,6 MW	57,6 Kg/h
12V46	15,7 MW	94,2 Kg/h

ORE FUNZIONAMENTO	12V38 E.ASSOLUTE	12V46 E.ASSOLUTE
8	460 Kg	754 Kg
10	576 Kg	942 Kg

È un po' improbabile, questo, come caso. Quasi nessuna nave da crociera è dotata di scrubbers e la tendenza è quella di utilizzare combustibili più puliti (non mancano tuttavia

casi in cui vengono utilizzati illecitamente combustibili sporchi anche senza essere equipaggiati di scrubbers). A 12 miglia dalla nostra costa l'obbligo è di utilizzare combustibile allo 0,1% di zolfo. Nelle tabelle 1 e 2 si vede come, per valutare le emissioni allo scarico degli ossidi di zolfo ad un carico prestabilito, è necessario conoscere il consumo specifico di combustibile. Facendo lo 0,1% sulla massa assoluta del combustibile consumato, si ottiene la massa di zolfo contenuta in essa. Dato che il rapporto tra massa di zolfo e ossido di zolfo è 1:1 allora rimane determinata la massa di SO_x erogata. Si può dire, con una certa approssimazione, che la nave, visti i carichi, quando è in porto, mantiene in funzione due motori al 65% del carico (oppure uno al 75% e uno al 50%). L'approssimazione consiste nel fatto che da terra non si può prevedere cosa succede realmente a bordo durante la giornata e quindi bisogna accontentarsi di questa ipotesi. Si può stimare allora un'emissione allo scarico di SO_x di:

MOTORE	8 ORE	10 ORE
12V38	14,4 Kg	17,9 Kg
12V46	21,9 Kg	27,4 Kg

Stabilendo le ore di ormeggio quotidiane di tali navi e moltiplicando questi dati per i giorni dell'anno, si ottengono le emissioni annuali di NO_x e SO_x.

II.IV QUADRO FINALE DELLE EMISSIONI

Nelle condizioni meno critiche in termini di emissioni, il quadro finale delle due navi è il seguente:

NAVE	NO_x in 8 ore	SO_x in 8 ore
Elation	776 Kg	14,4 Kg
Voyager of the Seas	1320 Kg	21,9 Kg

La presenza contemporanea in porto di due navi da crociera medie come l'Elation insieme con due navi grandi come la Voyager of the Seas per una durata media di 8 ore significa scaricare nell'aria in una giornata circa 4200 Kg di NO_x e circa 73 Kg (nelle condizioni ottime) di SO_x. È da sottolineare che nella stagione estiva il numero di navi può superare

quello ipotizzato. Il porto di Napoli, per esempio, può ospitare anche 5 navi da crociera di queste dimensioni e queste possono stare ormeggiate anche per un tempo di 10 ore. In queste ipotesi:

NAVE	NO_x in 10 ore	SO_x in 10 ore
Elation	970 Kg	17,9 Kg
Voyager of the Seas	1650 Kg	27,4 Kg

Avere tre navi da crociera della stazza simile a quella dell' "Elation" e due della stazza simile a quella della "Voyager of the Seas", significa scaricare nell'aria circa 110 Kg di ossido di zolfo e circa 6200 Kg di ossido di azoto.

CAPITOLO III – QUALITÁ DELL'ARIA: IL CASO DEL PORTO DI NAPOLI

III.I ANALISI DELLE RILEVAZIONI

In un porto grande come quello di Napoli viene a stabilirsi una situazione ambientale alquanto difficile che dipende da vari fattori.

Primi fra questi le condizioni climatiche che variano nel tempo. I gas e le polveri nocive hanno dimensioni tali da poter essere trasportate dal vento e, se la direzione di questo tende al suolo, l'impatto viene a essere diretto sulle persone. Inoltre, come più volte detto, le fonti inquinanti in queste aree non sono soltanto le navi da crociera ma anche le altre navi, i veicoli terrestri a sostegno delle operazioni di imbarco e sbarco, i veicoli urbani e le altre fonti quali quelle industriali limitrofe.

Per tenere conto di tutti questi fattori, durante accurati studi del problema tenuti dai membri ricercatori del Dipartimento di Ingegneria Navale dell' Università degli Studi di Napoli "Federico II", sono state fatte delle rilevazioni nei mesi di Marzo e Aprile 2012 sulla qualità dell'aria proprio nei pressi delle bitte d'ormeggio del Molo Beverello, molo del porto di Napoli destinato ad ospitare le navi da crociera e le navi passeggeri. Questa campagna di rilevazioni ha fornito i valori medi delle concentrazioni nell'aria di NO_x e SO_x (in $\mu g/m^3$) per ogni ora trascorsa dalle ore 00:00 del 28 Marzo 2012 alle ore 00:00 del 10 Aprile 2012. Dalle medie orarie si è passati poi a semplificare calcolando la media quadri-oraria delle concentrazioni nell'aria degli ossidi di azoto e di zolfo.

Relazionando graficamente questi valori sia con gli intervalli di tempo (ognuno di 4 ore consecutive), numerati da 4 (primo intervallo quadri-orario) a 312 (ultimo intervallo), e sia con il numero di navi da crociera presenti in porto durante il periodo di ricerca, si è ottenuto quanto rappresentato nelle figure 17 e 18.

Nei grafici si vede che, in alcuni intervalli di ore, la media delle concentrazioni nell'aria degli ossidi di zolfo e degli ossidi di azoto assumono valori relativamente elevati. Ma si nota anche che la causa di questa elevazione non è da imputare unicamente all'arrivo di un'altra nave da crociera. Questa è prova del fatto che anche le altre navi presenti nel porto,

sebbene in misura minore, insieme con le fonti terrestri, anche se lontane dal punto di rilevazione, inquinano. Non a caso infatti, nei grafici, viene evidenziato che, sebbene, nelle prime 50 ore di ricerca, sia nullo il numero di navi da crociera presenti in porto, la concentrazione dei gas tossici nell'aria è comunque elevata. Si intuisce quindi che, se durante quelle ore ci fossero state altre navi da crociera ferme nel porto, la situazione sarebbe stata alquanto dannosa nei termini dell'impatto ambientale.

Figura 17

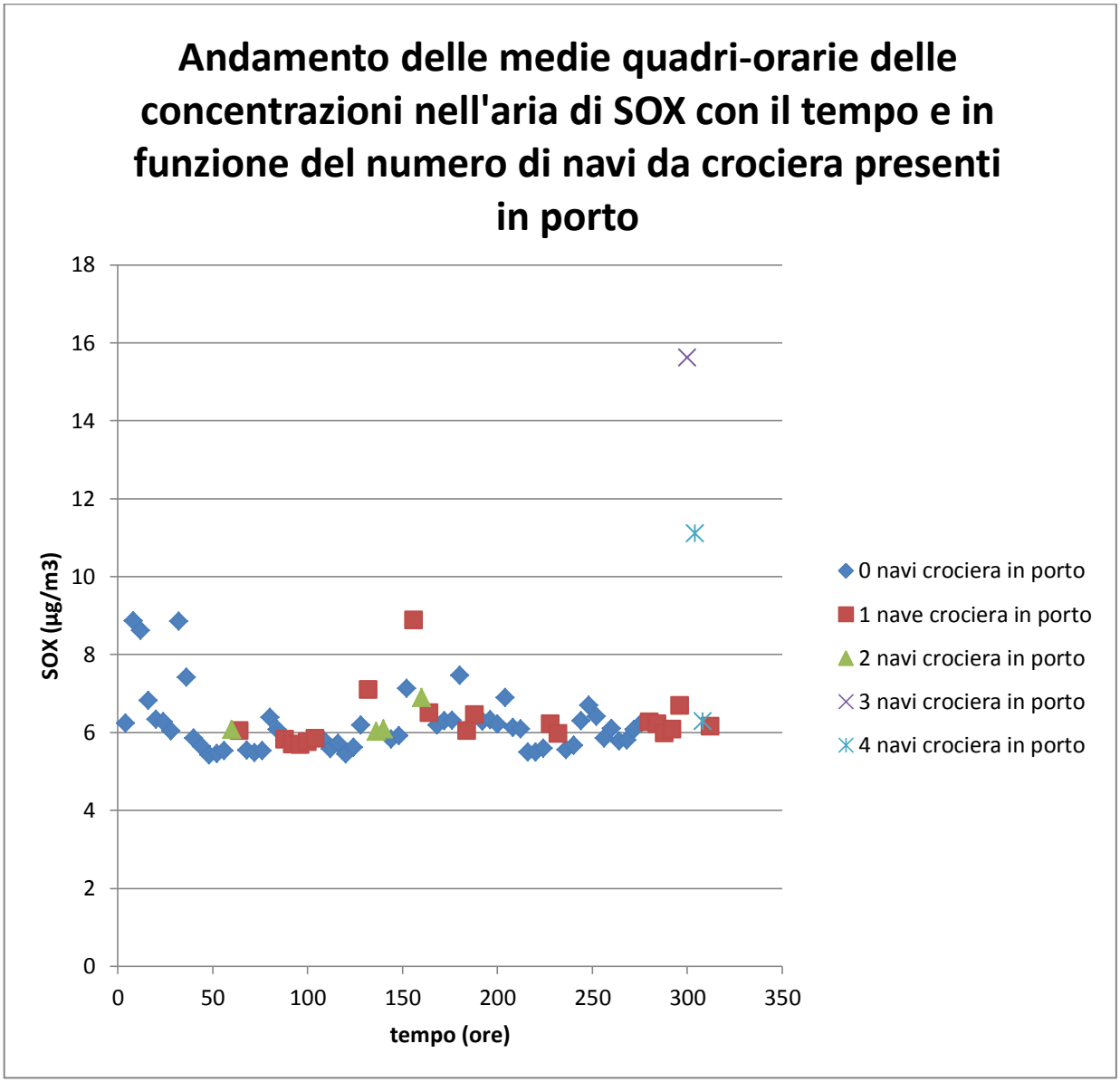
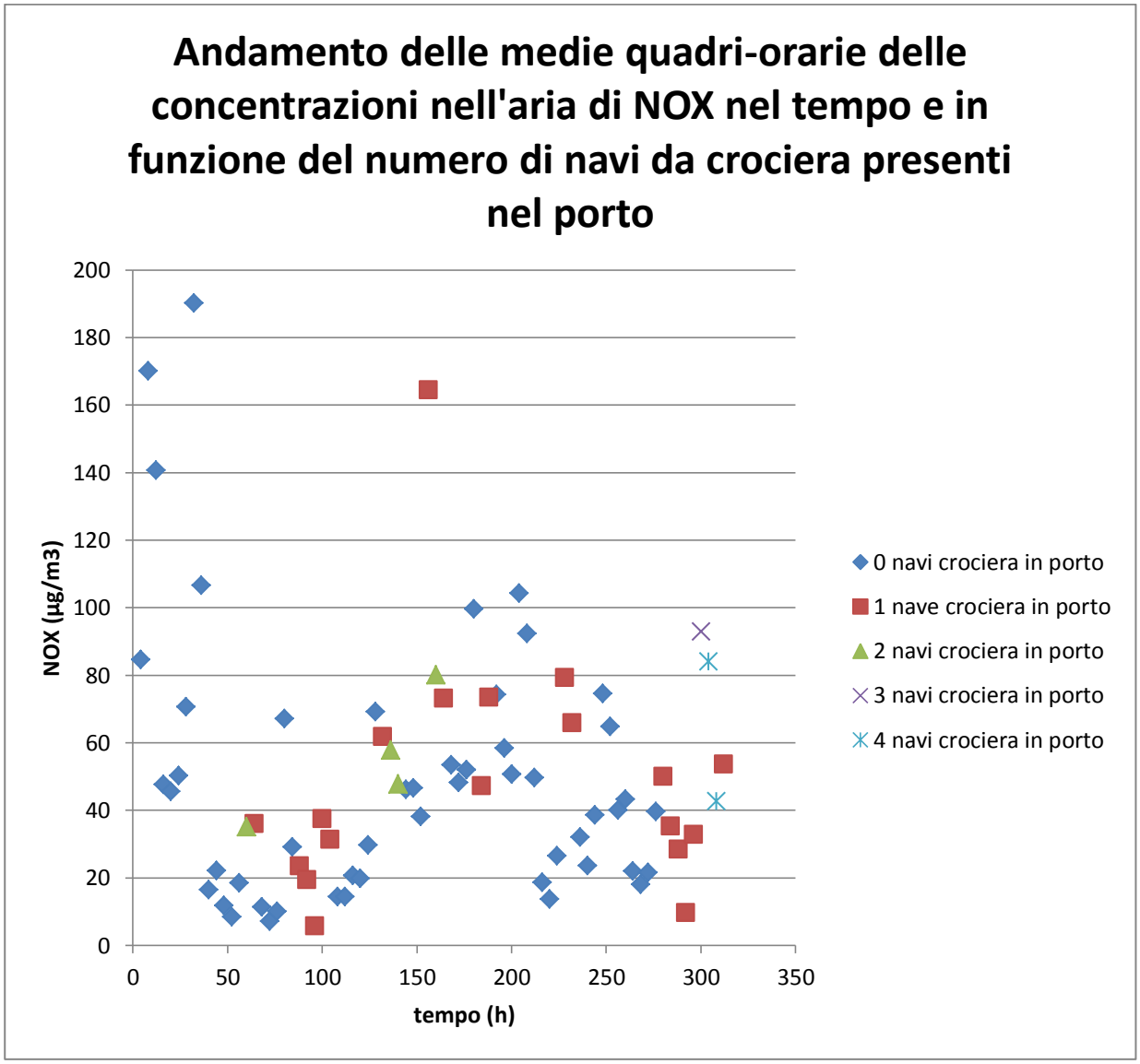


Figura 18



III.II CONCLUSIONI IN MERITO ALLE ANALISI DELLE RILEVAZIONI

I grafici riportati nelle figure 17 e 18 rivelano che, in un periodo di scarsa attività crocieristica come quello compreso tra marzo e aprile, la media quadri-oraria delle concentrazioni nell'aria di SO_x oscillano tra i 5 µg/m^3 e i 10 µg/m^3 con valori più elevati

registrati solo durante determinati intervalli d'ore e probabilmente per condizioni di vento particolari; la media quadri-oraria delle concentrazioni nell'aria di NO_x oscillano tra i 5 $\mu g/m^3$ e i 110 $\mu g/m^3$ e, a differenza degli SO_x, acquisiscono un po' più spesso valori più elevati rispetto alla media designata. Si ricorda, a tal proposito, che l'Organizzazione Mondiale della Sanità (WHO) ha indicato:

GAS NOCIVI	Massima esposizione su base oraria ($\mu g/m^3$)	Massima esposizione su base annuale ($\mu g/m^3$)
NO_x	200	40
SO_x	60 $\mu g/m^3$ cominciano a dare problemi di salute	

È da sottolineare che ogni singolo valore tra le rilevazioni riportate nelle figure 17 e 18, è frutto di una media fatta nell'arco di 4 ore. Pertanto il valore associato ad ogni intervallo di tempo considerato non è costante in questo intervallo ma è variabile. Viceversa, i suggerimenti della WHO non prevedono questa variabilità.

Stando a quanto indicato dalla WHO e stando a quanto si è dedotto da questo studio, si traggono le seguenti conclusioni:

Le concentrazioni degli ossidi di zolfo e degli ossidi di azoto nell'aria sono destinate a crescere in periodi diversi da quello esaminato, quando l'attività crocieristica è più intensa, portandosi al limite o addirittura oltre i limiti indicati dalla WHO.

CAPITOLO IV – POSSIBILI RIMEDI

Il problema dell'inquinamento nei porti dovuto alla presenza contemporanea di navi da crociera può essere risolto principalmente in due modi. Il primo è quello più semplice e soprattutto meno costoso ma allo stesso tempo poco efficace e consiste nel cambiamento di disposizione dei punti di ormeggio delle navi da crociera; il secondo è quello più efficace in assoluto e consiste nell'installazione di un sistema chiamato "cold ironing".

IV.I DISPOSIZIONE ORMEGGI

Consiste nell' evitare la concentrazione delle navi da crociera ferme in porto in un area ristretta, come quella del Molo Beverello. In questo modo è possibile diluire la distribuzione delle fonti inquinanti e allo stesso tempo diminuire la concentrazione dei gas tossici nelle aree vicine ai centri abitati. Questa soluzione non è sempre possibile perché, per quanto un porto come quello di Napoli possa essere grande, comunque le banchine sono disposte ad ottemperare alle svariate necessità delle altre attività marittime e questa soluzione stravolgerebbe quella che per anni è stata la disposizione portuale. Se ciò fosse ad ogni modo possibile, allora è necessario un servizio che garantisca ai turisti di spostarsi al centro della città.

IV.II IL SISTEMA "COLD IRONING"

È quello più efficace tra le tante possibili soluzioni proposte. Ma è anche quello più costoso, richiede disposizioni di tempi e spazi terrestri più grandi, insieme con adeguate installazioni di bordo.

In generale i rimedi all'inquinamento portuale si trovano mediante la forte collaborazione tra politici, tecnici e operatori nel settore marittimo e l'attuazione di certe decisioni

impiega tempi medio-lunghi. Talvolta invece, viste le condizioni dei porti, occorrono soluzioni che, sebbene parziali, vanno attuate in tempi brevi. Già l'applicazione dei regolamenti della MARPOL è un notevole passo avanti ma, come già visto, ci sono voluti circa 8 anni per far diventare legge ciò che era stato designato qualche tempo prima. I costi dell'impianto sono notevoli e, per come è fatto, occupa spazi terrestri non certo ridotti.

Il sistema "cold ironing" consiste nel fornire energia elettrica alle navi in sosta mediante punti di alimentazione vicini alle bitte d'ormeggio. È un impianto che prevede quindi dei generatori di energia a terra che permettono alle navi di spegnere i motori quando sono ferme in porto. Dato che a terra si dispone di spazi molto più grandi di quelli di bordo, tale sistema può sfruttare fonti di energia "pulite" come il sole, il vento e le biomasse o produrre energia elettrica attraverso accumulatori a idrogeno di ultima generazione che prendono il nome di "fuel cells". Il sistema Cold Ironing prevede impianti che inquinano poco ed è già in uso dagli anni '80 nel Nord America e nel Nord Europa a sostegno delle navi traghetto. Oggi, nel Nord Europa, nel Nord America, in Cina e in Giappone, gli studi mirano a progetti più aggiornati e aperti anche alle altre tipologie di navi come quelle da crociera. In Italia mostrano interesse a questo sistema i porti di Civitavecchia, La Spezia e Venezia.

Il progetto di un impianto simile offre non poche difficoltà legate sia al traffico portuale e sia al tipo di nave che necessita di energia. Il numero di navi che si collegano a tale impianto possono variare e soprattutto non tutte le navi hanno le stesse caratteristiche in termini di tensione. In genere a bordo è installata la bassa tensione o al più la media: sono comunque valori che vanno tra gli 0,4 KV e gli 11 KV per frequenze di 50 Hz o 60 Hz. In via del tutto generale, un impianto "Cold Ironing" è concepito secondo lo schema riportato nella figura 19.

L'energia viene prodotta da un generatore centrale che per problemi di dimensioni viene installato ad una certa distanza dalla banchina; cavi sotterranei di alta tensione (20 KV ÷ 100 KV) portano la corrente ad una prima stazione (sub station) dove è presente un primo trasformatore che riduce la tensione a valori di media tensione (6 KV ÷ 20 KV); cavi sotterranei di media tensione portano poi la corrente in un punto di connessione prossimo alla banchina dove un cavo flessibile, sempre di media tensione, viene srotolato dalla nave e si collega con l'impianto di terra. Questo cavo arriva a monte di un trasformatore di bordo che trasforma la media tensione in bassa tensione. Un convertitore di frequenza

concilia la frequenza di bordo con quella di terra e da là parte poi l'impianto elettrico della nave.

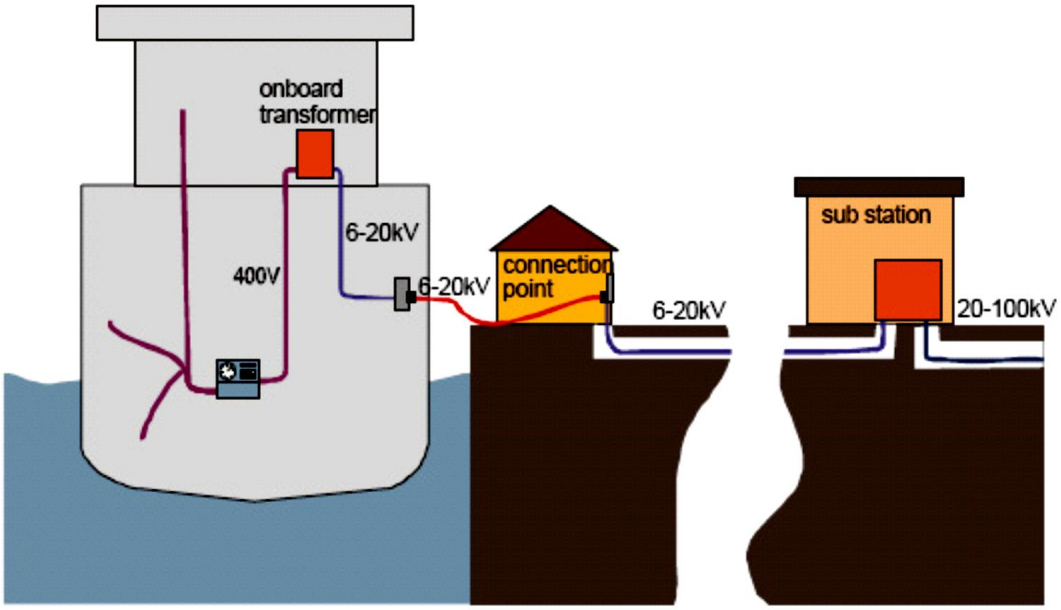


Figura 19: *Schema di impianto Cold Ironing.*

Bibliografia e sitografia

- T. Coppola, F. Quaranta – Il caso del Porto di Napoli: valutazione dell'impatto sull'ambiente cittadino generato dal traffico marittimo
- L. Battistelli, M. Fantauzzi, T. Coppola, F. Quaranta – Evaluation of the environmental impact of harbour activities: problem analysis and possible solutions
- L. Battistelli, T. Coppola, M. Fantauzzi, F. Quaranta – A case study on the environmental impact of harbour activities: analysis and solutions
- L. Battistelli, T. Coppola, M. Fantauzzi, F. Quaranta – The environmental impact of cruise ships in the port of Naples: analysis of the pollution level and possible solutions
- L. Battistelli, T. Coppola, M. Fantauzzi, F. Quaranta – Shore-side power supply of ships as a possible solutions to the environmental pollution in the harbours
- Louis Browning, Kathleen Bailey – Current Methodologies and best practices for preparing port emission inventories
- R. Della Volpe – Impianti Motori per la Propulsione Navale
- IMO - MARPOL 73/78
- Diesel and Gas Turbine pubblications – global sourcing guide 2004
- Gazzetta Ufficiale dell' Unione Europea – www.eur-lex.europa.eu.it
- Ship-technology - www.ship-technology.com
- Wärtsilä – www.wartsila.com
- www.terminalnapoli.it
- www.nonsoloaria.com