



*Autorità di Sistema Portuale
del Mar Tirreno Settentrionale*



Porti di Livorno, Piombino,
Portoferraio, Rio Marina,
Cavo, Capraia Isola

Direzione Sviluppo, Programmi Europei e Innovazione

Relazione tecnica Carbon Footprint

Sede Centrale :
Scali Rosciano, 6
57123 Livorno, Italia
+39 0586 249411

Uffici di Piombino :
Piazzale Premuda 6/a
57025 Piombino, (LI)
+39 0565 229210

C.F. 92130540492
P.I. 01884020494
adsp@pec.portialtotirreno.it
www.portialtotirreno.it





Sommario

1. Obiettivi	3
2. Metodologia calcolo emissioni lato mare	4
2.1 Tipologia di navi	4
2.2 Calcolo durata temporale movimenti portuali	5
2.3 Calcolo energia assorbita dalle imbarcazioni	5
2.4 Calcolo delle emissioni di inquinanti	7
2.4.1 Calcolo degli NO_x	7
2.4.2 Calcolo di CO₂, SO₂, CO e PM₁₀	7
2.4.3 Calcolo di N₂O, CH₄ e PM_{2.5}	8
3. Risultati Attività navali	9
3.1 Tempi movimenti navi Livorno	9
3.2 Risultati emissioni navi Livorno	11
3.3 Tempi movimenti navi Piombino	17
3.4 Risultati emissioni navi Piombino	19
3.5 Tempi movimenti navi Portoferraio	24
3.6 Risultati emissioni navi Portoferraio	26
4. Incertezza dei coefficienti di carico	29
5. Confronto emissioni navi/automobili	32
6. Strategie per la riduzione di emissioni lato navi	34
6.1 Elettificazione delle banchine (Cold Ironing)	34
6.2 Utilizzo di combustibili alternativi (GNL)	35
7. Metodologia calcolo emissioni lato terra	38
7.1 Emissioni sorgenti connesse ad AdSP-MTS	38
7.1.1 Livorno	39
7.1.2 Piombino	43
7.2 Emissioni sorgenti non connesse ad AdSP-MTS	45
7.2.1 Livorno	46
7.2.2 Piombino	47
8. Conclusioni	48
Bibliografia.....	51



1. Obiettivi

Il presente studio si basa sulle Linee Guida del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare per la redazione dei DEASP (1), e ha l'obiettivo di sviluppare una metodologia per il calcolo delle emissioni dei principali inquinanti prodotti nei porti di competenza dell'ADSP-MTS e nelle zone limitrofe, dovute a tutte le fonti direttamente o indirettamente riconducibili alle attività portuali.

L'area di studio è stata divisa in due sezioni:

- Lato mare: nella quale vengono calcolate le emissioni prodotte dalle navi durante le ordinarie operazioni portuali;
- Lato terra: nella quale vengono calcolate le emissioni prodotte dai grandi terminalisti portuali e dalle industrie presenti all'interno del porto o nelle zone limitrofe, le quali contribuiscono direttamente o indirettamente alle emissioni portuali di inquinanti.

Lo studio realizzato affianca le metodologie esistenti per la misurazione della Carbon Footprint (2), con le tecnologie innovative sviluppate da ADSP-MTS quali la piattaforma MONICA, al fine di calcolare le quantità emesse degli inquinanti atmosferici quali: NO_x, SO_x, CO₂, CO, N₂O, CH₄, PM₁₀ e PM_{2.5}.

Per convalidare il modello matematico, verranno installati in particolari punti strategici dei sensori ambientali per il monitoraggio degli inquinanti, in tale modo sarà possibile correggere il modello matematico con i dati puntuali ottenuti dall'elaborazione dei dati provenienti dai sensori.

Con questo studio sarà quindi possibile identificare in modo accurato la situazione attuale dei porti, individuando le sorgenti di inquinanti più critiche e studiando le soluzioni migliori di mitigazione.

Tale modello infine è stato strutturato in modo da essere riproducibile in tutti i porti.



2. Metodologia calcolo emissioni lato mare

Il calcolo delle emissioni di inquinanti prodotte dalle attività navali nei porti risulta molto complessa ed articolata a causa dell'elevata eterogeneità del tipo di navi, caratteristiche meccaniche, operazioni, potenze dei motori e tempi impiegati per le varie operazioni.

Gli strumenti utilizzati per il calcolo sono:

- Piattaforma MONICA, strumento fondamentale per lo studio realizzato in quanto oltre a fornire le informazioni generiche su ogni nave in arrivo nei porti quali: IMO, nome nave, dimensioni, tipo di nave e carico, fornisce gli orari di arrivo, movimento interno e partenza di ogni nave, tramite i quali è possibile calcolare la durata di ogni fase di navigazione;
- database IHS Markit, dai quali sono stati estratti i dati relativi alle potenze e alle velocità delle navi oggetto di studio;
- Ship Emissions Toolkit della IMO, i quali contengono sia le metodologie di calcolo delle emissioni di inquinanti delle navi, sia i coefficienti di emissione da utilizzare;

La metodologia adottata prevede:

- Classificazione delle navi oggetto di studio;
- Calcolo delle durate temporali dei vari movimenti portuali di ogni nave;
- Calcolo delle potenze dei motori primi e dei generatori ausiliari di ogni nave durante ogni movimento portuale;
- Calcolo dell'energia assorbita da ogni nave durante i vari movimenti;
- Calcolo delle emissioni di inquinanti durante i vari movimenti portuali.

2.1 Tipologia di navi

In questo studio sono state prese in esame le principali tipologie di navi operanti nei porti caratterizzate da elevato numero di arrivi, prolungati tempi di sosta, elevata potenza installata. Le tipologie di navi che presentano una o più di queste caratteristiche sono:

- Passenger/Cruise: caratterizzate da tempi medio/lunghi di sosta ed elevata potenza installata;
- RO-RO Cargo ship: caratterizzate da tempi medio/brevi di sosta, basse potenze dei generatori ed elevato numero di arrivi
- Passenger/RO-RO Cargo: caratterizzate da tempi medio/brevi di sosta, basse potenze dei generatori ed elevato numero di arrivi;
- Container ship: caratterizzate da elevati tempi di sosta;
- Vehicles Carrier: caratterizzate da tempi medi di sosta e potenze medie dei generatori.



Lo studio verrà in seguito esteso anche a tutte le altre categorie di navi operanti nei porti quali ad esempio General Cargo, Products Tanker, Tug, ecc...

2.2 Calcolo durata temporale movimenti portuali

Tramite la piattaforma Monica sono noti gli orari di arrivo, movimento interno e partenza di ogni nave. Partendo da questi dati sono stati calcolati i tempi impiegati dalle navi per le operazioni di:

- **arrivo**, ossia il tempo che trascorre tra l'orario di ingresso in porto e l'orario di ormeggio all'accosto assegnato;
- **movimento interno**, ossia il tempo che trascorre tra il disormeggio dall'accosto e l'ormeggio al nuovo accosto (questo movimento non è sempre presente);
- **sosta**, ossia il tempo che trascorre tra l'orario di ormeggio e quello di disormeggio;
- **partenza**, ossia il tempo che trascorre tra l'orario di disormeggio e quello di uscita della nave dal porto.

Questi calcoli sono stati svolti per ogni nave operante nei porti, a questo punto sono stati filtrati in base alle tipologie di nave di interesse

2.3 Calcolo energia assorbita dalle imbarcazioni

Le energie assorbite dalle navi durante ognuna delle fasi descritte in precedenza sono state calcolate seguendo la metodologia descritta dai toolkit della IMO, moltiplicando la potenza massima dei motori primi e dei generatori per opportuni coefficienti di potenza per i tempi di durata di ogni fase. Le potenze massime dei motori principali e dei generatori di tutte le navi operanti nei porti oggetto dello studio sono state ottenute dal database IHS Markit, dallo stesso database sono state ricavate le velocità massime di crociera delle imbarcazioni.

Le energie assorbite dai motori primi delle navi sono state calcolate moltiplicando le potenze massime dei motori primi stessi, per il tempo di durata di ogni fase, per un opportuno coefficiente (C1) dipendente dalla velocità della nave durante la specifica fase. Il fattore di carico C1 dei motori principali è stato calcolato per le fasi supponendo che l'energia assorbita dipenda dalla velocità di movimento della nave rispetto alla velocità massima della nave stessa mediante la relazione:

$$C1_{i,j} = \left(\frac{w_{i,j}}{w_{max,i}} \right)^3$$

Dove è stato indicato con:



- $C1_{i,j}$ = fattore di carico della nave i-esima per l'operazione j-esima;
- $w_{i,j}$ = velocità media della nave i-esima per l'operazione j-esima;
- $w_{max,i}$ = velocità massima della nave i-esima.

Le energie dei generatori ausiliari sono state calcolate moltiplicando la potenza massima assorbita da questi per il tempo di durata di ogni fase per un opportuno coefficiente (C2). Va sottolineato che calcolare l'effettiva energia assorbita dai generatori delle navi risulta molto complesso sia perché queste informazioni non sono disponibili commercialmente, sia per l'eterogeneità delle configurazioni impiantistiche e della gestione dei carichi utilizzate dalle flotte a livello mondiale.

Utilizzando le informazioni presenti in letteratura (3), è stato ipotizzato ipotizzando che i generatori ausiliari lavorino al 100% della potenza massima durante le fasi di arrivo, movimento interno e partenza, e 25% della potenza massima durante le fasi di sosta. I fattori di carico dei generatori (C2) sono stati ipotizzati pari a:

- 1: durante le fasi di arrivo, movimento interno e partenza;
- 0.25: durante le fasi di sosta.

I fattori di carico C2 verranno successivamente verificati e corretti mediante il confronto con i dati ottenuti dalla campagna di misurazione tramite sensori.

Le energie complessivamente richieste dalle singole navi sono state calcolate tramite la relazione:

$$E_i = \sum [(Load1_i * C1_{i,j} + Load2_i * C2_j) * time_{i,j}] \text{ [kWh]}$$

Dove è stato indicato con:

- E_i = energia assorbita dalla nave i-esima;
- $Load1_i$ = potenza massima dei motori principali della nave i-esima;
- $Load2_i$ = potenza massima dei generatori della nave i-esima;
- $C2_j$ = fattore di carico dei generatori durante l'operazione j-esima;
- $time_{i,j}$ = tempo espresso in ore dalla nave i-esima durante l'operazione j-esima.

L'energia totale richiesta da tutte le navi operanti nel porto è stata ottenuta dalla relazione:

$$E = \sum E_i \text{ [kWh]}$$

2.4 Calcolo delle emissioni di inquinanti

Il calcolo delle emissioni dei principali inquinanti derivanti dalle operazioni navali è stato eseguito utilizzando il toolkit della IMO (4), che fissano i valori di emissioni espressi in g/kWh per i vari tipi di motori principali ed ausiliari.

Engine category	Model year range	NO _x	PM ₁₀	PM _{2.5}	SO ₂	HC	CO	CO ₂	N ₂ O	CH ₄
Slow speed main (Tier 0)	1999 and older	18.1	1.42	1.34	10.29	0.60	1.40	620	0.03	0.01
Slow speed main (Tier I)	2000 to 2010	17.0	1.42	1.34	10.29	0.60	1.40	620	0.03	0.01
Slow speed main (Tier II)	2011 to 2016	15.3	1.42	1.34	10.29	0.60	1.40	620	0.03	0.01
Slow speed main (Tier III)	2016 +	3.6	1.42	1.34	10.29	0.60	1.40	620	0.03	0.01
Medium speed main (Tier 0)	1999 and older	14.0	1.43	1.34	11.35	0.50	1.10	683	0.03	0.01
Medium speed main (Tier I)	2000 to 2010	13.0	1.43	1.34	11.35	0.50	1.10	683	0.03	0.01
Medium speed main (Tier II)	2011 to 2016	11.2	1.43	1.34	11.35	0.50	1.10	683	0.03	0.01
Medium speed main (Tier III)	2016 +	2.8	1.43	1.34	11.35	0.50	1.10	683	0.03	0.01
Gas turbine	All	6.1	0.06	0.06	16.10	0.10	0.20	970	0.08	0.00
Steam main engine and boiler	All	2.1	0.93	0.87	16.10	0.10	0.20	970	0.08	0.00

Tabella 1: Coefficienti IMO per calcolo emissioni

2.4.1 Calcolo degli NO_x

Per quanto riguarda gli NO_x, le guide IMO prevedono l'utilizzo di diversi coefficienti in base sia all'anno di costruzione delle navi, passando da Tier 0 (anno di costruzione antecedente al 1999) a Tier III (anno di costruzione dal 2016 in poi), sia in funzione della velocità di rotazione dei motori: bassa velocità (meno di 130 rpm) o media velocità (da 130 a 2000 rpm). Anno di costruzione e velocità dei motori sono stati ricavati dal database IHS Markit. La formula utilizzata per calcolare le emissioni è:

$$NO_x = \frac{(Load1_i * C1_{i,j} * C1_{NO_x} + Load2_i * C2_j * C2_{NO_x}) * time_{i,j}}{10^6} \text{ [Ton]}$$

Dove è stato indicato con:

- $C1_{NO_x}$ = fattore di emissione degli NO_x (g/kWh) prodotti dai motori principali dalla nave;
- $C2_{NO_x}$ = fattore di emissione degli NO_x (g/kWh) prodotti dai generatori ausiliari dalla nave.

2.4.2 Calcolo di CO₂, SO₂, CO e PM₁₀

Per quanto riguarda la CO₂, SO₂, CO e PM₁₀, le guide IMO fissano i valori di emissione (espressi in g/kWh) in funzione della sola velocità dei motori e non dell'anno di costruzione. Si



sottolinea, inoltre, che per quanto riguarda gli ossidi di zolfo, SO_x, è stato ipotizzato che abbiano la stessa composizione chimica: SO₂, in quanto questi rappresentano oltre il 90% (5) di tutti gli SO_x prodotti.

La relazione usata per questi inquinanti è:

$$CO_2 = \frac{(Load1_i * C1_{i,j} * C1_{CO_2} + Load2_i * C2_j * C2_{CO_2}) * time_{i,j}}{10^6} \text{ [Ton]}$$

Dove è stato indicato con:

- $C2_{CO_2}$ = fattore di emissione degli CO_2 (g/kWh) prodotti dai motori principali dalla nave;
- $C2_{CO_2}$ = fattore di emissione degli CO_2 (g/kWh) prodotti dai motori ausiliari dalla nave.

2.4.3 Calcolo di N₂O, CH₄ e PM_{2.5}

Per quanto riguarda le emissioni di PM_{2.5}, N₂O e CH₄, le guide IMO stabiliscono anche per loro dei coefficienti di emissione che risultano tuttavia indipendenti dal tipo di motore e dalla velocità di rotazione. In particolare, l'ossido di diazoto (N₂O) ed il metano (CH₄) sono gas con un potenziale climalterante paragonabile a quello della CO₂. Tramite l'utilizzo di specifici coefficienti: Global Warming Potential (GWP), che esprimono il contributo all'effetto serra di un gas climalterante relativamente all'effetto della CO₂, il cui potenziale di riferimento è pari a 1, è quindi possibile considerare gli effetti comuni di tutti e tre i gas sull'ambiente.

3. Risultati Attività navali

Di seguito vengono riportati i risultati dello studio svolto relativi al numero di navi transitate nei porti di Livorno, Piombino e Portoferraio, ai tempi impiegati nelle varie fasi e alle emissioni atmosferiche prodotte.

3.1 Tempi movimenti navi Livorno

Dal 01-05-2018 al 02-05-2019, nel porto di Livorno sono arrivate oltre 5600 navi appartenenti alle 5 categorie studiate. Di queste oltre il 45% appartengono alla categoria Passenger/Ro-Ro, ed il 27% alla categoria Ro-Ro.

Calcolo tempi Livorno						
Movimento	U.o.M.	Passenger	RO-RO	Container	Vehicles Carrier	Passenger/Ro-Ro
Totale arrivi navi	N°	339	1567	749	417	2598
Totale arrivo	Ore	152	1052	501	210	1109
Totale mov. Int.	Ore	50	143	222	69	21
Totale ore sosta	Ore	5948	19620	16502	5854	11172
Totale partenza	Ore	96	849	779	323	804
Media arrivo	Ore	0.5	0.7	0.8	0.6	0.4
Media mov. Int.	Ore	11.5	5.9	7.1	3.3	2.7
Media sosta	Ore	19.4	12.6	25.6	16.1	7.8
Media partenza	Ore	0.3	0.5	1.1	0.8	0.2

Tabella 2: Tempi movimenti navi Livorno

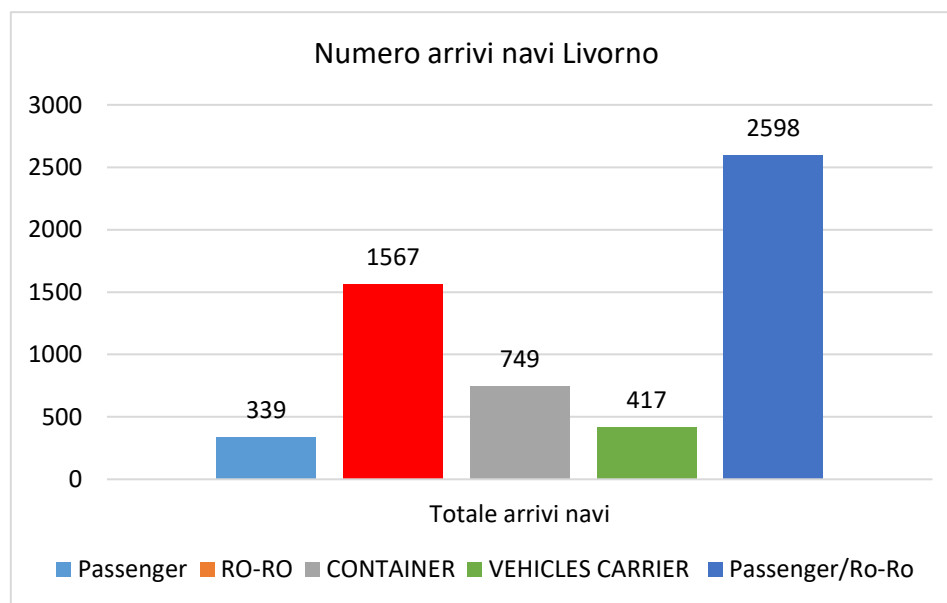


Figura 1: Numero arrivi navi Livorno

Complessivamente i tempi di attività di tutte le navi oggetto di studio nel porto di Livorno sono state maggiori di 65000 ore (equivalente a oltre 7 anni). In particolar modo la fase di sosta rappresenta oltre il 90% delle ore totali (59000 ore), in questa fase i motori primi non sono in funzione, rimangono accesi solo i generatori ausiliari necessari per mantenere in funzionamento la strumentazione ed i sistemi di bordo.

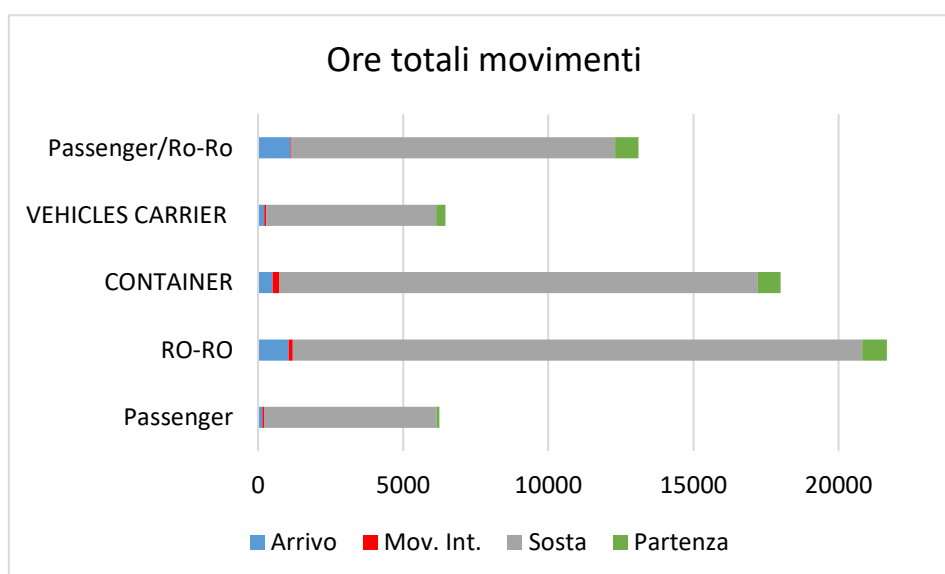


Figura 2: Ore totali movimenti navi Livorno

Per quanto riguarda i tempi medi di ogni fase, per tutte e 5 le tipologie di navi studiate, la fase di sosta è la più lunga, variando da 25 ore per le navi containers a circa 4 ore per le navi Passenger/Ro-Ro. Risultano invece molto più contenuti i tempi delle fasi di arrivo e partenza, che variano a seconda della tipologia di nave da 20 a 80 minuti.

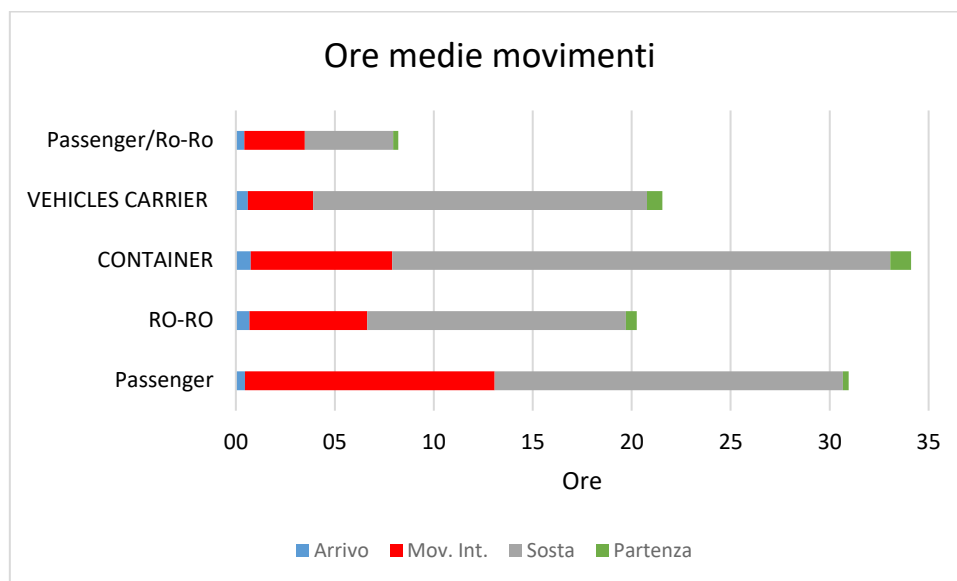


Figura 3: Ore medie movimenti navi Livorno

3.2 Risultati emissioni navi Livorno

I risultati dello studio svolto sono stati riportati nella tabella sottostante. In particolare, i risultati indicano le quantità di inquinanti prodotte (esprese in tonnellate) dalle attività marittime nel periodo dal 1-05-2018 al 02-05-2019.

CALCOLO EMISSIONI					
Passenger (cruise) ship	Arrivo	Mov int	Sosta	Partenza	Totale
NOx (TON)	9.0	3.5	52.7	6.6	71.8
N2O (TON)	0.0	0.0	0.1	0.0	0.2
CH4 (TON)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
PM2.5 (TON)	0.9	0.3	5.1	0.7	7.0
PM10 (TON)	1.0	0.4	5.4	0.7	7.4
CO2 (TON)	464.9	172.4	2580.8	334.9	3553.0
CO (TON)	1.2	0.3	3.2	0.6	5.3
SO2 (TON)	0.9	0.3	4.8	0.6	6.6
RO-RO Cargo Ship	Arrivo	Mov int	Sosta	Partenza	Totale
NOx (TON)	63.2	9.9	248.4	52.1	373.5
N2O (TON)	0.1	0.0	0.5	0.1	0.8
CH4 (TON)	0.0	0.0	0.2	0.0	0.3
PM2.5 (TON)	6.1	0.9	24.2	4.9	36.1
PM10 (TON)	6.5	1.0	25.6	5.2	38.3
CO2 (TON)	2979.0	432.6	11826.5	2394.6	17632.7
CO (TON)	7.5	1.2	24.3	6.2	39.2
SO2 (TON)	5.7	0.9	22.7	4.6	33.9



Passenger/Ro-Ro Cargo Ship	Arrivo	Mov int	Sosta	Partenza	Totale
NOx (TON)	116.1	1.9	332.3	67.2	517.6
N2O (TON)	0.3	0.0	0.7	0.2	1.2
CH4 (TON)	0.1	0.0	0.2	0.1	0.4
PM2.5 (TON)	11.7	0.2	32.9	6.8	51.5
PM10 (TON)	12.5	0.2	34.9	7.2	54.7
CO2 (TON)	5962.2	92.7	16690.5	3441.0	26186.4
CO (TON)	10.6	0.2	17.0	7.0	34.7
SO2 (TON)	11.0	0.2	30.9	6.4	48.4
Container Ship	Arrivo	Mov int	Sosta	Partenza	Totale
NOx (TON)	62.8	29.4	464.2	104.8	661.2
N2O (TON)	0.1	0.1	0.9	0.2	1.2
CH4 (TON)	0.0	0.0	0.3	0.1	0.4
PM2.5 (TON)	5.1	2.4	38.2	8.5	54.3
PM10 (TON)	5.4	2.6	40.5	9.0	57.5
CO2 (TON)	2379.7	1125.8	17717.3	3933.5	25156.4
CO (TON)	6.8	3.1	43.5	11.2	64.6
SO2 (TON)	4.8	2.3	35.9	8.0	51.0
Vehicles Carrier	Arrivo	Mov int	Sosta	Partenza	Totale
NOx (TON)	11.9	7.2	66.4	20.0	105.6
N2O (TON)	0.0	0.0	0.1	0.0	0.2
CH4 (TON)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
PM2.5 (TON)	1.1	0.6	5.9	1.8	9.3
PM10 (TON)	1.1	0.7	6.2	1.9	9.9
CO2 (TON)	487.8	285.7	2714.6	814.8	4303.0
CO (TON)	1.5	0.7	7.1	2.4	11.7
SO2 (TON)	1.0	0.6	5.5	1.7	8.7

Tabella 3: Emissione di inquinanti per tipo di movimentazione e nave (Livorno)

Dalla tabella si nota come gli inquinanti maggiormente emessi sono:

- CO₂ con 79534 tonnellate;
- NOx con 1808 tonnellate;
- SOx con 1321 tonnellate;
- PM₁₀ con 174 tonnellate;
- PM_{2.5} con 164 tonnellate.

Complessivamente questi inquinanti rappresentano oltre il 99% in massa delle emissioni totali, ed in particolar modo l'anidride carbonica rappresenta da sola circa il 95% in massa di tutte le emissioni. Sono presenti anche emissioni di N₂O (4Ton), CO (2Ton), CH₄ (1Ton) seppur in quantità molto più ridotte e limitate.

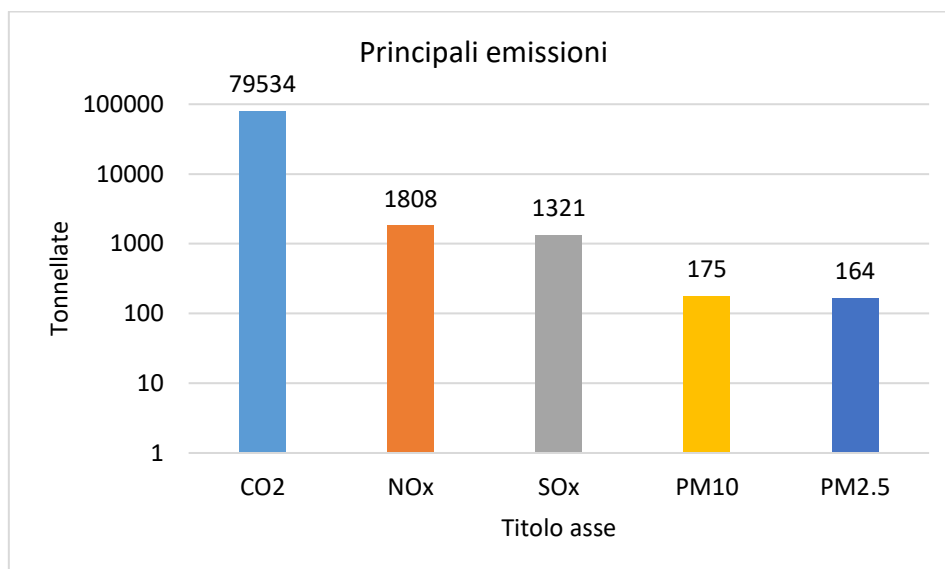


Figura 4: Principali inquinanti emessi in atmosfera (Livorno)

Andando ad analizzare le singole tipologie di navi, quelle con un impatto ambientale maggiore risultano essere le Container Ship a causa degli elevati tempi di sosta e all'elevata potenza che i generatori a bordo nave devono fornire per le normali operazioni (in particolar modo per mantenere attivi i container frigo).

Al secondo e terzo posto per emissioni vi sono rispettivamente le navi di categoria Passenger Ro-Ro e Ro-Ro cargo, i quali elevati valori sono dovuti al cospicuo numero di arrivi annuo appartenenti a questa categoria (insieme rappresentano oltre il 73% di tutti gli arrivi).

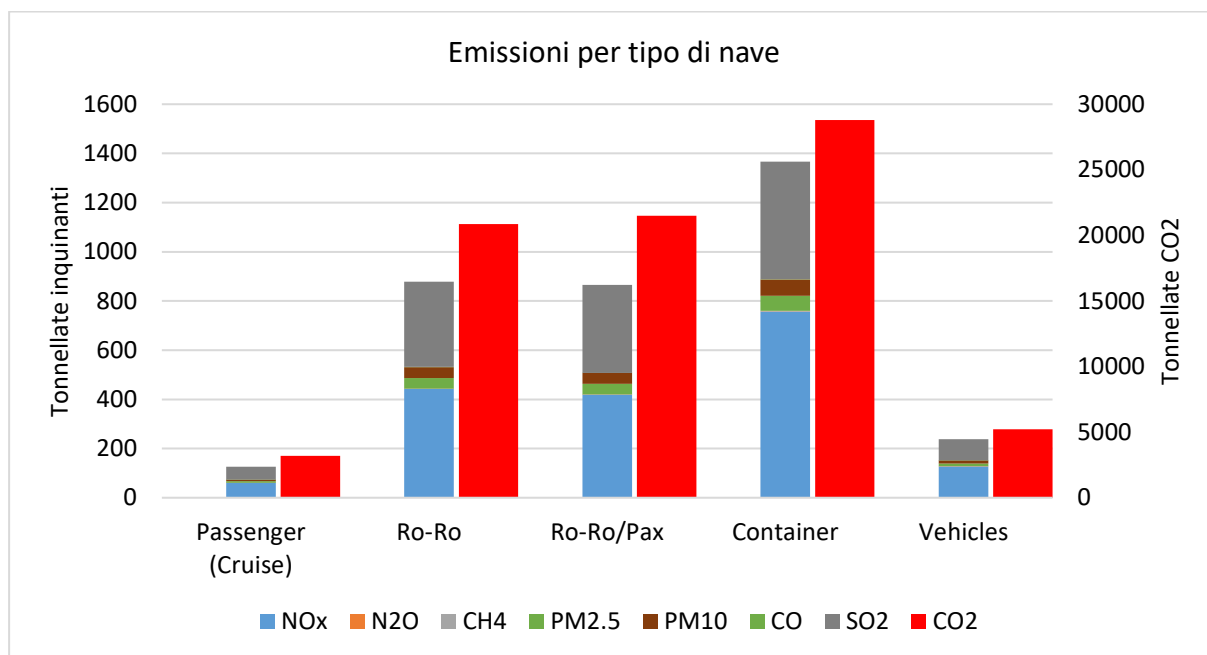


Figura 5: Emissioni di inquinanti per tipologia di nave (Livorno)

Infine, osservando le emissioni per tipologia di movimento portuale, come sottolineato in precedenza, le emissioni maggiori si verificano nelle fasi di sosta (60% del totale). Le elevate emissioni stimate in questa fase sono dovute sia agli elevati tempi di sosta (possono superare le 24 ore), ma soprattutto alle elevate energie assorbite durante le normali attività lavorative. La maggior parte delle navi è infatti dotata di propri generatori ausiliari con potenza nominale anche superiore a 10 MW necessaria per garantire il corretto funzionamento di tutti i dispositivi di bordo.

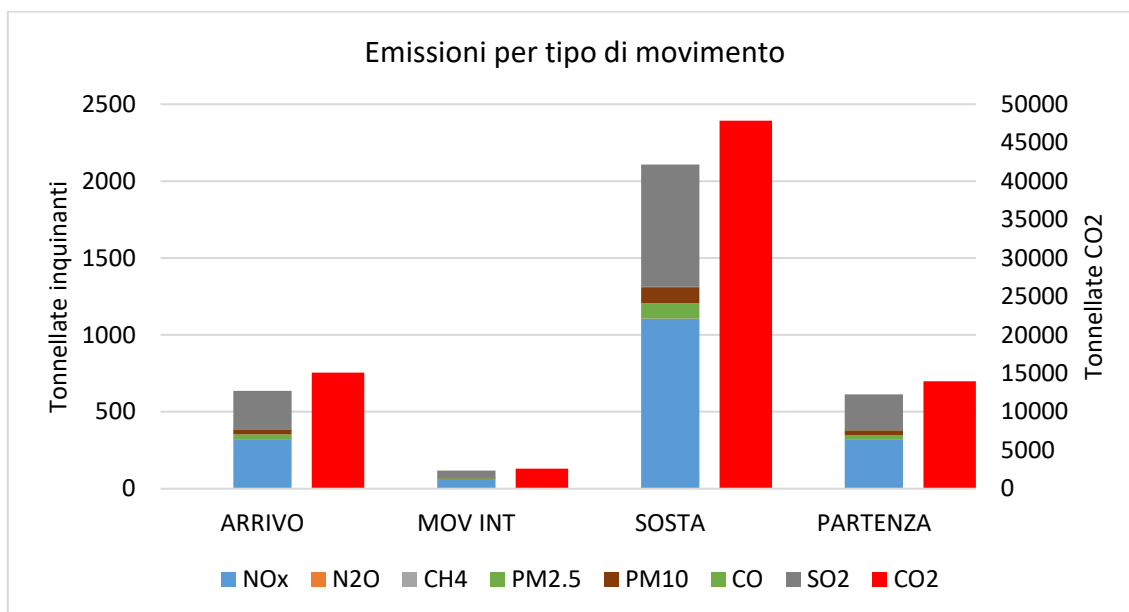


Figura 6: Emissioni di inquinanti per tipo di movimento (Livorno)

Per quanto riguarda le emissioni di gas climalteranti quali: CO₂, CH₄ e N₂O, queste possono essere aggregate esprimendole in termini di CO₂ equivalente (CO₂-e), utilizzando degli specifici coefficienti: Global Warning Potential (GWP), e Global Temperature Potential (GTP) (6). Questi due indicatori, GWP e GTP, rappresentano rispettivamente quanto un elemento inquinante contribuisce al riscaldamento globale, e quanto contribuisce all'aumento della temperatura superficiale terrestre, rispetto alla CO₂, il cui potenziale di riferimento è pari a 1.

INQUINANTE	CICLOVITALE	GWP20	GWP100	GTP20	GTP100
CO ₂		1	1	1	1
CH ₄	12.4	85	30	68	6
N ₂ O	121	264	265	277	234

Tabella 4: Coefficienti GWP e GTP a 20 e 100 anni

Utilizzando questi coefficienti, sono state calcolate le quantità di CO₂-e per le varie categorie di navi. I dati sono riportati nella tabella seguente.

Inquinante	Passenger	RO-RO Cargo	Passenger/ Ro-Ro Cargo	Container	Vehicles Carrier
CO ₂ (TON)	3181	20870	21485	28785	5213
CO ₂ EQ (GWP20)	3222	21149	21761	29191	5287
CO ₂ EQ (GWP100)	3220	21132	21745	29167	5282
CO ₂ EQ (GTP20)	3223	21156	21768	29201	5289
CO ₂ EQ (GTP100)	3214	21095	21708	29113	5273

Tabella 5: Emissione CO₂ e CO₂ equivalente (Livorno)



Analizzando nello specifico gli effetti delle emissioni di N_2O e CH_4 sul riscaldamento globale (GWP), si può osservare come in un periodo temporale di 20 anni producono un effetto sull'ambiente paragonabile a quello di 1076 tonnellate di CO_2 , comportando un incremento equivalente di circa 1.3% sulle emissioni totali di CO_2 (80610 tonnellate). In un orizzonte temporale di 100 anni invece, gli effetti dei due gas scendono ad un valore equivalente a 1013 tonnellate di CO_2 .

Relativamente agli effetti sull'incremento della temperatura media superficiale (GTP), si osserva che a 20 anni di distanza i due gas studiati producono un effetto paragonabile a quello di 1103 tonnellate di CO_2 , mentre a 100 anni di distanza gli effetti diminuiscono fino ad un valore equivalente a 869 tonnellate di CO_2 . I risultati vengono riportati nella fig.7.

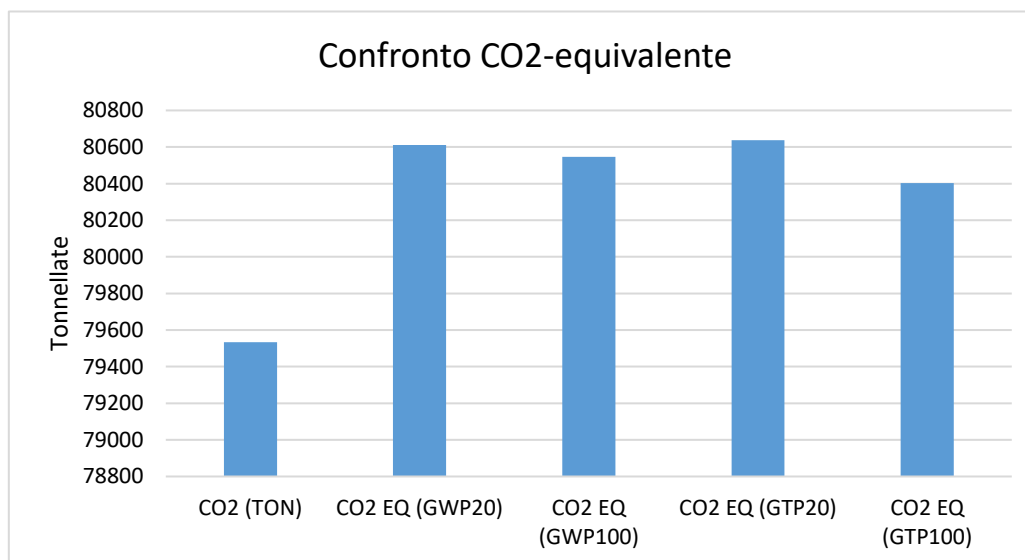


Figura 7: Confronto CO2 e CO2 equivalente (Livorno)



3.3 Tempi movimenti navi Piombino

I traffici marittimi del porto di Piombino si differenziano in modo sostanziale da quelli del porto di Livorno sia per tipologia di navi, sia per numero di arrivi. Nel periodo di riferimento sono arrivate oltre 12700 navi, l'85% delle quali appartengono alla categoria Passenger/Ro-Ro e il 10% alla categoria Passenger. Inoltre, per via della conformazione geografica del porto di Piombino, i tempi di arrivo e partenza delle navi risultano inferiori rispetto a quelli di Livorno, mentre non sono presenti movimenti interni delle navi, ossia il cambio di banchina d'ormeggio durante la fase di sosta. Nella tabella sottostante vengono riportati il numero di arrivi ed i tempi di movimento di tutte le navi studiate.

Calcolo tempi Piombino						
Movimento	U.o.M.	Passenger/ Ro-Ro	Passenger	General Cargo	Ro-Ro	Passenger (Cruise)
Totale arrivi navi	N°	10977	1332	273	184	11
Totale arrivo	Ore	1667	201	42	28	2
Totale sosta	Ore	20850	1636	14435	923	138
Totale partenza	Ore	1334	161	33	23	1
Media arrivo	Min	9	9	9	9	10
Media sosta	Min	114	74	3196	302	751
Media partenza	Min	7	7	7	7	8

Tabella 6: Tempi movimenti navi Piombino

È interessante notare come il 54% di tutti gli arrivi è dovuto a sole 6 navi, ognuna delle quali ha effettuato più di 1000 accosti l'anno, ossia una media di oltre 3 arrivi al giorno. Queste navi appartengono tutte alle categorie Passenger e Passenger Ro-Ro, e sono traghetti che congiungono Piombino all'isola D'Elba che compiono più viaggi durante l'arco della giornata ottimizzando al massimo i tempi di sosta.

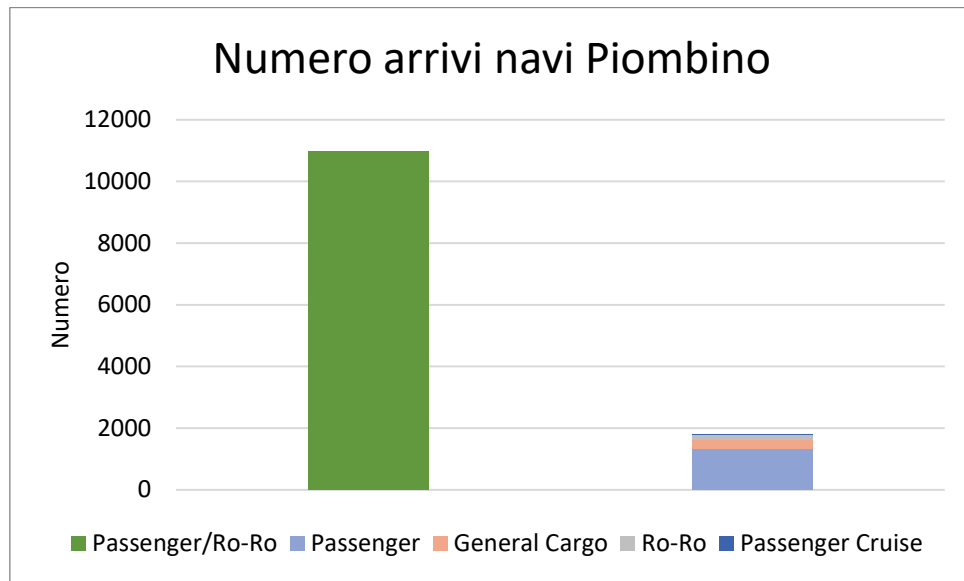


Figura 8: Numero arrivi Piombino

Complessivamente i tempi di attività di tutte le navi oggetto di studio nel porto di Piombino sono state circa 41000 ore (equivalente a più di 4 anni). La fase di sosta rappresenta oltre il 90% delle ore totali (38000 ore).

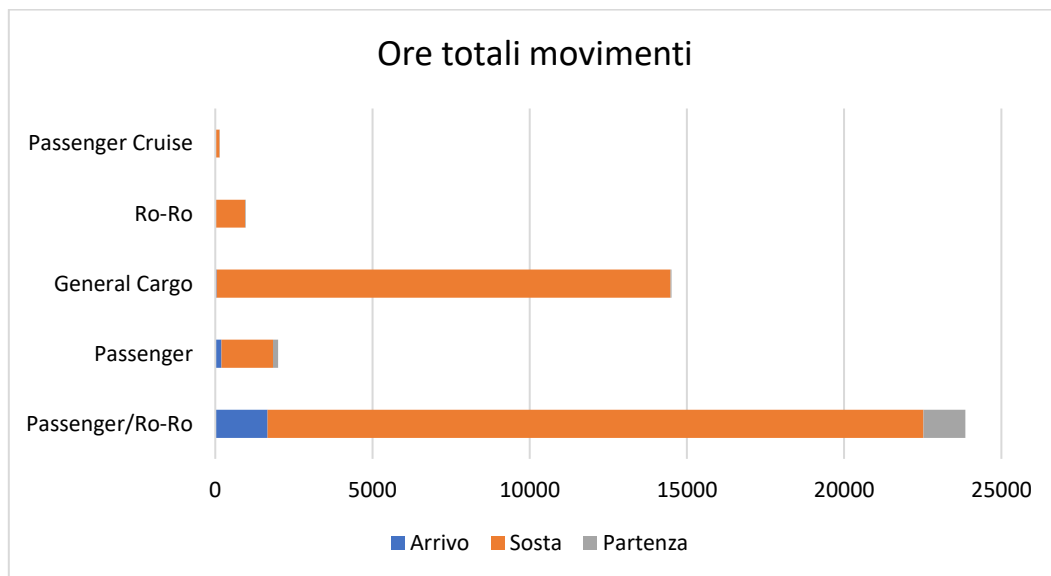


Figura 9: Ore totali movimenti navi Piombino



Anche per le navi operanti nel porto di Piombino la fase con durata temporale maggiore è quella di di sosta. Il tempo medio di sosta varia sensibilmente a seconda della tipologia di nave, si passa da circa un'ora per le navi di categoria Passenger, fino a superare le 50 ore per le navi di categoria Container. Risultano molto più contenuti i tempi medi di arrivo e partenza, i quali non superano i 10 minuti per tutte le categorie di navi.

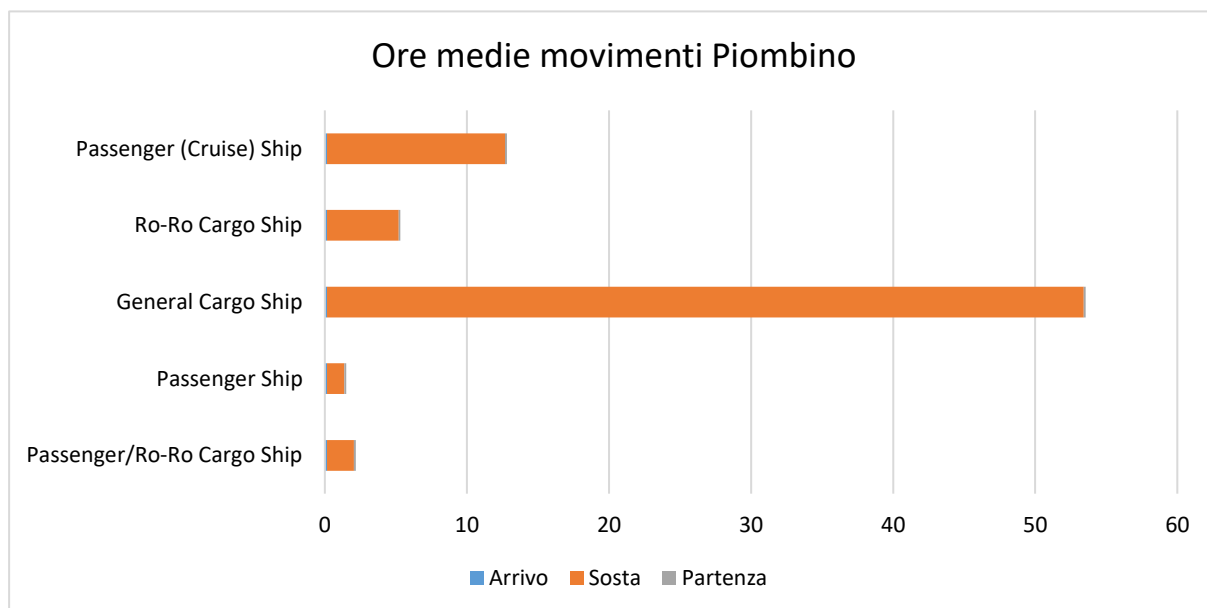


Figura 10: Ore medie movimenti navi Piombino

3.4 Risultati emissioni navi Piombino

Nella tabella sottostante vengono riportate le quantità di inquinanti prodotte (esprese in tonnellate) dalle attività marittime del porto di Piombino nel periodo dal 1-05-2018 al 02-05-2019.

CALCOLO EMISSIONI				
Passenger/Ro-Ro Cargo Ship	ARRIVO	SOSTA	PARTENZA	TOTALE
ENERGIA (MWh)	3495	6751	2796	13041
GASOLIO (TON) (STIMA)	733	1416	587	2736
NOx (TON)	49	95	39	183
N2O (TON)	0.1	0.2	0.1	0.4
CH4 (TON)	0.0	0.1	0.0	0.1
PM2.5 (TON)	4.7	9.0	3.7	17.5



PM10 (TON)	5.0	9.7	4.0	18.6
CO2 (TON)	2387	4611	1909	8907
CO (TON)	3.8	7.4	3.1	14.3
SO2 (TON)	40	77	32	148
Passenger Ship	ARRIVO	SOSTA	PARTENZA	TOTALE
ENERGIA (MWh)	46	45	37	128
GASOLIO (TON) (STIMA)	10	9	8	27
NOx (TON)	1	1	1	2
N2O (TON)	0.0	0.0	0.0	0.0
CH4 (TON)	0.0	0.0	0.0	0.0
PM2.5 (TON)	0.1	0.1	0.0	0.2
PM10 (TON)	0.1	0.1	0.1	0.2
CO2 (TON)	31	31	25	87
CO (TON)	0.1	0.0	0.0	0.1
SO2 (TON)	1	1	0	1
General Cargo Ship	ARRIVO	SOSTA	PARTENZA	TOTALE
ENERGIA (MWh)	73	1214	58	1346
GASOLIO (TON) (STIMA)	15	255	12	282
NOx (TON)	1	17	1	19
N2O (TON)	0.0	0.0	0.0	0.0
CH4 (TON)	0.0	0.0	0.0	0.0
PM2.5 (TON)	0.1	1.6	0.1	1.8
PM10 (TON)	0.1	1.7	0.1	1.9
CO2 (TON)	50	827	40	917
CO (TON)	0.1	1.3	0.1	1.5
SO2 (TON)	1	14	1	15
Ro-Ro Cargo Ship	ARRIVO	SOSTA	PARTENZA	TOTALE
ENERGIA (MWh)	76	415	61	551
GASOLIO (TON) (STIMA)	16	87	13	116
NOx (TON)	1	6	1	8
N2O (TON)	0.0	0.0	0.0	0.0
CH4 (TON)	0.0	0.0	0.0	0.0
PM2.5 (TON)	0.1	0.6	0.1	0.7
PM10 (TON)	0.1	0.6	0.1	0.8
CO2 (TON)	52	283	41	377
CO (TON)	0.1	0.5	0.1	0.6
SO2 (TON)	1	5	1	6
Passenger (Cruise) Ship	ARRIVO	SOSTA	PARTENZA	TOTALE

ENERGIA (MWh)	14	197	11	223
GASOLIO (TON) (STIMA)	3	41	2	47
NOx (TON)	0	3	0	3
N2O (TON)	0.0	0.0	0.0	0.0
CH4 (TON)	0.0	0.0	0.0	0.0
PM2.5 (TON)	0.0	0.3	0.0	0.3
PM10 (TON)	0.0	0.3	0.0	0.3
CO2 (TON)	10	135	8	152
CO (TON)	0.02	0.2	0.0	0.2
SO2 (TON)	0	2	0	3

Tabella 7: Emissioni di inquinanti per tipo di movimentazione e nave (Piombino)

Anche in questo caso gli inquinanti maggiormente emessi sono stati:

- CO₂ con 10440 tonnellate;
- NO_x con 214 tonnellate;
- SO_x con 173 tonnellate;
- PM₁₀ con 22 tonnellate;
- PM_{2.5} con 20 tonnellate;

Complessivamente questi inquinanti rappresentano oltre il 99% in massa delle emissioni totali, ed in particolar modo l'anidride carbonica rappresenta da sola circa il 95% in massa di tutte le emissioni, come mostrato nella figura sottostante.

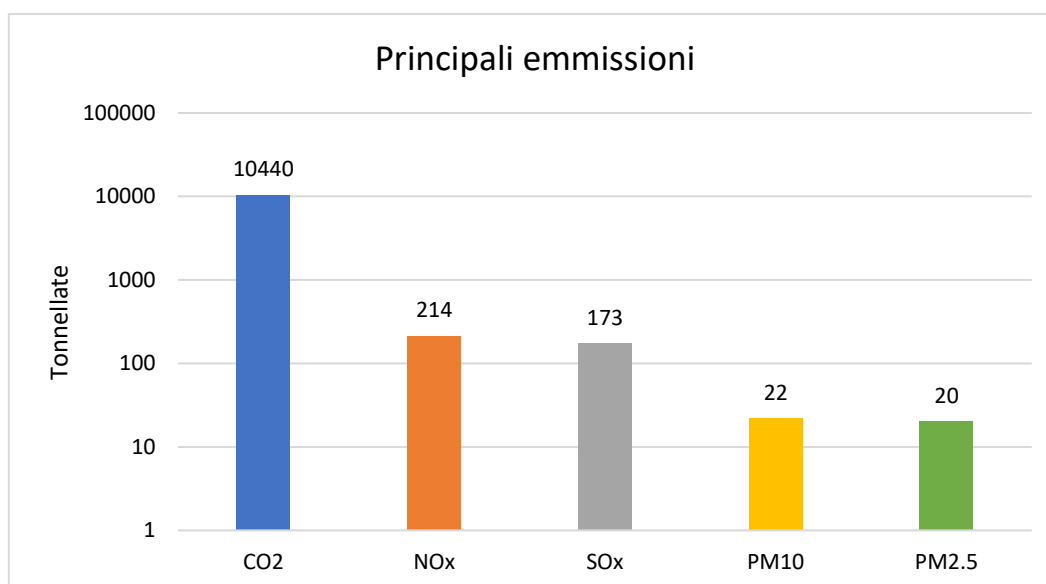


Figura 11: Principali inquinanti emessi in atmosfera (Piombino)

Andando ad analizzare le singole tipologie di navi, quelle con un impatto ambientale maggiore risultano essere le Passenger Ro-Ro (85% delle emissioni totali) per via degli elevati numeri di arrivi. Al secondo posto per emissioni vi sono le navi di categoria General Cargo (8% delle emissioni totali) a causa degli elevati tempi di sosta e all'elevata potenza che i generatori a bordo nave devono fornire per le normali operazioni.

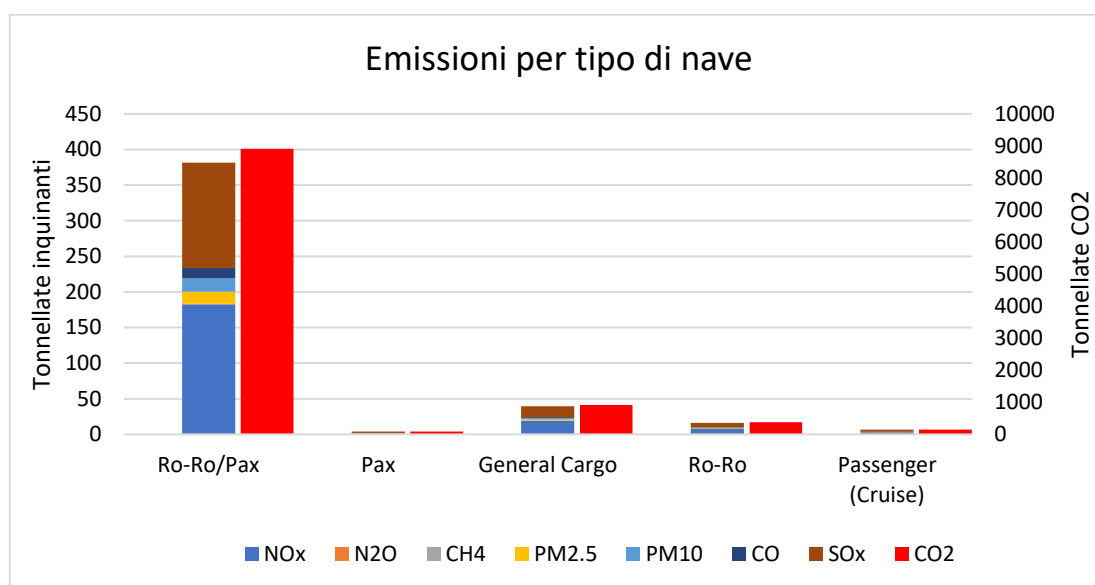


Figura 12: Emissioni di inquinanti per tipologia di movimento (Piombino)

Osservando le emissioni per tipologia di movimento portuale è possibile notare come il 56% delle emissioni sono state prodotte durante la fase di sosta. La percentuale risulta inferiore rispetto alle emissioni del porto di Livorno sia per la minore durata della fase di sosta, sia per la minore potenza dei generatori installata a bordo delle navi in oggetto, infatti, come detto in precedenza, in questa fase le emissioni sono dovute solo al funzionamento dei generatori ausiliari, in quanto i motori primi durante la sosta sono spenti.

Durante la fase di arrivo si stima che siano state prodotte il 31% delle emissioni, mentre durante la partenza sono state prodotte il restante 25% di inquinanti.

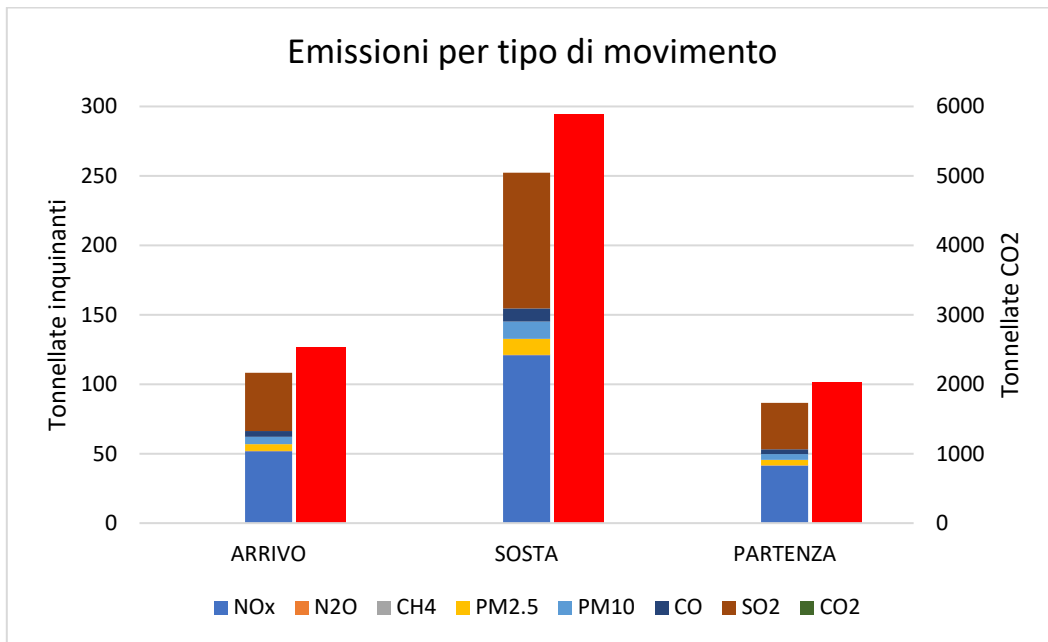


Figura 13: Emissioni di inquinanti per tipo di movimento (Piombino)



3.5 Tempi movimenti navi Portoferraio

I traffici marittimi del porto di Portoferraio sono costituiti quasi esclusivamente da navi di categoria Passenger e Passenger/Ro-Ro. Nel periodo di riferimento sono arrivate oltre 9800 navi, l'88% delle quali appartengono alla categoria Passenger/Ro-Ro e il restante 12% alla categoria Passenger. Anche in questo caso, per via della conformazione geografica del porto di Portoferraio, i tempi di arrivo e partenza delle navi risultano inferiori rispetto a quelli di Livorno, mentre non sono presenti movimenti interni delle navi, ossia il cambio di banchina d'ormeggio durante la fase di sosta. Nella tabella sottostante vengono riportati il numero di arrivi ed i tempi di movimento di tutte le navi studiate.

Calcolo tempi			
Movimento	U.o.M.	Passenger/Ro-Ro	Passenger Ship
Totale arrivi navi	N°	8664	1138
Totale ore arrivo	Ore	1316	172
Totale ore sosta	Ore	16457	1398
Totale ore partenza	Ore	1053	137
Minuti medio arrivo	Min	9	9
Minuti medio sosta	Min	114	74
Minuti medio partenza	Min	7	7

Tabella 8: Tempi movimenti navi Portoferraio

È interessante notare come in questo caso il 60% di tutti gli arrivi è dovuto a sole 5 navi, ognuna delle quali ha effettuato più di 1000 accosti l'anno, ossia una media di oltre 3 arrivi al giorno. Queste navi sono traghetti che congiungono il porto di Portoferraio a quello di Piombino, che compiono più viaggi durante l'arco della giornata ottimizzando al massimo i tempi di sosta.

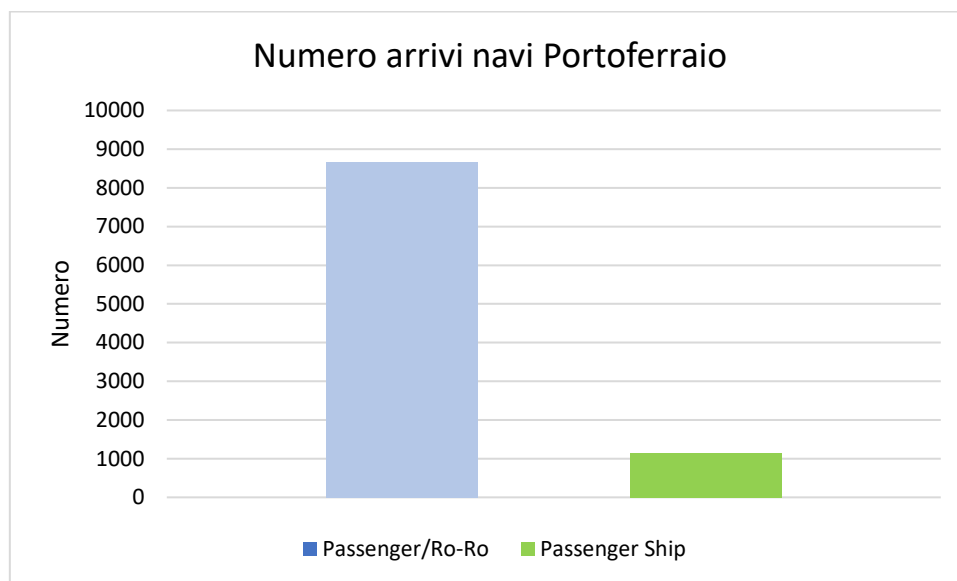


Figura 14: Numero arrivi Portoferraio

Complessivamente i tempi di attività di tutte le navi oggetto di studio nel porto di Portoferraio sono state oltre 20500 ore (equivalente a più di 2 anni). La fase di sosta rappresenta oltre il 90% delle ore totali (circa 18000 ore).

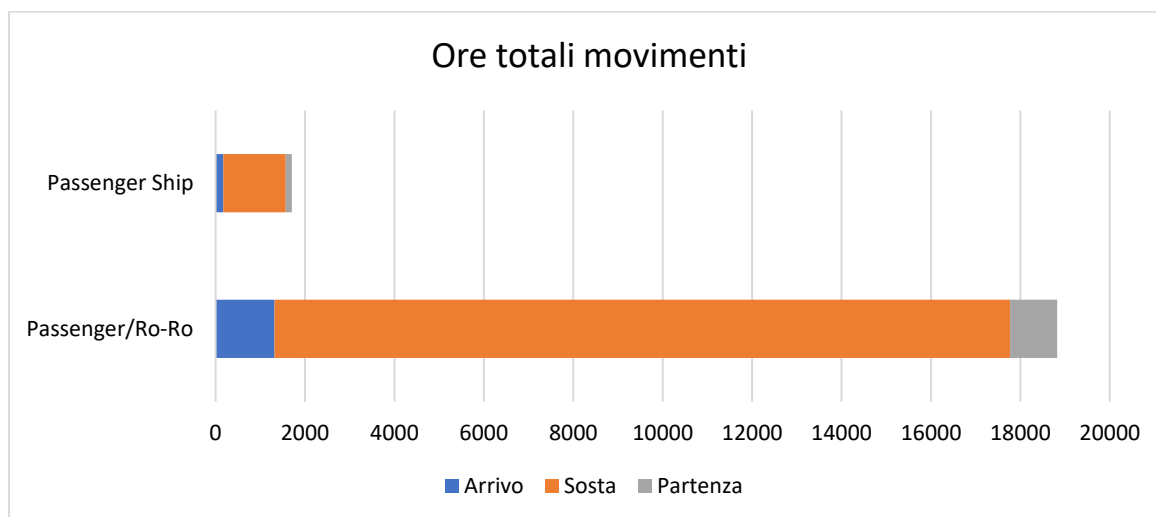


Figura 15: Ore totali movimenti navi Portoferraio

Anche per le navi operanti nel porto di Portoferraio la fase con durata temporale maggiore è quella di sosta. Il tempo medio di sosta varia da circa un'ora per le navi di categoria Passenger,

fino a 2 ore per le navi di categoria Passenger/Ro-Ro. Risultano molto più contenuti i tempi medi di arrivo e partenza, i quali non superano i 10 minuti per tutte le navi.

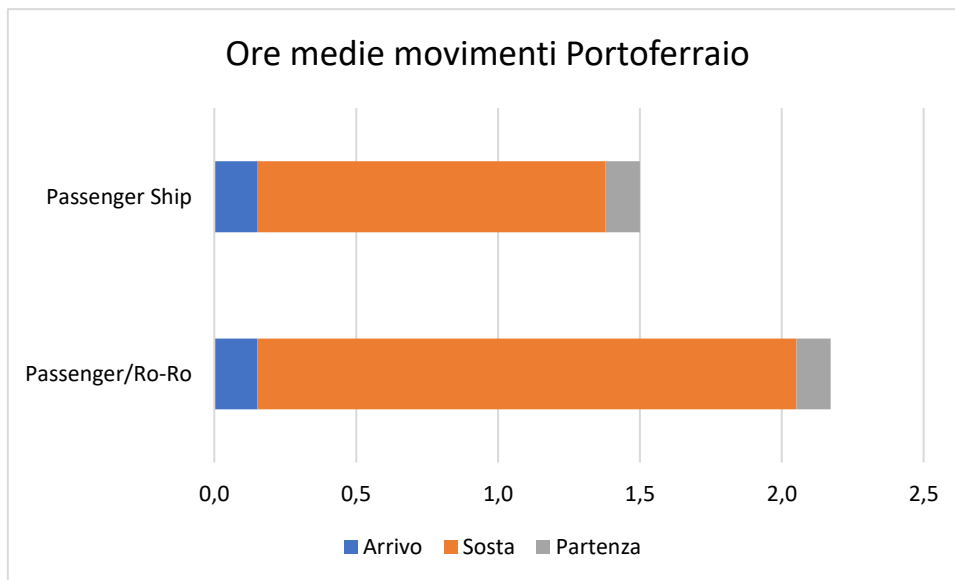


Figura 16: Ore medie movimenti navi Piombino

3.6 Risultati emissioni navi Portoferraio

Nella tabella sottostante vengono riportate le quantità di inquinanti prodotte (esprese in tonnellate) dalle attività marittime del porto di Portoferraio nel periodo dal 1-05-2018 al 02-05-2019.

CALCOLO EMISSIONI				
Passenger/Ro-Ro	ARRIVO	SOSTA	PARTENZA	TOTALE
ENERGIA (MWh)	2758	5328	2207	10293
GASOLIO (TON) (STIMA)	579	1118	463	2159
NOx (TON)	39	75	31	144
N2O (TON)	0	0	0	0
CH4 (TON)	0	0	0	0
PM2.5 (TON)	4	7	3	14
PM10 (TON)	4	8	3	15
CO2 (TON)	1884	3639	1507	7030
CO (TON)	3	6	2	11
SO2 (TON)	31	60	25	117
Passenger Ship	ARRIVO	SOSTA	PARTENZA	TOTALE

ENERGIA (MWh)	39	38	31	109
GASOLIO (TON) (STIMA)	8	8	7	23
NOx (TON)	0.6	0.5	0.4	1.5
N2O (TON)	0.0	0.0	0.0	0.0
CH4 (TON)	0.0	0.0	0.0	0.0
PM2.5 (TON)	0.1	0.1	0.0	0.1
PM10 (TON)	0.1	0.1	0.0	0.2
CO2 (TON)	26.9	26.3	21.5	74.7
CO (TON)	0.0	0.0	0.0	0.1
SO2 (TON)	0.4	0.4	0.4	1.2

Tabella 9: Emissione di inquinanti per tipo di movimentazione e nave (Portoferraio)

Anche in questo caso gli inquinanti maggiormente emessi sono stati:

- CO₂ con 7105 tonnellate;
- NO_x con 146 tonnellate;
- SO_x con 118 tonnellate;
- PM₁₀ con 15 tonnellate;
- PM_{2.5} con 14 tonnellate;

Complessivamente questi inquinanti rappresentano oltre il 99% in massa delle emissioni totali, ed in particolar modo l'anidride carbonica rappresenta da sola circa il 95% in massa di tutte le emissioni, come mostrato nella figura sottostante.

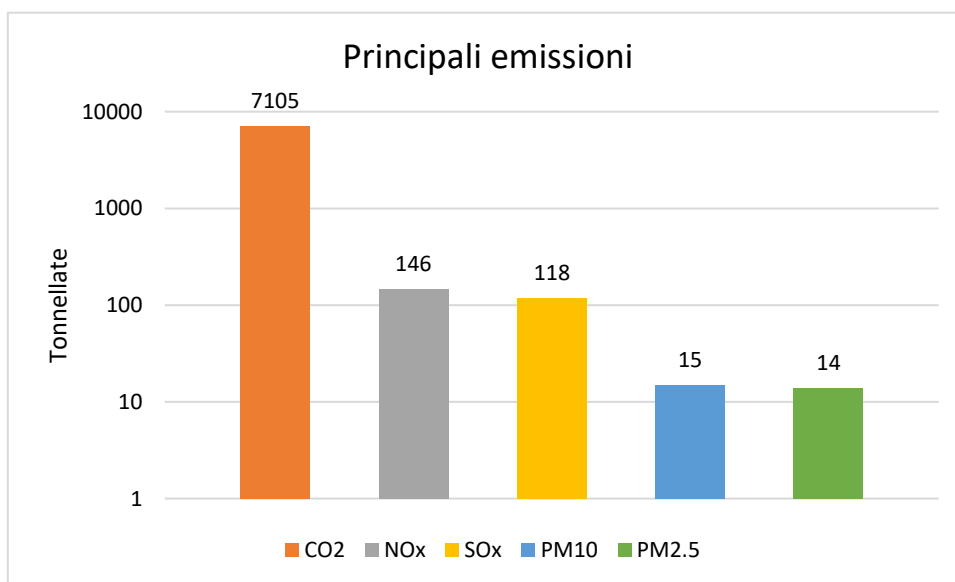


Figura 17: Principali inquinanti emessi in atmosfera (Piombino)

Osservando le emissioni per tipologia di movimento portuale è possibile notare come il 56% delle emissioni sono state prodotte durante la fase di sosta. La percentuale risulta inferiore rispetto alle emissioni del porto di Livorno sia per la minore durata della fase di sosta, sia per la minore potenza dei generatori installata a bordo delle navi in oggetto, infatti, come detto in precedenza, in questa fase le emissioni sono dovute solo al funzionamento dei generatori ausiliari, in quanto i motori primi durante la sosta sono spenti.

Durante la fase di arrivo si stima che siano state prodotte il 31% delle emissioni, mentre durante la partenza sono state prodotte il restante 25% di inquinanti.

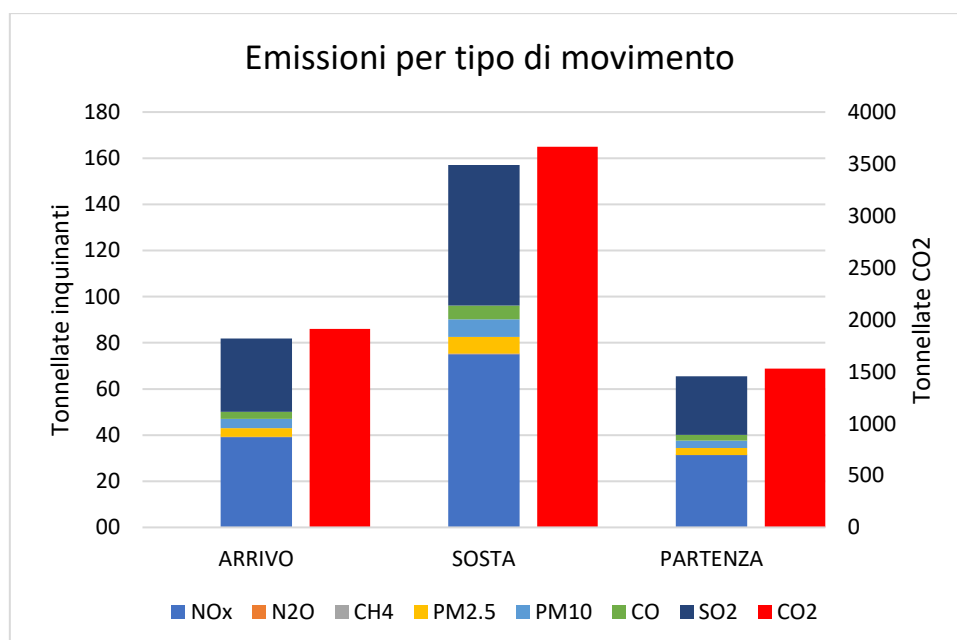


Figura 18: Emissioni di inquinanti per tipo di movimento (Portoferraio)



4. Incertezza dei coefficienti di carico

Come accennato in precedenza, per calcolare le energie assorbite dalle navi sono stati usati dei coefficienti di utilizzo delle potenze dei motori primi e dei generatori ausiliari. In particolare, in accordo con i toolkit IMO, è stato ipotizzato che:

- il coefficiente di carico dei motori primi sia proporzionale al cubo del rapporto tra la velocità sostenuta dalla nave durante ogni fase e la velocità massima raggiungibile dalla nave stessa;
- il coefficiente di carico dei generatori ausiliari sia massimo (pari a 1) durante le fasi di arrivo, movimento interno e partenza, e pari a 0.25 durante la fase di sosta.

Tali coefficienti sono solo indicativi e variano da caso a caso, in particolare modo per quanto riguarda l'utilizzo dei generatori ausiliari. In letteratura viene specificato che in genere per il calcolo della potenza totale dei gruppi elettrogeni installati bisogna considerare che il punto di lavoro ottimale dei generatori, è in corrispondenza del 75% della loro potenza massima nominale. È inoltre norma comune installare una potenza superiore rispetto a quella richiesta sia per un eventuale ampliamento futuro, sia per avere disponibile, in caso di avaria di uno dei generatori, una maggiore potenza dagli altri generatori rimasti in funzione. Per tali motivi sono state calcolate le emissioni variando i coefficienti di carico dei motori primi e dei generatori ausiliari. In particolare, sono state valutate le seguenti ipotesi:

- variazione del coefficiente di potenza dei motori principali (C1) ipotizzato pari a 1;
- variazione del coefficiente di potenza dei generatori durante le fasi di arrivo, movimento interno e partenza (C2) ipotizzato pari a 1;
- variazione del coefficiente di potenza dei generatori durante la fase di sosta (C3) ipotizzato pari a 0.25;

Il coefficiente C1 rappresenta la percentuale nominale di potenza massima utilizzata dai motori primi. Dal grafico sottostante si può notare che variando del 75% questo coefficiente, le emissioni variano in media del 10%, questo denota come le emissioni complessive delle navi dipendano in modo limitato dalle emissioni derivanti dai motori primi. In particolare, si nota come la variazione maggiore di emissioni si verifica per le navi di categoria Passenger (17%), mentre la categoria meno soggetta a variazione è la Container (5%).

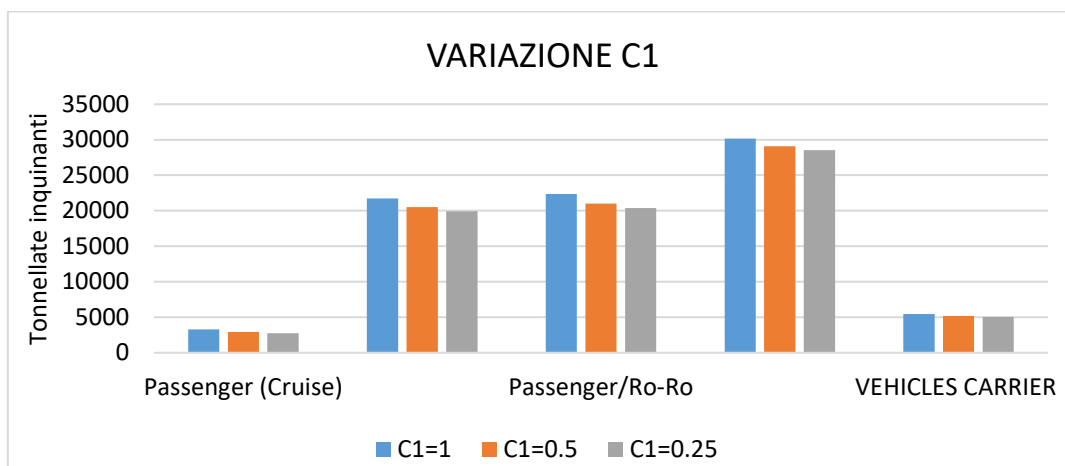


Figura 19: Analisi sensitività emissioni al variare di C1

Mantenendo invece costante il fattore di carico dei motori primi e dei generatori durante la fase di sosta, si può osservare come variano le emissioni al variare del fattore di carico C2 durante le fasi di arrivo, movimento interno e partenza. In questo caso una variazione del 75% del fattore di carico in oggetto, si registra una variazione media delle emissioni del 18%. In questo caso la variazione maggiore (29%) si registra per le emissioni delle navi di categoria Passenger/Ro-Ro, mentre la variazione minore (9%) si registra per le navi di categoria Passenger.

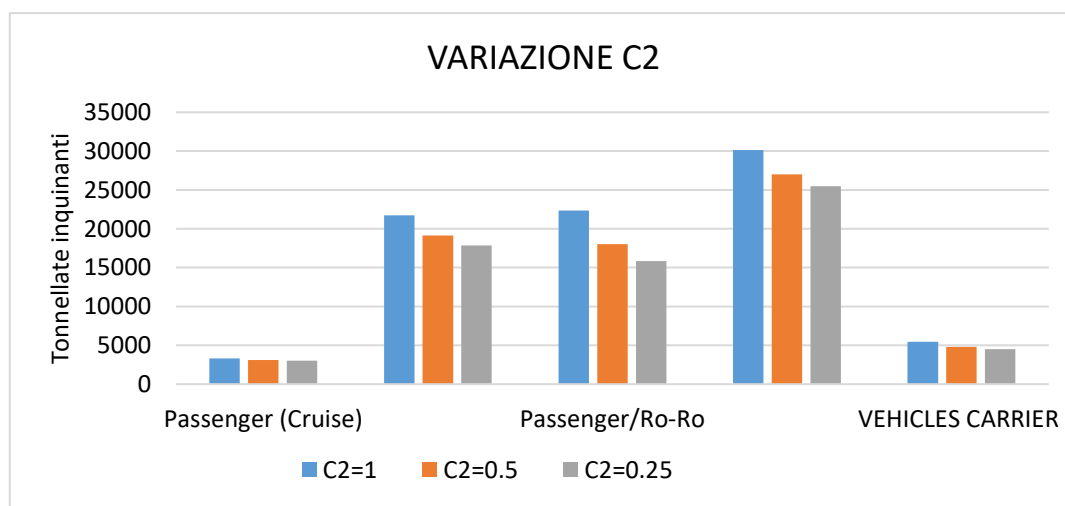


Figura 20: Analisi sensitività emissioni al variare di C2

Infine, variando il solo fattore di carico C3 dei generatori durante la fase di sosta, si registra una variazione media delle emissioni del 270%. In particolare, la variazione maggiore delle emissioni si verifica per le navi di categoria Container (300%), mentre quella minore per le navi di categoria Passenger/Ro-Ro (246%).

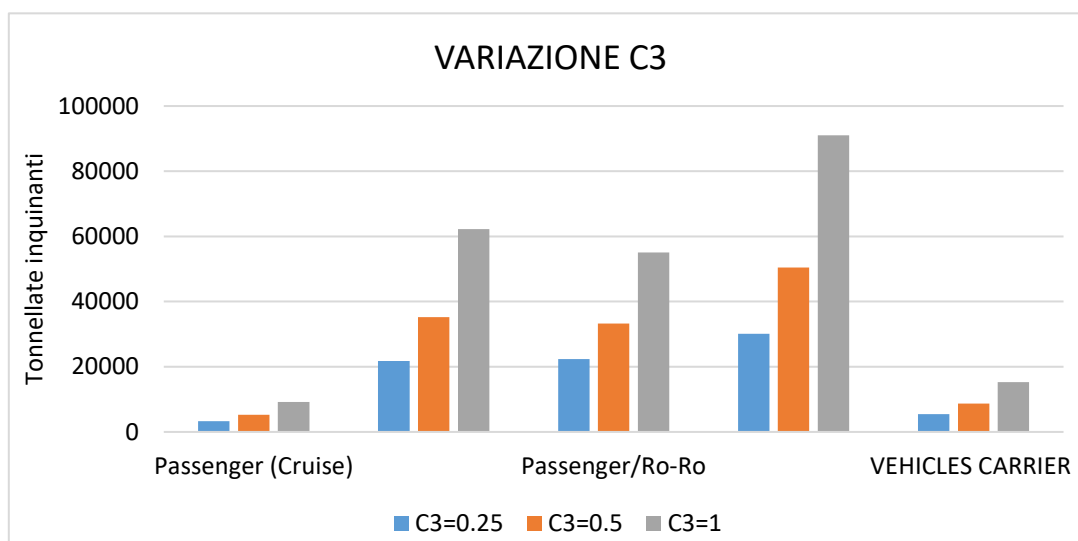


Figura 21: Analisi sensitività emissioni al variare di C3

I risultati mettono in evidenza come le emissioni dipendano fortemente dalle energie assorbite dai generatori durante la fase di sosta, mentre risultano poco sensibili alle incertezze sulle energie assorbite durante le altre fasi. Risulta quindi evidente la necessità di ottenere dei dati quanto più attendibili ed accurati possibili sulle energie effettivamente assorbite dai generatori durante le fasi di sosta al fine di sviluppare un modello attendibile.

5. Confronto emissioni navi/automobili

Le emissioni prodotte dalle navi studiate sono state confrontate con quelle prodotte mediamente da un'automobile in un anno in Italia. Per realizzare questo confronto è necessario definire le emissioni medie annue del parco veicolare. Le emissioni delle automobili si misurano in g/km e variano a seconda del tipo di veicolo, dell'anno di immatricolazione e del combustibile utilizzato. Le emissioni annue dipendono anche dai chilometri percorsi in media in un anno, queste variano a seconda del Paese preso in esame, ed in Italia in media un'automobile percorre 11200 km l'anno (7). Prendendo a riferimento il parco veicolare delle automobili alimentate a gasolio, le emissioni medie dei principali inquinanti risultano essere (8):

- $SO_x = 0.0122$ kg/anno;
- $NO_x = 3.905$ kg/anno;
- $PM_{2.5} = 0.445$ kg/anno;
- $CO_2 = 1259$ kg/anno (9);

Confrontando le emissioni delle navi operanti nel porto di Livorno si nota come le 5670 navi appartenenti alle 5 categorie studiate in un anno producano tanta CO_2 come circa 62 mila automobili. Continuando il confronto, per quanto riguarda il particolato, il numero di auto equivalenti sale a 369 mila, mentre per gli NO_x l'equivalenza sale ancora a 463 mila auto. Infine, per quanto riguarda gli SO_x , per eguagliare le emissioni sono necessarie oltre 100 milioni di automobili. I risultati vengono riportati nella figura seguente.

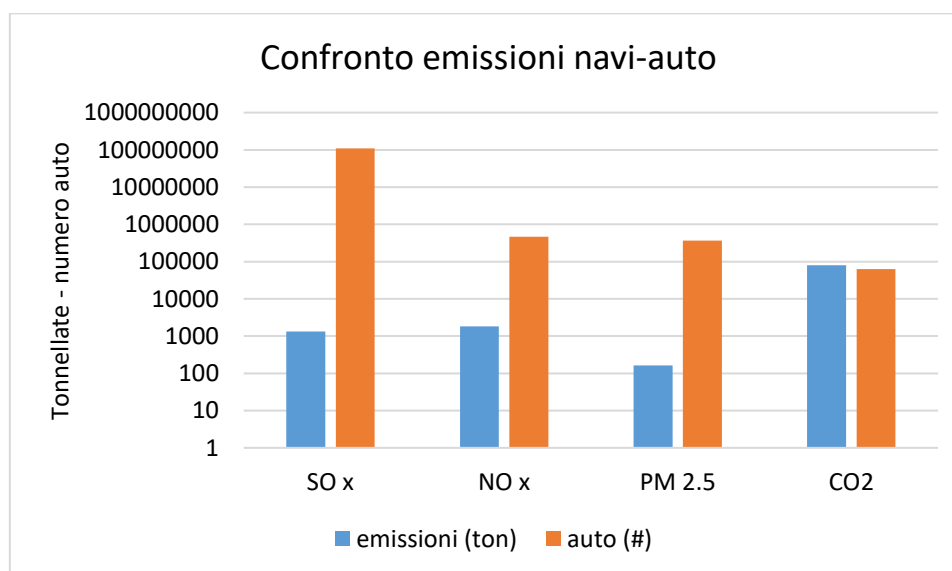


Figura 22: Confronto emissioni navi con numero di auto equivalenti

Risulta interessante confrontare le emissioni prodotte dalle navi studiate, con quelle emesse dalle autovetture della città di Livorno. Le automobili registrate nella città di Livorno nell'anno 2018 ammontano a circa 87000 unità (10), sono state quindi stimate le emissioni annuali prodotte dal parco veicolare livornese riportati nella tabella sottostante.

Inquinante	Emissioni navi	Emissioni automobili	U.o.M.
SO _x	1321	1.06	Ton
NO _x	1808	340	Ton
PM	164	39	Ton
CO ₂	79534	109512	Ton

Tabella 10: Confronto emissioni navi con emissioni auto nella città di Livorno

Conoscendo le emissioni medie prodotte dalle automobili di Livorno, è possibile realizzare un confronto tra le emissioni del porto e della città di Livorno, in particolare dal confronto è emerso che la CO₂ emessa dalle navi studiate corrisponde al 70% di quella emessa dal parco automobilistico livornese in un anno; gli ossidi di azoto ed il particolato emessi sono rispettivamente 5 e 4 volte maggiori di quelli emessi dalle automobili, mentre per quanto riguarda gli ossidi di zolfo, le emissioni delle navi corrispondono ad oltre 1200 volte le emissioni dell'intero parco automobilistico della città di Livorno.

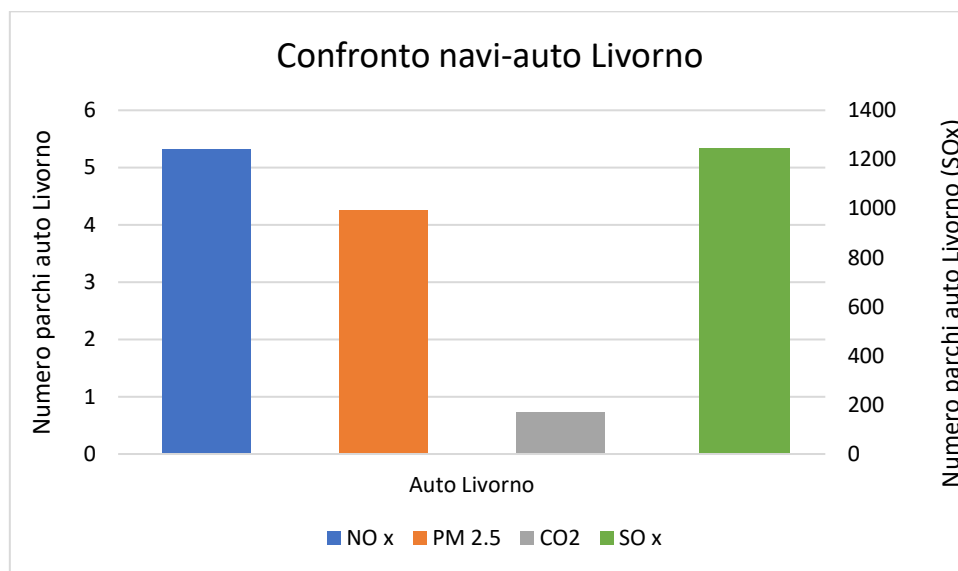


Figura 23: Confronto emissioni navi con emissioni auto presenti a Livorno



6. Strategie per la riduzione di emissioni lato navi

Lo studio svolto evidenzia come la maggior parte delle emissioni delle navi avviene durante la fase di sosta all'interno dei porti. Le strategie per ridurre le emissioni dei GHG devono quindi concentrarsi in questa riduzione. A tal fine sono possibili vari soluzioni per raggiungere gli obiettivi prefissati, quali l'elettificazione delle banchine o l'utilizzo di combustibili con un minore impatto ambientale rispetto a quelli tradizionalmente usati.

6.1 Elettificazione delle banchine (Cold Ironing)

La banchina elettrificata è un progetto altamente innovativo, in piena fase di sviluppo, che ha già riscontrato un notevole successo a livello mondiale. Ad oggi, non sono molti i porti che possono già vantare l'utilizzo di questa tecnologia, ma i benefici in termini d'inquinamento, di costi, di energia e d'immagine stanno spingendo le compagnie portuali e navali ad attrezzarsi in tale direzione. La banchina elettrificata è un sistema che ha lo scopo di fornire l'energia elettrica richiesta dalle navi in sosta attraverso una linea elettrica di terra generalmente connessa alla rete elettrica nazionale. In questo modo è possibile ridurre notevolmente le emissioni prodotte durante la fase di sosta, in quanto i fattori di emissione del parco elettrico nazionale sono inferiori rispetto a quelli dei generatori delle navi.

Prendendo come esempio il porto di Livorno, l'energia complessivamente assorbita durante la fase di sosta dalle navi studiate è stata di oltre 74 GWh. Ipotizzando di prelevare la totalità di questa energia dalla rete elettrica nazionale, si possono calcolare le emissioni indirette dei vari inquinanti derivanti dalla produzione di energia elettrica dal parco elettrico nazionale. A livello nazionale, l'energia elettrica viene prodotta da diverse fonti e tipi di impianti (centrali idroelettriche, termoelettriche, biomasse fotovoltaico, eolico...) risulta quindi particolarmente difficile identificare con esattezza i vari inquinanti e i loro coefficienti di emissione. Per il calcolo sono stati usati i coefficienti presenti nell'inventario di ISPRA relativo alle sorgenti di combustione stazionarie (11). In particolare, i coefficienti di emissione della CO₂ sono relativi all'anno 2018, mentre i coefficienti di emissione di NO_x, SO_x, CO e PM₁₀ sono relativi all'anno 2017. Nella tabella sottostante vengono confrontate le emissioni prodotte dai generatori delle navi con quelle del parco elettrico nazionale.

Vettore	elettrico	Combustibile
NO _x (TON)	17	1103
PM ₁₀ (TON)	0.40	105
CO (TON)	7.25	95
SO _x (TON)	4.72	795
CO ₂ (TON)	22132	47880

Tabella 11: Confronto emissioni combustibile-elettrico

Si può notare immediatamente come le emissioni del parco elettrico siano nettamente inferiori alle emissioni prodotte dai combustibili tradizionali, sia perché le centrali elettriche presentano in media un rendimento energetico maggiore rispetto ai generatori delle navi, sia perché una quota sempre maggiore di energia a livello nazionale viene prodotta da fonti rinnovabili a emissioni zero. Nel dettaglio, dai calcoli emerge che alimentando tutte le navi in sosta nel porto di Livorno tramite la rete elettrica nazionale, si avrebbe una riduzione delle emissioni di CO₂ pari al 54%, mentre le riduzioni di NO_x, SO_x e PM₁₀ si attesterebbero a circa il 99%.

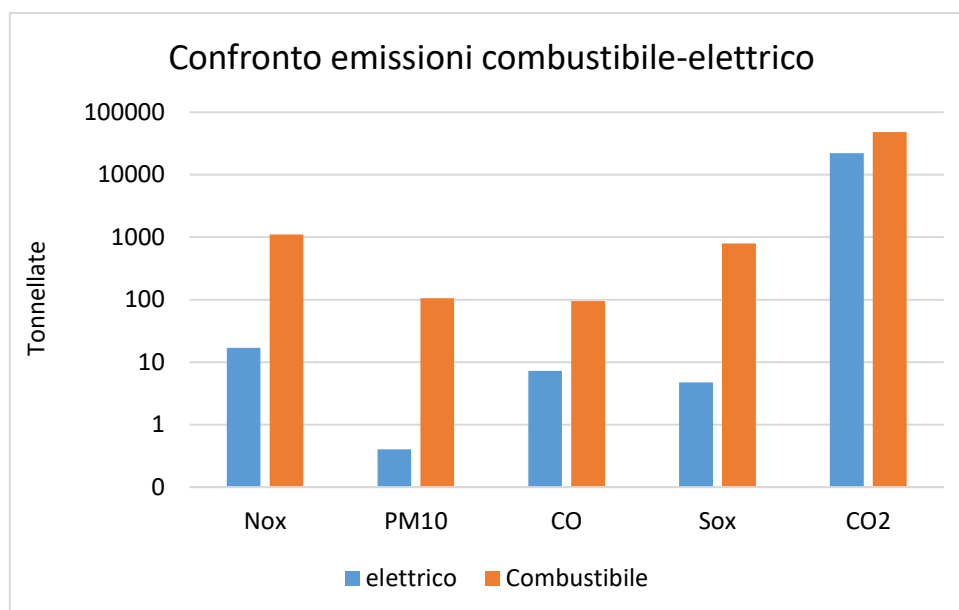


Figura 24: Confronto emissioni utilizzando combustibili o elettricità per alimentare le navi in sosta

Va sottolineato che tali emissioni possono essere ulteriormente ridotte installando nelle zone portuali o limitrofe impianti per la produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili quali ad esempio:

- impianti fotovoltaici;
- impianti eolici di media o piccola taglia;
- impianti per lo sfruttamento dei moti ondosi e delle correnti marine.

6.2 Utilizzo di combustibili alternativi (GNL)

Un altro metodo seguito per ridurre le emissioni di inquinanti e favorire la decarbonizzazione è l'utilizzo di combustibili alternativi a minore impatto ambientale quali biocombustibili, gas naturale e idrogeno. Al momento l'utilizzo del gas naturale nella sua forma liquida (GNL) a

bordo delle navi può garantire una notevole riduzione delle emissioni degli inquinanti. Il combustibile marino attuale ha un contenuto di zolfo molto elevato rispetto ai combustibili stradali e il GNL promette di essere un combustibile molto più pulito dal punto di vista degli inquinanti locali. È questa una delle ragioni principali per cui il GNL sulle navi viene promosso per soddisfare i requisiti delle Aree a Emissioni Controllate (ECA) e del limite globale dello 0,5% per lo zolfo che entrerà in vigore nel 2020. Le riduzioni degli inquinanti locali associati all'uso del GNL nelle navi sono ben documentate (12), (13), che stimano riduzioni di NO_x, SO_x e PM nell'ordine del 85-100%, rispetto alle navi alimentate a HFO.

Fuel	Grams of pollutant per gram of fuel consumed			kg of pollutant per GJ of fuel consumed		
	NO _x	SO ₂	PM	NO _x	SO ₂	PM
HFO (0.5% sulphur content)	0.0825	0.005	0.00385	2.027	0.123	0.095
MGO (0.1% sulphur content)	0.0877	0.001	0.00097	2.060	0.023	0.023
LNG	0.0140	0	0.00018	0.292	0.000	0.004
LNG: change versus HFO (%)				-85.6%	-100%	-96.0%
LNG: change versus MGO (%)				-85.8%	-100%	-83.5%

Tabella 12: Coefficienti di emissioni di NO_x, SO_x e PM utilizzando combustibile tradizionale o GNL

Utilizzando i coefficienti di emissioni presenti nella *tabella 9* è quindi possibile calcolare quali sarebbero le emissioni prodotte dalle navi se utilizzassero il GNL al posto del combustibile tradizionale.

Per realizzare le stime è stato necessario calcolare le quantità di GNL consumato per produrre l'energia assorbita dalle navi. Il calcolo è stato eseguito ipotizzando che tutti i motori primi ed i generatori delle navi avessero lo stesso rendimento in tutte le condizioni operative, e che questo fosse pari al 40% (14), mentre il potere calorifico inferiore (PCI) è stato assunto pari a quello del metano, in quanto rappresenta circa il 99 % della miscela del GNL. Utilizzando queste ipotesi sono state calcolate le emissioni derivanti dall'utilizzo del GNL. I risultati sono riportati nella *tabella 13*.

Inquinante	CO ₂	NO _x	SO _x	PM
Combustibile Tradizionale	79534	1808	1321	174
GNL	63627	323	0	4.42

Tabella 13: Tonnellate di CO₂, NO_x, SO_x e PM emesse utilizzando combustibile tradizionale o GNL

L'utilizzo del GNL al posto dei combustibili tradizionali presenta dei benefici in termini di emissioni. Per quanto riguarda le emissioni di CO₂ si registra una diminuzione del 20% delle

emissioni, mentre ancora più significative sono le riduzioni di ossidi di azoto (82%), particolato (97%) e ossidi di zolfo, i quali per via della composizione chimica del GNL sono quasi del tutto assenti.

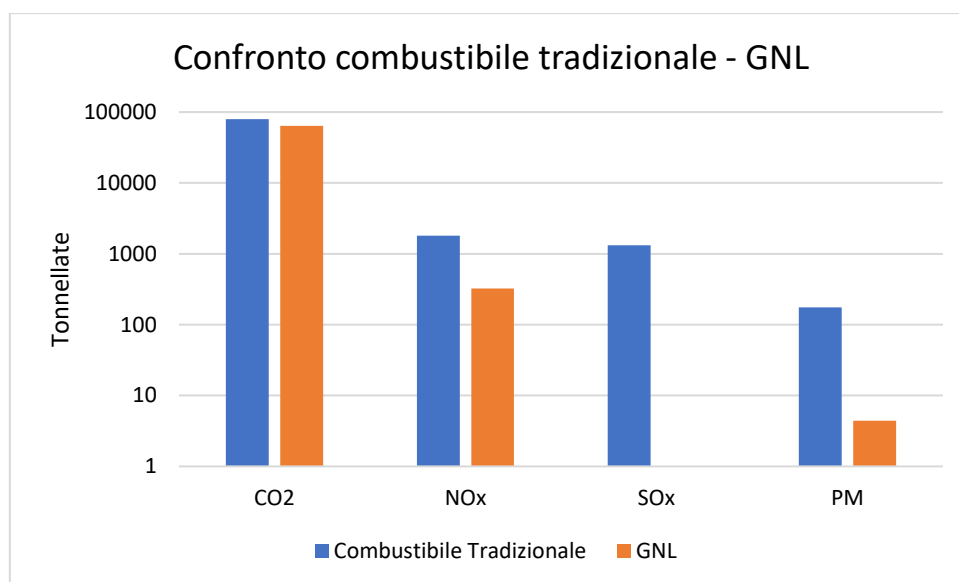


Figura 25: Confronto emissioni CO₂, NO_x, SO_x e PM utilizzando combustibili tradizionali o GNL



7. Metodologia calcolo emissioni lato terra

Il calcolo delle emissioni lato terra risulta molto più semplice rispetto al lato mare, sia per la ridotta eterogeneità delle sorgenti, sia per il loro limitato numero rispetto alle sorgenti lato mare. La metodologia seguita prevede di dividere tutte le sorgenti in due gruppi:

- Sorgenti emesse da soggetti che hanno un rapporto contrattuale con AdSP-MTS;
- Sorgenti emesse da soggetti presenti nelle zone portuali o limitrofe, ma che non hanno un rapporto contrattuale con AdSP-MTS;

È stato scelto di monitorare anche le industrie presenti nelle zone limitrofe alle aree portuali in quanto anche se non direttamente connesse al porto, contribuiscono alle emissioni totali rilevate all'interno dei porti e bisogna quindi tenerne conto durante la fase di monitoraggio tramite sensori.

Il passo successivo è stato quello di distinguere le varie tipologie di emissioni:

- Emissioni dirette: prodotte dalla combustione di carburanti utilizzati per gli automezzi, per il riscaldamento degli edifici e per produrre energia elettrica;
- Emissioni indirette: derivanti dall'acquisto di energia elettrica calore o vapore da fonti esterne non presenti nelle zone limitrofe.

Sono state così classificate tutte le possibili sorgenti lato terra, e sviluppato un apposito algoritmo di calcolo per ognuna di esse. A questo punto sono stati contattati tutti i soggetti e richieste le specifiche informazioni su:

- numero di automezzi posseduti;
- tipo e la quantità di combustibili consumati,
- tipo e quantità di combustibile consumato per il riscaldamento degli edifici;
- consumi elettrici.

È stata inoltre richiesta l'Autorizzazione Integrata Ambientale (AIA) alle industrie che ne erano provviste al fine di quantificare in modo più preciso le emissioni in atmosfera.

Le emissioni sono state stimate applicando a seconda dei casi, i fattori di emissione specifici per i vari processi, formule chimiche di ossido-riduzione dei combustibili e valori presenti nelle AIA.

7.1 Emissioni sorgenti connesse ad AdSP-MTS

Rientrano in questa categoria tutti i soggetti presenti nei porti le cui attività sono direttamente collegate al trasporto marittimo e che hanno un rapporto contrattuale con AdSP-MTS. I soggetti per i porti di Livorno e Piombino sono riportati nella tabella seguente.

La metodologia seguita per calcolare le emissioni dei vari inquinanti prevede:

- identificazione e caratterizzazione della sorgente;
- stima delle quantità di combustibili consumate nell'anno di riferimento
- stima delle emissioni mediante opportuni coefficienti.

I dati sono stati raccolti contattando direttamente tutti i soggetti chiedendo informazioni specifiche relativi ai vari consumi energetici delle loro attività.

7.1.1 Livorno

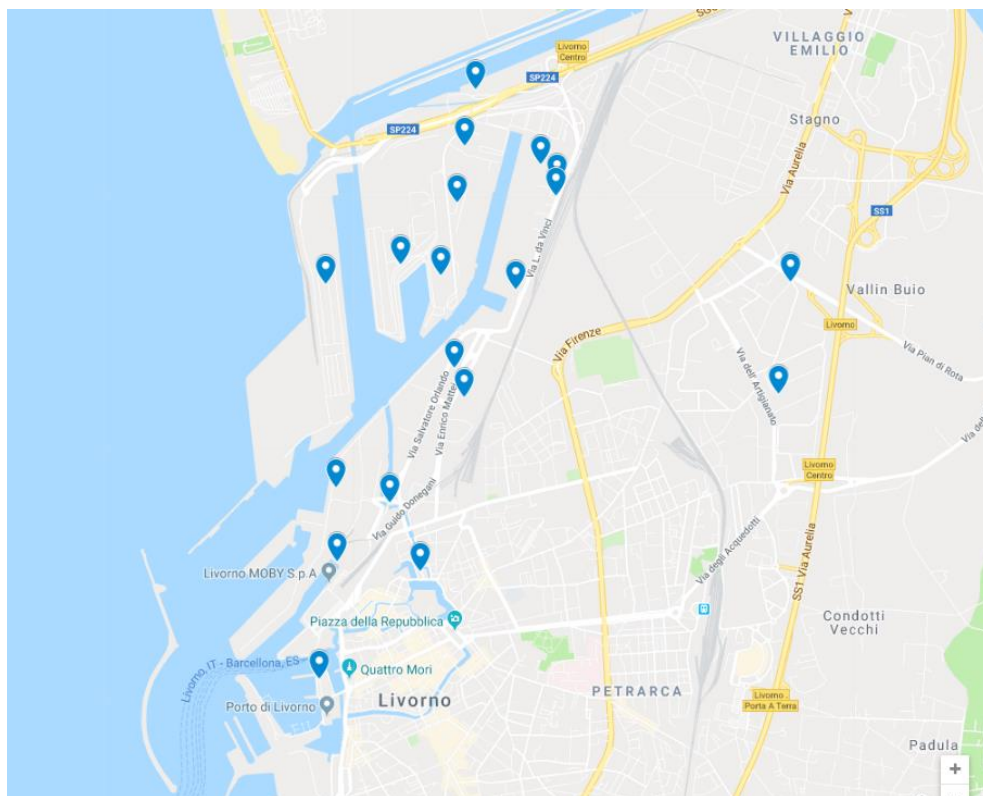


Figura 26: Mappa soggetti studiati nel porto di Livorno e nelle zone limitrofe

Per il porto di Livorno sono state individuate 17 società rientranti in questa categoria. La raccolta dei dati è ancora in corso, e lo stato attuale è riportato nella tabella sottostante.



Azienda	Consumi combustibili	Consumi elettrici
Capitaneria di Porto	SI	SI
Costrieri D'Alesio	NO	SI
Laviosa	NO	NO
Neri spa	SI	SI
Bartoli	NO	NO
Grandi Molini Italiani	NO	SI
Labromare	NO	NO
Lorenzini & C.	SI	SI
Mariter	NO	NO
Masol	SI	SI
Scotto & C.	NO	NO
Solvay Solution Italia	SI	SI
Terminal Calata Orlando	NO	SI
Terminal Darsena Toscana	SI	SI
Toscopetrol	NO	SI
Costiero Gas	SI	SI
Intercontainers Livorno	NO	NO

Tabella 14: Elenco soggetti contattati nel porto di Livorno

I soggetti intervistati hanno fornito i consumi annuali di combustibili ed energia elettrica. È emerso che, relativamente all'anno 2017, i consumi di combustibili tradizionali sono stati superiori a 42000 mc, mentre i consumi di energia elettrica sono stati di circa 34000 MWh.

I consumi di combustibili sono da attribuire ai mezzi da banchina posseduti dai vari terminalisti, agli autoveicoli, al riscaldamento degli edifici e ai vari processi produttivi, visto l'enorme eterogeneità delle sorgenti, non risulta ottimale l'utilizzo di coefficienti per stimare le emissioni di inquinanti, il calcolo della CO₂ è stato quindi eseguito utilizzando le formule chimiche dei vari combustibili e calcolando matematicamente la CO₂ che si forma durante il processo di ossidoriduzione. I combustibili utilizzati sono:

- Benzina = 2.1 mc;
- Gasolio = 2200 mc;
- GPL = 2066 mc;
- Gas naturale = 38150 smc.

Per quanto riguarda il consumo di energia elettrica, questa rientra nelle emissioni indirette, dal calcolo sono state escluse le quote autoprodotte tramite fonti rinnovabili. Per calcolare le emissioni di CO₂, CO, SO_x, NO_x e PM sono stati usati i coefficienti relativi al parco termoelettrico nazionale forniti da ISPRA relativi all'anno 2018. I risultati vengono riportati nella figura seguente, dalla quale si può osservare che le emissioni indirette prodotte dall'utilizzo dell'energia elettrica siano molto inferiori rispetto a quelle prodotte dai

combustibili, questo è dovuto sia alla maggiore efficienza del parco termoelettrico nazionale, sia alla quota sempre maggiore di fonti rinnovabili utilizzate.

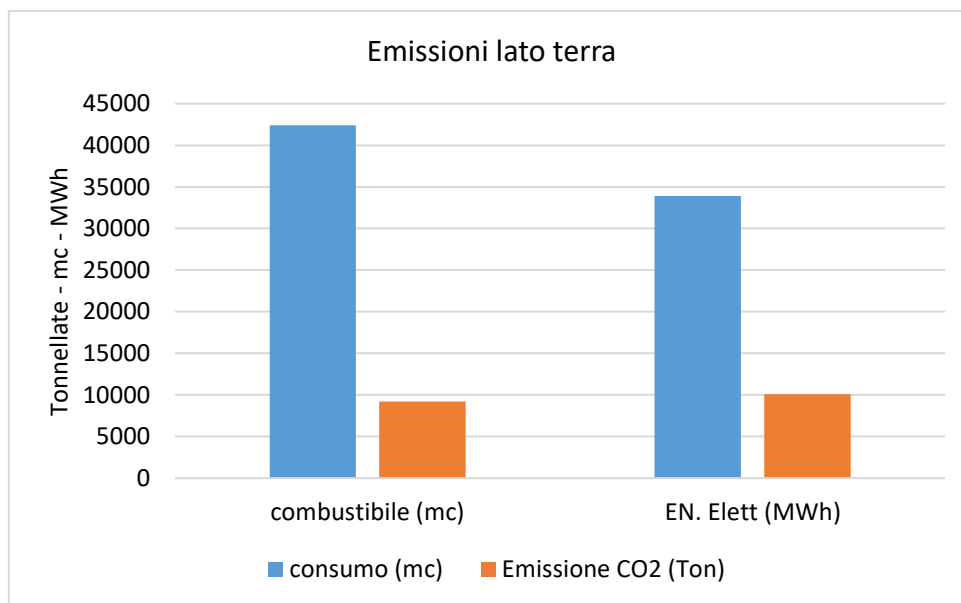


Figura 27: Confronto tra i consumi di combustibili ed energia elettrica e le relative emissioni di CO₂ (Livorno)

Per quanto riguarda le emissioni di CO₂, la quota prodotta direttamente dalla combustione di carburanti ammonta a circa 9000 tonnellate l'anno, mentre quella prodotta indirettamente dall'utilizzo di energia elettrica è di circa 10000 tonnellate.

Per i consumi di energia elettrica sono state calcolate anche le emissioni degli altri principali inquinanti quali NO_x, SO_x, CO e PM i quali risultati vengono riportati nella figura sottostante.

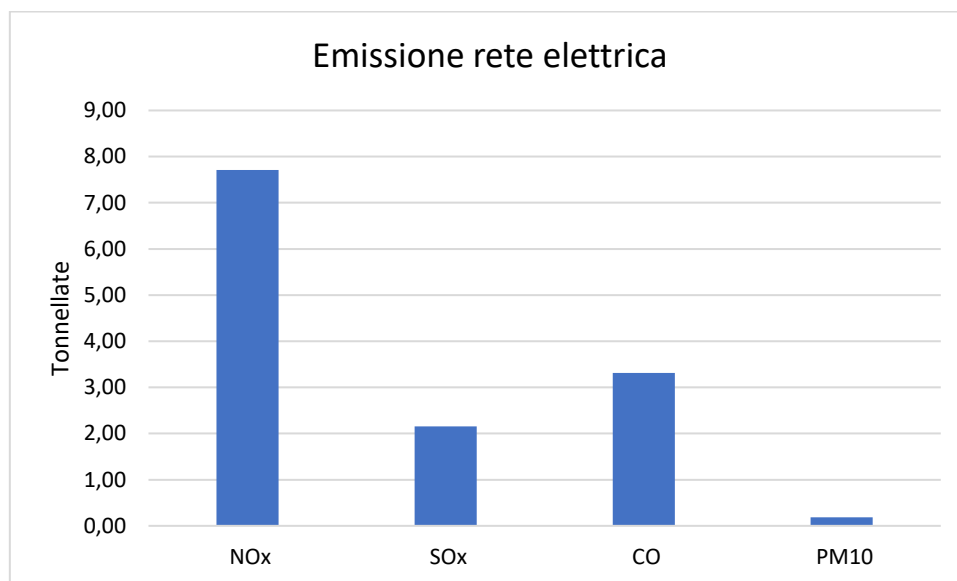


Figura 28: Emissioni di NOx, SOx, CO e PM prodotte indirettamente dal consumo di energia elettrica (Livorno)

Dalla *figura 28* si nota come il 57% delle emissioni sono composte da ossidi di azoto (7.7 tonnellate), l'ossido di carbonio rappresenta invece il 25% delle emissioni (3.3 tonnellate), molto più contenute risultano invece le emissioni di ossidi di zolfo (2 tonnellate) e del particolato (0.2 tonnellate).

7.1.2 Piombino

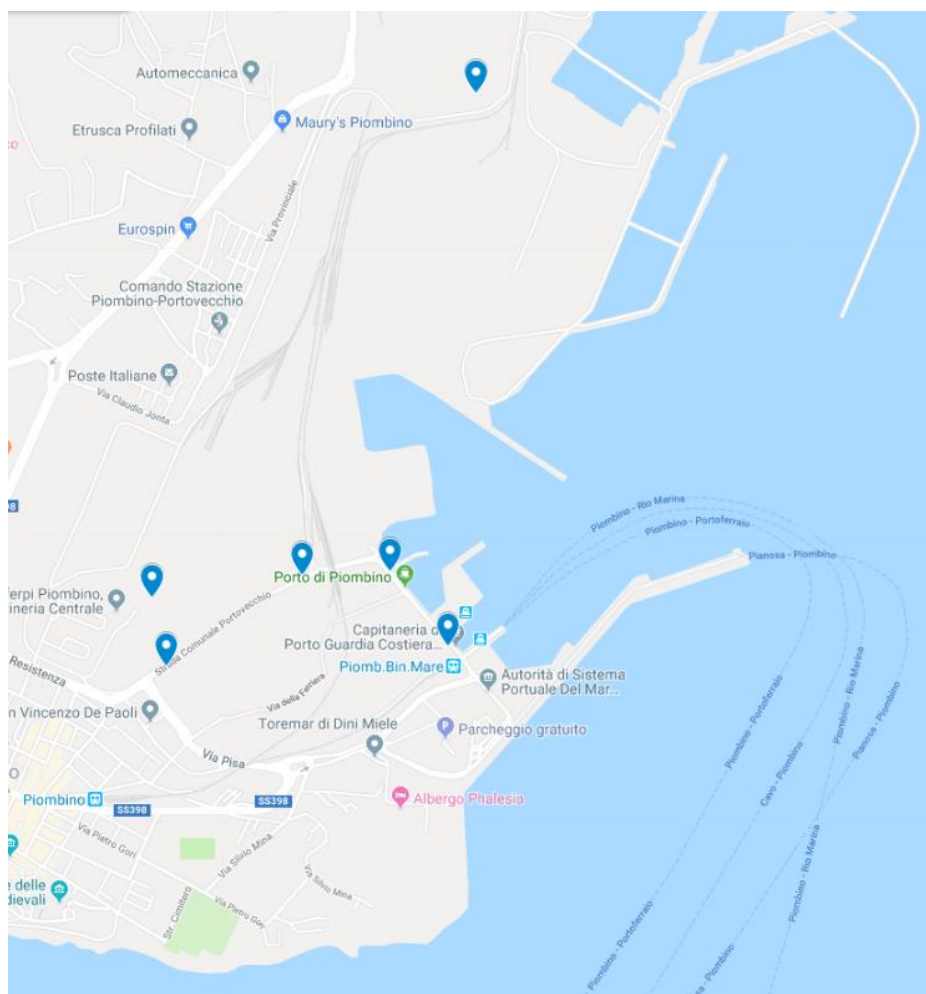


Figura 29: Mappa soggetti studiati nel porto di Piombino e nelle zone limitrofe

Per il porto di Piombino sono state individuate 4 società rientranti in questa categoria. La raccolta dei dati è ancora in corso, e lo stato attuale è riportato nella tabella sottostante.

Azienda	Consumi combustibili	Consumi elettrici
Capitaneria di Porto	SI	SI
S.Me.P.P.	NO	NO
La Magona d'Italia	NO	NO
Aferpi	SI	SI

Tabella 15: Elenco soggetti contattati nel porto di Piombino

I soggetti intervistati hanno fornito i consumi annuali di combustibili ed energia elettrica. È emerso che, relativamente all'anno 2017, i consumi di combustibili tradizionali sono stati di circa 5000 mc, mentre i consumi di energia elettrica sono stati di circa 68 MWh.

I combustibili consumati sono:

- Benzina = 2 mc;
- Gasolio = 88 mc
- Gas naturale 3311 smc.

Nella tabella sottostante vengono riportati i consumi di combustibili e di energia elettrica e le rispettive emissioni di CO₂.

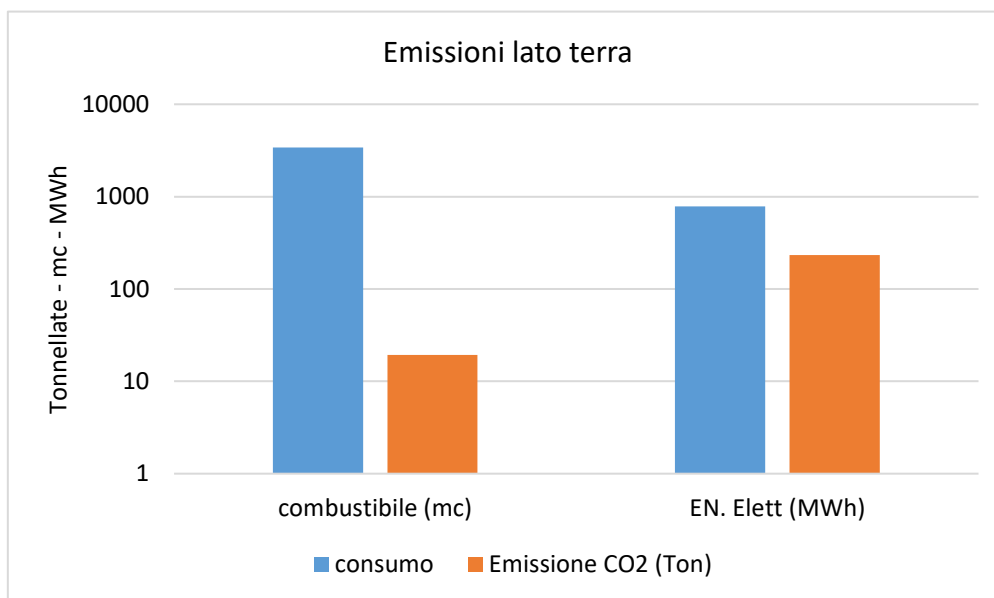


Figura 30: Confronto tra i consumi di combustibili ed energia elettrica e le relative emissioni di CO₂ (Piombino)

Per quanto riguarda le emissioni di CO₂, la quota prodotta direttamente dalla combustione di carburanti ammonta a circa 20 tonnellate l'anno, mentre quella prodotta indirettamente dall'utilizzo di energia elettrica è di circa 200 tonnellate.

Per le emissioni derivanti dall'utilizzo dell'energia elettrica, sono state stimate anche le emissioni di NO_x, SO_x, CO e PM i quali risultati vengono riportati nella figura sottostante.

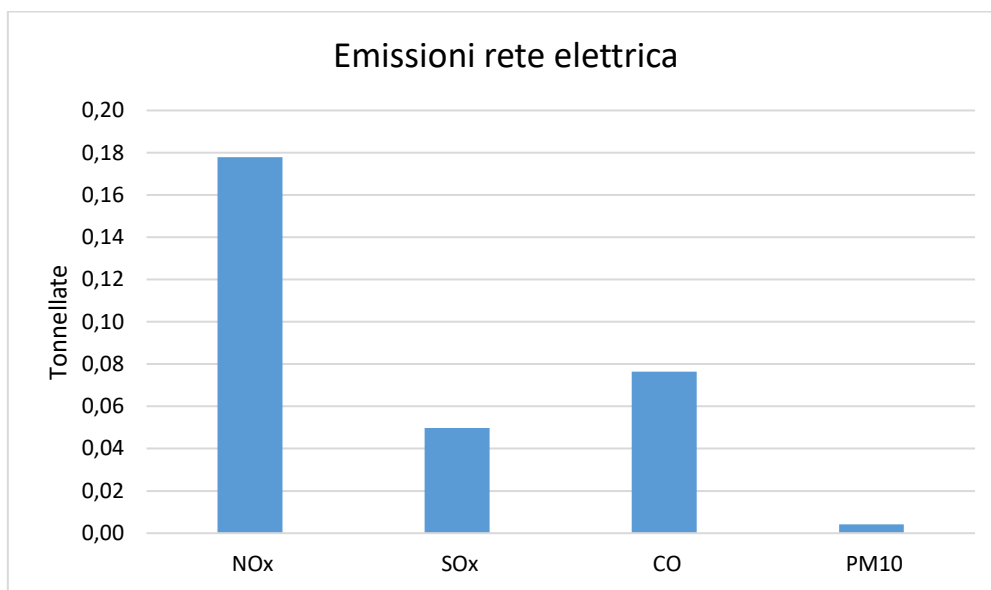


Figura 31: Emissioni di NOx, SOx, CO e PM prodotte indirettamente dal consumo di energia elettrica (Piombino)

7.2 Emissioni sorgenti non connesse ad AdSP-MTS

Per il calcolo della Carbon Footprint è stato tenuto conto anche dell'impatto ambientale delle industrie presenti sia all'interno dell'area portuale che esterne ad essa le cui emissioni non sono dipendenti da AdSP-MTS ma incidono in modo significativo sulle emissioni registrate all'interno delle aree portuali. A tale scopo sono state individuate tutte le industrie che presentano delle emissioni di inquinanti in atmosfera nelle zone porto-città sia di Livorno che di Piombino. Le industrie in oggetto sono state individuate con vari strumenti (15), (16), (17). In seguito, è stato verificato che le aziende fossero ancora attive nell'anno 2018 (18). Una volta individuate, sono state richieste le A.I.A. (Autorizzazione Integrata Ambientale), tramite le quali sono state calcolate le emissioni di inquinanti in atmosfera.

L'Autorizzazione Integrata Ambientale (AIA) è l'autorizzazione di cui necessitano alcune aziende per uniformarsi ai principi dettati dalla comunità europea tesi a prevenire e ridurre l'inquinamento. L'Autorità competente nel determinare le condizioni per il rilascio dell'AIA tiene conto dei seguenti principi generali:

- devono essere prese le opportune misure di prevenzione dell'inquinamento, applicando in particolare le migliori tecniche disponibili;
- non si devono verificare fenomeni di inquinamento significativi;
- deve essere evitata la produzione di rifiuti; in caso contrario i rifiuti devono essere recuperati o, se ciò non è economicamente o tecnicamente possibile, devono essere eliminati evitandone e riducendone l'impatto sull'ambiente;
- l'energia deve essere utilizzata in modo efficace;

- devono essere prese le misure necessarie per prevenire gli incidenti e limitarne le conseguenze;

7.2.1 Livorno

Per il porto di Livorno sono state individuate due industrie rientranti in questa categoria:

- AAMPS:
- Rari

La raccolta dei dati è stata svolta contattando le aziende e richiedendo, oltre alla compilazione di appositi questionari, le AIA relative agli impianti gestiti. La raccolta dei dati è ancora in corso, al momento i combustibili consumati risultano essere:

- metano = 324000 mc;
- gasolio = 763 mc;
- benzina = 34 mc.

Analizzando i consumi sono state stimate le emissioni, i cui risultati sono riportati nella figura seguente.

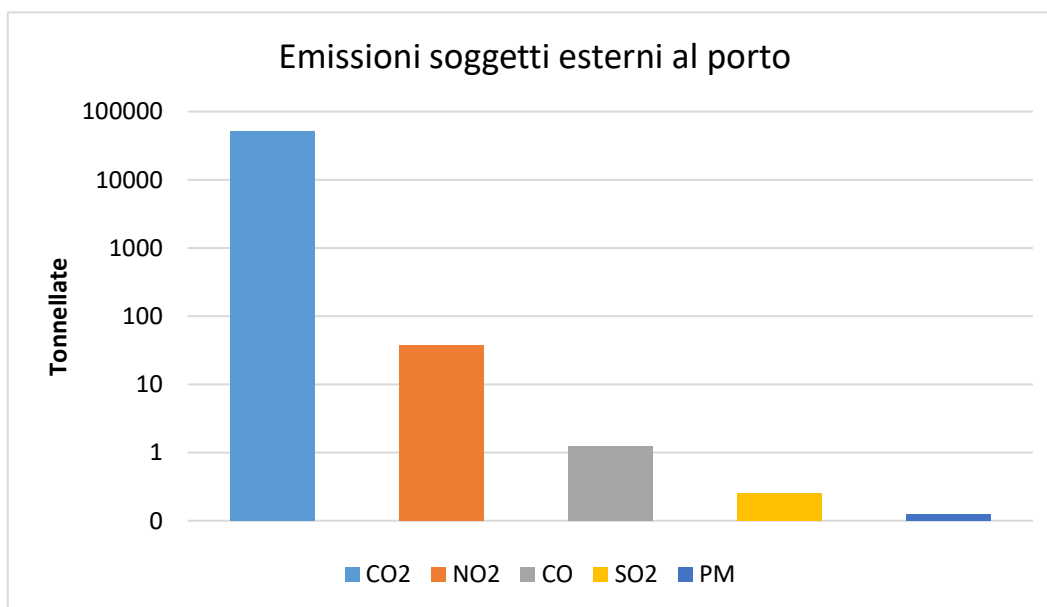


Figura 32: Emissioni di CO₂, NO_x, SO_x, CO e PM prodotte da soggetti esterni al porto di Livorno



Come sottolineato in precedenza queste emissioni non sono di competenza dell'AdSP-MTS, ma devono comunque essere quantificate in quanto le sorgenti sono localizzate in zone limitrofe alle aree di competenza dell'AdSP-MTS e posso quindi andare ad interferire con le misurazioni delle emissioni che verranno realizzate in seguito tramite sensori ambientali per convalidare i modelli matematici.

7.2.2 Piombino

Per il porto di Piombino sono state individuate 2 industrie:

- Centrale elettrica SnowStorm
- Arcelormittal

La metodologia seguita è la stessa descritta in precedenza. Anche in questo caso la raccolta dei dati è ancora in corso, dallo studio delle AIA al momento i combustibili consumati risultano essere:

- Gas naturale = 111 milioni di mc/anno;
- gas siderurgici = 232 milioni di mc/anno.

Utilizzando i dati contenuti nelle AIA e quelli forniti da ISPRA per le emissioni delle centrali elettriche (19) sono state calcolate le emissioni di CO₂, NO_x, SO_x, PM e CO, i quali risultati sono riportati nella figura seguente

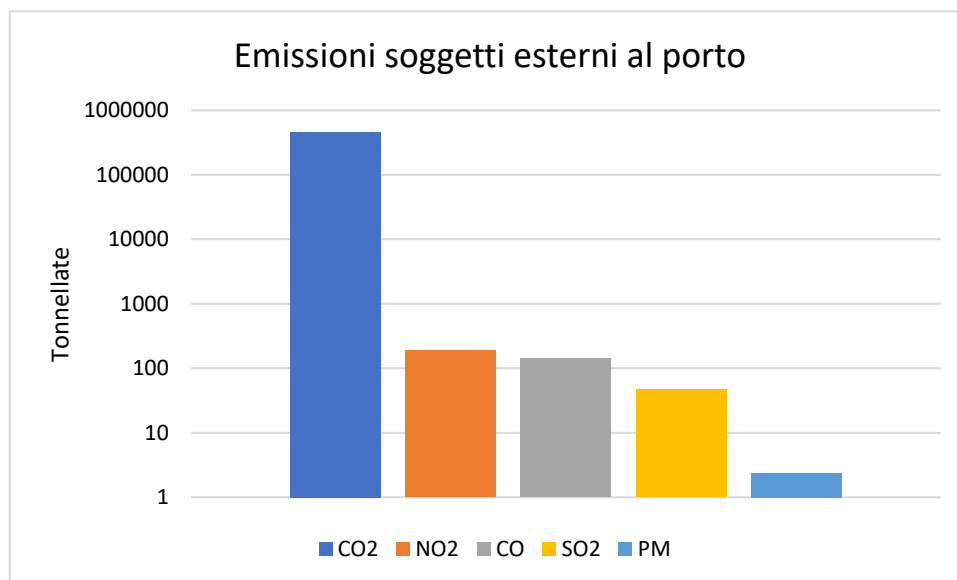


Figura 33: Emissioni di CO₂, NO_x, SO_x, CO e PM prodotte da soggetti esterni al porto di Piombino

8. Conclusioni

Complessivamente si stima che dal 01/05/2018 al 02/05/2019 nel porto di Livorno le emissioni prodotte dalle attività connesse ai trasporti marittimi di competenza della AdSP-MTS oggetto di studio sono state circa 150.000 tonnellate. Nella figura sottostante vengono riportate le ripartizioni delle varie emissioni.

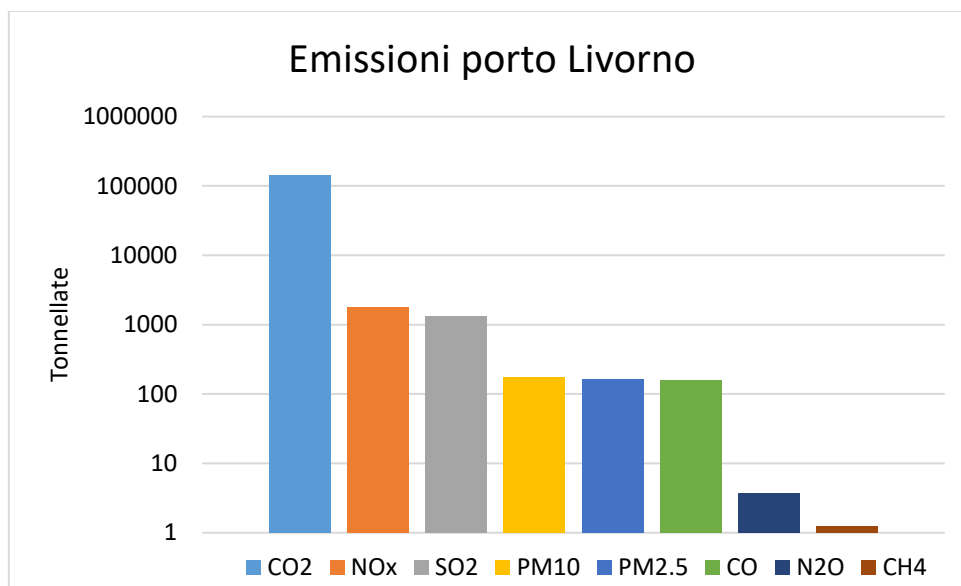


Figura 34: Emissioni totali prodotte dal porto di Livorno

Come si può notare l'anidride carbonica rappresenta oltre il 97% di tutte le emissioni prodotte. Più nel dettaglio circa il 56% di tutta la CO2 è stata prodotta direttamente dalle navi durante i movimenti portuali, il 37% deriva dalle attività industriali svolte nelle aree portuali, mentre il restante 7% è composta da emissioni indirette derivanti dal consumo di energia elettrica prodotta da aree esterne a quelle portuali.

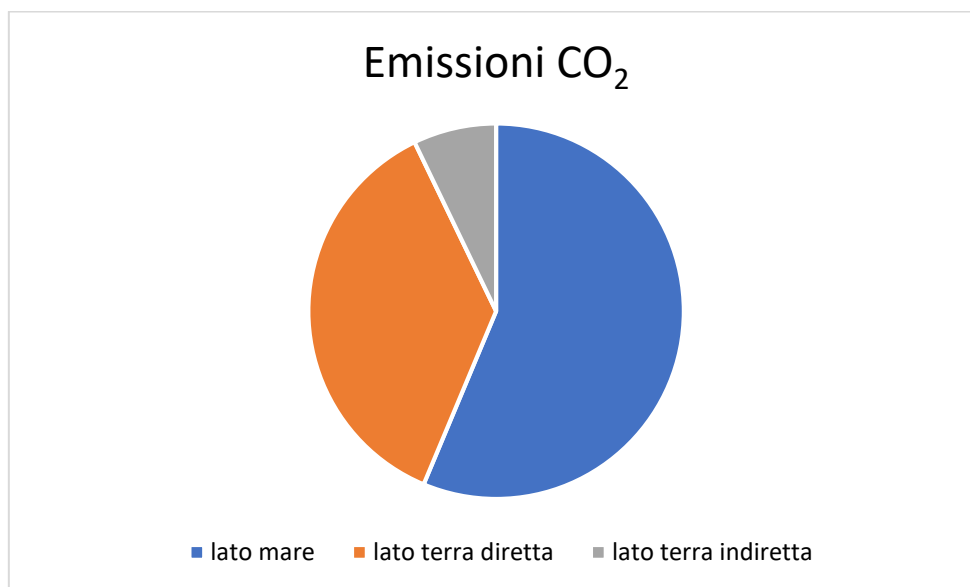


Figura 35: Ripartizione delle emissioni di CO₂ prodotte dal porto di Livorno

Per quanto riguarda il porto di Piombino si stima che nel periodo temporale di riferimento le emissioni prodotte dalle attività connesse ai trasporti marittimi di competenza della AdSP-MTS oggetto di studio sono state circa 14.000 tonnellate. Nella figura sottostante vengono riportate le ripartizioni delle varie emissioni.

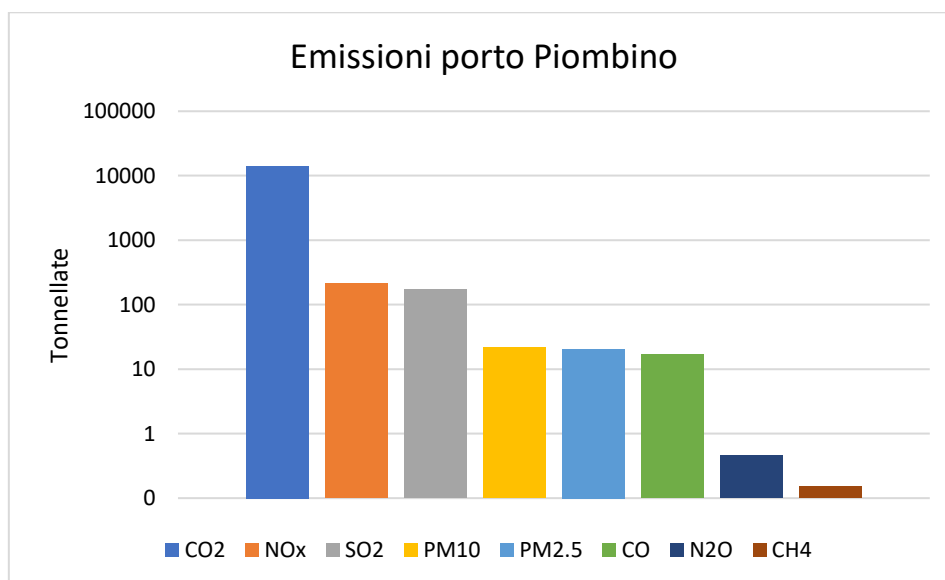


Figura 36: Emissioni totali prodotte del porto di Piombino



Come si può notare l'anidride carbonica rappresenta oltre il 96% di tutte le emissioni prodotte. Più nel dettaglio circa il 74% di tutta la CO₂ è stata prodotta direttamente dalle navi durante i movimenti portuali, il 24% deriva dalle attività industriali svolte nelle aree portuali, mentre il restante 2% è composta da emissioni indirette derivanti dal consumo di energia elettrica prodotta da aree esterne a quelle portuali

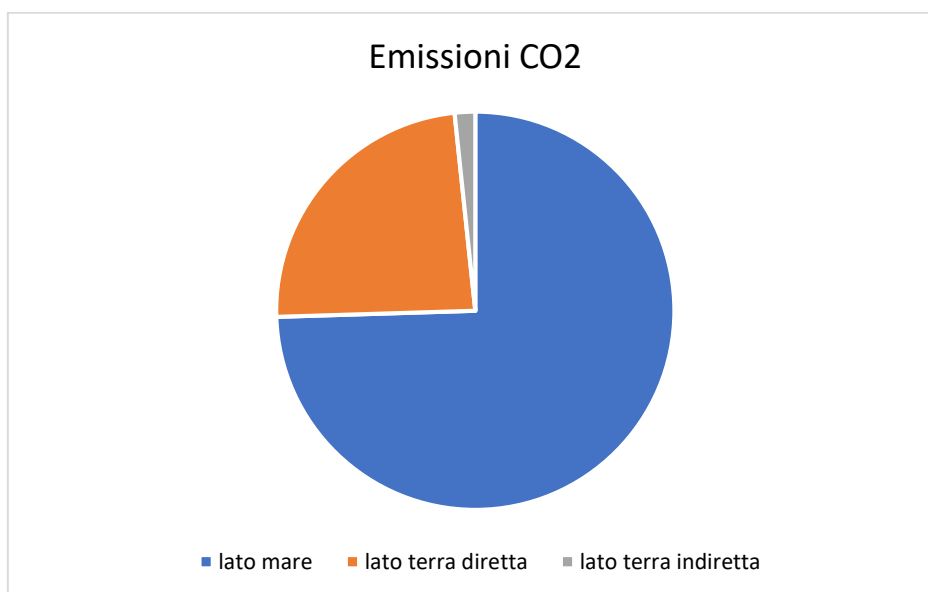


Figura 37: Emissioni totali prodotte dal porto di Piombino



Bibliografia

1. **Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare.** *Linee Guida per la redazione dei Documenti di Pianificazione Energetico Ambientale dei Sistemi Portuali.* 2018.
2. **Ente Italiano di Normazione.** *Norma UNI EN ISO 14064.*
3. **AAB s.p.a.** *Quaderni di applicazione tecnica N.12 Generalità sui sistemi navali e sulle installazioni di bordo.*
4. **International Maritime Organization.** *Port Emissions Toolkit Guide No.1: Assessment of port emissions.* 2018.
5. **ATTAR AMIR.** *Chemistry, Thennodynamics, and Kinetics of Sulfur in Coal Gas Reactions:A Review.* 1978.
6. **Intergovernmental Panel on Climate Change.** *Climate Change 2013: The Physical Science Basis.* 2013.
7. **Facile.it.** Assicurazioni. *Sito Web Facile.it.* [Online] 2016.
<https://www.facile.it/assicurazioni/news/analisi-di-facile-it-sull-uso-dell-auto-in-italia.html>.
8. **Transport & Environment.** *One Corporation to Pollute Them All.* 2019.
9. **Autopromotec.** Blog. *Sito Web Autopromotec.* [Online] 2018.
<https://www.autopromotec.com/it/auto-emissioni/a314>.
10. **Automobile Club d'Italia.** Autorizzato 2018. *Sito Web ACI.* [Online] 2018.
<http://www.aci.it/laci/studi-e-ricerche/dati-e-statistiche/autoritratto/autoritratto-2018.html>.
11. **ISPRA.** *Rete del Sistema Informativo Nazionale Ambientale.* [Online] 2018.
<http://www.sinanet.isprambiente.it/it/sia-ispra/serie-storiche-emissioni/fattori-di-emissione-per-le-sorgenti-di-combustione-stazionarie-in-italia/view>.
12. **ICCT.** *Assessment of the fuel cycle impact of liquefied natural gas as used in international shipping.* 2013.
13. **Ricardo.** *The role of natural gas and biomethane in the transport sector.* 2016.
14. **Giorgio Trincas.** *Fondamenti ed applicazioni di propulsione navale.* 2010.
15. **Ministero dell'ambiente e dalla tutela del territorio e del mare.** *va.minambiente.* [Online]
<http://www.va.minambiente.it>.
16. **Sistema Nazionale per la Protezione dell'Ambiente.** *Rapporto controlli ambientali SNPA AIA/Seveso Edizione2017.* 2018.
17. **Provincia di Livorno.** Ambiente. *provincia.livorno.* [Online]
<http://www.provincia.livorno.it/new/spawdocs/ambiente/>.



18. **Camera di Commercio. Telemaco.** [Online]
<https://login.infocamere.it/eacologin/login.action>.

19. **ISPRA.** Rete del Sistema Informativo Nazionale Ambientale. *SINA* . [Online] 2018.
<http://www.sinanet.isprambiente.it/it/sia-ispra/serie-storiche-emissioni/fattori-di-emissione-per-la-produzione-ed-il-consumo-di-energia-elettrica-in-italia/view>.