

ATTIVITA T.3.3.2

Linee di navigazione transfrontaliere

Prodotto T.3.3.2

Linee di navigazione transfrontaliere

Partner Responsabile: AtmoSud

L'obiettivo di questo deliverable è stimare l'impatto delle tecnologie di riduzione delle emissioni, non più a livello locale (fasi di banchina e di manovra), ma nella fase offshore. Questa fase di navigazione costituisce la maggior parte del viaggio della nave. Le linee di navigazione su cui si stimano le riduzioni delle emissioni sono riportate nella Figura 1. Le soluzioni di riduzione delle emissioni su cui si concentra il presente documento sono l'uso di gas naturale liquefatto (GNL), filtri antiparticolato (FAP) e scrubber.

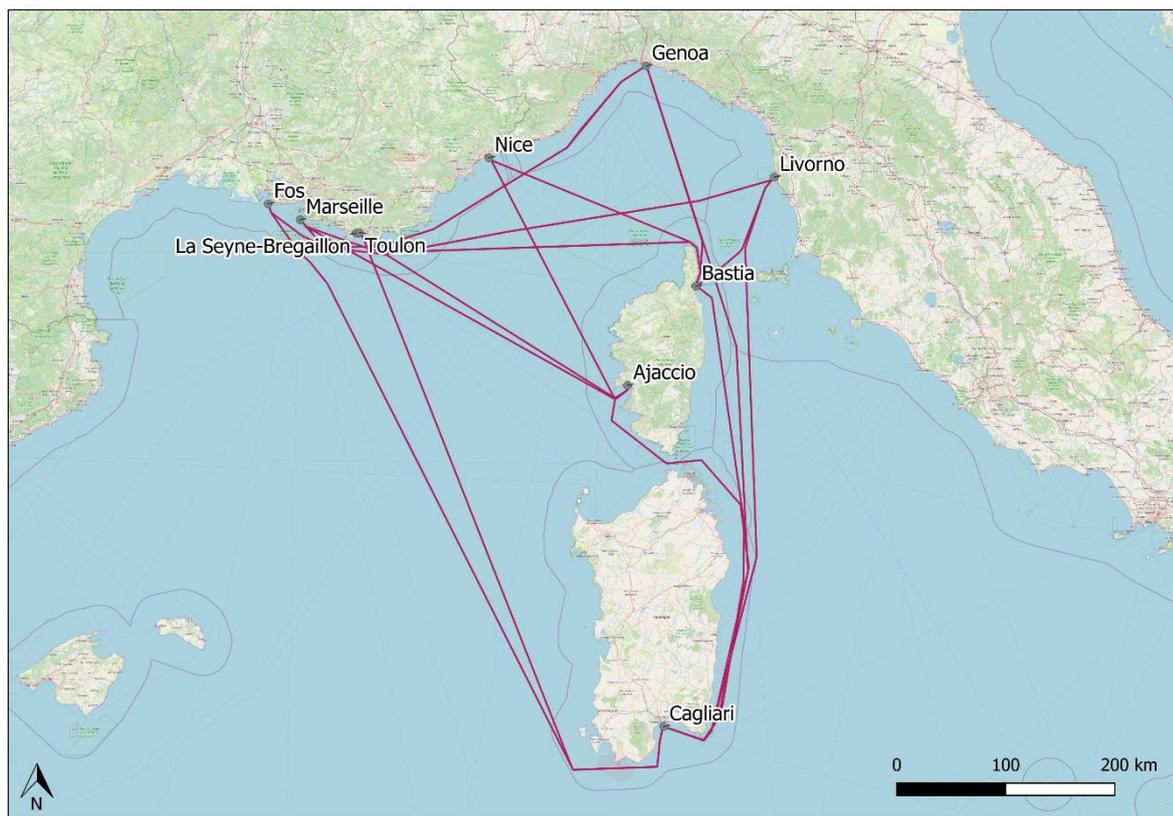


Figura 1 : Mappe delle linee di navigazione utilizzate per la valutazione delle tecnologie di riduzione delle emissioni

1. Calcolo delle emissioni di base

Per stimare le riduzioni generate dalle diverse tecnologie di riduzione delle emissioni, è necessario innanzitutto calcolare le emissioni di una nave che utilizza il Bunker Fuel Oil (BFO) su una delle rotte. L'esempio scelto come riferimento è una nave da carico e passeggeri che effettua il tragitto Marsiglia-Bastia. Le emissioni sono date dalla formula :

$$E_i = C F_i$$

dove

- E_i è l'emissione dell'inquinante i [kg],
- C è il consumo energetico dell'imbarcazione [J],
- F_i è il fattore di emissione (FE) specifico dell'inquinante i [kg/J].

Il consumo energetico delle navi è calcolato in base alle raccomandazioni della guida metodologica per la preparazione degli inventari della LCSQA¹ (guida PCIT2²). È dato da :

$$C = G p$$

dove

- G è il consumo di carburante [g olio combustibile],
- p è il potere calorifico inferiore del combustibile utilizzato [J/g olio combustibile].

Per il BFO, $p = 40,0$ J/g di olio combustibile. Il consumo di carburante dipende da diversi fattori, in particolare dalla stazza lorda, che caratterizza le dimensioni della nave. La nave scelta come riferimento, con una stazza lorda di 42180, consuma circa 44 tonnellate di olio combustibile nel tragitto Marsiglia-Bastia, ovvero un consumo energetico C di $2,185 \times 10^9$ J. Questo consumo energetico viene convertito in quantità di inquinanti utilizzando i fattori di emissione F_i del database OMINEA del CITEPA³.

Tabella 1 : FE della BFO, elenco delle linee di navigazione tracciate nella Figura 1, distanze corrispondenti e quantità di inquinanti e gas serra emessi su queste rotte da una nave merci e passeggeri che opera sulla BFO.

	NO _x	SO _x	PM10	PM2.5	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂ eq
Fattori di emissione BFO	1982,5 [g/GJ]	1360 [g/GJ]	147,2 5 [g/GJ]	139,5 [g/GJ]	78 [kg/G J]	7,5 [g/GJ]	2,0 [g/GJ]	78,74 [kg/G J]

¹ Laboratorio centrale di monitoraggio della qualità dell'aria (FR)

² Guida metodologica per l'elaborazione degli inventari territoriali delle emissioni in atmosfera (inquinanti atmosferici e gas a effetto serra), Ministero della Transizione Ecologica e della Solidarietà (FR), Direzione Generale per l'Energia e il Clima, Ufficio Qualità dell'Aria, versione n°2, giugno 2018.

³ Centro interprofessionale tecnico di studi sull'inquinamento atmosferico (FR) : <https://www.citepa.org/fr/>

Viaggi	Distanza [km]	NO _x [kg]	SO _x [kg]	PM10 [kg]	PM2.5 [kg]	CO ₂ [t]	CH ₄ [kg]	N ₂ O [kg]	CO ₂ eq [t]
La Seyne-Cagliari	629	5323	136	97	92	215	20	5	217
La Seyne-Genova	299	2528	64	46	43	102	10	3	103
La Seyne-Livorno	366	3092	79	56	53	125	12	3	126
Toulon-Ajaccio	280	2371	60	43	41	96	9	2	97
Toulon-Bastia	333	2812	72	51	48	114	11	3	115
Marseille-Ajaccio	332	2810	72	51	48	114	11	3	115
Marseille-Bastia	384	3247	83	59	56	131	12	3	133
Marseille-Livorno	421	3563	91	65	61	144	14	4	145
Fos sur Mer-Cagliari	688	5820	148	106	100	235	22	6	238
Fos sur Mer-Genova	388	3281	84	60	56	133	13	3	134
Nice-Bastia	229	1940	49	35	33	78	7	2	79
Nice-Ajaccio	252	2133	54	39	37	86	8	2	87
Bastia-Cagliari	120	1011	26	18	17	41	4	1	41
Bastia-Livorno	196	1660	42	30	29	67	6	2	68
Bastia-Genova	458	3870	99	70	67	156	15	4	158
Cagliari-Livorno	549	4647	119	84	80	188	18	5	190
Cagliari-Genova	648	5479	140	99	94	222	21	6	224
Ajaccio-Cagliari	437	3698	94	67	64	150	14	4	151

Le quantità di NO_x, SO_x, PM e dei gas a effetto serra (GES) CO₂, CH₄ e N₂O emesse dalla nave sulla rotta Marsiglia-Bastia sono riportate nella Tabella 1. Le quantità che la stessa nave emetterebbe sulle rotte marittime illustrate nella Figura 1 sono dedotte applicando la regola di proporzionalità alle distanze di queste rotte. Le distanze di queste rotte e le masse di inquinanti emesse su queste altre rotte sono raggruppate nella stessa tabella.

L'impatto cumulativo dei gas serra CO₂, CH₄ e N₂O sul riscaldamento globale è stimato calcolando il FE di CO₂ equivalente a questi tre gas serra.

Questo si ottiene secondo la formula

$$F_{CO_2eq} = \alpha_{CO_2} F_{CO_2} + \alpha_{CH_4} F_{CH_4} + \alpha_{N_2O} F_{N_2O}$$

dove α_i è il potenziale di riscaldamento globale del gas i , rispetto al potere riscaldante della stessa massa di CO_2 in un periodo di 100 anni. Per definizione, $\alpha_{CO_2} = 1$; i valori utilizzati per gli altri gas, $\alpha_{CH_4} = 28$ e $\alpha_{N_2O} = 265$, sono tratti dal Quinto Rapporto IPCC.

2. Impatto dell'utilizzo del GNL

Le emissioni di una nave con le stesse caratteristiche della nave di riferimento utilizzata nella sezione precedente, questa volta alimentata a GNL, sono calcolate moltiplicando il consumo energetico G stimato in precedenza per il potere calorifico netto del GNL, che ammonta a $p = 49,6$ J/g di olio combustibile, e per i fattori di emissione per il GNL ricavati dal *Third IMO GHG Study 2020*⁴. Questo rapporto distingue tra diversi tipi di motori a GNL :

- GNL-Otto SS : motore a due tempi, a bassa velocità, a doppia alimentazione, funzionante a ciclo Otto ;
- GNL-Otto MS : motore a quattro tempi, a media velocità, a doppia alimentazione, funzionante a ciclo Otto ;
- GNL-Diesel : motore a due tempi, a bassa velocità, a doppia alimentazione, funzionante con ciclo Diesel ;
- LBSI : motore monocarburante, a quattro tempi, a media velocità, a iniezione a bassa pressione, che accende la miscela aria/gas nel cilindro con una scintilla.

a. Inquinanti con impatto sulla salute

Per i motori che funzionano con il ciclo Diesel, di cui il motore GNL-Diesel fa parte, il FE_{NOx} varia in base alla velocità del motore e al suo anno di fabbricazione (Tier). Il rapporto *Third IMO GHG Study 2020* fornisce valori per tre generazioni di motori e tre velocità del motore. Questi valori sono riassunti nella Tabella 2, insieme alla loro variazione percentuale, indicata con Δ , rispetto al FE_{NOx} del BFO mostrato nella Tabella 1. Le navi GNL-Diesel più vecchie emettono più NOx rispetto alle navi BFO, ma le nuove generazioni di motori GNL-Diesel hanno prestazioni migliori. Allo stesso tempo, più lento è il motore, più alte sono le emissioni di NOx . Considerando la velocità più elevata, rappresentativa della fase di "viaggio", l'abbattimento raggiunge il 72% per i motori di generazione Tier 3. Per gli altri tipi di navi a GNL, le emissioni di NOx sono più elevate. Per gli altri tipi di navi a GNL, si ipotizza un FE_{NOx} costante, da cui si ricava un abbattimento dell'82%.

La Tabella 3 raggruppa gli FE per SOx e PM. Il valore FE_{SOx} dipende solo dal contenuto di zolfo, quindi è lo stesso per tutti i tipi di motori a GNL. Il valore FE_{PM10} è più basso per i motori GNL-Diesel rispetto agli altri tipi di motori a GNL. Il $FE_{PM2.5}$ è stimato ipotizzando che sia equivalente al 92% del FE_{PM10} ⁵. Come nella Tabella 2, viene mostrata la variazione percentuale degli FE rispetto al caso BFO. L'abbattimento raggiunge quasi il 100% sia per SOx che per PM.

⁴ International Maritime Organization (IMO), Fourth IMO Greenhouse Gas Study, *Full Report, London, 2020*.

⁵ EPA, 2019. Current Methodologies in Preparing Mobile Source Port-Related Emission Inventories, Final report, Fairfax: ICF ; EPA.

Tabella 2 : FE_{NO_x} [g/GJ] delle navi alimentate a GNL dal rapporto Third IMO GHG Study 2020 e variazioni percentuali rispetto ai FE_{NO_x} delle navi alimentate a BFO (Tabella 1). I FE_{NO_x} delle navi alimentate a GNL-Diesel differiscono in base alla velocità operativa e all'anno di costruzione. La variabile n indica la velocità del motore in giri al minuto. I motori diesel classificati come Tier 1, Tier 2 e Tier 3 sono stati costruiti rispettivamente dal 1° gennaio 2000, 2011 e 2016.

		NO _x								
		n < 130		130 ≤ n < 2000		n ≥ 2000		∀ n		
		FE	Δ%	FE	Δ%	FE	Δ%	FE	Δ%	
GNL-Diesel	Tier 1 2000	-	4722,22	+138,20	3606,67	+81,93	2722,22	+37,31		
	Tier 2 2011	-	4000,00	+101,77	2926,67	+47,63	2138,89	+7,89		
	Tier 3 2016	-	944,44	-52,36	721,39	-63,61	555,56	-71,98		
Altre navi GNL									361,11	-81,79

Tabella 3 : FE di SO_x e PM [g/GJ] per le navi alimentate a GNL dal rapporto Third IMO GHG Study 2020 e variazioni percentuali rispetto agli FE per le navi alimentate a BFO (prima riga).

	SO _x		PM10		PM2.5	
	FE [g/GJ]	Δ%	FE [g/GJ]	Δ%	FE [g/GJ]	Δ%
Navi BFO	1360	-	147,25	-	139,5	-
GNL-Diesel	32,68	-97,60	2,78	-98,11	2,56	-98,17
Altre navi GNL			5,56	-96,23	5,11	-96,34

Tabella 4 : Risparmio di NOx, SOx e PM10 sulle rotte indicate nella Figura 1 grazie all'utilizzo del GNL.

		NOx		SOx	PM10	
		GNL-Diesel	GNL-autres		GNL-Diesel	GNL-altri
Tasso di abbattimento (%)		-71,98	-81,79	-97,60	-98,11	-96,23
Viaggi	Distanza [km]	NOx [kg]		SOx [kg]	PM10 [kg]	
		GNL-Diesel	GNL-autres		GNL-Diesel	GNL-altri
La Seyne-Cagliari	629	-3831	-4354	-133	-95	-93
La Seyne-Genova	299	-1820	-2068	-63	-45	-44
La Seyne-Livorno	366	-2226	-2529	-77	-55	-54
Toulon-Ajaccio	280	-1707	-1939	-59	-42	-41
Toulon-Bastia	333	-2024	-2300	-70	-50	-49
Marseille-Ajaccio	332	-2023	-2298	-70	-50	-49
Marseille-Bastia	384	-2337	-2656	-81	-58	-57
Marseille-Livorno	421	-2564	-2914	-89	-63	-62
Fos sur Mer-Cagliari	688	-4189	-4760	-145	-104	-102
Fos sur Mer-Genova	388	-2362	-2684	-82	-58	-57
Nice-Bastia	229	-1396	-1586	-48	-35	-34
Nice-Ajaccio	252	-1535	-1744	-53	-38	-37
Bastia-Cagliari	120	-728	-827	-25	-18	-18
Bastia-Livorno	196	-1195	-1357	-41	-30	-29
Bastia-Genova	458	-2785	-3165	-96	-69	-68
Cagliari-Livorno	549	-3345	-3801	-116	-83	-81
Cagliari-Genova	648	-3944	-4482	-136	-98	-96
Ajaccio-Cagliari	437	-2662	-3025	-92	-66	-65

Le quantità di NO_x, SO_x e PM₁₀ risparmiate sulle rotte mostrate nella Figura 1 grazie all'utilizzo del GNL sono riassunte nella Tabella 4. Per le navi GNL-Diesel il tasso di abbattimento degli NO_x utilizzato è quello del regime di velocità più elevato, mentre gli altri tassi sono più rappresentativi delle fasi di banchina e di manovra.

b. Gas a effetto serra

Le FE dei gas serra CO₂, CH₄ e N₂O sono riassunte nella Tabella 5. Si presume che le emissioni di CH₄ varino con il carico del motore, pertanto i valori presentati sono indicativi.

Tabella 5 : FE dei GES per le navi alimentate a GNL dal rapporto Third IMO GHG Study 2020, FE di CO₂ equivalente e variazione percentuale rispetto ai FE calcolato per le navi alimentate a BFO (vedi prima riga).

	CO ₂		CH ₄		N ₂ O		CO ₂ equivalente	
	FE [g/GJ]	Δ%	FE [g/GJ]	Δ%	FE [g/GJ]	Δ%	FE [g/GJ]	Δ%
BFO	78000		7,50		2,00		78740	
GNL-Otto SS	55443	-28,92	694,44	+9159,26	5,56	+117,78	76360	-3,02
GNL-Otto MS			1527,78	+20270,37			99694	+26,61
LBSI			1138,89	+15085,19			88805	+12,78
GNL-Diesel			55,56	+640,74			8,33	+316,67

Il confronto degli FE per le navi BFO e GNL mostra che le navi GNL emettono più CH₄ e N₂O rispetto alle navi BFO, ma meno CO₂. Le emissioni aggiuntive di CH₄ variano a seconda del tipo di motore, con un valore EF di CH₄ che varia da 56 g/GJ per il motore GNL-Diesel a 1528 g/GJ per il motore GNL-Otto MS. L'impatto di queste variazioni sul riscaldamento globale è stato quantificato confrontando il FE di CO₂ equivalente delle quattro categorie di motori con quello calcolato per le navi BFO. Per i motori GNL-Otto MS e LBSI si osserva un aumento delle emissioni di CO₂ equivalente, poiché il guadagno di CO₂ non compensa l'aumento delle emissioni di CH₄ e N₂O. Il motore GNL-Otto SS mostra prestazioni paragonabili a quelle del BFO, mentre il motore GNL-Diesel riduce le emissioni di CO₂ equivalente di quasi il 25%.

Per misurare l'impatto di queste variazioni, le quantità di CO₂ equivalente risparmiate o aggiunte dall'uso del GNL, calcolate sulla rotta Marsiglia-Bastia per i quattro tipi di motore, sono presentate nella Tabella 6, con le relative conversioni in termini di chilometri percorsi da un'auto e di anni di riscaldamento, elettrico o a gasolio, di una casa o di un appartamento⁶.

⁶ Source : <https://datagir.ademe.fr/apps/impact-co2/>

Tabella 6 : Guadagno/aumento di CO₂ equivalente calcolato sul tragitto Marsiglia-Bastia per i quattro tipi di motore a GNL, espresso in massa (kg) ed equivalenza in chilometri percorsi da un'auto e numero di anni di riscaldamento, elettrico e a gasolio, in una casa o appartamento.

	GNL-Otto SS	GNL-Otto MS	LBSI	GNL-Diesel
Guadagno/aumento di CO₂ equivalente (kg)	-4006	35270	16941	-32878
Eq km in auto (motore a combustione)	-18400	162100	77900	-151100
Eq anni di riscaldamento elettrico (appart)	-17	151	73	-141
Eq anni di riscaldamento elettrico (casa)	-6	52	25	-48
Eq anni di riscaldamento a gasolio (appart)	-1,3	11	5	-11
Eq anni di riscaldamento a gasolio (casa)	-0,7	6	2,9	-6

3. Impatto dell'uso di FAP

Uno studio sull'efficienza di FAP è stato condotto da *La Méridionale*⁷, una compagnia di navigazione pioniera nell'applicazione di questa tecnologia al settore navale. Le percentuali di abbattimento misurate per NO_x, SO_x, PM e CO₂ sono elencate nella Tabella 7, insieme ai guadagni di emissioni calcolati per le diverse linee di navigazione presentati nella Figura 1.

Tabella 7 : Tassi di abbattimento delle emissioni di NO_x, SO_x, PM e CO₂ misurati nello studio condotto da La Méridionale e le masse di inquinanti non emesse calcolate per ciascuno dei percorsi presentati nella Figura 1.

		NO _x	SO _x	PM		CO ₂
Tasso di abbattimento (%)		-10,7	-90,72	-99,9		-0,5
Viaggi	Distanza [km]	NO _x [kg]	SO _x [kg]	PM10 [kg]	PM2.5 [kg]	CO ₂ [kg]
La Seyne-Cagliari	629	-570	-123	-97	-91	-1076
La Seyne-Genova	299	-271	-59	-46	-43	-511
La Seyne-Livorno	366	-331	-72	-56	-53	-625
Toulon-Ajaccio	280	-254	-55	-43	-41	-479
Toulon-Bastia	333	-301	-65	-51	-48	-569
Marseille-Ajaccio	332	-301	-65	-51	-48	-568
Marseille-Bastia	384	-347	-75	-59	-56	-657

⁷ Christophe SEGUINOT (La Méridionale). 2020. Projet TEST FAP : Test d'un système de filtre à particules sur les navires de fortes puissances. 50 pages.

Marseille-Livorno	421	-381	-82	-65	-61	-720
Fos sur Mer-Cagliari	688	-623	-135	-106	-100	-1177
Fos sur Mer-Genova	388	-351	-76	-59	-56	-663
Nice-Bastia	229	-208	-45	-35	-33	-392
Nice-Ajaccio	252	-228	-49	-39	-37	-431
Bastia-Cagliari	120	-108	-23	-18	-17	-204
Bastia-Livorno	196	-178	-38	-30	-29	-336
Bastia-Genova	458	-414	-90	-70	-66	-782
Cagliari-Livorno	549	-497	-108	-84	-80	-940
Cagliari-Genova	648	-586	-127	-99	-94	-1108
Ajaccio-Cagliari	437	-396	-86	-67	-64	-748

Tabella 8 : Il risparmio di CO₂ ottenuto dai FAP, calcolato sul tragitto Marsiglia-Bastia, espresso in massa (kg) ed equivalente in chilometri percorsi da un'auto e numero di anni di riscaldamento, elettrico e a gasolio, in una casa o appartamento.

	FAP
Guadagno di CO₂ (kg)	-657
Eq km in auto (motore a combustione)	3 000
Eq anni di riscaldamento elettrico (appart)	2,8
Eq anni di riscaldamento elettrico (casa)	1
Eq anni di riscaldamento a gasolio (appart)	0,2
Eq anni di riscaldamento a gasolio (casa)	0,1

In questo studio, i FAP mostrano un tasso di filtrazione di quasi il 100% sul PM e sono anche efficaci nel ridurre le emissioni di SO_x. Il loro impatto rimane moderato sugli NO_x e trascurabile sulla CO₂. Le equivalenze presentate nella Tabella 6 per il GNL sono calcolate per i FAP nella Tabella 8 per confronto. Considerando il basso abbattimento di CO₂ misurato per i FAP, si presume che l'abbattimento di CH₄ e N₂O sia trascurabile, quindi l'abbattimento equivalente di CO₂ sia simile all'abbattimento di CO₂ nel caso dei FAP, vale a dire che le cifre in entrambe le tabelle possono essere confrontate.

4. Impatto dell'uso di scrubber

Gli studi sull'efficienza degli scrubber dimostrano che sono una tecnologia molto efficiente per ridurre le emissioni di SO₂ derivanti dall'uso di olio combustibile pesante. Gli studi di *Winnes et al, 2020* e *Yang et al, 2021* indicano un'efficienza compresa tra il 97% e il 99%, indipendentemente dal carico del motore. In *Winnes et al, 2020*, le emissioni misurate con uno scrubber e un combustibile al 2,77% sono inferiori a quelle misurate con un combustibile allo 0,1%, mentre *Yang et al, 2021* indicano che le emissioni residue dopo il trattamento con scrubber sono ancora tre volte superiori a quelle misurate con un combustibile a bassissimo tenore di zolfo (0,038%) (*McCaffery et al, 2021*).

Le stime dell'impatto dei scrubber sulle emissioni di PM variano notevolmente tra gli studi e tra i carichi del motore. Per valutare l'efficacia di questa tecnologia nella fase di viaggio, si considerano carichi motore elevati. *Yang et al, 2021* misurano un abbattimento medio del 10%, del 16,3% al 70% del carico motore e nessuna variazione all'80%. Questi dati sono inferiori a quelli di studi precedenti: *Lehtoranta et al, 2019* misurano un abbattimento del 21%-45% al 66%-75% di carico motore; *Winnes et al, 2020* misurano un abbattimento del 34% al 76% di carico motore; l'abbattimento del PM sale addirittura al 76% nello studio di *Fridell & Salo, 2016*.

La variabilità dell'abbattimento del PM_{2.5} può dipendere da diversi fattori, come il tipo di motore, le condizioni operative, la composizione del carburante, il metodo di campionamento e il design dello scrubber. Il metodo di campionamento può avere un impatto molto forte sulla misurazione delle emissioni di PM, soprattutto quando lo scarico contiene sia particelle solide che condensabili, come nel caso di uno scrubber. Il rapporto di diluizione utilizzato per il campionamento influenza la percentuale di particelle condensabili catturate dal sistema di misurazione. L'elevato abbattimento misurato da *Fridell & Salo, 2016* può quindi essere spiegato da una perdita di massa di particelle condensabili, indotta dalle condizioni di diluizione utilizzate.

Il PM_{2.5} misurato da *Yang et al, 2021* è costituito principalmente da solfato, carbonio organico e carbonio elementare. La frazione di solfato è maggioritaria e varia dal 66,5% al 93%. I livelli di solfato prima e dopo il trattamento con scrubber sono comparabili, il che spiega perché l'abbattimento del PM_{2.5} è basso in questo studio. Ciò è coerente con l'analisi di *Lehtoranta et al, 2019*, che ha anch'essa riscontrato livelli di solfato comparabili prima e dopo il trattamento con scrubber, a fronte di una massa di carbonio organico significativamente ridotta dallo scrubber. Per i combustibili a ridotto contenuto di zolfo, il carbonio organico costituisce la frazione principale del PM_{2.5} emesso, con i solfati che contribuiscono solo a una minoranza della massa totale. Più alto è il contenuto di zolfo, più PM viene emesso, attraverso i solfati, ma la correlazione tra emissioni e contenuto di zolfo diventa debole al di sotto di un contenuto di zolfo dello 0,5% (*Winnes et al, 2020*).

Infine, le variazioni di NO_x registrate in questi studi sembrano essere attribuibili al funzionamento del motore piuttosto che alla presenza di uno scrubber (*Winnes et al., 2020, Yang et al. 2021*). L'impatto degli scrubber sulle emissioni di CO e CO₂ sembra trascurabile (*Yang et al. 2021*).

La Tabella 9 riassume i tassi di abbattimento in fase di viaggio consentiti da GNL, FAP e scrubber sulla base dei dati presentati nella Sezione 2, dello studio condotto da *La Méridionale* e dei riferimenti presentati in questa sezione (*Fridell & Salo, 2016, Lehtoranta et al, 2019, Winnes et al, 2020, Yang et al. 2021*), rispettivamente.

Tabella 9 : Tasso di aumento o riduzione delle emissioni da GNL, FAP e scrubber in fase di viaggio (valori indicativi).

	NOx	SOx	PM	CO ₂ /CO ₂ eq
GNL	de -82% à +37%	-98 %	-97 %	de -25% à +27%
FAP	-11 %	-91 %	≈ 100 %	-0,5 %
Scrubber	≈ 0%	-98 %	de -76% à -10%	≈ 0%

5. Conclusione

In questo studio, il GNL sembra essere una soluzione efficace per ridurre le emissioni marittime, anche se ci sono differenze a seconda della categoria di motori considerata. I modelli più vecchi di GNL-Diesel possono portare a emissioni di NO_x più elevate rispetto alle navi alimentate a BFO, ma questo difetto scompare per i motori di più recente costruzione e per le altre categorie di motori a GNL. Le emissioni di SO_x e PM diminuiscono di quasi il 100%. Le emissioni di CO₂ registrano una diminuzione di quasi il 30%, ma sono associate a un forte aumento delle emissioni di CH₄ e N₂O, che può comportare, per alcune categorie di motori, un aumento delle emissioni di CO₂ equivalente. Una diminuzione indicativa del 27% è tuttavia ottenuta dal motore GNL-Diesel, che presenta emissioni di CH₄ inferiori rispetto agli altri motori. Tra i diversi tipi di motori presentati, il motore GNL-Diesel di ultima generazione sembra distinguersi come un modo efficiente per ridurre le emissioni marittime, sia in termini di inquinanti che di gas serra. Un importante vantaggio del GNL è che non è necessariamente di origine fossile. Può essere di origine biologica, ad esempio da un'unità di metanizzazione, e quindi avere un'impronta di carbonio neutra.

Per le navi alimentate a BFO, i FAP e gli scrubber sono una buona soluzione per ridurre solo le emissioni inquinanti, poiché entrambe le tecnologie hanno un basso impatto sulle emissioni di CO₂ e quindi sui gas serra. I FAP hanno un'efficienza di circa il 90% sugli SO_x e del 10% sugli NO_x. Gli scrubber hanno un'efficienza di quasi il 100% sugli SO_x, ma un impatto praticamente nullo sugli NO_x. La differenza principale tra le due tecnologie risiede nell'abbattimento del PM, che è totale per i FAP, difficile da quantificare per gli scrubber. L'efficacia degli scrubber sul PM dipende in particolare dalla composizione del PM emesso e quindi dal combustibile utilizzato. Sebbene la percentuale di abbattimento del PM da parte dei FAP vari notevolmente da uno studio all'altro, gli studi attuali concordano sul fatto che l'uso di uno scrubber con un combustibile ricco di zolfo non riduce le emissioni di PM a un livello così basso come quello misurato con un combustibile a ridotto contenuto di zolfo.

Su scala del bacino del Mediterraneo, l'uso di queste tecnologie può ridurre le emissioni di NO_x, SO_x e PM da diverse centinaia a diverse migliaia di kg per viaggio. Per un viaggio Fos sur Mer-Cagliari, che è il viaggio più lungo tra quelli presentati in questo studio, l'GNL-Diesel consente di risparmiare una quantità di CO₂ equivalente a 19 anni di riscaldamento a olio per un appartamento o a 253 anni di riscaldamento elettrico per lo stesso appartamento.

Il GNL riduce le emissioni di NO_x, SO_x e PM rispetto al BFO. A seconda del tipo di motore considerato, il GNL comporta un aumento o una diminuzione della somma dei gas serra. I FAP e gli scrubber hanno un impatto trascurabile sui gas serra, ma riducono le emissioni di alcuni inquinanti, SO_x e PM nel caso dei FAP.

Références :

- Fridell, E., & Salo, K. (2016). Measurements of abatement of particles and exhaust gases in a marine gas scrubber. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 230(1), 154-162.
- Lehtoranta, K., Aakko-Saksa, P., Murtonen, T., Vesala, H., Ntziachristos, L., Rönkkö, T., ... & Timonen, H. (2019). Particulate mass and nonvolatile particle number emissions from marine engines using low-sulfur fuels, natural gas, or scrubbers. *Environmental science & technology*, 53(6), 3315-3322.
- McCaffery, C., Zhu, H., Karavalakis, G., Durbin, T. D., Miller, J. W., & Johnson, K. C. (2021). Sources of air pollutants from a Tier 2 ocean-going container vessel: Main engine, auxiliary engine, and auxiliary boiler. *Atmospheric Environment*, 245, 118023.
- Winnes, H., Fridell, E., & Moldanová, J. (2020). Effects of marine exhaust gas scrubbers on gas and particle emissions. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(4), 299.
- Yang, J., Tang, T., Jiang, Y., Karavalakis, G., Durbin, T. D., Miller, J. W., ... & Johnson, K. C. (2021). Controlling emissions from an ocean-going container vessel with a wet scrubber system. *Fuel*, 304, 121323.