

Progetto “PROMO-GNL
Studi e azioni comuni per promuovere l'uso del GNL nei porti commerciali”

Le soluzioni per la filiera del GNL nel trasporto marittimo

03 giugno 2021

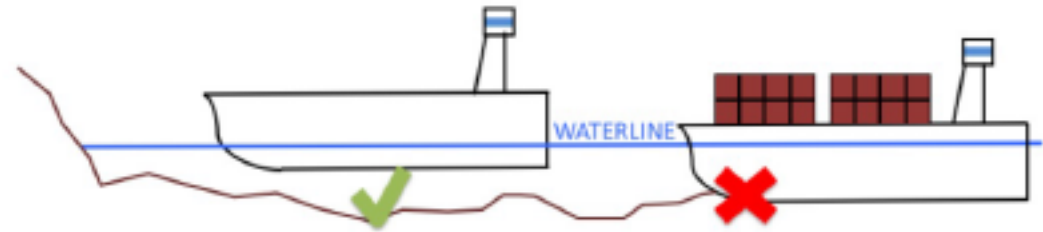
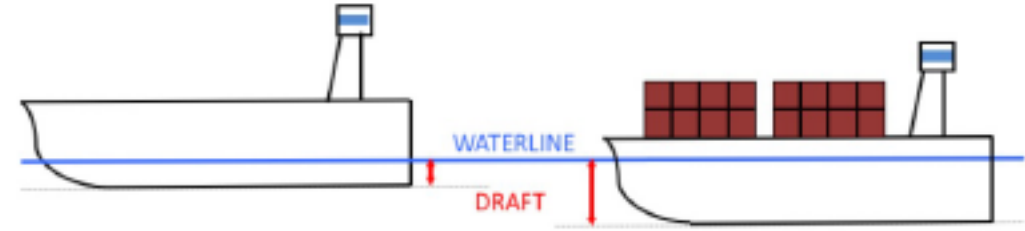
Il GNL nel trasporto marittimo

Paolo Fadda, Università di Cagliari, Dipartimento Ingegneria Civile, Ambientale e Architettura



Descrizione del problema

- Vehicle routing problem
 - Porti
 - Domanda: q_i
 - Profondità di fondale: D_{max_i}
 - Diverse tipologie di navi
 - Capacità: Q_s
 - Pescaggio da scarica: D^E
 - Pescaggio a pieno carico: D^F
 - Costo orario di navigazione (Euro/h): c_s
 - Costo di accesso al porto: r_{is}
 - **Goal: Minimizzazione del costo totale**



Massimo carico consentito per accedere ad un porto con una data tipologia di nave

- Se $D_{\max_i} \geq D^F \rightarrow L_{is} = Q_s$ **nessuna limitazione**
- Se $D_{\max_i} \leq D^E \rightarrow L_{is} = 0$ **la nave s non può entrare nel porto i**
- Se $D^E \leq D_{\max_i} \leq D^F \rightarrow L_{is} = \frac{D_{\max_i} - D^E}{D^F - D^E} Q_s$

Input data:

- $I=[1, I_{max}]$: set of ports
- $I_0=[0, I_{max}]$: set of ports included the depot
- $S=[1, S_{max}]$: set of ships

- Q_s : ship capacity
- q_s : port demand
- L_{is} : maximum loading for ship s to access port i
- t_{ij} : sailing time between port i and port j
- c_s : hourly sailing cost for ship s
- r_{is} : access cost for ship s entering port i

Decision Variables:

- x_{ijs} binary variables taking value 1 if arc ij is traversed by ship s
- y_{is} binary variables taking value 1 if port i is served by ship s
- l_{is} loading of ship s entering port i
- u_i position of port i in the sequence of visited ports
- p_s total load for ship s

Modello di ottimizzazione

costi di viaggio



costi di accesso al porto



$$\min \sum_{i \in I} \sum_{j \in I} \sum_{s \in S} c_s t_{ijs} X_{ijs} + \sum_{i \in I} \sum_{s \in S} r_{is} Y_{is} \quad (1)$$

$$\sum_{s \in S} Y_{is} = 1 \quad \forall i \in I \quad (2) \quad \text{Tutti i porti devono essere serviti}$$

$$\sum_{i \in I} q_i Y_{is} \leq Q_s \quad \forall s \in S \quad (3) \quad \text{Capacità di carico rispettata}$$

Porti

APPROVVIGIONAMENTO

- Barcellona (Spagna)
- Delimara (Malta)
- Skikda (Algeria)
- Marsa el Brega (Libia)
- Idku (Egitto)

IMPORTAZIONE

- Bastia (Francia);
- Cagliari (Italia);
- Genova (Italia);
- Livorno (Italia);
- Nizza (Francia);
- Oristano (Italia)
- Tolone (Francia).

Caratteristiche dei terminal marittimi

	Capacità di stoccaggio nominale [m ³]	Capacità di stoccaggio effettiva [m ³]	Pescaggio massimo nominale [m]	Pescaggio operativo ridotto di un franco di sicurezza pari a 1.3 m [m]
Bastia	5.000	2.500	8	6,7
Cagliari	22.000	11.000	8,5	7,2
Genova	6.600	3.300	5,6	4,3
Livorno	9.000	4.500	9	7,7
Nizza	5.000	2.500	8	5,7
Oristano	10.000	5.000	11	9,7
Tolone	10.000	5.000	8	6,7

Distanze in miglia nautiche

	Tolone	Genova	Livorno	Bastia	Cagliari	Oristano	Nizza	Barcellona	Malta	Skikda	Marsa El Brega	Idku
Tolone		163	195	178	327	239	82	202	610	377	1000	1758
Genova	163		78	105	349	304	86	352	590	460	989	1685
Livorno	195	78		61	294	292	131	380	532	441	895	1632
Bastia	178	105	61		245	283	126	362	490	400	882	1610
Cagliari	327	349	294	245		142	355	370	337	174	737	1377
Oristano	239	304	292	283	142		276	313	491	248	1000	1465
Nizza	82	86	131	126	355	276		270	764	408	985	1737
Barcellona	202	352	380	362	370	313	270					
Malta	610	590	532	490	337	491	764					
Skikda	377	460	441	400	174	248	408					
Marsa el Brega	1000	989	895	882	737	1000	985					
Idku	1758	1685	1632	1610	1377	1465	1737					

Categoria	Capacità di carico [m ³]	Pescaggio a pieno carico [m]	Pescaggio a vuoto [m]	Costo operativo [€/mn]
1 – extra small	3.000	4,3	3,9	17,6
2 - small	7.500	6	5,5	18,5
3 - medium	10.000	6,6	5,9	19,3
4 - large	20.000	7,8	6,8	20,4
5 – extra large	30.000	8	7,5	21,3

Scenari

- **Scenario 1:** i nodi compratori dello spazio di cooperazione si approvvigionano ciascuno in modo autonomo e indipendente (assetto di approvvigionamento Business As Usual - BAU, assimilabile a quanto avviene attualmente);
- **Scenario 2:** i nodi compratori dello spazio di cooperazione si approvvigionano in modo coordinato agendo in coalizione come pool organizzato (assetto di approvvigionamento di progetto - coalizione). Le caratteristiche dei depositi costieri in termini di capacità di stoccaggio e pescaggio sono derivate dai documenti sviluppati nell'ambito di **Signal** e si riferiscono allo stato di fatto o di progetto presso i relativi nodi;
- **Scenario 3:** l'off shore di Livorno è ipotizzato porto di approvvigionamento dei nodi compratori dello spazio di cooperazione;
- **Scenario 4:** i nodi compratori dello spazio di cooperazione si approvvigionano in modo coordinato agendo in coalizione come pool organizzato. L'obiettivo del test è individuare le caratteristiche di capacità ottimali della nave da mettere a servizio della rete di distribuzione e le caratteristiche minime di pescaggio e di capacità di stoccaggio dei depositi costieri che garantirebbero il funzionamento ottimale della rete di approvvigionamento (scenario prospettico).

Tabella 8 - Costo di trasporto del GNL per via marittima nell'assetto senza coalizione (€/mese).

	Costo di approvvigionamento dei singoli nodi compratori (€/mese)							Costo di rete (€/mese)	Distanza (mn/mese)	Δ_{costo} (€/m ³)
	Bastia	Cagliari	Genova	Livorno	Nizza	Oristano	Tolone			
Barcellona	12742	13690	74342	66180	11018	9504	7474	194951	10832	-
Malta	17248	11862	124608	92231	17283	26893	21472	311598	17312	2,5
Skikda	14080	6125	97152	72668	8730	14362	13270	226387	12578	0,9
Marsa el Brega	31046	25942	208877	153424	35200	34672	35200	524361	29132	7,3
Idku	56672	48470	355872	265864	51568	61142	61882	901470	50082	15,6

Tabella 14 - Risparmio percentuale sui costi di trasporto ottenibile nel passaggio dall'assetto senza coalizione (BAU) all'assetto con coalizione (Gruppo A).

	Risparmio percentuale (%)							
	Bastia	Cagliari	Genova	Livorno	Nizza	Oristano	Tolone	Totale
Barcellona	95%	58%	0%	25%	92%	87%	29%	29%
Malta	95%	33%	0%	25%	92%	94%	66%	32%
Skikda	96%	5%	0%	25%	89%	92%	59%	27%
Marsa el Brega	96%	50%	0%	25%	94%	92%	66%	32%
Idku	96%	57%	0%	25%	93%	93%	69%	33%

Tabella 15 - Variazione percentuale dei costi di trasporto ottenibile nel passaggio dall'assetto senza coalizione (BAU) all'assetto con coalizione e potenziamenti infrastrutturali (Gruppo B).

	Variazione percentuale (%)							
	Bastia	Cagliari	Genova	Livorno	Nizza	Oristano	Tolone	Totale
Barcellona	93%	35%	-42%	-19%	87%	81%	-10%	32%
Malta	93%	3%	-33%	-18%	89%	91%	50%	39%
Skikda	93%	-45%	-32%	-17%	83%	87%	37%	29%
Marsa el Brega	94%	28%	-31%	-17%	91%	89%	51%	43%
Idku	95%	39%	-29%	-15%	91%	90%	55%	46%

Tabella 12 - Istanze del Gruppo C - Costo di trasporto del GNL nell'ipotesi in cui Livorno diventi porto di approvvigionamento.

ID	Nodo esportatore	Descrizione	Costo di approvvigionamento dei nodi in coalizione con ipotesi potenziamenti infrastrutturali nodi Genova e Cagliari (€/mese)						Costo di rete (€/mese)	Distanza (mn/mese)
			Bastia	Cagliari	Genova	Nizza	Oristano	Tolone		
C1.1	Livorno	No coalizione	2147	10349	16474	10278	4611	6864	50723	2768
C1.2	Livorno	No coalizione + potenziamento Genova e Cagliari	2147	10349	8237	10278	4611	6864	42486	2144
C2.1	Livorno	Sì coalizione	907	8810	16474	1445	1845	8231	37712	1148
C2.2	Livorno	Sì coalizione + potenziamento Genova e Cagliari	907	8810	8237	1445	1845	8231	37712	662

Considerazioni sul costo delle rete marittima ottimizzata

- Il problema è talmente complesso che per ottenere la configurazione di rete ottima è necessario usare un modello di ottimizzazione
- L'ingresso in coalizione porta consistenti vantaggi dal punto di vista economico
- L'ampiamiento di alcuni fondali e serbatoi comporterebbe un ulteriore elevata riduzione dei costi
- Livorno, data la sua posizione strategica, garantirebbe costi di rete più bassi ma non essendo produttore di GNL dovrebbe imporre un costo di acquisto più alto
- Barcellona tra i porti fornitori di GNL è quello che garantisce il costo di rete più basso ma se Skikda applicasse prezzi di acquisto leggermente più bassi diventerebbe competitivo
- **La coalizione potrebbe comportare anche un ulteriore sconto per elevate quantità di GNL acquistato e quindi un ulteriore beneficio economico rispetto a quelli derivanti dal solo costo di rete**

Le ricadute sull'ambiente generate dalla ottimizzazione della rete marittima

L'impatto ambientale del trasporto marittimo

- Il trasporto marittimo internazionale è considerato uno dei principali settori economici per emissioni di gas serra (GHG), e in particolare di CO₂. Quest'ultimo costituisce il gas serra più significativo rilasciato dalle navi, nonché l'imputato principale del riscaldamento globale.
- A luglio 2019 la Commissione Europea ha pubblicato per la prima volta i dati delle emissioni di CO₂ delle navi nell'area economica europea (Regolamento 2015/757)
- In base ai dati diffusi dalla European Maritime Safety Agency (piattaforma web Thetis-Mrv), nel 2018 le circa 10.800 navi con stazza lorda superiore alle 5.000 tonnellate hanno emesso nell'area economica europea circa 152 milioni di tonnellate di CO₂.

Il quadro regolatorio internazionale

- La riserva normativa del trasporto marittimo internazionale risiede principalmente nell'**IMO**, agenzia specializzata delle Nazioni Unite responsabile della prevenzione dell'inquinamento marino provocato dalle navi e della sicurezza della navigazione
- La principale misura implementata dall'IMO è la **Convenzione Internazionale MARPOL** per la prevenzione dell'inquinamento provocato dalle navi
- La convenzione MARPOL comprende sei allegati tecnici, l'**Allegato VI** regola l'inquinamento atmosferico delle navi:
 - stabilisce i limiti delle emissioni globali di SO_x, NO_x e PM e introduce le aree di controllo delle emissioni (ECA) in cui si applicano politiche di emissione più rigorose;
 - stabilisce il limite dello 0,5% in peso del contenuto di zolfo nei combustibili marini (Global IMO's sulphur cap);
 - include politiche progressivamente restrittive riguardanti gli NO_x applicabili alle navi costruite dopo gennaio 2016;
 - istituisce alcune aree di controllo delle emissioni di SO₂ (SECA) in cui il limite di zolfo è dell'1% dal 2015.
- Nel 2018, l'IMO ha adottato la **Initial IMO Strategy** per guidare il processo di riduzione delle emissioni di gas serra del settore di trasporto marittimo. Assumendo il 2008 come anno di riferimento base, la Strategia IMO mira almeno a dimezzare le emissioni totali di GHG del trasporto marittimo entro il 2050 e a ridurre l'intensità media di carbonio (CO₂ per tonnellata-miglio) di almeno il 40% entro il 2030, e del 70% entro il 2050.

Il quadro regolatorio europeo

- L'Unione Europea ha adottato direttive che limitano ulteriormente il contenuto massimo di zolfo nei combustibili marini allo 0,1% in peso per le navi che ormeggiano in diversi porti dell'UE
[European Commission. Report from the Commission to the European Parliament and the Council on Implementation and Compliance with the Sulphur Standards for Marine Fuels set out in Directive (EU) 2016/802 Relating to a Reduction in the Sulphur Content of Certain Liquid Fuels. 2018]

- Gli Stati membri sono tenuti a costruire punti di rifornimento di GNL in tutti i porti e installare infrastrutture di cold ironing entro la fine del 2025
[European Parliament. Directive 2014/94/EU of the European Parliament and of the Council of 22 October 2014 on the Deployment of Alternative Fuels Infrastructure. 2014]

La politica comunitaria per i trasporti sostenibili

- Il Libro Bianco della Commissione Europea «Tabella di marcia verso uno spazio unico europeo dei trasporti – per una politica dei trasporti competitiva e sostenibile» ha inteso promuovere obiettivi di medio e lungo periodo finalizzati a creare un sistema dei trasporti competitivo ed efficiente sul piano delle risorse.

- I tre principali obiettivi indicati nel documento sono:
 - il miglioramento dell'efficienza dei veicoli mediante l'uso di carburanti sostenibili;
 - l'ottimizzazione delle prestazioni della catena logistica multimodale;
 - l'uso efficiente delle infrastrutture grazie ai sistemi di gestione informatizzata del traffico.

- La nuova strategia europea intende ottimizzare l'efficacia delle catene logistiche multimodali, incrementando tra l'altro l'uso di modi di trasporto più efficienti sotto il profilo energetico

Le politiche comunitarie e nazionali a favore del trasporto sostenibile

- Rimborsi alle imprese di autotrasporto che trasferiscono quote di trasporto da strada a modalità marittima
- Trasferimenti finanziari alle imprese di navigazione che operano a corto raggio

	Ecobonus (Legge n.265/2002)	Marebonus (Legge di Stabilità 2016)
Periodo	2007-2010	2016-2018
Importo	240 M €	138 M €
Obiettivo	Sostenere la scelta della nave da parte degli autotrasportatori in alternativa alla strada	Sviluppare la modalità combinata strada-mare attraverso la creazione di nuovi servizi marittimi e il miglioramento di quelli già esistenti
Beneficiari	Imprese di autotrasporto europee che imbarchino su nave destinata prevalentemente al trasporto merci i propri veicoli e casse mobili, al fine di percorrere delle tratte marittime individuate dal Governo.	Imprese armatrici operanti in Italia che presentano progetti triennali per la realizzazione di nuovi servizi marittimi ro/ro e ro/pax per il trasporto multimodale delle merci o il miglioramento dei medesimi servizi su rotte esistenti, in arrivo e in partenza da porti situati in Italia, che collegano porti situati in Italia o negli Stati membri, al fine di sostenere il miglioramento della catena intermodale e il decongestionamento della rete viaria

Le politiche comunitarie e nazionali a favore del trasporto sostenibile

- I passati programmi di finanziamento dell'UE, hanno riguardato quasi esclusivamente la fornitura di aiuti finanziari per gestire rotte marittime esistenti o nuove
- Le prestazioni delle politiche di assistenza finanziaria finora attuate sono risultate spesso deludenti e non tutte le rotte che hanno ricevuto aiuti finanziari condividono storie di successo
- Un numero non trascurabile dei servizi attivati a seguito di aiuti pubblici si è interrotto non appena scaduto il contributo
- Questi fattori sembrano suggerire la necessità di un cambio di indirizzo politico sul trasporto marittimo e nella prospettiva fin qui adottata a sostegno della sostenibilità del trasporto marittimo: da un'ottica di singolo servizio a un'ottica di sistema integrato

L'impatto ambientale della distribuzione del GNL per via marittima nello spazio di cooperazione

IL CASO STUDIO: 7 nodi acquirenti nello spazio di cooperazione devono gestire in modo ottimale i propri approvvigionamenti di GNL per via marittima: Bastia, Cagliari, Genova, Livorno, Nizza, Oristano, Tolone.

Scenario BAU	Ciascun porto acquirente gestisce in modo autonomo e indipendente i propri approvvigionamenti di GNL
Scenario in coalizione	I 7 porti acquirenti gestiscono in modo integrato i propri approvvigionamenti di GNL
Scenario in coalizione con potenziamenti infrastrutturali	I 7 porti acquirenti gestiscono in modo integrato i propri approvvigionamenti di GNL e vengono ipotizzate condizioni di offerta migliorate dei depositi costieri rispetto a quelle attuali

L'impatto della distribuzione del GNL per via marittima nello spazio di cooperazione

- Una gestione del sistema di approvvigionamento del GNL in coalizione tra i porti dello spazio di cooperazione può consentire una riduzione dei costi di trasporto per tutti i nodi della rete
- Tale riduzione dei costi di trasporto è dovuta all'ottimizzazione dei coefficienti di riempimento delle navi, al minor numero di navi da impiegare per l'approvvigionamento di tutti i nodi, e alla riduzione del numero totale di miglia navigate per effetto dell'ottimizzazione dei percorsi di distribuzione
- Quello economico non è il solo beneficio che deriverebbe da una gestione in chiave integrata del sistema di approvvigionamento del GNL per via marittima. La riduzione del numero di navi in circolazione nelle acque dello spazio di cooperazione e del totale di miglia navigate, ha evidenti impatti positivi sia in termini di sicurezza della navigazione che di riduzione delle emissioni inquinanti

Stima dell'impatto ambientale della distribuzione del GNL per via marittima nello spazio di cooperazione

- Metodo di calcolo activity-based per la stima delle emissioni di CO₂, NO_x, SO_x, PM, NMVOC e BC
- Le stime sono basate sui consumi della navigazione (FC) e utilizzano i fattori di emissione (EF) relativi all'anno 2018 (kg pollutant/tonne fuel) estratti dal Fourth IMO Greenhouse Gas Study (IMO, 2020)

Consumi medi delle navi considerate

Categoria	Capacità di carico [m ³]	Velocità di progetto [nodi]	Consumi - HFO mode		Consumi - LNG mode	
			[t/giorno]	[t/h]	[t/giorno]	[t/h]
1 – extra small	3.000	12	8,5	0,354	6,6	0,275
2 - small	7.500	13,5	10,4	0,433	8,4	0,350
3 - medium	10.000	14	13,6	0,567	12,1	0,504
4 - large	20.000	15	20,3	0,846	18,1	0,754
5 – extra large	30.000	16	28,6	1,192	25,1	1,046

Distanze navigate mensilmente per tipologia di nave

Scenario	N. navi impiegate per classe di capacità (navi/mese)					Miglia navigate mensilmente per tipologia di nave (mn/mese)				
	3.000	7.500	10.000	20.000	30.000	3.000	7.500	10.000	20.000	30.000
No coalizione (BAU)	9	3				9274	1558			
Sì coalizione	6	1	1			4224	1096	777		
Sì coalizione + attributi di offerta migliorati				1	1				708	1158

Consumi di carburante mensili (t/mese): navi alimentate con HFO e navi alimentate con GNL

Scenario	Consumo mensile per categoria di nave - HFO mode (t/mese)					Consumo totale (t/mese)	Consumo mensile per categoria di nave - LNG mode (t/mese)					Consumo totale (t/mese)
	3.000	7.500	10.000	20.000	30.000		3.000	7.500	10.000	20.000	30.000	
No coalizione (BAU)	273,71	50,01				323,72	212,53	40,39				252,92
Sì coalizione	124,67	35,18	31,45			191,30	96,80	28,41	27,98			153,20
Sì coalizione + attributi di offerta migliorati				39,92	86,25	126,17				35,60	75,69	111,29

il consumo effettivo per ciascuna tipologia di nave è calcolato moltiplicando il consumo orario per il tempo totale di navigazione (h/mese). Quest'ultimo è a sua volta calcolato dividendo le miglia totali navigate dalle navi di una stessa tipologia per la velocità di servizio che caratterizza quella tipologia.

Valori di emissione mensili (kg/mese) relativi ai diversi scenari – alimentazione HFO

Scenario	CO ₂ EF=3114	NO _x EF=75,9	SO _x EF=50,83	PM EF=7,55	NM VOC EF=3,2	BC EF=0,26
No coalizione (BAU)	1.008.069,3	24.570,5	16.454,8	2.444,1	1.035,9	84,2
Sì coalizione	595.698,6	14.519,4	9.723,6	1.444,3	612,2	49,7
Sì coalizione + attributi di offerta migliorati	392.894,0	9.576,3	6.413,2	952,6	403,7	32,8

EF = Fattore di Emissione (kg inquinante per tonnellata di carburante)

I valori delle emissioni sono calcolati moltiplicando il Fattore di Emissione relativo a ciascun inquinante per il consumo mensile (t/mese) relativo allo scenario considerato.

Valori di emissione mensili (kg/mese) relativi ai diversi scenari – alimentazione GNL

Scenario	CO ₂ EF=2755	NO _x EF=13,44	SO _x EF=0,03	PM EF=0,11	NMVOC EF=1,59	BC EF=0,019
No coalizione (BAU)	696.799,4	3.399,3	7,6	27,8	402,1	4,8
Sì coalizione	422.055,2	2.059,0	4,6	16,9	243,6	2,9
Sì coalizione + attributi di offerta migliorati	306.600,8	1.495,7	3,3	12,2	176,9	2,1

EF = Fattore di Emissione (kg inquinante per tonnellata di carburante)

I valori delle emissioni sono calcolati moltiplicando il Fattore di Emissione relativo a ciascun inquinante per il consumo mensile (t/mese) relativo allo scenario considerato.

Riduzione percentuale (%) dell'inquinamento nel passaggio dallo scenario BAU ai diversi scenari di progetto

SCENARIO	HFO MODE	LNG MODE
Sì coalizione	-40,9%	-39,4%
Sì coalizione + attributi di offerta migliorati	- 61,0%	-56,0%

Riduzione percentuale (%) dell'inquinamento nel passaggio da navi alimentate a HFO a navi alimentate a GNL

CO ₂	NO _x	SO _x	PM	NMVOG	BC
-28,7%	-85,7%	-99,9%	-98,8%	-59,9%	-94,1%

Considerazioni finali

- La semplice riorganizzazione in chiave integrata del sistema di approvvigionamento del GNL tra i porti dello spazio di cooperazione potrebbe, da sola, garantire una riduzione dell'impatto ambientale delle attività di trasporto di circa il 41%.
- Tale beneficio in termini di riduzione delle emissioni potrebbe addirittura raggiungere il 61% se a una riorganizzazione in chiave sistemica della rete di distribuzione si accompagnasse il futuro dimensionamento ottimale dei depositi costieri.
- L'applicazione considera un cluster limitato di depositi costieri che potrà in futuro essere ampliato attraverso l'inserimento di ulteriori porti e l'estensione dell'ambito geografico di riferimento, con conseguenti aumentati benefici.
- I dati suggeriscono l'importante potenziale delle politiche di riorganizzazione in chiave integrata delle reti di trasporto marittimo del GNL per la riduzione delle emissioni generate dalle attività di trasporto. Combinare il potenziale di mitigazione che deriverebbe dalla riorganizzazione dei servizi di trasporto marittimo in modo integrato con l'adozione di combustibili alternativi può rappresentare la chiave di volta nella ricerca di soluzioni per la riduzione dell'impatto ambientale delle catene di trasporto marittimo e il raggiungimento degli ambiziosi obiettivi internazionali di riduzione delle emissioni.
- L'opportunità di incoraggiare gli interventi di progettazione della rete pianificando servizi di trasporto strategici in modo integrato merita un'indagine più approfondita, anche da parte degli organismi europei (politica attiva di indirizzo)

GRAZIE PER L'ATTENZIONE

Università di Cagliari, Dipartimento Ingegneria Civile, Ambientale e Architettura

Paolo Fadda
fadda@unica.it