

ATTIVITA' T1.6

Definizione modello della rete marittima

Il seguente studio è stato sviluppato nell'ambito del Progetto SIGNAL - Strategie transfrontaliere per la valorizzazione del Gas Naturale Liquido, co-finanziato dal Programma INTERREG Marittimo Italia-Francia 2014-2020.

Informazioni sul documento	
Codice prodotto	T1.6.1
Titolo prodotto	Definizione modello della rete marittima
Codice Attività	T1.6
Titolo Attività	Sviluppo di dimostrativi sull'impiego del GNL
Codice Componente	T3
Titolo Componente	Modello di analisi, valutazione e pianificazione della rete di trasporto marittimo del GNL
Soggetto responsabile dell'Attività	Assessorato dell'Industria Regione Sardegna - CIREM Univ. Di Cagliari -
Responsabile scientifico di UNICA-CIREM per conto dell'Assessorato dell'Industria	Prof. Paolo Fadda
Coordinatore dello studio di UNICA-CIREM per conto dell'Assessorato dell'Industria	Ing. Federico Sollai
Soggetto responsabile della stesura del documento	Prof. Paolo Fadda, Ing. Patrizia Serra, Dott.ssa Simona Mancini, Ing. Federico Sollai
Versione	FINALE
Data	11/11/2019

Versione	Data	Estensore(i)	Descrizione modifiche
FINALE	19/01/2021	UNICA_CIREM	Revisione dati



Quest'opera è distribuita con Licenza Creative Commons Attribuzione - Condividi allo stesso modo 4.0 Internazionale ([CC BY-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/))

Sommario

Indice delle tabelle	4
Abstract	5
1. Introduzione	6
2. Il caso studio	7
2.1 I terminal della rete small-scale dello spazio di cooperazione	7
2.2 La matrice delle distanze marittime	8
2.3 La domanda di approvvigionamento dei nodi compratori	9
2.4 La flotta a servizio della rete	10
3. Il modello di ottimizzazione	10
4. Gli scenari test	12
4.1 Scenario 1: assetto di approvvigionamento BAU	13
4.2 Scenario 2: assetto di approvvigionamento in coalizione	13
4.3 Scenario 3: Livorno diventa porto di approvvigionamento della rete	15
4.4 Scenario 4: assetto di approvvigionamento in coalizione con introduzione di caratteristiche di offerta migliorate nei nodi compratori (scenario prospettico)	16
5. Risultati	16
5.1 Risultati relativi allo scenario 1: assetto di rete attuale (BAU)	17
5.2 Risultati relativi allo scenario 2: assetto di progetto con porti in coalizione	18
5.3 Risultati relativi allo scenario 3: Livorno diventa porto di approvvigionamento dell'intera rete	19
5.4 Risultati relativi allo scenario 4: porti in coalizione con caratteristiche di offerta migliorate nei nodi compratori (scenario prospettico)	20
6. Discussione	21
6.1 Differenza di costo tra i diversi assetti	21
6.2 L'impatto in termini ambientali e di sicurezza della navigazione	23
Bibliografia e sitografia	29

Indice delle tabelle

Tabella 1 - Caratteristiche dei terminal marittimi della rete small-scale SIGNAL.....	8
Tabella 2 - Matrice delle distanze (mn).....	9
Tabella 3 - Domanda mensile di GNL (m ³ /mese), anno di riferimento: 2025.....	10
Tabella 4 - Caratteristiche delle navi GNL a servizio della rete considerata.....	10
Tabella 5 - Caratterizzazione degli scenari di rete nell'assetto di progetto.....	14
Tabella 6 - Caratterizzazione degli scenari di rete con Livorno porto di approvvigionamento della rete.	15
Tabella 7 - Costo di trasporto del GNL per via marittima nell'assetto senza coalizione (€/mese).	17
Tabella 8 - Costo di trasporto del GNL per via marittima nell'assetto senza coalizione (€/mese) - Ipotesi di potenziamento infrastrutturale sui nodi di Genova e Cagliari.....	17
Tabella 9 - Istanze del Gruppo A - Costo di trasporto del GNL per via marittima nell'assetto in coalizione (€/mese).....	18
Tabella 10 - Istanze del Gruppo B - Costo di trasporto del GNL per via marittima nell'assetto in coalizione con ipotesi di potenziamenti infrastrutturali nei nodi di Genova e Cagliari (€/mese).	19
Tabella 11 - Istanze del Gruppo C - Costo di trasporto del GNL nell'ipotesi in cui Livorno diventi porto di approvvigionamento.	20
Tabella 12 - Istanze dello Scenario 4 - Costo di trasporto del GNL nello scenario prospettico con attributi di offerta migliorati nei nodi compratori.	20
Tabella 13 - Risparmio percentuale sui costi di trasporto ottenibile nel passaggio dall'assetto senza coalizione (BAU) all'assetto con coalizione (Gruppo A).....	21
Tabella 14 - Variazione percentuale dei costi di trasporto ottenibile nel passaggio dall'assetto senza coalizione (BAU) all'assetto con coalizione e potenziamenti infrastrutturali (Gruppo B).	22
Tabella 15 - Risparmio percentuale sui costi di trasporto ottenibile nel passaggio dall'assetto senza coalizione (BAU) all'assetto con coalizione e attributi di offerta migliorati (Scenario 4).	22
Tabella 16 - Consumi medi delle navi considerate.....	24
Tabella 17 - Distanze navigate mensilmente per tipologia di nave.....	25
Tabella 18 - Consumi di carburante mensili (t/mese): alimentazione con HFO e alimentazione con LNG.....	25
Tabella 19 - Valori di emissione mensili (kg/mese) relativi ai diversi scenari – alimentazione HFO.	26
Tabella 20 - Valori di emissione mensili (kg/mese) relativi ai diversi scenari – alimentazione LNG.	26
Tabella 21 - Riduzione dell'inquinamento nel passaggio dallo scenario BAU ai diversi scenari di progetto.....	27
Tabella 22 - Riduzione percentuale media degli inquinanti nel passaggio da navi alimentate con HFO a navi alimentate con GNL.....	27

Abstract

Le catene di approvvigionamento del GNL consentono tradizionalmente di fornire grandi volumi di gas su grandi distanze per le quali la distribuzione mediante gasdotto non risulta praticabile. Di recente, stanno assumendo crescente rilievo le catene di distribuzione di GNL di tipo *small-scale* nelle quali il GNL viene distribuito per via marittima dai grandi terminali di esportazione attraverso terminali satellite di ricezione più piccoli (Bittante et al., 2017). Le catene di approvvigionamento del GNL di tipo *small-scale* hanno caratteristiche specifiche:

- i terminali satellite di ricezione sono distribuiti su distanze contenute (fino a poche migliaia di miglia nautiche);
- le capacità di carico delle navi impiegate per il trasporto del GNL variano da poche migliaia di m³ fino a 50.000 m³;
- i carichi delle navi possono essere suddivisi su terminali di ricezione consecutivi;
- i depositi costieri dei terminali di ricezione sono dotati di serbatoi di stoccaggio da riempire una o più volte al mese.

Un'applicazione ideale della rete di distribuzione *small-scale* è rappresentata dai porti dello spazio di cooperazione coinvolti nel progetto SIGNAL.

In questo documento vengono investigate le configurazioni di minimo costo della rete di approvvigionamento del GNL per via marittima tra i porti dello spazio di cooperazione al fine di esplorare le economie di costo che potrebbero derivare da una gestione in chiave sistemica ed integrata dell'approvvigionamento del GNL tra i porti dello spazio di cooperazione riuniti in coalizione.

1 Introduzione

Il costo di trasporto del GNL è sempre stato un elemento di cruciale importanza nel commercio di GNL (Rogers, 2018). Secondo stime condivise, i costi di trasporto del GNL rappresentano mediamente il 20-30% del costo totale (Williams, 2010).

Gli importatori e gli esportatori generalmente negoziano per fissare il prezzo del GNL da inserire nel contratto commerciale. I prezzi da inserire nel contratto variano a seconda che il GNL sia prezzato *Ex-ship* o *Free-On-Board-FOB* (Maxwell e Zhu, 2011). La prima tipologia riflette i prezzi a valle meno il processo di gassificazione e altri costi del terminal di destinazione, mentre la seconda tipologia tiene conto del solo prezzo del GNL caricato sulla nave cisterna nel terminale di esportazione. Nei contratti commerciali di tipo FOB, il trasporto e i relativi costi di assicurazione sono a carico dell'acquirente. I contratti FOB offrono pertanto agli acquirenti una maggiore flessibilità per quanto riguarda i costi di trasporto, e una maggiore possibilità di sfruttare le opportunità di profitto attraverso l'arbitraggio. Oggigiorno, i contratti commerciali del GNL sono sempre più del tipo FOB e questo, insieme all'aumentato livello di integrazione del mercato del GNL, aumenta le opportunità di arbitraggio dei prezzi agendo sulla diminuzione dei costi di trasporto.

Il significativo sviluppo del mercato del GNL ha inevitabilmente portato a una corrispondente crescita del livello di concorrenza tra gli esportatori di GNL, che è passato dalla scala regionale a quella globale (Chen et al., 2016). Inoltre, la crescente domanda di GNL costringe gli acquirenti a rivolgersi a più fornitori, incoraggiando così rapporti più competitivi tra gli esportatori. Se in passato il GNL veniva commercializzato principalmente con contratti a lungo termine caratterizzati da un piccolo numero di esportatori che rifornivano specifici mercati regionali, oggigiorno una quota sempre maggiore di volumi viene scambiata con contratti a breve termine, contribuendo così ulteriormente alla liquidità del mercato (Hartley, 2015).

Dato questo quadro competitivo, l'idea principale alla base di questo lavoro è che i costi di trasporto, e per ricaduta il prezzo finale del GNL, possano essere ridotti quando i porti agiscono in coalizione come un cluster organizzato anziché come singole entità. L'idea fondante è che si possano ottenere risparmi significativi sfruttando le economie di scala e il maggiore potere contrattuale ottenibili operando come un pool organizzato di porti compratori. Agendo in coalizione, i porti e le loro regioni possono infatti fare leva sul loro più forte potere contrattuale durante i negoziati per cercare di ottenere prezzi di importazione ragionevoli che possano beneficiare dei costi di trasporto ridotti e del volume totale garantito di GNL da acquistare. Una gestione sistemica della rete di approvvigionamento di GNL *small-scale* basata su politiche di cluster può infatti comportare:

- coefficienti di carico più elevati delle navi metaniere;
- percorsi di distribuzione ottimizzati (distanze percorse totali ridotte);
- maggiori economie di scala.

Alla luce di questo contesto, il presente studio si prefigge un triplice obiettivo:

1. definire, mediante l'applicazione di un modello di ottimizzazione di rete analitico sviluppato ad hoc, la configurazione ottimale della rete marittima di trasporto per un cluster di porti acquirenti nello spazio di cooperazione che agiscono in coalizione nel mercato del GNL;
2. esplorare il potenziale margine di contrattazione sul prezzo di acquisto del GNL che deriverebbe dal ridotto costo di trasporto a seguito di una gestione integrata del sistema di approvvigionamento per via marittima;
3. stimare il potenziale beneficio ambientale in termini di riduzione delle emissioni inquinanti associate che deriverebbe da una gestione integrata dell'approvvigionamento del GNL per via marittima tra i porti dello spazio di cooperazione.

2 Il caso studio

Il presente capitolo introduce il caso studio preso in esame. Sono presentati:

- i nodi portuali che compongono la rete small-scale dello spazio di cooperazione. I nodi sono distinti in due categorie: nodi esportatori e nodi compratori. I nodi compratori sono rappresentati dai terminali marittimi dello spazio di cooperazione che devono acquisire per via marittima i volumi di GNL che soddisfano la propria domanda. Ciascun nodo compratore è caratterizzato in termini di fondale d'attracco (o pescaggio) e di capacità di stoccaggio del deposito costiero;
- la matrice delle distanze nautiche O/D che caratterizzano i nodi della rete small-scale in esame;
- la domanda di GNL mensile ($m^3/mese$) per ciascuno dei nodi compratori della rete small-scale in esame;
- le principali caratteristiche strutturali (pescaggio a pieno e a vuoto, capacità di stoccaggio) e di costo (costo operativo unitario per miglio nautico) della flotta di navi GNL ipotizzate a servizio della rete di approvvigionamento in esame.

2.1 I terminali della rete small-scale dello spazio di cooperazione

La rete in esame comprende cinque nodi marittimi di esportazione del GNL, da considerarsi ai fini dello studio come fonti di approvvigionamento alternative, localizzati in cinque diversi paesi del Mediterraneo:

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

e sette terminali marittimi di importazione (alcuni già esistenti, altri pianificati) distribuiti lungo le coste tirreniche italiane e francesi dello spazio di cooperazione:

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

Ai fini dell'applicazione in esame, le principali caratteristiche fisiche dei nodi compratori sono estratte dalla documentazione tecnica sviluppata nell'ambito del progetto SIGNAL. La Tabella 1 riassume le principali caratteristiche dei sette nodi di importazione in termini di capacità di stoccaggio nominale ed effettiva, pescaggio nominale e pescaggio operativo.

Relativamente al fattore capacità di stoccaggio, poiché per motivi di sicurezza i depositi costieri operano secondo il principio del "50% sempre pieno", la capacità effettiva del deposito costiero è calcolata come metà della sua capacità nominale. Per quanto riguarda il fattore pescaggio, il pescaggio operativo di ciascun terminal è calcolato sottraendo un franco di sicurezza al suo pescaggio nominale. Nel caso studio qui analizzato si assume per tutti i terminal di importazione un franco di sicurezza pari a 1,3 m. Tale franco di sicurezza medio tiene conto del franco netto sotto-chiglia, delle tolleranze di dragaggio, dei fattori meteorologici e delle maree (PIANC, 2014).

Tabella 1 - Caratteristiche dei terminal marittimi della rete small-scale SIGNAL.

	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

2.2 La matrice delle distanze marittime

La rete in esame costituisce un'applicazione ideale dello schema di distribuzione small-scale, con distanze massime tra i porti inferiori alle 1.800 mn. La Tabella 2 riporta la matrice completa delle distanze nautiche per le coppie O/D che compongono la rete in esame.

Tabella 2 - Matrice delle distanze (mn).

	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					

2.3 La domanda di approvvigionamento dei nodi compratori

La domanda di approvvigionamento di GNL considerata per la definizione del modello di rete di trasporto ottimizzata per i nodi portuali dello spazio di cooperazione è definita sulla base dei dati e delle informazioni riportati nei documenti “Report Attività T1.3.1 – Mappatura e Database della domanda di GNL” e “Report Attività T1.3.2 – Database sulla domanda del GNL” sviluppati nell’ambito del progetto SIGNAL.

Nello specifico, la domanda considerata nella definizione del modello di rete si riferisce alle previsioni relative all’anno 2025 e risulta calcolata come somma di tre contributi:

- la domanda marittima: tiene conto dei volumi di bunkering di GNL richiesti dal mercato per la propulsione navale (diporto, navi commerciali, servizi ancillari, servizi di trasporto pubblico, polizia e guardia costiera);
- la domanda portuale: tiene conto dei fabbisogni energetici che si generano nell’ambito delle aree portuali (mezzi di movimentazione portuale, impianti energetici, ecc.) e che possono essere soddisfatti, almeno sotto il profilo teorico, mediante l’impiego del GNL;
- la domanda terrestre: tiene conto della richiesta di servizi di bunkering e stoccaggio di GNL per uso industriale e privato che, pur non originandosi necessariamente all’interno del porto, potrebbe essere soddisfatta attraverso impianti localizzati presso le aree portuali in esame.

Per l’ottimizzazione della rete di distribuzione marittima viene considerato un orizzonte temporale mensile. Applicando una semplificazione che non inficia la validità dello studio, la domanda di GNL che caratterizza ciascuno dei nodi portuali della rete in esame nell’orizzonte di pianificazione mensile è calcolata dividendo la domanda annuale per 12 mensilità.

La Tabella 3 riporta per ciascuno dei nodi importatori della rete, il dato di domanda mensile di GNL riferito all'anno 2025 assumendo lo scenario di crescita base definito nel documento "Report Attività T1.3.2 – Database sulla domanda del GNL" sviluppato nell'ambito del progetto SIGNAL

Tabella 3 - Domanda mensile di GNL (m³/mese), anno di riferimento: 2025.

	Domanda mensile (m ³ /mese)
Bastia	498,26
Cagliari	4.841,94
Genova	16.061,58
Livorno	18.255,53
Nizza	794,29
Oristano	1.014,14
Tolone	4.523,79
Totale	45.989,52

2.4 La flotta a servizio della rete

Nell'applicazione in esame si ipotizza che la rete di trasporto marittima del GNL presa in considerazione possa essere servita da 5 tipologie di navi GNL in esercizio aventi differenti caratteristiche e capacità di carico. La Tabella 4 sintetizza le caratteristiche generali di ciascuna categoria navale in termini di capacità di carico, pescaggio a vuoto e a pieno, costo operativo per miglio nautico (€/mn). Relativamente a quest'ultimo, è fondamentale sottolineare che le stime relative ai costi operativi riportate nella tabella sono da ritenersi puramente indicative e sono state stimate con il gentile supporto di esperti del settore.

Tabella 4 - Caratteristiche delle navi GNL a servizio della rete considerata.

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

3 Il modello di ottimizzazione

Lo studio utilizza uno strumento di modellazione sviluppato ad hoc in grado di definire la configurazione ottimale della rete di trasporto marittimo che serve un insieme di porti acquirenti che agiscono in modo coordinato nel mercato del GNL. Una rete di distribuzione ottimale deve essere in grado di collegare in modo efficiente i vari nodi compratori garantendo al contempo costi di trasporto minimi nel rispetto di una serie di vincoli operativi e fisici, tra cui, in particolare, il pescaggio massimo consentito alla nave GNL per l'ingresso in porto.

Il problema analizzato è un problema di routing con flotta navale eterogenea e vincoli sul pescaggio in cui una serie di porti deve essere visitata da navi aventi capacità e caratteristiche

diverse. Ogni porto è caratterizzato da una domanda che deve essere servita nell'orizzonte temporale di riferimento e da un limite di pescaggio che rappresenta il pescaggio massimo con cui una nave può accedere in sicurezza nel porto. I limiti di pescaggio possono impedire alle navi di entrare in alcuni porti quando sono a pieno carico, imponendo così dei vincoli sulla sequenza dei porti visitati. La flotta è composta da diverse navi, ciascuna caratterizzata in termini di capacità di carico, costi portuali, costi di trasporto unitari e valori di pescaggio a vuoto e a pieno carico. Il pescaggio effettivo di una nave in un dato tempo è calcolato come somma del pescaggio della nave vuota più una funzione lineare del carico a bordo in quel momento. L'obiettivo del problema è quello di definire la configurazione ottimale della rete di distribuzione che minimizza il costo totale di trasporto sull'intera rete. Il problema decisionale in oggetto è stato formalizzato come un problema di programmazione mista intera. È stata sviluppata una formulazione matematica di questo problema che può essere risolta con un solver di Programmazione Mista Intera.

$$\min \sum_{i \in I_0} \sum_{j \in I_0} \sum_{s \in S} c_s t_{ijs} X_{ijs} + \sum_{i \in I} \sum_{s \in S} r_{is} Y_{is} \quad (1)$$

$$\sum_{s \in S} Y_{is} = 1 \quad \forall i \in I \quad (2)$$

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

$$\sum_{i \in I_0} X_{ijs} = Y_{is} \quad \forall j \in I \quad \forall s \in S \quad (4)$$

$$\sum_{i \in I_0} X_{ijs} = X_{jis} \quad \forall i \in I \quad \forall s \in S \quad (5)$$

$$X_{0js} \leq \sum_{j \in I} Y_{js} \quad \forall s \in S \quad (6)$$

$$X_{0js} \geq \sum_{j \in I} Y_{js} / |I| \quad \forall s \in S \quad (7)$$

$$u_j \geq u_i + 1 - |I|(1 - \sum_{s \in S} X_{ijs}) \quad \forall i \in I \quad \forall j \in I0 \quad \forall s \in S \quad (8)$$

$$l_{js} \geq l_{is} - q_i - Q_s(1 - X_{ijs}) \quad \forall i \in I \quad \forall j \in I0 \quad \forall s \in S \quad (9)$$

$$l_{is} \leq L_{is} \quad \forall i \in I \quad \forall s \in S \quad (10)$$

$$l_{0s} = \sum_{i \in I} q_i Y_{is} \quad \forall s \in S \quad (11)$$

$$X_{ijs} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I0 \quad \forall j \in I0 \quad \forall s \in S \quad (12)$$

$$Y_{is} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I \quad \forall s \in S \quad (13)$$

$$u_i \in \mathbb{N}^+ \quad \forall i \in I \quad (14)$$

In (1) è riportata la funzione obiettivo che consiste nella minimizzazione dei costi totali, intesi come costi di viaggio e costi di accesso ai porti. I vincoli (2) impongono che ogni porto sia visitato da una sola nave. Ogni nave può portare un carico non superiore alla sua capacità, come imposto con i vincoli (3). Un porto può essere visitato da una nave solo se è stato assegnato ad essa (vincoli (4)). I vincoli (5) garantiscono la continuità delle rotte e il fatto che una nave, dopo aver visitato un certo sottoinsieme dei porti, rientri al deposito di partenza. Una nave parte dal porto di approvvigionamento se e solo se deve servire almeno un porto (vincoli (6) e (7)). I vincoli (8) impediscono la formazione di sottocicli. I vincoli (9)-(11) impongono che una nave possa entrare in un porto solo se il suo carico a bordo le permette di avere un pescaggio compatibile con le caratteristiche del fondale del porto. Infine, i vincoli (12)-(14) specificano il dominio delle variabili decisionali.

4 Gli scenari test

Il modello di ottimizzazione introdotto al capitolo 3 è applicato su diverse istanze test allo scopo di individuare, per ciascun scenario di rete testato, l'assetto della rete di trasporto per via marittima che garantirebbe i minori costi di trasporto complessivi.

Nell'applicazione sono presi in esame quattro scenari di rete diversi:

- 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).

4.1 Scenario 1: assetto di approvvigionamento BAU

Per la valutazione dell'assetto di rete nelle modalità di approvvigionamento attuali, il modello di ottimizzazione è applicato considerando separatamente ciascuno dei 7 nodi importatori nell'ipotesi che ciascuno di essi si serva di volta in volta da uno dei 5 nodi esportatori, per un totale di 35 istanze.

Il modello viene applicato una prima volta considerando i valori di pescaggio e capacità di stoccaggio dei nodi compratori riportati in Tabella 1 (riferiti allo stato di fatto o di progetto nei nodi in esame), e una seconda volta ipotizzando un potenziamento infrastrutturale dei nodi di Genova e Cagliari. Il pescaggio operativo viene portato a 8 m per entrambi, la capacità del deposito di Genova passa da 3.500 m³ a 7.000 m³. Questa modifica viene ipotizzata al fine di poter verificare, da un lato, il beneficio che questo genererebbe sul risultato complessivo della rete, dall'altro per un corretto confronto con lo scenario prospettico nel quale si propone sia l'ampliamento del pescaggio sia l'ampliamento dei depositi.

L'obiettivo è calcolare il costo minimo di trasporto che caratterizzerebbe l'approvvigionamento di GNL per ciascuno dei sette nodi compratori analizzati, qualora ciascuno di essi gestisse i propri approvvigionamenti per via marittima in modo autonomo e indipendente.

4.2 Scenario 2: assetto di approvvigionamento in coalizione

Per la valutazione dell'assetto di rete di progetto, nell'ipotesi in cui i nodi compratori gestiscano in coalizione i propri approvvigionamenti di GNL, il modello di ottimizzazione è applicato su un set di istanze test suddivise in due gruppi:

- il primo gruppo (Gruppo A) si compone di 5 istanze test. Ogni istanza assume di approvvigionarsi da un diverso porto di esportazione tra i cinque considerati. Il nodo acquirente di Genova date le sue caratteristiche (fondale e capacità del deposito limitati

rispetto alla domanda di GNL richiesta) viene servito in modo totalmente autonomo e indipendente, mentre il nodo di Livorno è servito in modo parzialmente autonomo. I valori relativi alla capacità di stoccaggio e al pescaggio dei 7 nodi acquirenti sono estratti dalla Tabella 1 e si riferiscono allo stato di fatto o di progetto nei nodi in esame.

- il secondo gruppo (Gruppo B) si compone di 5 istanze test. Ogni istanza assume di approvvigionarsi da un diverso porto di esportazione tra i cinque considerati. A differenza delle istanze del Gruppo A, viene ipotizzato un incremento della capacità di stoccaggio e/o del pescaggio per i nodi di Genova e Cagliari. Il pescaggio operativo viene portato a 8 m per entrambi, la capacità del deposito di Genova passa da 3.500 m³ a 7.000 m³.

La Tabella 5 dettaglia le specifiche di ciascuna istanza.

Tabella 5 - Caratterizzazione degli scenari di rete nell'assetto di progetto.

	ID	Terminal di esportazione	Nodi acquirenti nella rete small-scale tirrenica	Specifiche
GRUPPO A	A1	Barcellona (Spagna)	Bastia; Cagliari; Genova; Livorno; Nizza; Oristano; Tolone	Il terminal di Genova è servito in modo totalmente autonomo e indipendente; Il terminal di Livorno è servito in modo parzialmente indipendente. I valori relativi alla capacità di stoccaggio e al pescaggio dei 7 terminal acquirenti sono estratti dalla Tab. 1.
	A2	Delimara (Malta)	Bastia; Cagliari; Genova; Livorno; Nizza; Oristano; Tolone	Il terminal di Genova è servito in modo totalmente autonomo e indipendente; Il terminal di Livorno è servito in modo parzialmente indipendente. I valori relativi alla capacità di stoccaggio e al pescaggio dei 7 terminal acquirenti sono estratti dalla Tab. 1.
	A3	Skikda (Algeria)	Bastia; Cagliari; Genova; Livorno; Nizza; Oristano; Tolone	Il terminal di Genova è servito in modo totalmente autonomo e indipendente; Il terminal di Livorno è servito in modo parzialmente indipendente. I valori relativi alla capacità di stoccaggio e al pescaggio dei 7 terminal acquirenti sono estratti dalla Tab. 1.
	A4	Marsa el Brega (Libia)	Bastia; Cagliari; Genova; Livorno; Nizza; Oristano; Tolone	Il terminal di Genova è servito in modo totalmente autonomo e indipendente; Il terminal di Livorno è servito in modo parzialmente indipendente. I valori relativi alla capacità di stoccaggio e al pescaggio dei 7 terminal acquirenti sono estratti dalla Tab. 1.
	A5	Idku (Egitto)	Bastia; Cagliari; Genova; Livorno; Nizza; Oristano; Tolone	Il terminal di Genova è servito in modo totalmente autonomo e indipendente; Il terminal di Livorno è servito in modo parzialmente indipendente. I valori relativi alla capacità di stoccaggio e al pescaggio dei 7 terminal acquirenti sono estratti dalla Tab. 1.
GRUPPO B	B1	Barcellona (Spagna)	Bastia; Cagliari; Genova; Livorno; Nizza; Oristano; Tolone	I valori relativi alla capacità di stoccaggio e/o al pescaggio dei terminal di Genova e Cagliari risultano aumentati ^(*) rispetto a quanto riportato nella Tab.1.

P O B	B2	Delimara (Malta)	Bastia; Genova; Nizza; Tolone	Cagliari; Livorno; Oristano;	I valori relativi alla capacità di stoccaggio e/o al pescaggio dei terminal di Genova e Cagliari risultano aumentati ^(*) rispetto a quanto riportato nella Tab.1.
	B3	Skikda (Algeria)	Bastia; Genova; Nizza; Tolone	Cagliari; Livorno; Oristano;	I valori relativi alla capacità di stoccaggio e/o al pescaggio dei terminal di Genova e Cagliari risultano aumentati ^(*) rispetto a quanto riportato nella Tab.1.
	B4	Marsa el Brega (Libia)	Bastia; Genova; Nizza; Tolone	Cagliari; Livorno; Oristano;	I valori relativi alla capacità di stoccaggio e/o al pescaggio dei terminal di Genova e Cagliari risultano aumentati ^(*) rispetto a quanto riportato nella Tab.1.
	B5	Idku (Egitto)	Bastia; Genova; Nizza; Tolone	Cagliari; Livorno; Oristano;	I valori relativi alla capacità di stoccaggio e/o al pescaggio dei terminal di Genova e Cagliari risultano aumentati ^(*) rispetto a quanto riportato nella Tab.1.

(*) Genova: Pescaggio = 8 m; Capacità stoccaggio = 7.000 m³

Cagliari: Pescaggio = 8 m

4.3 Scenario 3: Livorno diventa porto di approvvigionamento della rete

L'off-shore di Livorno viene considerato nodo di approvvigionamento della rete small-scale e il nodo di Livorno esce dalla rete dei porti acquirenti, che da 7 passano a 6.

Il modello di ottimizzazione è applicato su un gruppo di 4 istanze test (Gruppo C), due considerano i 6 nodi compratori nell'ipotesi che ciascuno di essi gestisca il proprio approvvigionamento di GNL in modo autonomo e indipendente (C1.1 e C1.2), e due considerano i 6 nodi compratori organizzati in coalizione (C2.1 e C2.2).

Entrambe le coppie di istanze differiscono per i valori relativi alla capacità di stoccaggio e al pescaggio di alcuni nodi acquirenti. La prima istanza considera i valori definiti nella Tabella 1, mentre la seconda istanza assume un incremento della capacità di stoccaggio e/o del pescaggio per i terminal di Genova e Cagliari. Il pescaggio viene portato ad 8 m per entrambi, la capacità del deposito di Genova passa da 3.500 m³ a 7.000 m³.

La Tabella 6 dettaglia le specifiche di ciascuna delle 4 istanze test in cui Livorno diventa porto di approvvigionamento.

Tabella 6 - Caratterizzazione degli scenari di rete con Livorno porto di approvvigionamento della rete.

	ID	Terminal di esportazione	Nodi acquirenti nella rete small-scale tirrenica	Specifiche	
G	C1.1	Livorno off-shore (Italia)	Bastia; Genova; Oristano; Tolone	Cagliari; Nizza;	L'off-shore di Livorno viene considerato terminal di approvvigionamento e il nodo di Livorno esce dalla rete dei nodi acquirenti. I 6 nodi compratori si approvvigionano ciascuno in modo indipendente e autonomo I valori relativi alla capacità di stoccaggio e al pescaggio dei 6 nodi compratori sono estratti dalla Tab. 1.
	C1.2	Livorno off-shore (Italia)	Bastia; Genova;	Cagliari; Nizza;	L'off-shore di Livorno viene considerato terminal di approvvigionamento e il nodo di Livorno esce dalla rete dei

R U P P O C			Oristano; Tolone	nodi acquirenti. I 6 nodi compratori si approvvigionano ciascuno in modo indipendente e autonomo I valori relativi alla capacità di stoccaggio e/o al pescaggio dei nodi di Genova e Cagliari risultano aumentati ^(*) rispetto a quanto riportato nella Tab.1.
	C2.1	Livorno off-shore (Italia)	Bastia; Cagliari; Genova; Nizza; Oristano; Tolone	L'off-shore di Livorno viene considerato terminal di approvvigionamento e il nodo di Livorno esce dalla rete dei nodi acquirenti. I 6 nodi compratori si approvvigionano in coalizione, con l'eccezione del terminal di Genova che è servito in modo totalmente autonomo e indipendente. I valori relativi alla capacità di stoccaggio e al pescaggio dei 6 nodi compratori sono estratti dalla Tab. 1.
	C2.2	Livorno off-shore (Italia)	Bastia; Cagliari; Genova; Nizza; Oristano; Tolone	L'off-shore di Livorno viene considerato terminal di approvvigionamento e il nodo di Livorno esce dalla rete dei nodi acquirenti. I 6 nodi compratori si approvvigionano in coalizione. I valori relativi alla capacità di stoccaggio e/o al pescaggio dei nodi di Genova e Cagliari risultano aumentati ^(*) rispetto a quanto riportato nella Tab.1.

^(*) Genova: Pescaggio = 8 m; Capacità stoccaggio = 7.000 m³

Cagliari: Pescaggio = 8 m

4.4 Scenario 4: assetto di approvvigionamento in coalizione con introduzione di caratteristiche di offerta migliorate nei nodi compratori (scenario prospettico)

Lo Scenario 4 assume che i nodi compratori, con condizioni di offerta migliorate rispetto a quelle attuali, gestiscano in coalizione i propri approvvigionamenti di GNL con l'obiettivo di individuare le caratteristiche ottimali della nave metaniera (capacità e pescaggio) che garantirebbero la maggiore efficienza della rete di approvvigionamento. Il pescaggio operativo viene portato a 8 metri per tutti i porti compratori e la capacità dei depositi costieri di Livorno e Genova aumentata rispettivamente fino a 18.300 m³ e 16.100 m³.

Il modello di ottimizzazione è applicato su 5 istanze test; ogni istanza assume di approvvigionarsi da un diverso porto di esportazione tra i cinque considerati:

- D1. Barcellona (Spagna);
- D2. Delimara (Malta);
- D3. Skikda (Algeria);
- D4. Marsa el Brega (Libia);
- D5. Idku (Egitto).

5 Risultati

Il presente capitolo illustra i risultati derivanti dall'applicazione del modello di ottimizzazione per ciascuna delle istanze test nei quattro scenari di rete considerati (approvvigionamento BAU; approvvigionamento in coalizione; Livorno porto di approvvigionamento; scenario prospettico con introduzione di caratteristiche di offerta migliorate nei nodi compratori).

5.1 Risultati relativi allo scenario 1: assetto di rete attuale (BAU)

Le Tabella 7 e Tabella 8 sintetizzano i risultati relativi alle istanze test assimilabili all'attuale funzionamento del sistema di approvvigionamento del GNL per via marittima, in cui i diversi nodi acquirenti gestiscono ciascuno in modo autonomo e indipendente i propri approvvigionamenti di GNL. La Tabella 7 si riferisce alla rete i cui nodi compratori hanno le caratteristiche fisiche definite in Tabella 1 (riferite allo stato di fatto o di progetto nei nodi in esame), mentre la Tabella 8 si riferisce alla rete in cui viene ipotizzato un potenziamento infrastrutturale per i nodi di Genova e Cagliari.

Le tabelle riportano il costo di trasporto relativo a ciascuno dei sette nodi acquirenti in funzione del porto di esportazione utilizzato. Per ciascun nodo compratore viene evidenziata in grassetto l'opzione di trasporto più conveniente.

Le ultime colonne della tabella dettagliano inoltre:

- il costo complessivo della rete di trasporto per ciascuno dei cinque porti di esportazione (calcolato come somma dei costi di trasporto relativi ai sette nodi acquirenti). Il costo di rete relativo all'opzione più vantaggiosa è evidenziato in grassetto;
- il totale di miglia navigate per l'approvvigionamento mensile della rete;
- il delta (Δ) di costo che caratterizza l'approvvigionamento da ciascun nodo esportatore rispetto all'opzione di rete identificata come di minimo costo (riportata nella tabella in grassetto). Il Δ può essere interpretato come il ribasso unitario minimo in termini di €/m³ che dovrebbe applicarsi sul prezzo di acquisto del GNL al nodo di esportazione i affinché lo stesso possa risultare competitivo rispetto al nodo di esportazione che serve la rete di minimo costo.

Il Δ di costo che caratterizza la rete di trasporto relativa al porto esportatore i è calcolato come:

$$\Delta \text{ di costo} = \frac{(\text{costo rete } i - \text{costo rete minimo costo})}{\text{totale mc trasportati nella rete}}$$

Tabella 7 - 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 8 - Costo di trasporto del GNL per via marittima nell'assetto senza coalizione (€/mese) - Ipotesi di potenziamento infrastrutturale sui nodi di Genova e Cagliari.

	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	26048	42180	11018	9504	7474	122656	4498	-
Malta	17248	11862	43660	59052	17283	26893	21472	197470	7628	2.5
Skikda	14080	6125	34040	48951	8730	14362	13270	139557	5016	0.6
Marsa el Brega	31046	25942	73186	99345	35200	34672	35200	334592	12976	7.1
Idku	56672	48470	124690	181152	51568	61142	61882	585576	22528	15.5

La creazione di una coalizione permetterebbe di ridurre il costo totale di rete del 37%. Sia nel caso in coalizione sia nel caso senza coalizione, il porto di approvvigionamento che permette di avere costi di rete più bassi è Barcellona. Skikda è però un'alternativa molto valida, poiché se si riuscisse a pattuire un prezzo di acquisto a m³ inferiore di almeno 0,60 € rispetto al prezzo offerto da Barcellona, allora Skikda diventerebbe l'opzione globalmente più vantaggiosa. Le altre alternative risultano meno competitive.

5.2 Risultati relativi allo scenario 2: assetto di progetto con porti in coalizione

Le Tabelle 9 e 10 sintetizzano i risultati relativi ai due gruppi di istanze test che caratterizzano lo scenario di coalizione in cui i nodi acquirenti dello spazio di cooperazione gestiscono in modo coordinato i propri approvvigionamenti di GNL.

Per ciascuna istanza è riportata la quota del costo di trasporto relativa a ciascun nodo acquirente in funzione del porto di esportazione impiegato. La quota del costo di trasporto attribuita ai singoli nodi acquirenti è calcolata dividendo il costo di trasporto totale della rete proporzionalmente al volume di GNL acquisito da ciascun nodo. Le ultime colonne della tabella dettagliano inoltre:

- il costo complessivo della rete di trasporto per ciascuno dei cinque porti di esportazione. Il costo di rete relativo all'opzione di minimo costo è evidenziato in grassetto;
- il totale di miglia navigate per l'approvvigionamento mensile della rete;
- il delta (Δ) di costo che caratterizza l'approvvigionamento da ciascun nodo esportatore rispetto all'opzione di rete identificata come di minimo costo (riportata nella tabella in grassetto). Come definito in precedenza, il Δ può essere interpretato come il ribasso unitario minimo in termini di €/m³ che dovrebbe applicarsi sul prezzo di acquisto del GNL al nodo di esportazione i affinché lo stesso possa risultare competitivo rispetto al nodo di esportazione che serve la rete di minimo costo.

Tabella 9 - Istanze del Gruppo A - Costo di trasporto del GNL per via marittima nell'assetto in coalizione (€/mese).

ID	Nodo esportatore	Costo di approvvigionamento dei nodi in coalizione (€/mese)							Costo di rete (€/mese)	Distanza (mn/mese)	Δ_{costo} (€/m ³)
		Bastia	Cagliari	Genova	Livorno	Nizza	Oristano	Tolone			
A1	Barcellona	587	5707	74342	49635	936	1195	5332	137734	6097	-
A2	Malta	814	7905	124608	69174	1297	1656	7386	212839	9671	2.5
A3	Skikda	597	5800	97152	54501	951	1215	5419	165635	7418	0.9
A4	Marsa el	1333	12953	208877	115068	2125	2713	12102	355171	16112	7.3

	Brega										
A5	Idku	2146	20855	355872	199398	3421	4368	19485	605545	27045	15.6

Tabella 10 - Istanze del Gruppo B - Costo di trasporto del GNL per via marittima nell'assetto in coalizione con ipotesi di potenziamenti infrastrutturali nei nodi di Genova e Cagliari (€/mese).

ID	Nodo esportatore	Costo di approvvigionamento dei nodi in coalizione con ipotesi potenziamenti infrastrutturali nodi Genova e Cagliari (€/mese)							Costo di rete (€/mese)	Distanza (mn/mese)	Δcosto (€/m ³)
		Bastia	Cagliari	Genova	Livorno	Nizza	Oristano	Tolone			
B1	Barcellona	909	8834	36995	50391	1449	1850	8254	108683	2074	-
B2	Malta	1188	11543	57963	69779	1893	2418	10784	155568	2724	1.6
B3	Skikda	916	8905	45075	57227	1461	1865	8320	123771	2101	0.5
B4	Marsa Brega ^{el}	1912	18582	96212	116614	3048	3892	17361	257621	4388	5.0
B5	Idku	3038	29527	161279	208594	4844	6184	27587	441053	6956	11.1

Il costo di approvvigionamento di Genova risulta essere molto alto se si considera il suo assetto infrastrutturale attuale (Istanze del Gruppo A). Il fondale di Genova e le ridotte dimensioni del suo deposito richiedono infatti sei visite al mese con una nave dedicata per il soddisfacimento della sua domanda di GNL. Nello scenario di potenziamento infrastrutturale (Istanze del Gruppo B), Genova può invece essere servita da una nave più grande all'interno di un itinerario che tocca più porti, con una forte riduzione del suo costo di approvvigionamento (50%) e del costo globale di rete (21%). Occorre però considerare che l'ingresso del nodo di Genova nella coalizione comporta la ripartizione dei suoi costi di approvvigionamento tra tutti i membri della coalizione, con un conseguente incremento di costo per gli altri porti.

5.3 Risultati relativi allo scenario 3: Livorno diventa porto di approvvigionamento dell'intera rete

La Tabella 11 sintetizza i risultati relativi alle quattro istanze test che caratterizzano lo scenario di rete in cui l'off-shore di Livorno diventa porto di approvvigionamento.

Per ciascuna istanza è riportato il costo di trasporto relativo a ciascun nodo acquirente nella specifica configurazione di rete. Le ultime colonne della tabella dettagliano inoltre:

- il costo complessivo della rete di trasporto relativo a ciascuna istanza;
- il totale di miglia navigate per l'approvvigionamento mensile della rete.

Data la posizione geografica di Livorno, di maggiore centralità nella rete rispetto agli altri nodi esportatori, i costi di rete risultano notevolmente ridotti. Bisogna però considerare che Livorno dovrebbe fungere da intermediario, comprando il GNL da uno degli attuali porti esportatori e applicando un prezzo di vendita più elevato all'utente. Con il potenziamento del porto di Genova, il numero di viaggi mensili necessari per rifornire Genova diminuirebbe. La soluzione ottima per la coalizione comprenderebbe sempre viaggi dedicati per Genova. Genova continuerebbe a sostenere integralmente e autonomamente i propri costi, ma con il vantaggio di una riduzione

significativa dei suoi costi (-50%) senza un aumento di costo per gli altri porti, rendendo così il suo ingresso in coalizione vantaggioso per tutti i membri.

Tabella 11 - 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	Si coalizione	907	8810	16474	1445	1845	8231	37712	1148
C2.2	Livorno	Si coalizione + potenziamento Genova e Cagliari	907	8810	8237	1445	1845	8231	37712	662

5.4 Risultati relativi allo scenario 4: porti in coalizione con caratteristiche di offerta migliorate nei nodi compratori (scenario prospettico)

La Tabella 12 sintetizza i risultati relativi alle cinque istanze test che caratterizzano lo scenario di rete prospettico in cui si ipotizza un potenziamento delle caratteristiche di offerta (pescaggio e capacità del deposito) dei nodi compratori della rete.

Per ciascuna istanza è riportato il costo di trasporto relativo a ciascun nodo acquirente nella specifica configurazione di rete. Le ultime colonne della tabella dettagliano inoltre:

- il costo complessivo della rete di trasporto per ciascuno dei cinque porti di esportazione. Il costo di rete relativo all'opzione di minimo costo è evidenziato in grassetto;
- il totale di miglia navigate per l'approvvigionamento mensile della rete;
- il delta (Δ) di costo che caratterizza l'approvvigionamento da ciascun nodo esportatore rispetto all'opzione di rete identificata come di minimo costo (riportata nella tabella in grassetto). Come definito in precedenza, il Δ può essere interpretato come il ribasso unitario minimo in termini di €/m³ che dovrebbe applicarsi sul prezzo di acquisto del GNL al nodo di esportazione i affinché lo stesso possa risultare competitivo rispetto al nodo di esportazione che serve la rete di minimo costo.

Tabella 12 - Istanze dello Scenario 4 - Costo di trasporto del GNL nello scenario prospettico con attributi di offerta migliorati nei nodi compratori.

ID	Nodo esportatore	Costo di approvvigionamento dei nodi in coalizione con ipotesi caratteristiche di offerta migliorate	Costo di rete	Distanza (mn/mese)	Δ costo (€/m ³)
----	------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------	--------------------	------------------------------------

		(€/mese)							(€/mese)		
		Bastia	Cagliari	Genova	Livorno	Nizza	Oristano	Tolone			
D1	Barcellona	427	4146	13701	15413	680	868	3874	39109	1866	-
D2	Malta	581	5645	18655	20987	926	1182	5274	53251	2545	0.31
D3	Skikda	467	4536	14988	16861	744	950	4238	42782	2050	0.08
D4	Marsa el Brega	927	9004	29753	33473	1477	1886	8412	84932	4063	1.00
D5	Idku	1563	15186	50182	56455	2491	3181	14188	143244	6863	2.28

Nello scenario prospettico che prevede caratteristiche di offerta migliorate nei nodi compratori, l'opzione di rete più conveniente è quella si appoggia su Barcellona, con differenze di costo minime rispetto alle opzioni di rete con Malta e Skikda. Marsa el Brega e Idku, data la loro posizione geografica decentrata rispetto all'area di studio, risultano alternative meno competitive.

6 Discussione

6.1 Differenza di costo tra i diversi assetti

La Tabella 13 illustra il risparmio percentuale sui costi di trasporto che si avrebbe nel passaggio dallo scenario di approvvigionamento BAU allo scenario di approvvigionamento in coalizione (Scenario 2 - Istanze del Gruppo A).

L'ingresso in coalizione, qualunque sia il deposito di approvvigionamento scelto, comporta una notevole riduzione dei costi per tutti i porti, esclusa Genova, per la quale i costi di trasporto rimarrebbero inalterati. Infatti, anche entrando in coalizione, Genova verrebbe servita da servizi dedicati e sosterebbe interamente il suo costo di approvvigionamento, senza dividerlo con gli altri membri della coalizione. Genova avrebbe comunque un vantaggio ad entrare in coalizione, riguardante il prezzo di acquisto del GNL. Infatti, a fronte di una domanda molto più ampia, il porto di esportazione potrebbe fornire uno sconto maggiore sul prezzo di vendita del GNL, con ripercussioni positive anche per Genova.

Tabella 13- 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%

La Tabella 14 illustra la variazione percentuale sui costi di trasporto che si avrebbe nel passaggio dallo scenario di approvvigionamento BAU allo scenario di approvvigionamento in coalizione con potenziamenti infrastrutturali (Scenario 2 - Istanze del Gruppo B).

Grazie ai potenziamenti infrastrutturali Genova potrebbe essere inserita all'interno di un itinerario che tocca più porti. I suoi costi andrebbero quindi divisi con la coalizione. Questo comporterebbe un grosso vantaggio per Genova ma un incremento di costi per altri porti come Bastia, Nizza e Oristano, rendendo di fatti questa ipotesi non percorribile. Si noti che, essendo i costi di rete distribuiti in base allo share di domanda (percentuale di domanda di un porto rispetto alla domanda totale) Livorno trarrebbe vantaggio dall'ingresso in coalizione di Genova. Infatti, senza Genova, Livorno avrebbe uno share molto grande per cui dovrebbe sostenere la maggior parte dei costi di rete. Con l'ingresso di Genova il suo share sarebbe dimezzato e i costi di rete andrebbero ripartiti con Genova, comportando una riduzione di costo per Livorno.

Tabella 14- 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%

La Tabella 15 illustra il risparmio percentuale sui costi di trasporto che si avrebbe nel passaggio dallo scenario di approvvigionamento BAU allo scenario di approvvigionamento prospettico di coalizione con identificazione degli attributi di offerta ottimali per la nave e i depositi costieri (Scenario 4).

Tabella 15 - Risparmio percentuale sui costi di trasporto ottenibile nel passaggio dall'assetto senza coalizione (BAU) all'assetto con coalizione e attributi di offerta migliorati (Scenario 4).

	Risparmio percentuale (%)							
	Bastia	Cagliari	Genova	Livorno	Nizza	Oristano	Tolone	Totale
Barcellona	96.6	69.7	81.6	76.7	93.8	90.9	48.2	79.9
Malta	96.6	52.4	85.0	77.2	94.6	95.6	75.4	82.9
Skikda	96.7	25.9	84.56	76.8	91.5	93.4	68.1	81.1
Marsa el Brega	97.0	65.3	85.8	78.2	95.8	94.6	76.1	83.8
Idku	97.2	68.7	85.9	78.8	95.2	94.8	77.1	84.1

Portando i fondali di tutti i porti a 8 metri e ingrandendo la capacità dei depositi costieri di Livorno (da 4.500 a 18.300 m³) e di Genova (da 3.000 a 16.100 m³), è possibile ridurre i costi di trasporto di circa l'80%. Fondali più profondi e serbatoi più grandi consentirebbero di effettuare l'approvvigionamento di tutti i porti in coalizione utilizzando solo due navi, una large e una extralarge. Questo assetto, oltre a ridurre i costi, ridurrebbe anche le distanze percorse, che scenderebbero a 1.866 miglia nautiche con Barcellona hub, con una conseguente ulteriore riduzione dell'impatto ambientale (vedi paragrafo 6.2).

6.2 L'impatto in termini ambientali e di sicurezza della navigazione

L'applicazione descritta ha permesso di valutare quanto una gestione del sistema di approvvigionamento del GNL in coalizione tra i porti dello spazio di cooperazione potrebbe 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, ovviamente, alla riduzione del numero totale di miglia navigate per effetto dell'ottimizzazione dei percorsi di distribuzione.

È facile intuire che quello economico non è però 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 nel numero totale di miglia navigate, ha evidenti impatti positivi in termini di sicurezza della navigazione e riduzione delle emissioni inquinanti.

Relativamente a queste ultime, è utile sottolineare che 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.

Nel 2018, l'International Maritime Organization (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.

Per soddisfare gli ambiziosi livelli di mitigazione concordati a livello internazionale, l'industria marittima e tutte le parti interessate sono chiamate a intraprendere sforzi sostanziali per trovare e implementare soluzioni volte a ridurre l'impatto ambientale del settore. L'ottimizzazione delle reti di distribuzione può fornire il suo contributo per la mitigazione dell'impatto ambientale delle attività marittime.

Questo paragrafo riporta, per i diversi scenari di rete analizzati, una stima delle emissioni di CO₂, NO_x, SO_x, PM, NMVOC e BC (Black Carbon).

Le stime di emissione 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) riportati nella Figura 1.

Pollutants	Fuel Type	The Fourth IMO GHG Study						
		2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
CO ₂	HFO	3,114	3,114	3,114	3,114	3,114	3,114	3,114
	MDO	3,206	3,206	3,206	3,206	3,206	3,206	3,206
	LNG	2,750	2,750	2,749	2,749	2,750	2,753	2,755
CH ₄	HFO	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
	MDO	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
	LNG	5.31	6.00	7.35	8.48	10.20	11.22	11.96
N ₂ O	HFO	0.17	0.17	0.17	0.17	0.18	0.18	0.18
	MDO	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18
	LNG	0.08	0.08	0.08	0.09	0.09	0.10	0.10
NO _x	HFO	78.61	77.18	76.19	76.98	76.71	76.67	75.90
	MDO	53.12	52.51	52.14	57.68	57.45	57.62	56.71
	LNG	5.60	5.90	5.82	5.99	7.46	10.95	13.44
CO	HFO	2.84	2.83	2.84	2.86	2.86	2.87	2.88
	MDO	2.48	2.47	2.47	2.58	2.58	2.60	2.59
	LNG	1.88	2.07	2.38	2.64	3.10	3.57	3.97
NMVOC	HFO	3.14	3.13	3.13	3.17	3.18	3.19	3.20
	MDO	2.16	2.15	2.15	2.39	2.39	2.42	2.40
	LNG	0.81	0.88	0.99	1.09	1.26	1.44	1.59
SO _x	HFO	46.63	44.80	45.31	47.90	50.44	50.83	50.83
	MDO	2.74	2.54	2.35	1.56	1.56	1.56	1.37
	LNG	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
PM	HFO	7.11	6.96	7.01	7.26	7.48	7.53	7.55
	MDO	0.97	0.96	0.94	0.92	0.92	0.92	0.90
	LNG	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11
PM _{2.5}	HFO	6.54	6.41	6.45	6.68	6.88	6.93	6.94
	MDO	0.90	0.88	0.87	0.84	0.84	0.85	0.83
	LNG	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
BC	HFO	0.26	0.27	0.27	0.26	0.26	0.26	0.26
	MDO	0.43	0.43	0.43	0.37	0.37	0.37	0.38
	LNG	0.019	0.019	0.019	0.019	0.019	0.019	0.019

Figura 1. Emission factors (kg pollutant per tonne fuel). Fonte: Fourth IMO GHG Study (2020)

In questo studio, i consumi di trasporto che caratterizzano i diversi scenari sono calcolati come somma dei consumi relativi alle distanze servite dalle diverse tipologie di nave, utilizzando i valori riportati nella Tabella 16. Per ciascuno scenario, il consumo effettivo per ciascuna tipologia di nave è calcolato moltiplicando il consumo orario per il tempo totale di navigazione. 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. La Tabella 17 dettaglia per l'opzione di rete migliore relativa a ciascuno degli scenari analizzati:

- il numero e la tipologia di navi impiegate mensilmente;
- le miglia totali percorse da ciascuna categoria di nave nel mese di riferimento.

I consumi mensili relativi ai diversi scenari di rete sono riportati nella Tabella 18, sia nell'ipotesi di navi alimentate con HFO che di navi alimentate con LNG.

Tabella 16 - 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

Tabella 17 - Distanze navigate mensilmente per tipologia di nave.

Scenario ID	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
1 - No coalizione (BAU)	9	3				9274	1558			
2.A - Sì coalizione	6	1	1			4224	1096	777		
2.B - Sì coalizione + potenziamenti infrastrutturali Genova e Cagliari	2	1		1		1408	976		1098	
4 – Sì coalizione + attributi di offerta migliorati				1	1				708	1158

Tabella 18 - Consumi di carburante mensili (t/mese): alimentazione con HFO e alimentazione con LNG.

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	
1 - No coalizione (BAU)	273,71	50,01	0,00	0,00	0,00	323,72	212,53	40,39	0,00	0,00	0,00	252,92
2.A - Sì coalizione	124,67	35,18	31,45	0,00	0,00	191,30	96,80	28,41	27,98	0,00	0,00	153,20

2.B - Sì coalizione + potenziamenti infrastrutturali Genova e Cagliari	41,56	31,33	0,00	61,92	0,00	134,80	32,27	25,30	0,00	55,21	0,00	112,78
4 – Sì coalizione + attributi di offerta migliorati	0,00	0,00	0,00	39,92	86,25	126,17	0,00	0,00	0,00	35,60	75,69	111,29

La Tabella 19 e la Tabella 20 riportano i valori di emissione relativi ai diversi scenari analizzati nell'ipotesi, rispettivamente, di navi alimentate con HFO e con LNG. I valori delle emissioni sono calcolati moltiplicando il Fattore di Emissione – EF (kg pollutant per tonne fuel) relativo a ciascun inquinante per il consumo mensile (tonne fuel/month) relativo allo specifico scenario di rete considerato.

Tabella 19 - 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	NMVOC EF=3,2	BC EF=0,26
1 - No coalizione (BAU)	1.008.069,3	24.570,5	16.454,8	2.444,1	1.035,9	84,2
2.A - Sì coalizione	595.698,6	14.519,4	9.723,6	1.444,3	612,2	49,7
2.B - Sì coalizione + potenziamenti infrastrutturali Genova e Cagliari	419.763,9	10.231,2	6.851,8	1.017,7	431,4	35,0
4 – Sì coalizione + attributi di offerta migliorati	392.894,0	9.576,3	6.413,2	952,6	403,7	32,8

Tabella 20 - Valori di emissione mensili (kg/mese) relativi ai diversi scenari – alimentazione LNG.

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
1 - No coalizione (BAU)	696.799,4	3.399,3	7,6	27,8	402,1	4,8
2.A - Sì coalizione	422.055,2	2.059,0	4,6	16,9	243,6	2,9
2.B - Sì coalizione + potenziamenti infrastrutturali Genova e Cagliari	310.696,1	1.515,7	3,4	12,4	179,3	2,2
4 – Sì coalizione + attributi di offerta migliorati	306.600,8	1.495,7	3,3	12,2	176,9	2,1

La Tabella 21 illustra la riduzione percentuale (%) dell'inquinamento che si registrerebbe nel passaggio dallo scenario BAU ai diversi scenari di progetto. Nell'ipotesi di navi alimentate in modo tradizionale, il passaggio dall'assetto di approvvigionamento attuale (Scenario 1 - BAU) all'assetto di approvvigionamento in coalizione (Scenario 2.A) produrrebbe da solo una riduzione percentuale dell'inquinamento legato alle attività di trasporto del GNL pari al 40,9%. Tale riduzione si attesterebbe al 58,4% nell'ipotesi di potenziamenti infrastrutturali sui depositi costieri di Genova e Cagliari (Scenario 2.B) e potrebbe potenzialmente raggiungere il 61% nell'ipotesi di un più generale dimensionamento ottimale dei depositi costieri (Scenario 4).

Tabella 21 - Riduzione dell'inquinamento nel passaggio dallo scenario BAU ai diversi scenari di progetto.

Scenario	Riduzione percentuale (%) dell'inquinamento nel passaggio dallo scenario BAU ai diversi scenari di progetto	
	HFO mode	LNG mode
2.A - Sì coalizione	-40,9%	-39,4%
2.B - Sì coalizione + potenziamenti infrastrutturali Genova e Cagliari	-58,4%	-55,4%
4 - Sì coalizione + attributi di offerta migliorati	- 61,0%	-56,0%

La Tabella 22 mostra, per ciascuno degli inquinanti considerato, la riduzione percentuale media delle emissioni che si realizzerebbe nel passaggio da navi cisterna alimentate con carburanti tradizionali a navi cisterna alimentate con LNG. L'impiego di navi cisterna alimentate a GNL comporterebbe la riduzione di oltre un quarto delle emissioni di CO₂, l'eliminazione pressoché totale degli SO_x e delle polveri sottili, una fortissima riduzione delle emissioni di NO_x e BC, e la riduzione di quasi il 60% delle emissioni NMVOC.

Tabella 22 - Riduzione percentuale media degli inquinanti nel passaggio da navi alimentate con HFO a navi alimentate con GNL.

	CO ₂	NO _x	SO _x	PM	NMVOC	BC
Riduzione percentuale degli inquinanti col passaggio da HFO a GNL mode (%)	-28,7%	-85,7%	-99,9%	-98,8%	-59,9%	-94,1%

Dai dati emerge una chiara indicazione del beneficio ambientale che deriverebbe dall'adozione di un sistema organizzato di approvvigionamento del GNL nello spazio di cooperazione. 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 quasi 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.

È bene inoltre rimarcare che il caso studio qui presentato 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 quindi 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 e l'implementazione di tecnologie e pratiche operative sempre più ecologiche 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.

Bibliografia e sitografia

Bittante, A., Pettersson, F. and Saxén, H., 2017, September. A multi-period optimization model for the design of new LNG supply chains. In Proceedings of the 58th Conference on Simulation and Modelling (SIMS 58) Reykjavik, Iceland, September 25th–27th, 2017 (No. 138, pp. 332-342). Linköping University Electronic Press.

Chen, Z., An, H., Gao, X., Li, H. and Hao, X., 2016. Competition pattern of the global liquefied natural gas (LNG) trade by network analysis. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 33, pp.769-776.

Hartley, P.R., 2015. The future of long-term LNG contracts. The Energy Journal, pp.209-233.

IMO – International Maritime Organization (2020). Fourth IMO's GHG Study.

Maxwell, D. and Zhu, Z., 2011. Natural gas prices, LNG transport costs, and the dynamics of LNG imports. Energy Economics, 33(2), pp. 217-226.

PIANC, 2014. Permanent International Association Navigation Congress (PIANC), Report No.121-2014, Harbour Approach Channels Design Guidelines.

Rogers, H., 2018. The LNG Shipping Forecast: Costs Rebounding, Outlook Uncertain. Technical report. The Oxford Institute for energy studies.

Williams, C., 2010. Management 6e. Cengage Learning, 2010. ISBN 0538745975.