



Università
Ca' Foscari
Venezia

Corso di Laurea magistrale in
Relazioni Internazionali Comparete

Tesi di Laurea

**Decarbonizzazione del trasporto marittimo:
la transizione all'idrogeno verde come variabile
geoeconomica nel contesto mediterraneo ed
europeo**

Relatore

Ch. Prof. Stefano Soriani

Laureando

Isacco Del Tegno
Matricola 873029

Anno Accademico

2022/2023

Elenco delle abbreviazioni

APV	Autorità Portuale di Valencia	MDO	Diesel marino / Marine Diesel Oil
CAPEX	Spese in conto capitale	MEPC	Marine Environment Protection Committee
CBG	Biogas compresso	MGO	Marine GasOil / gasolio marino
CCS	Sistemi di cattura e sequestro della CO ₂	MRV	Monitoring, Reporting and Verification
CI	Carbon intensity	MSC	Mediterranean Shipping Company
COP	Conferenza delle Parti	OPS	Onshore power supply
CSSC	China State Shipbuilding Corporation	RFNBO	Renewable fuels of non-biological origin
DAC	Cattura diretta dell'aria	RSU	Rifiuti solidi urbani
EMSA	European Maritime Safety Agency	TEN-T	Rete Transeuropea di Trasporto
ETC	Energy Transition Commission	TEU	Twenty-foot equivalent unit
ETS	Emission Trading Scheme dell'UE	TTW	Tank-to-Wake
GNL	Gas naturale liquefatto	UCO	Olio da cucina esausto
HFO	Heavy Fuel Oil / combustibile pesante	VLSFO	Very Low Sulphur Fuel Oil / olio combustibile a tenore di zolfo molto basso
IMO	Organizzazione Marittima Internazionale	WTW	Well-to-Wake
IMO	DCS IMO Data Collection System	WTT	Well-to-Tank
IRENA	Agenzia Internazionale per le Energie Rinnovabili	Elenco dei composti chimici	
LBG	Biogas liquefatto	CH₄	Metano
MARPOL	Convenzione internazionale per la prevenzione dell'inquinamento causato da navi	CH₃OH	Metanolo
		H	Idrogeno
		N	Azoto
		NH₃	Ammoniaca
		N₂O	Protossido di azoto
		NO_x	Ossidi di azoto
		SO_x	Ossidi di zolfo

Indice

Summary.....	3
Introduzione.....	7
I Carburanti ad emissioni zero.....	8
<i>Una premessa</i>	8
1.1 Idrogeno	10
<i>Sostenibilità della produzione ed analisi Well-to-Wake</i>	12
<i>Considerazioni tecniche</i>	14
<i>Conclusioni</i>	15
1.2 Ammoniaca	16
<i>Disponibilità</i>	18
<i>Sostenibilità</i>	19
<i>Aspetti tecnico-economici</i>	20
<i>Regolamentazione</i>	21
<i>Conclusioni</i>	21
1.3 Metanolo.....	22
<i>Sostenibilità</i>	23
<i>Metanolo rinnovabile: il bio-metanolo e l'e-metanolo</i>	26
<i>Considerazioni tecniche</i>	28
<i>Conclusioni</i>	29
1.4 Carburanti rinnovabili gassosi.....	30
<i>Gas Naturale Liquefatto: una non-soluzione</i>	30
<i>GNL come carburante di transizione</i>	31
<i>Disponibilità e scalabilità</i>	35
<i>Conclusioni</i>	36
II Gli attori: Legislatore, Carriers e Porti	38
2.1 Il legislatore.....	38
International Maritime Organization	38
<i>Le tre principali sfide affrontate dall'IMO</i>	40
Unione Europea.....	44
<i>EU Emissions Trading System (EU ETS)</i>	47
<i>FuelEU Maritime Initiative</i>	49
2.2 Carriers	54
MAERSK	55
<i>I carburanti prioritari individuati da Maersk</i>	55
<i>Strategia e percorso di decarbonizzazione</i>	56
<i>La catena di approvvigionamento dei carburanti verdi per Maersk</i>	60

CMA CGM.....	62
<i>I carburanti prioritari individuati da CMA CGM</i>	62
<i>Strategia e percorso di decarbonizzazione</i>	64
<i>La catena di approvvigionamento dei carburanti verdi per CMA CGM</i>	67
Mediterranean Shipping Company - MSC	72
<i>I carburanti prioritari individuati da MSC</i>	72
<i>Strategia e percorso di decarbonizzazione</i>	74
<i>La catena di approvvigionamento dei carburanti verdi per MSC</i>	76
2.3 Porti	78
<i>Il Porto di Rotterdam</i>	79
<i>Il Porto di Valencia</i>	83
<i>Il Porto di Tanger-Med</i>	87
III Gli aspetti geoeconomici	91
<i>L'importanza dell'idrogeno</i>	91
<i>Verso un mercato dell'idrogeno?</i>	92
<i>Verso una nuova mappa geoeconomica?</i>	98
<i>Il binomio luogo di produzione – luogo di distribuzione</i>	103
<i>Conclusione</i>	105
Bibliografia	107

Summary

Since 2005, the number of ships composing the global ocean fleet has doubled. The effect of this growth has resulted in a 20% increase over the past decade in greenhouse gas emissions from the shipping sector. Estimates by the International Maritime Organization indicate that this figure, unless concrete action is taken, could reach levels of 130% of levels recorded in 2008 by 2050. Alternative fuels show potential promise, but their adoption is still in the early stages. In fact, in the year 2022, 98.8% of globally active ships were sailing using conventional fossil fuels. However, in the same year, a glimmer of light came from the fact that 21% of ships whose construction was ordered would operate on alternative fuels or using hybrid technologies.

The decarbonization process in the maritime industry appears to take the form of four main steps: the identification of alternative fuels, the conversion of ships to use them, the adaptation of port infrastructure, and the subsequent formation of green corridors. The main actors taking part to this process are legislators, carriers, and ports.

The urgent need for decarbonization of shipping is clear but the industry is facing multibillion-dollar investments in a context of uncertainty about what are the best ways to ensure the transition. Green hydrogen, i.e. produced using renewable energy sources, has emerged as a possible substitute for conventional fossil fuels, both in its pure form and in its by-products. With regard to the long-range maritime transport, we can say that the maximum valorization of green hydrogen is achieved only when it is converted into its derivatives e-fuels. Among these, the most promising today are e-ammonia, e-methanol, and e-methane. Hence, green hydrogen emerges as a pivotal element of the industry transition, and because of its importance, the need for an attentive analysis of elements related to production and distribution arises. In this sense, factors such as the availability of renewable energy and related infrastructure assume relevance. Interweaving then these considerations with the map of Mediterranean and European maritime transport, a new political-economic geography of transport influenced by the hydrogen factor could in fact appear.

When assessing the sustainability of a fuel, the emissions produced throughout its life cycle must be taken into account. From a methodological point of view, it is therefore important to make use of the Well-to-Wake (WTW) analysis. This analysis can be divided into two phases: the Well-to-Tank (WTT) phase, which considers all the pollutants generated during production, storage and transport to the end consumer; and the

subsequent Tank-to-Wake (TTW) phase, which considers the emissions from the actual combustion and use of the product. Thus, fuels such as green ammonia, green methanol, and e-methane emerge as ideal options to achieve an energy transition in the shipping industry. Other options, such as conventional liquefied natural gas (LNG), on the other hand, are to be considered as “transition fuels” toward truly decarbonized shipping. Indeed, LNG offers a lower climate impact than traditional fuels but, since it is still dependent on fossil fuels, it cannot be considered as the ultimate solution but more as a first step.

As mentioned earlier, the legislator plays a role within the maritime transport decarbonization process. It should act as a guide and facilitator, mapping out the modalities and timeframes to achieve climate goals. The International Maritime Organization, as a UN agency, is committed to this process. However, when defining strict regulation of greenhouse gas emissions from maritime shipping, IMO faces three main challenges at its core. First, a gap in the organization’s ability to effectively regulate various emerging technologies; second, uncertainty about the scope of IMO’s regulatory mandate; and third, a lack of political consensus during negotiation processes. Therefore, IMO’s role as a guide in the decarbonization of maritime transport appears bland and ineffective. In response to perceived IMO inaction on the issue, several regulatory initiatives have emerged in recent years from both the public sector and the industry itself. The European Union, for example, has included maritime transport within the EU Emissions Trading System (ETS) as of January 2024. The ETS is the world’s first international emissions trading system and is a key component of European energy policy. Applicable in all 27 EU member states and European Free Trade Association countries, the system encourages polluters to be responsible for their own GHG emissions. This approach, in addition to encouraging decarbonization efforts, generates revenues to support the EU’s transition to a zero-emissions future. In the wake of European efforts to decarbonize its economy and achieve the goals of the European Green Deal, the launch of the Fit for 55 plan has committed to reforming the EU ETS by making it more ambitious. The system works according to the “Cap and Trade” principle. The cap is used to set a limit on the total amount of greenhouse gases that can be emitted by industries, aircraft and ship operators covered by the system. Within this cap, emission allowances can be traded among operators.

Looking at the actions of the major sea carriers operating in Europe (Maersk, CMA CGM and MSC), it is possible to find a common pattern in addressing the decarbonization of the industry. Indeed, these companies are engaged in the study and application of different technologies, thus operating a diversification strategy. This approach is mainly related to uncertainty about which is the best green fuel from a scalability, cost, and supply chain perspective. It is precisely for this reason that carriers are ordering the construction of new ships whose engines are defined as “multifuel-ready”, meaning they are prepared to use of multiple types of fuels. Alternatively, some carriers are making a gradual transition in order to give the market time to adapt. One example out of all is CMA CGM which is focusing heavily on “e-methane-ready” ships, i.e., ships now powered by fossil LNG but ready to use synthetic methane produced from green hydrogen when it becomes available.

In order to imagine how this whole process may lead to the creation of a new geoeconomic map of maritime transportation influenced by the green hydrogen factor, it is necessary to observe which countries and regions are expected to emerge as leading producers and exporters of this feedstock. As noted earlier, significant availability of renewable energy and the consequent possibility of low-cost sustainable electricity production are believed to be primary characteristics for emerging as leaders in green hydrogen production. Based on this consideration and observing the analyses conducted by the International Renewable Energy Agency, with regard to the European and Mediterranean context, the emergence of the Southwest region of the Mediterranean, specifically Morocco, and Spain as potential producers of large quantities of green hydrogen from solar energy can be noted. At the same time, also worthy to be noted is the production potential of the area stretching from the north of France to Norway. This region, while lacking in solar exposure, in fact boasts a great deal of onshore and offshore wind potential that is widely developed. A practical example of this consideration is the case of the Port of Rotterdam. Indeed, the Dutch port's decarbonization strategy shows a great ability to emerge in the sustainable hydrogen production landscape precisely because of the wise development of offshore wind farms in the North Sea.

By intersecting projections related to green hydrogen production with the logics that specifically determine Mediterranean and European shipping routes, some possible key elements of a geoeconomic shift can be identified.

First of all, one of the factors that needs to be taken into account is that shipping companies, in order to optimize costs, try to offer the most direct services possible between the main ports. Thus, when choosing routes and ports of call, they try to deviate as little as possible from the main route. Ports less than one hundred nautical miles from a main sea route are considered low deviation, and therefore attractive. Northern range ports serve as continental gateways and are therefore generally favored as final stops on east-west routes. On the contrary, the specific Mediterranean context is characterized by a constellation of transshipment ports, i.e. ports that serve as simple hubs for smaller routes. It is precisely in this context that the green hydrogen factor can play a decisive role.

In the globalized world, the competition among ports of call to emerge and channel cargo flows is sharpening and showing a particular degree of malleability, especially in the competition among transshipment hubs. Observing the development of green hydrogen production clusters is believed to be a new element of particular importance to navigate the unfolding geoeconomic and geopolitical developments. Based on all these considerations, a hypothetical scenario in which Spanish and North African ports emerge as leaders in this transformation can be highlighted. North African ports in particular are considered to be of special interest as they have a number of characteristics that elevate them to true competitors for European ports of call: they are extremely close to the main routes, usually have lower operating costs and are placed in an ideal geographic location for the production of large volumes of green hydrogen at competitive costs.

As has been noted, the amount of renewable energy in Europe is limited and, more importantly, sees competition from numerous sectors for its use. In this sense, it is not possible to assume that all of the continent's sustainable energy potential would be directed toward the production of green hydrogen and the specific decarbonization of shipping. It is therefore this scenario that allows speculation about a hypothetical rebalancing of routes to the southern shore of the Mediterranean. At the same time, it should be recognized that the mapping and shaping of maritime flows is affected by numerous other factors that contribute to the final transportation map. Thus, the green hydrogen factor becomes part of the range of elements that the public and private sector will need to consider in order to navigate the evolution of the maritime transportation sector.

Introduzione

Il trasporto marittimo occupa una posizione centrale nella catena di approvvigionamento globale: quasi 100.000 navi commerciali movimentano ogni anno 11 miliardi di tonnellate di merci, pari a circa l'80% del volume del commercio mondiale. Come conseguenza, tale settore risulta essere responsabile di circa il 3% delle emissioni globali annue di gas serra. Per dare una misura di questo dato, se il settore del trasporto marittimo internazionale fosse un Paese, sarebbe il sesto-settimo emettitore di CO₂ con livelli di emissioni paragonabili a quelli della Germania (Balcombe, 2019). A tal proposito, l'Organizzazione Marittima Internazionale (IMO) prevede che entro il 2050 il commercio via mare potrebbe raggiungere livelli di crescita compresi tra il 40% e il 115% rispetto ai livelli registrati nel 2020. Attualmente, circa il 99% della domanda energetica del settore è soddisfatta da combustibili fossili (IMO, 2020a). Considerata la combinazione di questi due fattori, in assenza di interventi l'IMO ha segnalato che le emissioni di gas serra associate al settore del trasporto marittimo potrebbero aumentare tra il 50% e il 250% entro il 2050 rispetto ai livelli di emissione del 2008.

Negli ultimi dieci anni, la crescente consapevolezza dell'impatto climatico del settore marittimo ha stimolato l'interesse dell'industria e dei governi per le misure volte a limitare le emissioni delle navi. L'idrogeno verde, nelle sue varie declinazioni, è spesso apparso come risposta al problema. Il presente elaborato intende analizzare il processo della decarbonizzazione dello shipping marittimo con il fine ultimo di evidenziarne gli elementi ritenuti in grado di influire sull'assetto attuale dei flussi logistici mediterranei ed europei. Specificatamente, si intende osservare come il legame tra gli elementi alla base del processo, ovvero i carburanti sostenibili a base di idrogeno e la loro produzione attraverso l'energia rinnovabile, possa determinare una nuova geografia politica ed economica dei trasporti marittimi. A livello pratico, si osserverà come il binomio luogo di produzione – luogo di distribuzione giocherà nel vicino futuro un ruolo determinante nel successo di determinati porti rispetto ad altri.

L'analisi ruoterà attorno quelle che sono ritenute essere le quattro fasi chiave in cui si concretizzerà il processo di decarbonizzazione: l'individuazione dei carburanti alternativi, la riconversione delle navi per il loro utilizzo, l'adattamento delle infrastrutture portuali ad essi e la conseguente formazione di corridoi verdi. Gli attori parte del processo e di cui verrà osservato il coinvolgimento sono il legislatore, i carriers ed i porti.

I Carburanti ad emissioni zero

Una premessa

Dal 2005 il numero di navi che compone la flotta oceanica mondiale è raddoppiato. L'effetto di tale crescita si è concretizzato in un aumento del 20% negli ultimi dieci anni delle emissioni di gas serra del settore. Le stime dell'Organizzazione Marittima Internazionale affermano che questo dato, senza interventi concreti, potrebbe raggiungere entro il 2050 livelli pari al 130% di quelli registrati nel 2008 (IMO, 2020a). I carburanti alternativi si dimostrano promettenti, ma la loro adozione è ancora nelle fasi iniziali. Nell'anno 2022, infatti, il 98,8% delle navi attive a livello globale navigava utilizzando carburanti convenzionali. Tra questi, l'olio combustibile e il gasolio marino rappresentavano circa il 95% del totale. Nello stesso anno, uno spiraglio di luce è stato però dato dal fatto che il 21% delle navi la cui costruzione è stata ordinata opererà con carburanti alternativi quali gas naturale liquefatto, metanolo o utilizzando altre tecnologie ibride (UNCTAD, 2023). Oltre alle emissioni di anidride carbonica, l'industria del trasporto marittimo è anche associata al rilascio di altri gas serra, in particolare il metano (CH₄), il cui potenziale climalterante è circa 80 volte maggiore rispetto a quello della CO₂ nei primi 20 anni successivi al suo rilascio (MMM Center for Zero Carbon Shipping, 2022). Sia le emissioni di anidride carbonica che di metano hanno mostrato una tendenza al rialzo negli ultimi anni. Tra il 2012 e il 2018, le emissioni di anidride carbonica hanno registrato infatti un aumento sostanziale del 9,6%, mentre le emissioni di metano hanno registrato un notevole aumento dell'87%. Quest'ultimo dato può essere in gran parte attribuito al crescente utilizzo del gas naturale liquefatto (GNL) come combustibile marittimo. Per questo motivo, si prevede che l'espansione dell'utilizzo del GNL nel trasporto marittimo contribuirà a un'ulteriore crescita delle emissioni, sebbene l'entità precisa di questo impatto rimanga incerta.

L'urgenza della decarbonizzazione è evidente, ma il settore si trova a far fronte ad investimenti multimiliardari in un contesto di incertezza riguardo a quali siano i migliori metodi di transizione. Sempre più spesso l'idrogeno è apparso come possibile sostituto dei combustibili fossili classici, sia in forma pura che nei suoi derivati. Proprio per questo motivo, si ritiene utile aprire questa analisi con una panoramica sui principali carburanti alternativi che il mercato sta sperimentando e valutando: idrogeno, e-ammoniaca, e-metanolo ed e-metano.

Appare improbabile che un unico combustibile a zero emissioni possa soddisfare le esigenze di tutti i principali usi marittimi. In futuro, la scelta del carburante varierà probabilmente in base al tipo di navigazione, alla rotta, alla nave e ad altri fattori. Come verrà illustrato in seguito, ogni potenziale combustibile presenta vantaggi, svantaggi e importanti considerazioni tecniche, commerciali e normative. Queste sfide si aggiungono ai costi, che si prevedono però in diminuzione per la maggior parte dei combustibili con il raggiungimento di un'economia di scala.

Come indicato da uno degli istituti faro nell'ambito della decarbonizzazione del sistema marittimo, il Mærsk Mc-Kinney Møller Center for Zero Carbon Shipping (MMM Center for Zero Carbon Shipping), esistono tre percorsi principali per la produzione di carburanti utilizzabili nel trasporto marittimo a basse o zero emissioni di anidride carbonica:

1. Utilizzare energia rinnovabile e componenti chimici a zero emissioni per produrre carburanti a zero emissioni.
2. Utilizzare combustibili convenzionali impiegando meccanismi di cattura della CO₂ e misure per ridurre altre emissioni climalteranti.
3. Utilizzare composti di combustibili diversi che hanno emissioni associate inferiori rispetto alle opzioni convenzionali.

Questi tre percorsi garantiscono la produzione di una gamma di carburanti a basse o zero emissioni di anidride carbonica di cui si può prevedere un'ampia commercializzazione. I combustibili sopracitati continuano ad affrontare sfide legate al loro specifico percorso di approvvigionamento o alle loro proprietà, ma alcuni hanno superato più ostacoli tecnologici e normativi di altri.

I combustibili sostenibili e i loro percorsi di produzione

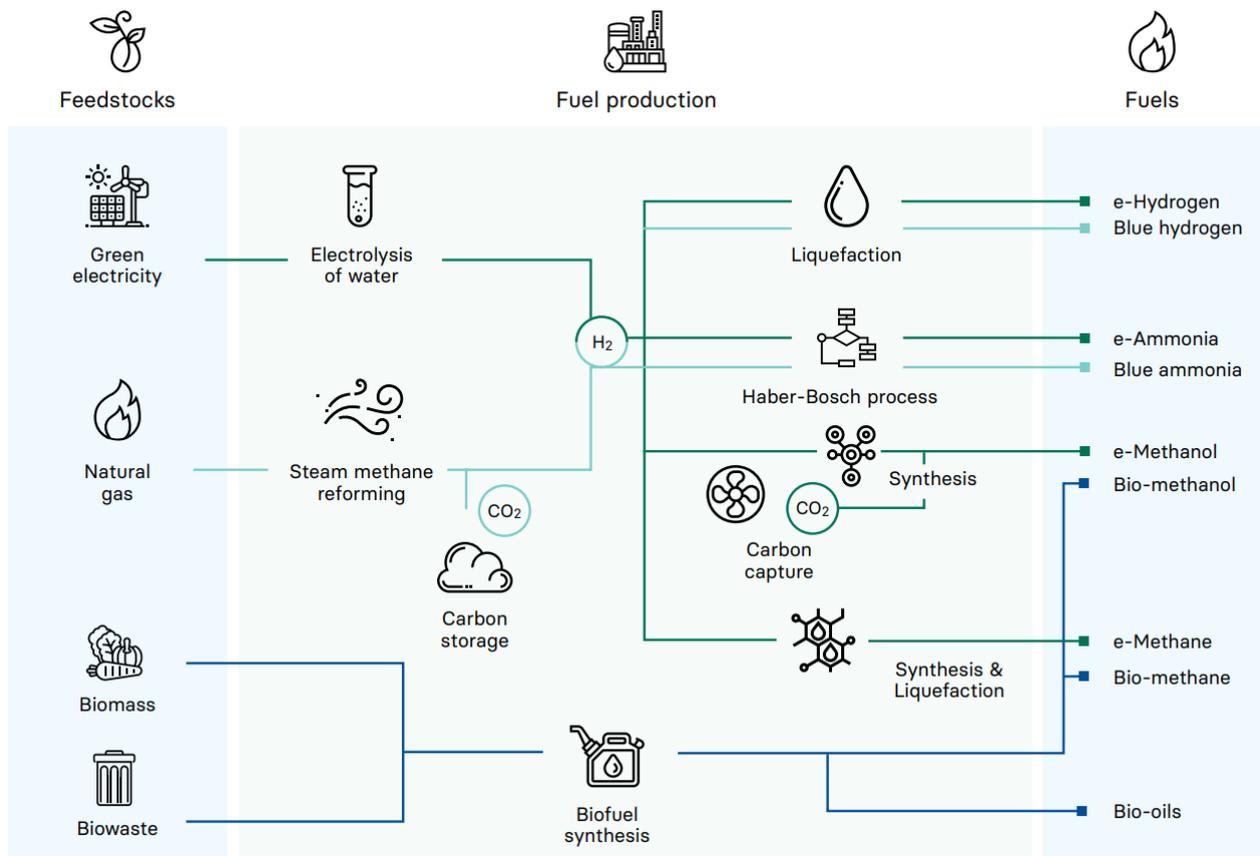


Figura 1

Fonte: MMM Center for Zero Carbon Shipping, Industry Transition Strategy (2021)

1.1 Idrogeno

L'idrogeno (H₂) è un elemento che si trova tipicamente in natura come composto di acqua o metano. Per ottenere idrogeno puro, l'elemento deve essere separato da questi composti. In condizioni standard, l'idrogeno è un gas tipicamente incolore, inodore, insapore, non tossico, relativamente non reattivo e altamente combustibile con un ampio intervallo di infiammabilità. La produzione dell'idrogeno ad oggi avviene comunemente convertendo il gas naturale o il carbone in idrogeno gassoso e CO₂. Al fine di perseguire obiettivi di sostenibilità a lungo termine, tuttavia, è auspicabile che questa metodologia di produzione venga sostituita con la generazione attraverso elettrolisi utilizzando energia rinnovabile. Nel settore manifatturiero, l'idrogeno è tipicamente utilizzato per la produzione chimica o come materia prima industriale.

Negli ultimi anni, l'industria del trasporto ha riconosciuto il potenziale dell'idrogeno per la generazione di elettricità attraverso la tecnologia delle celle a combustibile o dei motori a combustione interna. Quando consumato in una cella a combustibile o in un motore a combustione interna mono-carburante, l'idrogeno ha il potenziale per essere un carburante marino a zero emissioni di anidride carbonica. Se consumato invece in un motore a doppio combustibile, ha comunque la potenzialità di ridurre significativamente le emissioni di CO₂. Possiamo quindi affermare che l'idrogeno come carburante è caratterizzato da un potenziale impatto molto basso sulle emissioni generate nel processo di combustione (American Bureau of Shipping, 2021). Tuttavia, per poterne fare una valutazione complessiva a livello di sostenibilità, appare necessario considerare l'intero ciclo di vita della sua produzione.

In base al percorso produttivo che ha seguito, possiamo così dividere i vari tipi di idrogeno:

- “Idrogeno bruno”, ovvero prodotto dalla lavorazione del carbone o della lignite;
- “Idrogeno grigio”, ovvero prodotto principalmente dalla lavorazione del gas naturale utilizzando un processo chiamato *steam-reforming*, che riunisce gas naturale e acqua riscaldata sotto forma di vapore. Tale processo genera come sottoprodotto della CO₂;
- “Idrogeno blu”, ovvero ottenuto essenzialmente attraverso lo stesso processo dell'idrogeno grigio ma impiegando meccanismi di cattura e sequestro dell'anidride carbonica (CCS) e tecnologie di controllo delle emissioni al fine di eliminare l'impatto della sottoproduzione di CO₂;
- “Idrogeno verde”, ovvero prodotto utilizzando elettricità in eccesso da fonti di energia rinnovabile, come l'energia solare o eolica, per elettrolizzare l'acqua. Gli elettrolizzatori utilizzano una reazione elettrochimica per dividere l'acqua nei suoi componenti di idrogeno e ossigeno, emettendo zero anidride carbonica nel processo.¹

¹ Nello spettro delle tipologie di idrogeno prodotto da fonti di energia rinnovabile esiste inoltre l'“idrogeno rosa”, ovvero idrogeno generato specificatamente attraverso l'elettrolisi alimentata dall'energia nucleare. L'idrogeno prodotto dal nucleare può anche essere a volte definito idrogeno viola o idrogeno rosso.

Sostenibilità della produzione ed analisi Well-to-Wake

Nel valutare la sostenibilità di un carburante, bisogna tenere conto delle emissioni prodotte lungo l'intero ciclo di vita di questo. Dal punto di vista metodologico, la presente analisi si servirà dunque del concetto di analisi definita *Well-to-Wake* (WTW), letteralmente, dal *pozzo-alla-scia*. Tale analisi può a sua volta essere divisa in due ulteriori fasi: la fase *Well-to-Tank* (WTT)², che tiene conto di tutti gli inquinanti generati durante la produzione, lo stoccaggio e il trasporto al consumatore finale; e la successiva fase *Tank-to-Wake* (TTW)³, ovvero le emissioni derivanti dalla vera e propria combustione ed utilizzo del prodotto.

Il concetto di emissioni Well-to-Wake

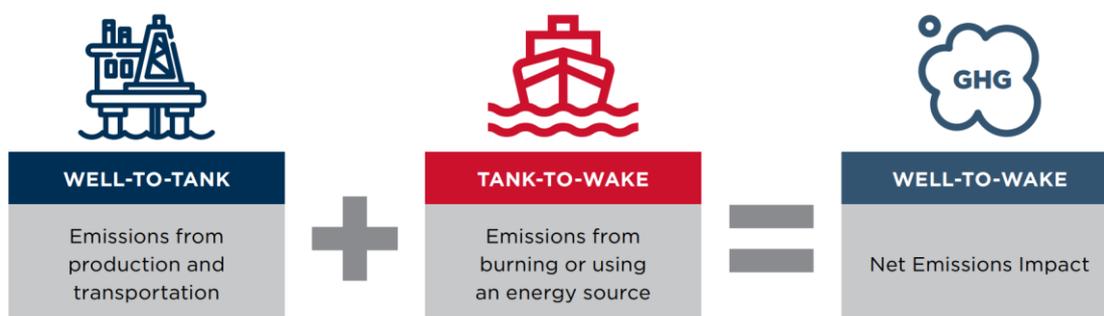


Figura 2

Fonte: American Bureau of Shipping (2021)

Al fine di tracciare l'origine dell'idrogeno e le specifiche caratteristiche ambientali, si stanno implementando schemi di verifica della sostenibilità o certificati di garanzia di origine come, ad esempio, il progetto EU CertifHy. Tali schemi di certificazione possono essere applicati a livello pratico nel mercato dell'idrogeno per tracciare, quantificare e verificare l'analisi WTW del prodotto. È auspicabile che con lo svilupparsi del mercato tali regimi possano essere applicati a livello regionale o nazionale. Ad oggi, tuttavia, non sono ancora richiesti dall'IMO (CertifHy, 2022).

Nel caso dell'idrogeno, dal punto di vista delle emissioni *Well-to-Tank*, l'utilizzo di combustibili fossili per la produzione influisce grandemente sul giudizio di sostenibilità del prodotto ottenuto. In questa fase sono da valutare con particolare attenzione gli inquinanti generati nel trattamento del carbone o del gas naturale per la produzione delle

² La traduzione letterale dall'inglese è *dal pozzo al serbatoio*.

³ La traduzione letterale dall'inglese è *dal serbatoio alla scia*.

tipologie di idrogeno bruno, grigio e blu, o i combustibili fossili bruciati per generare l'elettricità utilizzata per la generazione di idrogeno attraverso l'elettrolisi. Per eliminare completamente le emissioni inquinanti WTT, è quindi fondamentale concentrarsi su metodi di produzione, stoccaggio e trasporto carbon-free. La produzione di idrogeno che impiega elettrolisi alimentata da fonti energetiche rinnovabili, ad esempio, abbatterebbe le emissioni di anidride carbonica a monte del processo.

Questo elemento appare fondamentale se si tiene conto che, come osservato precedentemente, quando l'idrogeno è consumato in una cella a combustibile o in un motore a combustione interna mono-carburante, ha il potenziale per essere un carburante marino a zero emissioni su base *Tank-to-Wake*.

Ne consegue che, se si considera solamente la variante verde, l'intero percorso dell'idrogeno dalla produzione al suo consumo *Well-to-Wake* ha la potenzialità per essere ad impatto zero.

Dati riportati dall'Agenzia Internazionale per le Energie Rinnovabili (IRENA) mostrano come alla fine del 2021 quasi il 47% della quota della produzione globale di idrogeno proveniva dal gas naturale, il 27% dal carbone, il 22% dal petrolio (come sottoprodotto) mentre solamente il 4% circa era generato attraverso l'elettrolisi.

Nello stesso anno, la quota media globale di energia rinnovabile si attestava a circa il 33% dell'energia totale prodotta, il che significa che solo l'1% circa della produzione globale di idrogeno è effettivamente derivata da energia rinnovabile. L'idrogeno verde (prodotto quindi elettroliticamente con energia pulita) è rimasto limitato a progetti dimostrativi, per una capacità totale di 0,7 gigawatt⁴. Il dato risulta allarmante se si considera che secondo le proiezioni sarebbe necessaria una produzione di 4-5 terawatt⁵ entro il 2050 per soddisfare gli obiettivi dell'Accordo di Parigi⁶. Allo stato attuale, per raggiungere tali livelli sarebbe richiesto quindi un tasso di crescita più veloce di quello sperimentato finora dal solare fotovoltaico e dall'eolico (IRENA, 2022b).

⁴ Unità di misura della potenza pari a 10⁹ watt.

⁵ Unità di misura della potenza pari a 10¹² watt.

⁶ L'obiettivo di lungo periodo dell'Accordo di Parigi è quello di contenere l'aumento della temperatura media globale ben al di sotto della soglia di 2 °C oltre i livelli pre-industriali, e di limitare tale incremento a 1.5 °C, poiché questo ridurrebbe sostanzialmente i rischi e gli effetti dei cambiamenti climatici.

Considerazioni tecniche

L'idrogeno è sia un precursore di tutti gli *e-fuels* che un carburante a sé stante e può essere utilizzato sia nei motori a combustione che nelle celle a combustibile (MMM Center for Zero Carbon Shipping, 2022). Con *e-fuels*, o *electrofuels* si intende un gruppo di carburanti di origine sintetica la cui produzione avviene mediante la scissione dell'acqua in idrogeno e ossigeno e la successiva combinazione dell'idrogeno ricavato da tale processo con anidride carbonica catturata dall'atmosfera. Questo processo dà vita ad una serie di prodotti quali e-ammoniaca, e-metanolo, e-diesel, e-GNL, e l'e-kerosene (TNO, 2020).

Dal punto di vista tecnico, la tecnologia della cella a combustibile funziona combinando idrogeno e aria in presenza di un catalizzatore, generando quindi l'elettricità necessaria per azionare un motore elettrico, con il vapore acqueo come unico prodotto di scarto. Di conseguenza, la cella a combustibile può essere intesa come un convertitore di energia.

Attualmente, le celle a combustibile a idrogeno trovano già alcune applicazioni nel settore dei trasporti, in particolare nel settore degli autobus. Un esempio è rappresentato dal progetto di Transport for London, il quale ha sperimentato ed introdotto con successo autobus a due piani alimentati ad H₂ nella città di Londra (London Government, 2021). Inoltre, progetti simili sono attivi anche in Cina. Presso la città di Foshan (Guandong) dal 2009 si sta infatti esplorando l'uso di veicoli a idrogeno e nel 2016 è stata implementata la prima linea di trasporto pubblico a idrogeno nel paese (Meet Hydrogen, 2021).

L'utilizzo dell'idrogeno come vettore energetico rimane ad oggi prevalentemente limitato ai veicoli stradali. A livello globale, nel 2021, si registravano oltre 40.000 veicoli che sfruttavano tale tecnologia. Circa il 90% di questi era concentrato in quattro Paesi: Corea, Stati Uniti, Cina e Giappone. A fine 2020, si contavano circa 6.000 autobus, di cui il 95% in Cina, e oltre 3.100 camion. Questi numeri rappresentano quindi solo una piccolissima frazione del parco veicoli globale (IEA, 2021a).

Per quanto riguarda il settore del trasporto marittimo, è importante riconoscere che le applicazioni delle celle a combustibile sono più adatte a servizi a bassa intensità di energia e non sono al momento intese come soluzione di propulsione primaria per le imbarcazioni costiere o marittime. L'idrogeno, come combustibile, presenta infatti una densità energetica significativamente inferiore rispetto ad altri potenziali combustibili per la navigazione (MMM Center for Zero Carbon Shipping, 2022). Pertanto, il suo utilizzo

pratico comporterebbe tragitti più brevi, soste di rifornimento più frequenti o un compromesso sulla capacità di carico per ospitare un ulteriore stoccaggio di carburante a bordo. Queste sfide rendono al momento l'uso diretto dell'idrogeno verde in celle a combustibile un'opzione improbabile per il trasporto marittimo a lunga distanza. I test in corso vedono infatti piuttosto la sperimentazione di tale tecnologia sulle vie navigabili interne, aprendo quindi lo spazio per potenziali applicazioni nel trasporto marittimo a corto raggio (Buitendijk, 2022).

Conclusioni

Date le premesse di cui sopra, per quanto riguarda il tema trattato dal presente elaborato, ovvero il trasporto marittimo a lungo raggio, possiamo affermare che la massima valorizzazione dell'idrogeno sia raggiunta solo quando questo viene convertito negli *e-fuels* suoi derivati (IRENA, 2022b). Tra questi, che verranno trattati nelle prossime pagine, i più promettenti oggi sono l'e-ammoniaca, l'e-metanolo e l'e-metano (Hydrogen Europe, 2021).

In questo senso, il valore strategico della produzione di idrogeno verde appare chiaro in quanto elemento alla base della produzione di tali derivati. Nello schema riportato nella *Figura 3* è schematizzato il percorso produttivo che parte dalle fonti energetiche rinnovabili ed arriva agli elettrocarburanti.

Sulla base di queste considerazioni, è chiara la necessità di un'analisi degli elementi legati alla produzione di idrogeno verde, in primis la disponibilità di energia rinnovabile e le infrastrutture ad essa legate. Intrecciando poi queste considerazioni con la mappa dei trasporti marittimi mediterranei ed europei ed alle esigenze pratiche legate al possibile utilizzo di *elettrofuels* ai fini della decarbonizzazione dell'industria marittima, come vedremo in seguito, potrebbe apparire una nuova geografia politica economica dei trasporti condizionata dal binomio luogo di produzione – luogo di distribuzione.

Percorso produttivo dei principali e-fuels:

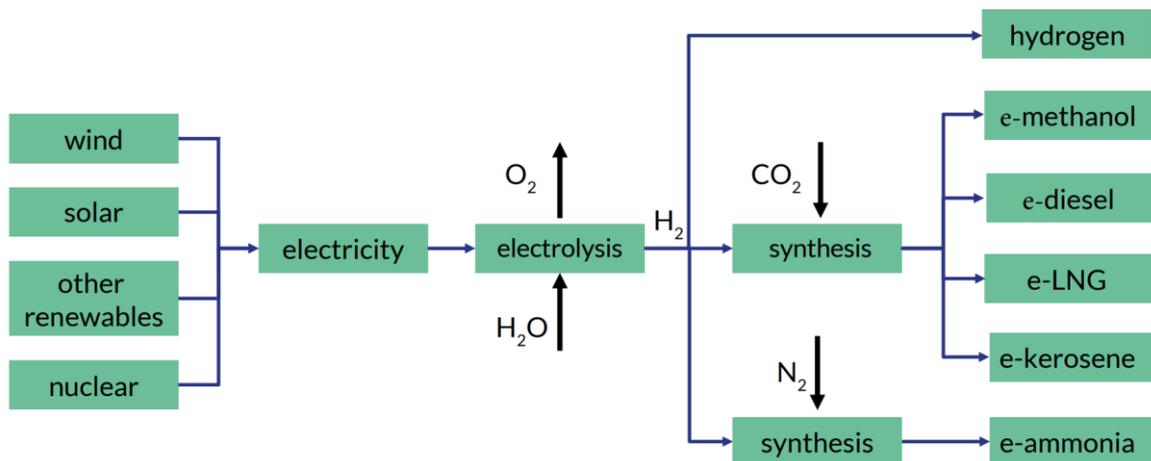


Figura 3

Fonte: TNO (2020)

1.2 Ammoniaca

L'ammoniaca è un composto chimico costituito da azoto e idrogeno nella combinazione di una molecola del primo e tre del secondo (NH_3). Questa sostanza è stata identificata come un potenziale carburante a lungo termine che potrebbe entrare nel mercato in tempi relativamente brevi ed offrire una soluzione a zero, o quasi, emissioni di anidride carbonica.

La produzione di ammoniaca inizia con la produzione di idrogeno, il quale viene utilizzato come materia prima. Successivamente, attraverso il processo Haber-Bosch si aggiunge azoto alle molecole di idrogeno formando un vettore di idrogeno più stabile e più facile da contenere e trasportare (UMAS, 2022). L'Haber-Bosch è un metodo consolidato per combinare l'idrogeno con l'azoto estratto dall'aria. Il processo avviene a temperature e pressioni elevate e in presenza di un catalizzatore. La miscela viene raffreddata in modo che l'ammoniaca si liquefaccia e possa essere estratta.

Come si può osservare nello schema riportato nella *Figura 1*, vengono presi in considerazione due tipi di ammoniaca⁷:

⁷ Esiste un terzo tipo di ammoniaca, la cosiddetta ammoniaca grigia, o *grey ammonia*, ovvero ammoniaca prodotta dal gas naturale senza l'impiego di meccanismi di cattura e sequestro dell'anidride carbonica. Questa non viene presa in considerazione in quanto registra emissioni di gas serra più elevate rispetto ai carburanti marini convenzionali.

- E-ammonia o “ammoniaca verde”: ovvero un combustibile prodotto senza emissioni di anidride carbonica utilizzando energia rinnovabile per il processo e idrogeno prodotto anch'esso con energia elettrica a zero emissioni, cioè da fonti rinnovabili, come materia prima;
- “Ammoniaca blu”: ovvero un combustibile prodotto da gas naturale impiegando meccanismi di cattura e sequestro dell'anidride carbonica (CCS). In questo processo, il gas naturale viene sottoposto a una serie di reazioni chimiche che separano l'idrogeno dall'azoto e dal carbonio; L'idrogeno ottenuto viene quindi utilizzato per la produzione di ammoniaca. Le emissioni di CO₂ prodotte dal processo vengono catturate e stoccate in modo permanente a livello geologico.

Il processo di captazione dell'anidride carbonica è progettato per catturare le emissioni generate durante la combustione dei combustibili fossili ed evitarne il rilascio in atmosfera. Dopo essere stata captata, la CO₂ viene trasportata in siti di stoccaggio ed iniettata all'interno di formazioni geologiche sotterranee *onshore* o *offshore*. Studi dell'Agenzia Internazionale per l'Energia segnalano che gli impianti produttivi dotati di tecnologia CCS possono potenzialmente catturare fino al 90% di CO₂ prodotta (IEA, 2021b), e i progressi potrebbero consentire di raggiungere anche livelli del 99% se fossero garantiti aumenti di capitale nello sviluppo della tecnologia attuale (IEA, 2019b). È importante notare, tuttavia, che ad oggi la media di CO₂ totale catturata varia dal 60% all'85% delle emissioni totali in quanto manca ancora un'implementazione completa di misure specifiche per la captazione di emissioni fuggitive legate all'estrazione del gas naturale (Committee on Climate Change, 2018).

Quando si considera l'ammoniaca blu, le emissioni effettive a livello WTW dipendono da variabili quali le emissioni associate alla produzione e al trasporto del gas naturale di partenza e dal livello di successo del processo di CCS. Sebbene l'ammoniaca blu sia emersa come una possibile fonte energetica a basse emissioni di anidride carbonica, infatti, i suoi legami con i combustibili fossili ne compromettono il ruolo all'interno di una strategia di decarbonizzazione sostenibile. La dipendenza del processo dall'estrazione di gas naturale e la limitata efficienza delle tecnologie di cattura della CO₂ sono elementi che possono determinare un'impronta ambientale da non sottostimare.

Disponibilità

L'ammoniaca viene attualmente prodotta in quantità considerevoli per essere utilizzata in varie applicazioni nei settori dei fertilizzanti e della chimica. Tuttavia, per permettere all'industria marittima l'accesso su larga scala alla cosiddetta ammoniaca verde come carburante, è necessaria una crescita sostanziale della capacità di produzione di quest'ultima. Conseguentemente, anche la disponibilità di elettricità da fonte rinnovabile e idrogeno verde dovrebbe crescere. Questo punto è di fondamentale importanza se si considera che l'attuale capacità globale degli impianti eolici e solari è notevolmente inferiore a quella necessaria. Allo stesso tempo, anche la disponibilità di elettrolizzatori necessari per la produzione di idrogeno verde andrebbe aumentata.

Un altro elemento importante dal punto di vista dell'analisi della disponibilità è il luogo della produzione. Si nota infatti che per una produzione efficiente di ammoniaca verde l'elettricità rinnovabile per gli elettrolizzatori dovrebbe essere generata in luoghi che presentano condizioni favorevoli per fonti quali l'eolico, il solare o altre fonti di energia a basso impatto ambientale. Questa precisazione risulta importante dal momento che per un'ottimizzazione dei costi e dell'efficienza del processo produttivo, è raccomandato l'utilizzo dell'elettricità direttamente negli elettrolizzatori e nella sintesi dell'ammoniaca con il conseguente uso e distribuzione immediata del prodotto. (EMSA, 2023) Il trasporto dell'idrogeno, elemento che abbiamo visto essere necessario alla produzione dell'ammoniaca, risulta infatti complicato, dispendioso e poco efficiente. Proprio per questo motivo, la soluzione ideale sarebbe la co-localizzazione della produzione di idrogeno e ammoniaca. Come vedremo in seguito, la combinazione di questi elementi potrebbe influire significativamente sulla geografia politico-economica dei porti europei e mediterranei.

Secondo le stime dell'European Maritime Safety Agency (EMSA), entro il 2040 la produzione globale di elettricità rinnovabile raggiungerà livelli tali da garantire i volumi richiesti di ammoniaca verde per l'alimentazione della flotta mondiale (EMSA, 2023). Tuttavia, è fondamentale considerare che a quel punto l'industria navale dovrà con tutta probabilità affrontare la concorrenza di vari altri settori per l'approvvigionamento sia di elettricità rinnovabile che di idrogeno verde necessari per la produzione di e-ammonia. Questa concorrenza includerà altri settori che dipendono da questa sostanza, in primis l'agricoltura. Inoltre, la rapidità di realizzazione di parchi solari ed eolici e di infrastrutture

di produzione, trasporto e distribuzione è soggetta a limitazioni che potrebbero rallentare la disponibilità di ammoniaca verde, soprattutto nel breve e medio termine.

Sostenibilità

Grazie alla composizione molecolare priva di anidride carbonica e zolfo dell'ammoniaca, la sua combustione in un motore crea emissioni di CO₂ e ossidi di zolfo (SO_x) prossime allo zero. Inoltre, come osservato, utilizzando idrogeno verde ed energia elettrica rinnovabile, il processo produttivo di e-ammoniaca non produce quasi nessuna emissione di gas serra a livello WTW. Se paragonata a combustibili tradizionali quali il combustibile pesante (HFO)⁸ ed il gasolio marino (MGO)⁹, le sue emissioni di inquinanti atmosferici quali fuliggine, idrocarburi incombusti, metano e monossido di carbonio risultano essere inferiori di circa l'85% (MAN Energy Solutions, 2020).

Nel valutare la sostenibilità dell'ammoniaca come carburante alternativo per lo shipping marittimo, va considerato però l'effetto inquinante dei cosiddetti combustibili pilota. Quando si tenta la combustione in un motore, l'ammoniaca risulta infatti difficile da innescare e per infiammarla è necessaria un'elevata energia di innesco sotto forma di combustibile. Esistono diverse opzioni di carburanti utilizzabili a questo scopo e le opzioni migliori ad oggi sono combustibili tradizionali come l'MGO o il diesel marino (MDO)¹⁰. Un possibile percorso di mitigazione di questo aspetto inquinante sarebbe quello di orientarsi verso l'impiego come combustibile pilota di diversi tipi di biocarburanti e olio combustibile a tenore di zolfo molto basso (VLSFO)¹¹. (MMM Center for Zero Carbon Shipping, 2021)

Infine, esistono preoccupazioni legate alle emissioni di ossidi di azoto (NO_x) e di protossido di azoto (N₂O). La formazione di tali sostanze rappresenta un grosso rischio potenziale in quanto queste risultano essere ancora più nocive del metano e della CO₂. L'effetto climalterante del protossido di azoto risulta infatti essere 264 volte più impattante dell'anidride carbonica su una base di 20 anni e 265 volte su una base di 100 anni. Per questi motivi, anche una piccola quantità di emissioni di N₂O formate durante la combustione ed emesse nell'atmosfera può limitare o vanificare l'impatto positivo

⁸ Acronimo dall'inglese che sta per *Heavy Fuel Oil*

⁹ Acronimo dall'inglese che sta per *Marine Gas Oil*

¹⁰ Acronimo dall'inglese che sta per *Marine Diesel Oil*

¹¹ Acronimo dall'inglese che sta per *Very Low Sulphur Fuel Oil*

dell'ammoniaca come carburante sostenibile a livello ambientale. Proprio questa criticità giocherà un forte ruolo nell'ulteriore sviluppo dei motori ad ammoniaca e della tecnologia ad essi legata.

Aspetti tecnico-economici

Dal punto di vista economico, le proiezioni dell'EMSA suggeriscono che nel 2030 il costo complessivo legato all'operare navi alimentate ad ammoniaca (blu o verde) sarà ancora superiore rispetto a quello delle navi che utilizzano combustibili tradizionali. Nel caso specifico delle navi portacontainer, ad esempio, il costo totale aggiuntivo ammonterebbe a circa 2,5 o 3 volte più alto per quelle operanti ad ammoniaca verde e 1,5 volte più alto quelle operanti ad ammoniaca blu (EMSA, 2023). Sempre secondo tali proiezioni, questa differenza di costo potrebbe tuttavia ridursi entro il 2050. Ciò sarebbe dovuto alla prevista riduzione dei costi di produzione dell'ammoniaca, ai minori investimenti iniziali (CAPEX¹²) per gli impianti ad ammoniaca e all'aumento del *carbon pricing*¹³. Il risultato, tuttavia, dipenderà dalla traiettoria dei prezzi globali del petrolio.

Vale la pena notare che l'adeguamento delle navi esistenti può essere più costoso della costruzione di nuove navi. Questo è determinato dal fatto che le tubature aggiuntive, i cablaggi, gli adeguamenti strutturali e talvolta le modifiche su misura contribuiscono ad aumentare i costi rispetto alla costruzione di nuove navi. Per abbattere i costi di riconversione delle navi, una delle vie che il mercato sta seguendo è quella di costruire navi definite "ammonia-ready", ovvero concepite, strutturate e predisposte in maniera tale da poter essere più facilmente convertite ad ammoniaca nel momento in cui il mercato offrirà condizioni quali prezzo e quantità tali perché il carburante sia considerato come un'opzione fruibile (Wallenius Wilhelmsen, 2023).

¹² Con *CAPEX* si intendono le spese in conto capitale, ovvero costi fissi sostenuti per una nave di nuova costruzione. Tra questi vi sono ad esempio il costo del motore, dello stoccaggio dei serbatoi ed il sistema di alimentazione del carburante. Questi costi non dipendono dalla frequenza e dall'intensità di utilizzo della nave ma sono appunto fissi.

¹³ Con *carbon pricing* si intende l'approccio politico volto a ridurre le emissioni di gas a effetto serra imponendo un prezzo all'anidride carbonica, tipicamente sotto forma di tassa. L'idea fondamentale alla base del carbon pricing è quella di internalizzare il costo esterno delle emissioni di anidride carbonica, incoraggiando le imprese e i singoli a ridurre la propria impronta CO₂.

Regolamentazione

Dal punto di vista normativo, esistono già regolamenti che si applicano ad alcune parti della catena di approvvigionamento dell'ammoniaca tra cui la produzione, la distribuzione, lo stoccaggio e l'utilizzo specificatamente in terraferma. Tuttavia, mancano attualmente standard ampiamente riconosciuti che regolino la produzione di ammoniaca verde ed il suo uso come combustibile marino. Inoltre, manca ancora un metodo di tracciamento che possa monitorare l'impatto sul clima da un punto di vista *Well-To-Wake*. Questa lacuna sta cercando di essere colmata dall'IMO, il quale sta lavorando allo sviluppo di linee guida per l'analisi del ciclo di vita del combustibile e per il calcolo delle emissioni. Sempre presso l'Organizzazione Marittima Internazionale si stanno vagliando altre misure tecniche e di mercato nell'ambito delle quali l'ammoniaca e le sue vie di produzione rinnovabili vengono prese in considerazione. (IMO, 2023a)

Il pacchetto di misure "Fit-for-55" dell'Unione Europea rappresenta un ulteriore apporto normativo. Questo, contiene infatti proposte di revisione di regolamenti e direttive e nuove iniziative in materia di politiche allo scopo di regolamentare i nuovi carburanti verdi. Tra gli obiettivi finali dell'iniziativa vi è quello fornire incentivi e spinte al trasporto marittimo per l'adozione di combustibili alternativi a basso o nullo contenuto di anidride carbonica, come appunto l'ammoniaca verde. (Garrido & Hervas, 2023)

Come segnala la European Maritime Safety Agency, le normative internazionali e regionali sulla riduzione dei gas serra, unite a misure basate sul mercato, hanno il potenziale per incoraggiare l'adozione dell'ammoniaca verde come combustibile ad uso marino. Il rafforzamento del quadro normativo esistente, con eventuali modifiche ed integrazioni, contribuirebbero all'adozione dell'ammoniaca come combustibile marino (EMSA, 2023). Considerato l'elevato potenziale di tossicità dell'ammoniaca sia per gli esseri umani che per gli ecosistemi in caso di mala gestione, appare imperativo lo sviluppo di solidi quadri normativi per sostenerne una gestione sicura ed incentivarne quindi anche l'utilizzo.

Conclusioni

In conclusione, possiamo affermare che l'ammoniaca ha il potenziale per giocare un ruolo molto promettente come combustibile decarbonizzante nel trasporto marittimo. Essendo una sostanza naturalmente priva di carbonio, può ridurre significativamente le emissioni

di gas serra se prodotta utilizzando fonti energetiche sostenibili. Inoltre, essendo una sostanza che ha una lunga storia di produzione e utilizzo su larga scala in vari altri settori industriali, sono già presenti una grande quantità di conoscenze legate a come gestirla, immagazzinarla e utilizzarla.

Tuttavia, vi sono ancora numerosi ostacoli di natura pratica che richiedono la collaborazione e l'intervento dell'industria, dei costruttori di motori, degli operatori, dei responsabili politici e delle autorità di regolamentazione. Nonostante l'ampia esperienza nella gestione dell'ammoniaca, infatti, le conoscenze legate al suo utilizzo come carburante sono ancora limitate. Inoltre, una delle criticità che si intende sottolineare è la dipendenza tra la produzione di ammoniaca verde e la disponibilità di energia elettrica da fonti rinnovabili. La competizione prevista tra vari settori industriali per l'accesso a tali fonti energetiche, unita all'osservazione fatta precedentemente circa la necessità di una produzione dell'ammoniaca verde negli immediati luoghi in cui l'energia è generata, dà vita a considerazioni di ambito geopolitico. Specificatamente, si può concludere che i luoghi che presentano condizioni favorevoli ad un'abbondante produzione di energia elettrica sostenibile saranno i più probabili candidati come sedi di produzione di e-ammoniaca. Conseguentemente, tali luoghi chiameranno a sé anche i soggetti consumatori, ovvero le navi. I porti più vicini a tali luoghi, applicando il binomio luogo di produzione – luogo di distribuzione, saranno quindi i più favoriti, grazie alla disponibilità di carburante per le navi che vi farebbero tappa.

1.3 Metanolo

Il metanolo (CH_3OH) è la forma più semplice di alcol. È un liquido leggero, volatile, incolore, infiammabile e, a temperatura e pressione ambiente, ha un odore distintivo. Il metanolo è ampiamente utilizzato come prodotto chimico per varie applicazioni industriali e domestiche. Recentemente, è sempre più considerato un possibile carburante alternativo per ridurre le emissioni di gas serra e di sostanze inquinanti.

Similmente alle sostanze precedentemente analizzate, il metanolo si divide in varie categorie in base al ciclo produttivo:

- “Metanolo bruno”, ovvero prodotto utilizzando il carbone come materia prima;

- “Metanolo grigio”, prodotto utilizzando il gas naturale come materia prima;
- “Metanolo blu”, prodotto utilizzando come materia prima il gas naturale ma impiegando meccanismi di captazione dell’anidride carbonica per ridurre l’impatto ambientale;
- “Metanolo verde” o e-metanolo, prodotto utilizzando la CO₂ catturata da fonti rinnovabili e l’idrogeno verde;
- “Bio-metanolo”, prodotto da biomassa, come rifiuti e sottoprodotti della silvicoltura e dell’agricoltura, biogas, acque reflue, rifiuti solidi urbani (RSU) e liquami neri provenienti dall’industria della cellulosa e della carta. Questi vengono convertiti in bio-metano e ulteriormente trasformati in bio-metanolo.

Sostenibilità

In generale, possiamo osservare come siano tre le fonti principali alla base della produzione di metanolo: il carbone, il gas naturale e l’energia rinnovabile / bio-massa. Pur partendo da elementi differenti, il risultato finale della trasformazione è sempre CH₃OH.

Per poter essere prodotto, il metanolo necessita di fonti di carbonio concentrate. Il gas naturale, il carbone e la biomassa sono degli esempi, ma può essere impiegata anche l’anidride carbonica proveniente da varie altre fonti, tra cui i gas di scarico industriali o catturandola direttamente dall’aria. Ad oggi, per ragioni prevalentemente economiche, il metanolo viene tuttavia ancora prodotto quasi esclusivamente da combustibili fossili. Circa il 65% della produzione di metanolo si basa sulla riformazione del gas naturale (metanolo grigio), mentre il resto (35%) è in gran parte basato sulla gassificazione del carbone (metanolo bruno). Attualmente, solo lo 0,2% circa proviene da fonti rinnovabili (metanolo verde). La maggior parte della produzione di metanolo bruno è realizzata in Cina, dove sono disponibili vaste riserve di carbone. La produzione da gas naturale è invece la norma nel resto del mondo (IRENA, 2021b).

Come rappresentato nello schema riportato nella *Figura 4*, in base alla fonte di partenza, varia il livello di *carbon intensity* (CI) finale del processo. Le tipologie di metanolo bruno e grigio, derivate quindi dal carbone e dal gas naturale, senza l’utilizzo di meccanismi di captazione della CO₂ o senza l’impiego di energia rinnovabile, sono tipicamente classificati come ad alta CI. All’opposto, la produzione di metanolo che utilizza

combustibili fossili applicando meccanismi CCS, energie rinnovabili in diverse forme, o una combinazione di entrambi, è considerata a minore intensità di carbonio. Il metanolo Blu, verde ed il bio-metanolo rientrano tra questi. Inoltre, i diversi tipi di CH₃OH possono essere classificati come rinnovabili e non rinnovabili. Per poter essere considerato rinnovabile, tutte le materie prime utilizzate per produrre il prodotto devono essere di origine rinnovabile (biomassa, solare, eolica, idroelettrica, geotermica, ecc.).

Classificazione del metanolo in base alle fonti

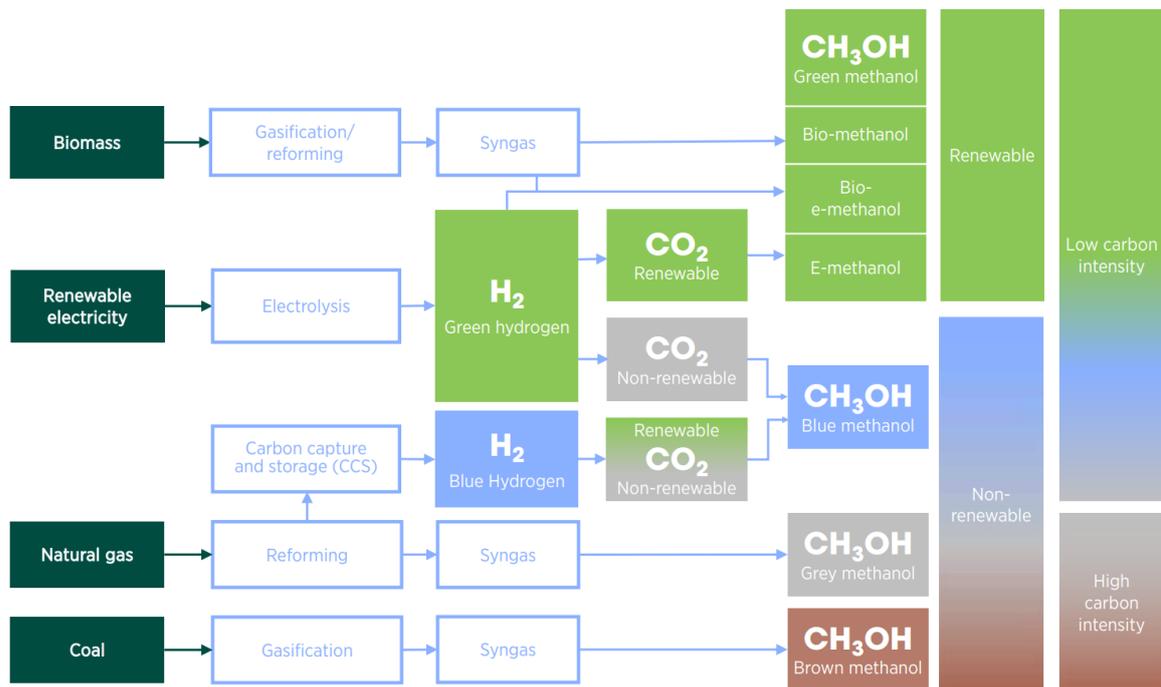


Figura 4

Fonte: IRENA (2021)

Per la produzione del metanolo bruno, grigio e blu il gas naturale ed il carbone devono prima essere convertiti in gas di sintesi (syngas), ovvero una miscela di monossido di carbonio, idrogeno e anidride carbonica. Dopo ulteriori trattamenti di raffinazione, il syngas viene convertito in metanolo mediante un processo catalitico generalmente basato su catalizzatori di rame, ossido di zinco e ossido di alluminio (IRENA, 2021b). Successivamente, avviene la distillazione del metanolo grezzo a cui viene rimossa l'acqua generata durante la sintesi ed eventuali altri sottoprodotti. Come già evidenziato, questa metodologia di produzione ha un forte impatto ambientale.

Per ridurre le emissioni WTT associate alla produzione di metanolo dal gas naturale sono stati sviluppati diversi metodi. Un'opzione consiste nello sfruttare la CO₂ proveniente da

gas di scarico industriali iniettandola nel ciclo di sintesi del metanolo. Un'altra possibilità è quella di decarbonizzare la prima fase della produzione, ovvero la fase di reforming a syngas. Questa fase risulta infatti essere molto dispendiosa dal punto di vista energetico, in quanto richiede la combustione di parte del gas naturale per generare il calore necessario al reforming, generando allo stesso tempo CO₂. Alimentando il riscaldamento con elettricità da fonte rinnovabile, queste emissioni di CO₂ possono essere eliminate (IRENA, 2021b).

Se queste metodologie venissero affiancate poi all'utilizzo di idrogeno verde si avrebbe un'ulteriore sensibile riduzione delle emissioni WTT. Queste e altre combinazioni di produzione di metanolo grigio/blu e verde costituiscono soluzioni ibride che potrebbero facilitare la progressiva introduzione del metanolo verde e consentire agli impianti di produzione di ridurre le proprie emissioni.

Dal punto di vista delle emissioni *Tank-to-Wake*, il metanolo risulta essere molto performante. L'assenza di legami carbonio-carbonio e l'elevato contenuto di ossigeno della sostanza portano teoricamente a una combustione priva di particolato. Inoltre, grazie al suo processo di produzione, è una sostanza priva di zolfo. Altre emissioni come quelle di ossidi di azoto possono essere invece efficacemente ridotte attraverso l'impiego di meccanismi interni al motore come il ricircolo dei gas di scarico. D'altra parte, una combustione incompleta del metanolo può però portare alla formazione di formaldeide e acido formico¹⁴. Anche questo aspetto potrebbe tuttavia essere controllato attraverso l'impiego di catalizzatori di ossidazione (IEA & AMF, 2020).

Facendo un'analisi comparatistica, il Forum Internazionale del Trasporto, afferma come rispetto ad un combustibile fossile tradizionale quale l'HFO il metanolo dimostri un significativo potenziale di riduzione delle emissioni. Nello specifico, è osservabile una riduzione del 99% delle emissioni di anidride solforosa, del 60% degli ossidi di azoto e del 95% delle emissioni di particolato (International Transport Forum, 2018). Inoltre, per quanto riguarda lo specifico dell'anidride carbonica, il metanolo derivato dal gas naturale presenta una riduzione del 25% delle emissioni rispetto all'HFO.

¹⁴ Nell'atmosfera, la formaldeide di solito si decompone rapidamente per creare acido formico e monossido di carbonio, che possono essere anch'essi sostanze nocive. L'esposizione degli animali alla formaldeide può farli ammalare, compromettere la loro capacità di riprodursi e ridurre la loro durata di vita. Può anche modificarne il comportamento e l'aspetto. La formaldeide è altamente tossica per la vita acquatica - i pesci, i crostacei e le altre creature dei nostri fiumi, laghi e oceani.

Tuttavia, effettuando un'analisi completa WTW del ciclo di vita dell'HFO e del metanolo blu e grigio (i quali rappresentano oggi la quasi totalità della produzione mondiale), si stima che questi ultimi comportino comunque emissioni generali di gas a effetto serra superiori del 10% rispetto al combustibile fossile tradizionale (IRENA, 2021a).

Alla luce di questi risultati, diventa ancora una volta evidente l'impatto della metodologia di produzione del carburante sulla performance ambientale. Per questo motivo appare fondamentale implementare metodi di produzione del metanolo che siano ecologici ed a basso impatto, concentrandosi in particolare sulla creazione di e-metanolo e bio-metanolo (IRENA, 2021a). Queste alternative rappresentano infatti opzioni completamente rinnovabili e sono quindi considerate le scelte più sostenibili per l'individuazione di un carburante marino che punti a mitigare l'impatto ambientale del settore.

Metanolo rinnovabile: il bio-metanolo e l'e-metanolo

Il metanolo rinnovabile prodotto in modo sostenibile rappresenta una strada percorribile per raggiungere un'efficiente decarbonizzazione del settore del trasporto marittimo. Come si osserva nella *figura 4* le tipologie di CH₃OH definite rinnovabili sono due: il bio-metanolo e l'e-metanolo. La differenziazione principale fra queste sostanze è la via di produzione percorsa. Il bio-metanolo è una sostanza rinnovabile la cui produzione si avvale come materia prima della biomassa proveniente da rifiuti forestali e agricoli, biogas, acque reflue, rifiuti solidi urbani e acque nere dell'industria della cellulosa e della carta. L'e-metanolo è invece una sostanza appartenente alla famiglia degli *e-fuels* in quanto basa la propria produzione sull'utilizzo di anidride carbonica combinata ad idrogeno verde.

Sia il bio-metanolo che l'e-metanolo, derivati da fonti e processi rinnovabili, hanno proprietà chimiche identiche a quelle del metanolo derivato da combustibili fossili. Tuttavia, contribuiscono a ridurre significativamente le emissioni di gas serra durante l'intero ciclo di vita *Well-to-Wake*.

Per quanto riguarda il **bio-metanolo**, generalmente gli impianti produttivi presentano molte analogie con quelli utilizzati per la produzione di metanolo bruno da carbone (IRENA, 2013). Un'eccezione degna di nota riguarda il bio-metanolo da biogas, la cui produzione è invece più simile a quella del metanolo grigio e blu. I processi principali della generazione del bio-metanolo comprendono la gassificazione, il trasferimento

acqua-gas, la pulizia del gas, l'aggiunta di idrogeno e/o la rimozione di CO₂, la sintesi del metanolo e la purificazione.

Quando la biomassa è utilizzata come materia prima, potrebbe richiedere un pretrattamento come la cippatura¹⁵ e l'essiccazione della biomassa legnosa o, ancora, la purificazione della biomassa liquida. La materia prima viene poi trasformata in gas di sintesi (syngas), composto principalmente da monossido di carbonio e idrogeno, insieme ad anidride carbonica, acqua e altri idrocarburi.

Il syngas non trattato che esce dalla fase di gassificazione deve essere sottoposto poi a pulizia e condizionamento per soddisfare gli standard di qualità richiesti per la sintesi del CH₃OH. Queste specifiche fasi variano a seconda della materia prima utilizzata e della tecnologia del gassificatore. La pulizia del syngas può comprendere unità per la rimozione di catrami, polveri e altri componenti, nonché un'unità di rimozione dei gas acidi per i componenti di CO₂ e zolfo. Il condizionamento del gas include tipicamente la regolazione del rapporto H₂/CO per la sintesi ottimale del metanolo, con l'obiettivo di massimizzare la resa del syngas e prevenire la perdita di energia sotto forma di metano che lascia l'unità di sintesi del metanolo come flusso di spurgo (IRENA, 2013).

L'**e-metanolo**, o electro-methyl alcohol, è un prodotto liquido ottenuto tramite un processo catalitico che combina CO₂ e idrogeno verde. Essendo prodotto utilizzando la tecnologia *Power-to-X*, ovvero convertendo elettricità rinnovabile in un'altra fonte di energia, l'e-metanolo è classificato come un elettrocarburante, rientrando quindi nella famiglia degli *e-fuel*.

Esiste più di un metodo per la produzione di e-metanolo. L'approccio più semplice e consolidato prevede la generazione di idrogeno attraverso l'elettrolisi dell'acqua utilizzando energia elettrica rinnovabile, seguita da una reazione catalitica con la CO₂. Un metodo alternativo prevede la produzione tramite elettrolisi di entrambi i componenti del syngas (CO e H₂) e la successiva conversione del syngas in e-metanolo seguendo un processo simile a quello della produzione tradizionale da fonti fossili.

Per poter essere considerato come una vera alternativa sostenibile, l'idrogeno utilizzato nella produzione di e-metanolo può solamente provenire da elettrolisi alimentata da fonti rinnovabili. Per quanto riguarda invece il secondo elemento alla base della produzione,

¹⁵ La cippatura del legno è il processo meccanico di riduzione di pezzi di legno di grandi dimensioni in piccole schegge dette *chips* utilizzando una cippatrice o un tritatore. Questa operazione viene comunemente eseguita per scopi quali la cura del paesaggio, la pacciamatura o la produzione di combustibile da biomassa.

ovvero l'anidride carbonica, questa può avere due tipologie di origine. Una delle opzioni è la CO₂ derivata come sottoprodotto da varie fonti industriali, tra cui centrali elettriche, acciaierie e cementifici¹⁶; la seconda opzione è invece la CO₂ ottenuta dall'atmosfera direttamente con la cattura diretta dell'aria (DAC) o attraverso la biomassa¹⁷.

In generale, possiamo affermare che ogni molecola di CO₂ che entra nel processo si trasforma in una molecola di metanolo all'uscita. Tuttavia, per ogni molecola di CO₂ sono necessarie tre molecole di idrogeno, con la conseguente produzione di una molecola d'acqua per ogni molecola di metanolo. Per produrre una tonnellata di metanolo sono necessarie circa 1,38 tonnellate di CO₂ e 0,19 tonnellate di idrogeno (equivalenti a circa 1,7 tonnellate di acqua). La produzione di una tonnellata di e-metanolo richiede circa 10-11 MWh di elettricità, di cui la maggior parte è destinata all'elettrolisi dell'acqua (assumendo la disponibilità di CO₂). Utilizzando un elettrolizzatore da 100 MW, si potrebbero generare circa 225 tonnellate al giorno di e-metanolo (IRENA, 2021b).

Considerazioni tecniche

Il metanolo è emerso come combustibile marino alternativo da diversi anni, trovando applicazione pratica in settori di nicchia come i traghetti, le navi da crociera e le piccole imbarcazioni. La sua attrattività come scelta per la decarbonizzazione risiede nella sua ampia disponibilità e versatilità di produzione da varie fonti. Questa flessibilità, unita alla facilità di trasporto e stoccaggio, fa del CH₃OH una soluzione pratica e percorribile per le grandi compagnie di navigazione (Aluko, 2023).

Come la maggior parte dei carburanti alternativi per il trasporto marittimo, il metanolo può essere utilizzato in due forme: attraverso la tecnologia delle celle a combustibile o dei motori a combustione interna. Ad oggi, il successo di questo carburante è legato all'esistenza di un'infrastruttura già rodada per il trasporto e lo stoccaggio. Attualmente accessibile in oltre 120 porti, il metanolo è già diventato il quarto carburante marino più

¹⁶ In questo caso, la CO₂ proverrebbe molto probabilmente dalla combustione di combustibili fossili. Anche se utilizzata come sostanza di riciclo, si tratterebbe comunque di CO₂ di origine fossile, cioè non rinnovabile. Questo aspetto rende il processo complessivo positivo in termini di emissioni di CO₂. Tuttavia, dato che l'anidride carbonica proveniente da queste fonti verrebbe rilasciata nell'atmosfera, utilizzandola un'altra volta per la produzione di metanolo da idrogeno verde si otterrebbe comunque un metanolo a bassissime emissioni WTT.

¹⁷ Per essere rinnovabili, sostenibili e neutrali dal punto di vista delle emissioni di CO₂, si dovranno sfruttare sempre più fonti organiche di anidride carbonica. Alcuni esempi sono le distillerie, le unità di fermentazione, i rifiuti solidi urbani, il biogas o altre attività come le centrali elettriche che producono elettricità bruciando biomassa.

utilizzato a livello globale, con oltre 20 navi che fanno affidamento su di esso (Longspur Reserch, 2023). La sua popolarità deriva dalla capacità di integrarsi perfettamente con le infrastrutture esistenti, dato il suo stato liquido alla normale temperatura e pressione dell'aria. Le opzioni di bunkeraggio¹⁸ risultano essere prontamente disponibili sia da nave a nave che da terra a nave. Inoltre, il metanolo si distingue al momento come il combustibile alternativo più sicuro potendo vantare rispetto ai concorrenti una più lunga storia di manipolazione specifica nel settore navale oltre che in varie altre applicazioni energetiche.

Oltre alla sua praticità, la caratteristica di biodegradabilità della sostanza offre grandi vantaggi ambientali. In caso di fuoriuscita, si diluisce infatti rapidamente nell'acqua, non danneggiando gli ecosistemi marini e mantenendo livelli non tossici. A tale proposito, è importante notare il fatto che la sicurezza del metanolo ha ricevuto un riconoscimento ufficiale nel novembre 2020, quando l'Organizzazione Marittima Internazionale ha approvato le linee guida per il suo utilizzo come carburante sicuro per le navi (IMO, 2020c).

Conclusioni

Come osservato precedentemente, il potenziale di riduzione dei gas serra del metanolo rinnovabile (sia bio-metanolo che e-metanolo) è di circa il 65-95% rispetto al metanolo fossile (IEA & AMF, 2020). Ancora una volta possiamo notare come l'idrogeno verde sia un elemento perno per poter considerare il metanolo come risposta alla necessità di decarbonizzazione dello shipping marittimo.

L'elettrolisi dell'acqua per produrre idrogeno è decollata negli ultimi anni, passando da kilowatt a gigawatt grazie a tecnologie esistenti e consolidate. Tuttavia, sono necessari ulteriori miglioramenti a livello tecnologico degli elettrolizzatori e di riduzione dei costi per consentire la produzione di massa di idrogeno verde a costi competitivi (IRENA, 2020). Il metanolo rinnovabile è solitamente più costoso sul mercato rispetto al metanolo di derivazione fossile, così come altri combustibili rinnovabili sono oggi più costosi dei competitors tradizionali. Tuttavia, se si considera la produzione di carburanti rinnovabili avanzati, il metanolo è una delle opzioni più efficienti dal punto di vista dei costi (IEA & AMF, 2020).

¹⁸ Con bunkeraggio si intende il processo di rifornimento di carburante per le navi, compresa la logistica di carico e distribuzione del carburante tra i serbatoi di bordo disponibili.

L'elettricità necessaria per il processo può essere generata da qualsiasi forma di energia. Tuttavia, per essere sostenibile, deve provenire da fonti rinnovabili. Per la diffusione su larga scala dell'elettrolisi sostenibile, l'eolico e il solare fotovoltaico hanno il maggiore potenziale grazie alla loro crescente disponibilità e ai costi in diminuzione. Queste, sono le fonti di energia in più rapida crescita al mondo e forniscono già oggi elettricità pulita e a prezzi accessibili. Alla luce di questi elementi possiamo osservare e sottolineare nuovamente l'elemento di criticità geo-economica ricorrente anche negli altri carburanti osservati fino ad ora, ovvero il legame di questi con la disponibilità di energia da fonti rinnovabili ed il possibile binomio luogo di produzione – luogo di distribuzione.

1.4 Carburanti rinnovabili gassosi

Gas Naturale Liquefatto: una non-soluzione

Una delle primissime risposte del mercato alla questione della decarbonizzazione e alle limitazioni imposte dall'IMO riguardo le emissioni di zolfo, è stata il Gas Naturale Liquefatto. Questo, negli ultimi anni ha acquisito un'importanza significativa che si è tradotta nel completamento di importanti sviluppi infrastrutturali. Oggi quasi 200 porti in tutto il mondo sono infatti dotati di impianti di bunkeraggio per GNL e l'Europa e l'Asia vantano la più alta concentrazione di questo tipo di infrastrutture (IRENA, 2021a).

Sebbene l'uso del GNL favorisca la riduzione delle emissioni di SO_x, NO_x, CO₂ e particolato (Agarwala, 2022), diversi studi indicano che l'uso di questo carburante non possa essere considerato una soluzione a lungo termine per rispettare gli impegni dell'Accordo di Parigi e passare a un regime di emissioni nette zero entro il 2050, come stabilito dall'IMO.

Questo scetticismo è legato al fatto che un'osservazione limitata alle emissioni *Tank-to-Wake* possa fornire un falso senso di fiducia nei confronti dei possibili vantaggi che il GNL offre come combustibile decarbonizzante. Analizzando le emissioni *Well-to-Tank*, legate quindi alla fase di estrazione, trasporto, liquefazione e rigassificazione, si nota come queste vadano quasi ad eguagliare le emissioni legate all'effettiva combustione del gas (TTW). Questo, raddoppia di fatto l'impatto del GNL sull'ambiente a livello *Well-to-Wake*.

Anche se il minore contenuto di carbonio nel GNL consente una riduzione teorica delle emissioni, non è chiaro se il suo uso possa fornire benefici in termini di riduzione delle emissioni climalteranti per l'intero ciclo di vita rispetto ai carburanti convenzionali o altre alternative di origine fossile. Ciò è dovuto principalmente al fatto che il GNL è una forma di metano liquefatto e il metano, in quanto gas, ha un potenziale climalterante molto più potente rispetto all'anidride carbonica. Se confrontato con la CO₂, questo registra effetti circa 80 volte più potenti nei primi 20 anni successivi al suo rilascio (Balcombe, 2022). Questo dato appare ancora più preoccupante se si considera che quando viene utilizzato sulle navi, il metano incombusto ha una concreta possibilità di dispersione nell'atmosfera. Questo fenomeno, detto *methane slip*, è stato osservato e misurato ed uno studio ha rilevato tassi di dispersione del metano che vanno dal 2% al 5% su navi a GNL di nuova fabbricazione (Mallouppas & Yfantis, 2021).

Il basso potenziale del GNL come alternativa per una profonda decarbonizzazione del trasporto marittimo internazionale è infine sottolineato anche dal fatto che, su base energetica, il contenuto di CO₂ del GNL risulta essere inferiore solo del 26% circa rispetto a quello dell'olio combustibile (IPCC, 2019).

Nonostante queste limitazioni, molti armatori hanno iniziato a concentrarsi ed investire sull'uso del GNL come combustibile alternativo per motivi prettamente economici. Nel 2020 infatti, quasi tre quarti degli ordini per nuove navi è stato destinato a navi alimentate a GNL (Agarwala, 2022). Tuttavia, enfatizzando il limitato potenziale di tale carburante ai fini del raggiungimento degli obiettivi di limitazione del riscaldamento globale appena espresse, questi investimenti e la continua espansione dell'infrastruttura GNL rischia di arenarsi, ritardando di conseguenza un'effettiva soluzione.

GNL come carburante di transizione

Data ad oggi l'assenza di una tecnologia definitiva ed applicabile su larga scala che garantisca emissioni nette zero nel settore del trasporto marittimo, il GNL si distingue ed emerge per il suo contenuto di zolfo pari a zero, le ridotte emissioni di anidride carbonica, ossidi di azoto e, soprattutto, i prezzi competitivi rispetto ai carburanti competitori. La combinazione di questi elementi permette di prevedere un aumento nel vicino futuro dell'utilizzo di navi alimentate a GNL. Tuttavia, come già sottolineato in precedenza, la scelta di questa soluzione non risponde agli obiettivi di emissioni nette zero. Proprio per

questo motivo, è auspicabile che il gas naturale liquefatto sia piuttosto considerato come “carburante di transizione” piuttosto che una soluzione a lungo termine.

In questi termini, il GNL rappresenterebbe un primo passo verso la decarbonizzazione del trasporto marittimo, aprendo la strada a futuri combustibili con emissioni nulle, come i carburanti rinnovabili gassosi. Specificatamente, una volta avviato l'uso del GNL come combustibile di transizione, un passaggio naturale sarebbe quello verso carburanti a minore impatto ambientale quali biogas e GNL sintetico rinnovabile. Queste alternative possono essere introdotte senza problemi come carburanti *drop-in*, ovvero sostituiti sintetici dei carburanti tradizionali (IRENA, 2021a). Richiedendo modifiche minime o nulle al motore, al sistema di alimentazione o alla rete di distribuzione, i carburanti *drop-in* offrono una soluzione semplice e intercambiabile che giustificherebbe oggi una transizione verso il GNL.

I combustibili gassosi rinnovabili adatti all'uso marittimo possono essere divisi in due categorie legate ai metodi di produzione: metanizzazione e metanazione.

La metanizzazione è un processo naturale di produzione di biogas dai rifiuti organici attraverso la digestione anaerobica di questi ultimi. La materia organica viene riscaldata in un'atmosfera a basso contenuto di ossigeno favorendone la disgregazione da parte dei batteri e generando metano. I carburanti ottenibili attraverso tale processo sono il **biogas compresso** (CBG)¹⁹ ed il **biogas liquefatto** (LBG)²⁰. Questi due biogas, dopo un trattamento di purificazione, possono essere immessi nella rete del gas naturale sotto forma di biometano e utilizzati per gli stessi scopi.

La metanazione, invece, è un processo industriale il cui scopo è creare una reazione chimica o biologica attraverso la combinazione di idrogeno con anidride carbonica o monossido di carbonio. Il prodotto risultante è noto come **metano sintetico liquefatto** (LSM)²¹ o e-metano (Dahlgren, 2022). Quest'ultimo offre un'alternativa ai combustibili gassosi derivati da biomassa.

¹⁹ Acronimo dall'inglese che sta per *Compressed Bio Gas*

²⁰ Acronimo dall'inglese che sta per *Liquefied Bio Gas*

²¹ Acronimo dall'inglese che sta per *Liquefied Synthetic Methane*

Metanazione e metanizzazione

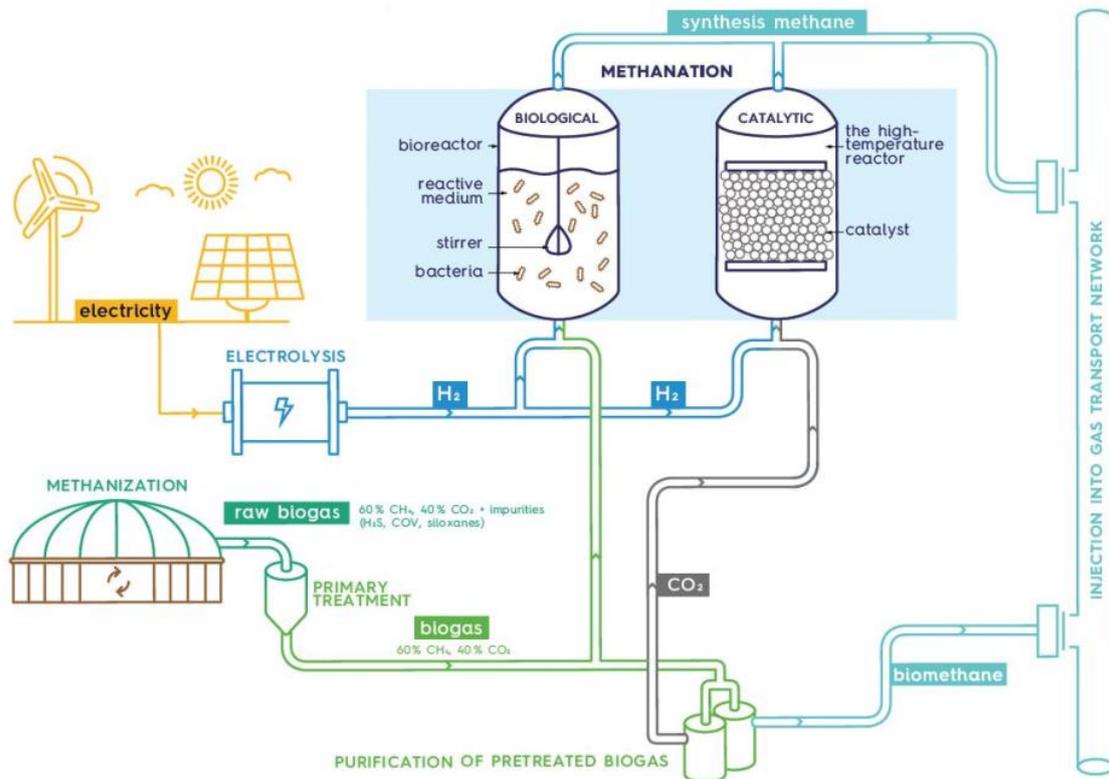


Figura 5

Fonte: Teréga, 2023

La metanizzazione (o biometanizzazione) è un processo basato sulla fermentazione naturale della materia organica per produrre biogas. Le materie prime utilizzate (o “input”) possono essere rifiuti organici provenienti dall'agricoltura (letame, liquami, residui di colture, ecc.), dall'industria agroalimentare o dalle autorità locali (fanghi di depurazione, rifiuti organici domestici, sfalci di cigli stradali, ecc.). Questo processo avviene all'interno di un'unità di metanizzazione. In una grande vasca, definita “digestore”, i rifiuti organici subiscono un processo di digestione anaerobica: vengono riscaldati e scomposti da batteri e microrganismi in assenza di ossigeno. Questa attività naturale produce metano.

Il biogas grezzo ottenuto attraverso la metanizzazione può essere ulteriormente raffinato per generare biometano, una sostanza con un livello di purezza superiore che contiene almeno il 97% di CH₄.

Il biometano ottenuto attraverso l'upgrading può essere poi utilizzato come combustibile in due modi. In primo luogo, può essere compresso a 200 bar, ottenendo così biogas

compresso (CBG). In alternativa, può essere raffreddato allo stato liquido a -162°C , ottenendo biogas liquefatto (LBG).

Come accennato precedentemente, entrambe le tipologie di carburante si prestano all'utilizzo da parte delle navi attualmente alimentate a GNL. In particolare, il CBG non richiede alcuna modifica ai sistemi di distribuzione del GNL, rendendolo un carburante *drop-in* intercambiabile con il gas naturale compresso (CNG) (ITF, 2020) (Dahlgren, 2022). Nonostante la maturità tecnologica di questo metodo di produzione, la scalabilità rimane una sfida.

L'altra via di produzione di combustibili gassosi rinnovabili adatti all'uso marittimo è la metanazione. Una delle metodologie più efficienti attraverso le quali è portato avanti questo processo si serve della cosiddetta tecnologia *Power-to-Gas*. Il concetto fondamentale di questa tecnologia si basa sulla conversione dell'elettricità in eccesso, in particolare da fonti rinnovabili come l'eolico e il solare, in una forma di gas immagazzinabile. La via *Power-to-Gas* prevede due fasi fondamentali (Teréga, 2023). In primo luogo, l'elettricità prodotta in eccesso viene utilizzata per l'elettrolisi dell'acqua e quindi la produzione di idrogeno (*Power-to-H₂*). Successivamente, si procede con la combinazione dell'idrogeno ottenuto con la CO₂ per generare infine il metano sintetico (*Power-to-CH₄*).

Tra le principali conseguenze dell'utilizzo di questa tecnologia vi è il possibile riciclo della CO₂ proveniente da altri settori industriali²², come già visto per la produzione del metanolo. Inoltre, altri importanti ripercussioni sono riscontrabili in relazione alle sfide legate alla modularità e allo stoccaggio dell'elettricità in eccesso quando la produzione supera il consumo. Questa tecnologia offre infatti una soluzione per lo sfruttamento e l'ottimizzazione dell'elettricità in eccesso trasformandola in gas che può essere stoccato in infrastrutture già esistenti o, in questo caso, usato come carburante per rifornire le navi portacontainer.

Esiste inoltre una seconda metodologia di produzione di gas sintetico chiamata pirogassificazione (Teréga, 2023). Questa prevede l'applicazione di alte temperature ai rifiuti in un ambiente a basso contenuto di ossigeno. Il processo si svolge in due fasi

²² Un interessante esempio legato al tema è lo sfruttamento della CO₂ prodotta dall'industria del cemento. Questa, combinata con idrogeno verde, è utilizzata in un ciclo virtuoso di produzione di CH₄ sintetico capace di abbattere le emissioni climalteranti. Per approfondire si consiglia la lettura dello studio "A Cost Estimation for CO₂ Reduction and Reuse by Methanation from Cement Industry Sources in Switzerland", Jens Baier et al, *Frontiers in Energy Research*, Febbraio 2018, Volume 6, Articolo 5. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenrg.2018.00005/pdf?isPublishedV2=False>

principali. La prima fase, la pirolisi, disassembla il materiale in tre fasi: solida, liquida e gassosa. Successivamente, la seconda fase, la gassificazione, converte le fasi solide e liquide in gas sintetico. Attraverso la pirogassificazione, quasi tutti i tipi di rifiuti possono essere trasformati in metano sintetico. Si prevede che l'espansione di questo settore acquisterà slancio grazie a meccanismi di sostegno e all'emergere di progetti dimostrativi.

Disponibilità e scalabilità

Il biogas compresso ha già ad oggi trovato applicazione nell'industria dei trasporti, in particolare nei piccoli veicoli da trasporto su strada, ed è considerato un'alternativa valida per le imbarcazioni marittime a breve distanza. Tuttavia, il suo utilizzo per il trasporto marittimo in acque profonde presenta delle difficoltà a causa del grande volume necessario per lo stoccaggio, che richiede frequenti soste per il rifornimento (Hansson, 2019). Per quanto riguarda invece il biogas liquefatto, i limiti nella scalabilità della sua applicazione sono legati alla mancanza ad oggi di infrastrutture per il rifornimento (Dahlgren, 2022).

Esempi reali di applicazione del biogas nello shipping marittimo sono rappresentati dalla Svezia, la quale si distingue come un importante produttore globale di LBG. Il porto di Göteborg, in particolare, fornisce servizi di bunkeraggio consolidati. Inoltre, la finlandese ESL Shipping ha incorporato nella sua flotta la prima nave da carico secco LBG al 100% rinnovabile (IRENA, 2021a). Nonostante questi esempi virtuosi, le sfide per CBG e LBG persistono a causa della disponibilità disomogenea di materie prime organiche necessarie per la produzione, con conseguenti problemi nella catena di approvvigionamento. Inoltre, i costi di trasporto associati alla movimentazione di combustibili da luoghi diversi da quelli di produzione riducono il rapporto costo-efficacia di CBG e LBG per il settore navale, spingendo i produttori di biogas a dare la priorità alla fornitura di questo per il teleriscaldamento locale.

La produzione di e-metano attraverso la metanazione, invece, offre una maggiore possibilità di scalabilità in quanto non dipende dalla disponibilità di biomassa. Tuttavia, la sua dipendenza dalla CO₂ come materia prima e la sua attuale giovane fase di sviluppo tecnologico ne ostacolano oggi l'applicazione su larga scala.

Conclusioni

La crescita dell'utilizzo del GNL come carburante è aumentata negli ultimi anni grazie alla sua ampia disponibilità e competitività di prezzo. Tuttavia, gli obiettivi globali di decarbonizzazione dello shipping marittimo richiedono enormi riduzioni delle emissioni di CO₂. Per questo motivo, la transizione al gas naturale liquefatto può essere giustificata solamente come passaggio per arrivare poi all'uso di combustibili gassosi rinnovabili alternativi che permettano di mitigare significativamente la produzione di gas serra (IMO, 2020b).

I biogas e l'e-metano sintetico si presentano come promettenti candidati per gli step successivi della transizione. Un'analisi completa delle loro emissioni conferma infatti che sia il primo che il secondo offrono una notevole riduzione in termini di emissioni *Well-To-Wake* (SEA\LNG & SGMF, 2019).

Una questione critica legata alla concettualizzazione del GNL come combustibile transitorio, tuttavia, è il fatto che questa implicherebbe il raggiungimento delle emissioni nette zero attraverso una successione di diversi stadi di transizione. Ciò richiederebbe all'industria marittima un iniziale passaggio dai combustibili fossili al GNL e successivamente da questo ai carburanti a zero emissioni. Questo processo in più fasi introdurrebbe sfide, complessità ed allungherebbe i tempi per il raggiungimento degli obiettivi finali. Queste problematiche potrebbero conseguentemente tradursi in dubbi circa la volontà delle parti interessate ad investire in una modalità di transizione multi-step. Come verrà evidenziato più dettagliatamente nei successivi capitoli, tali perplessità possono essere alimentate dall'ampiezza dell'orizzonte temporale a cui questi investimenti sono legati. La vita media di una nave si attesta infatti a circa 25/30 anni; di conseguenza, il passaggio ai combustibili alternativi attraverso la sostituzione della flotta o il *retrofit* richiede molto tempo. Questa realtà pone particolarmente sotto pressione gli armatori che vogliono decarbonizzarsi. Dovendo prendere decisioni economicamente rilevanti, un panorama dubbio o incerto potrebbe scoraggiarli nell'intraprendere specificatamente questa via per la pianificazione della loro transizione.

A mitigare in parte questi dubbi potrebbe essere l'intercambiabilità che i biogas ed il metano sintetico vantano nei confronti del GNL derivato da materie prime fossili (SEA\LNG & SGMF, 2019). Ad esempio, incorporando una miscela al 20% di biogas come carburante *drop-in* si può ottenere una riduzione del 13% delle emissioni di gas

serra rispetto all'utilizzo del 100% di GNL fossile senza dover incorrere a particolari modifiche tecniche alle navi.

Ancora una volta, tuttavia, si ritiene necessario sottolineare il fattore di dipendenza di questi carburanti dalla disponibilità di determinate materie prime. Nel caso dei biogas, come accennato sopra, è infatti da valutare la disomogeneità della distribuzione della materia prima organica necessaria per la produzione. Simili considerazioni possono inoltre essere fatte per quanto riguarda il gas naturale sintetico. Come per gli altri *e-fuels*, è importante considerare la dipendenza della produzione dalla disponibilità di energia rinnovabile e, in questo caso, anche di CO₂. Per quanto riguarda l'elemento geoeconomico legato al binomio luogo di produzione – luogo di distribuzione che è stato osservato per gli altri carburanti alternativi, possono essere fatte delle considerazioni specifiche. L'industria e la tecnologia di movimentazione dei gas liquefatti risulta essere già ben strutturata e collaudata. Per questo motivo, l'ipotetica distanza tra luoghi di produzione di tali carburanti e porti di bunkeraggio porrebbe problematiche inferiori rispetto ad altri combustibili alternativi.

Tuttavia, vale comunque la considerazione circa l'influenza sul rapporto costo-efficacia della necessità di una catena di distribuzione e trasporto.

II Gli attori: Legislatore, Carriers e Porti

Avendo nel precedente capitolo delineato una panoramica dei carburanti sostenibili presi in considerazione dall'industria dello shipping marittimo, si ritiene ora necessario procedere con un'analisi del ruolo giocato dagli attori principali del settore nei confronti della decarbonizzazione di questo. Come anticipato all'interno dell'introduzione, gli attori principali individuati sono il legislatore, i carriers ed i porti.

2.1 Il legislatore

International Maritime Organization

L'Organizzazione Marittima Internazionale è un'agenzia specializzata delle Nazioni Unite la cui missione è quella di promuovere gli sforzi di cooperazione volti a far progredire pratiche di navigazione sicure, protette, rispettose dell'ambiente, efficienti e sostenibili. Dal punto di vista della protezione ambientale, l'implementazione di nuovi strumenti politici che regolano le emissioni delle navi è il risultato di negoziati condotti in seno al *Marine Environment Protection Committee* (MEPC)²³ ogni sei mesi circa. Le prime *policy* sul tema sono state applicate nel 2005, a seguito di diversi anni di negoziati stimolati dall'accordo sul Protocollo di Kyoto del 1997. In quella sede l'industria navale fu infatti identificata fra gli attori di cui era necessaria un'azione attiva e responsabile nel processo di riduzione delle emissioni di gas a effetto serra.

Il MEPC, uno dei cinque principali comitati tecnici dell'Organizzazione Marittima Internazionale, comprende due sottocomitati: il "sottocomitato per l'attuazione degli strumenti IMO" e il "sottocomitato per la prevenzione e l'intervento contro l'inquinamento". Poiché l'IMO opera come un'organizzazione guidata dagli Stati membri (175), le decisioni sono generalmente precedute da proposte legislative presentate da questi e/o da organizzazioni con status consultivo (81 organizzazioni), come la *International Chamber of Shipping*. Durante le riunioni del MEPC ogni membro dispone

²³ Il *Marine Environment Protection Committee* (in italiano Comitato per la Protezione dell'Ambiente Marino) è un organismo tecnico specializzato che opera all'interno dell'Organizzazione Marittima Internazionale. Questo si occupa specificatamente di questioni ambientali legate al settore della navigazione quali: cambiamento climatico, prevenzione delle fuoriuscite di petrolio, gestione delle acque di zavorra, gestione dei rifiuti marittimi, inquinamento atmosferico ed acustico legato alle navi. Il MEPC svolge quindi un ruolo cruciale nella formulazione di regolamenti internazionali ai fini di promuovere pratiche sostenibili nell'industria marittima.

di un voto e le proposte vengono negoziate fino al raggiungimento di un consenso di almeno il 50% degli Stati membri o alla decisione di abbandonare la proposta.

L'Organizzazione Marittima Internazionale, in qualità di membro della famiglia delle agenzie ONU è impegnata nell'allineamento all'Obiettivo 13 dell'agenda 2030 per lo sviluppo sostenibile delle Nazioni Unite, che richiede un'azione immediata per affrontare il cambiamento climatico e le sue conseguenze. Questo impegno risulta essere in armonia con l'Accordo di Parigi del 2015, che mira a ridurre le emissioni di gas climalteranti e a combattere il riscaldamento globale. Il 15 luglio 2011, l'IMO ha introdotto la prima serie di misure obbligatorie a livello globale per migliorare l'efficienza energetica delle navi (IMO, 2011). Da allora, l'organizzazione ha compiuto ulteriori passi, tra cui l'emanazione di misure normative, l'adozione della “*Initial IMO GHG Strategy*” nel 2018 e, nel 2023, la revisione della Strategia sulla Riduzione delle Emissioni GHG delle Navi. Per facilitare l'attuazione di queste misure, l'IMO è impegnata in un programma completo di sviluppo delle proprie capacità e di assistenza tecnica.

La Strategia IMO 2023 sulla riduzione delle emissioni di gas serra da parte delle navi, riveduta ed approvata dal *Marine Environment Protection Committee* (MEPC 80), stabilisce obiettivi piuttosto ambiziosi per affrontare le emissioni dannose per l'ambiente (IMO, 2023b). Fra questi, vi è l'obiettivo collettivo di raggiungere lo zero netto di emissioni climalteranti da parte del settore del trasporto marittimo internazionale entro il 2050 circa. Inoltre, è previsto anche l'impegno a promuovere l'adozione di combustibili alternativi a impatto zero (o quasi) entro il 2030. Infine, vengono delineati dei parametri indicativi i quali specificano che lo shipping marittimo dovrebbe raggiungere una riduzione delle emissioni nette pari ad almeno il 20%, con aspirazioni al 30%, entro il 2030, e ad almeno il 70%, con aspirazioni all'80%, entro il 2040.

Fra i target della strategia 2023 vi è specificamente quello di ridurre l'impronta di CO₂ lasciata dal settore di almeno il 40% entro il 2030. Quest'ambizione è strettamente legata all'incorporazione di tecnologie, combustibili e/o fonti energetiche a emissioni zero (o quasi), che dovrebbero costituire almeno il 5%, con l'obiettivo del 10%, dell'energia utilizzata dal trasporto marittimo internazionale entro il 2030.

Si prevede che la revisione completa della Strategia 2023 dell'IMO sui gas serra sarà completata durante la riunione dell'autunno 2028 del *Marine Environment Protection Committee*, con l'intenzione finale di adottare la nuova Strategia IMO 2028 sulla riduzione delle emissioni di gas serra delle navi.

Iniziative e obiettivi dell'IMO per combattere il cambiamento climatico

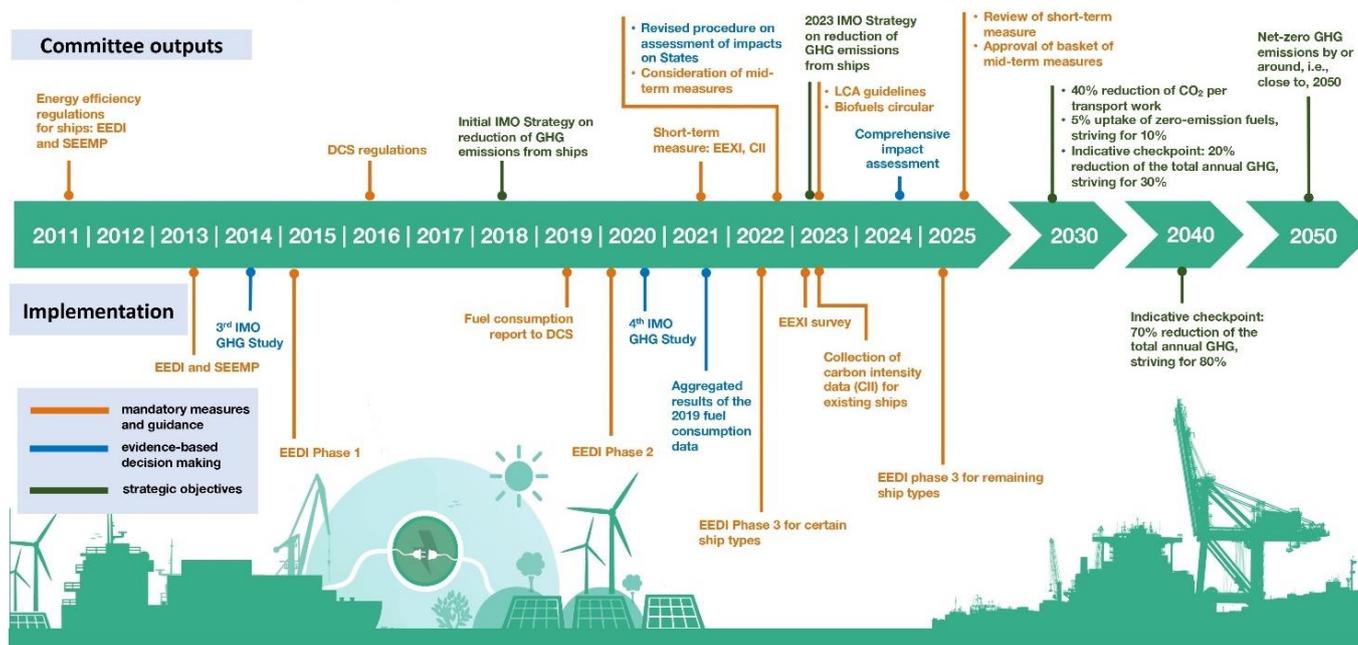


Figura 6

Fonte: IMO (2023)

Le tre principali sfide affrontate dall'IMO

Il bisogno di una regolamentazione più rigorosa delle emissioni di gas a effetto serra derivanti dallo shipping marittimo si scontra con tre sfide principali all'interno dell'Organizzazione Marittima Internazionale (Bach & Teis, 2023). In primo luogo, una carenza nella capacità dell'Organizzazione di regolamentare efficacemente le varie tecnologie emergenti; in secondo luogo, l'incertezza sulla portata del mandato normativo dell'IMO; in terzo luogo, la mancanza di consenso politico durante i processi negoziali.

La transizione alle tecnologie di propulsione a basse o zero emissioni richiede una gamma diversificata di soluzioni. Come è stato osservato nel precedente capitolo, diverse tipologie di navi operano in differenti condizioni. Specificatamente, elementi quali distanze percorse, rotte, numero di tappe, e velocità richiedono requisiti energetici variabili. Proprio per questo motivo alcune tipologie di carburanti possono rivelarsi efficaci per un tipo di servizio ma non adatti ad un altro (Hanna Bacha, et al., 2020). Tutto ciò si traduce in una grande sfida per l'IMO, la quale si ritrova nella condizione di dover passare dalla regolamentazione di un unico carburante (come accaduto per oltre 50 anni) alla necessità di dover generare un mix di politiche che accolga invece un ventaglio di

diverse soluzioni. Questa prima problematica si interseca inoltre con la difficoltà che l'IMO incontra nella supervisione di innovazioni e tecnologie emergenti causata dal suo approccio storico. Questo è infatti incentrato sulla regolamentazione basata sulla comprovata fattibilità tecnica, sottolineando la necessità da parte dell'istituzione di avere soluzioni pronte prima di attuare i regolamenti.

Infine, l'organizzazione tende ad emanare regolamenti neutrali dal punto di vista tecnologico, concentrandosi sugli standard di prestazione per le singole navi piuttosto che sostenere e avallare tecnologie a basse/zero emissioni specifiche. In questo modo, la decisione su quale carburante o tecnologia di propulsione adottare rimane nelle mani degli armatori con l'effetto di non incentivarli adeguatamente al raggiungimento degli obiettivi climatici. Data la lunga durata di vita delle navi (una media di 25/30 anni), un avvio della decarbonizzazione nel settore appare necessario al più presto. Tuttavia, l'attuale combinazione di strumenti introdotti dall'IMO appare blanda ed insufficiente per stimolare l'innovazione e la transizione in un ambiente che sia chiaro ed in grado di creare un'equa competizione (International Chamber of Shipping, 2021) (Knowler, 2021).

Il secondo degli ostacoli che l'Organizzazione Marittima Internazionale deve affrontare riguarda l'incertezza del suo mandato normativo. Storicamente, l'IMO ha funzionato come organizzazione prettamente tecnica, concentrando il suo operato principalmente sull'emanazione di regolamenti che disciplinassero l'operare delle navi. Tale orientamento si scontra quindi con l'ipotesi di un ruolo più attivo dell'agenzia ONU quale ad esempio l'attuazione di strumenti politici volti a promuovere la ricerca e lo sviluppo. Nel corso dei negoziati in seno all'IMO, a partire dalla fine degli anni 2000, sono infatti riecheggianti appelli persistenti a favore dell'attuazione di misure di mercato²⁴ e di un sostegno finanziario alla ricerca di soluzioni alternative (IMO, 2019). Tali richieste non hanno tuttavia ancora ottenuto un consenso all'interno delle discussioni del *Marine Environment Protection Committee*. Tale mancanza di consenso aggiunge un ulteriore livello di complessità alla questione del mandato normativo, portando alcuni delegati

²⁴ Con "misure di mercato" si intendono misure volte ad incentivare la decarbonizzazione dell'industria marittima assegnando un prezzo specifico al permesso di emettere gas serra. Il costo associato alle emissioni, basato appunto su meccanismi di mercato, funge da incentivo finanziario per le compagnie di navigazione ad investire in tecnologie a basso impatto ambientale, favorendo il passaggio a pratiche ecologiche nel settore.

degli Stati nazionali ad esprimere scetticismo circa il ruolo e l'orientamento giurisdizionale dell'IMO in queste materie²⁵.

Infine, l'assenza di efficaci strumenti politici che promuovano la decarbonizzazione dello shipping marittimo può essere in parte attribuita alla terza sfida che l'Organizzazione deve affrontare: la mancanza di consenso tra gli Stati membri riguardo alla tipologia e al rigore degli strumenti da implementare. Da un lato, avere un'istituzione multilaterale capace di uniformare e regolamentare un settore internazionale come quello del trasporto marittimo offre sicuramente dei vantaggi in termini di creazione di un campo di gioco omogeneo; dall'altro, tuttavia, non possono essere ignorate le sfide legate ad un'organizzazione guidata da Stati membri che funge da organo normativo primario, soprattutto quando sono affrontati argomenti politicamente sensibili come il cambiamento climatico.

Tale mancanza di consenso politico sull'adozione di adeguati strumenti per il contenimento dei gas serra è ulteriormente complicata dal fatto che le delegazioni degli Stati membri mostrano sforzi meno ambiziosi nei negoziati IMO rispetto a quelli che occorrono in seno ad altre agenzie ONU (Bach & Teis, 2023). Durante i negoziati sul clima, come la Conferenza delle Parti (COP), le delegazioni sono generalmente composte da rappresentanti dei ministeri di ambiente ed esteri, mentre le delegazioni all'IMO includono solitamente personale tecnico delle autorità marittime nazionali. Questi ultimi, spesso, non considerano la mitigazione dei cambiamenti climatici allo stesso livello di priorità rispetto ai delegati che partecipano alla COP.

Un altro elemento da non sottovalutare è l'influente ruolo negoziale che giocano i principali Paesi armatori del Sud globale. Poiché molti proprietari tendono a registrare le proprie navi in nazioni che offrono regimi fiscali agevolati o leggi sul lavoro meno severe, paesi quali Panama, Liberia e Isole Marshall sono emersi come grandi nazioni armatrici. Di conseguenza, in alcuni casi, questi vantano più potere ed influenza in seno ai negoziati

²⁵ L'articolo 1(a) della Convenzione sull'Organizzazione Marittima Internazionale definisce lo scopo dell'IMO come *“fornire un meccanismo di cooperazione tra i governi nel campo della regolamentazione e delle pratiche governative relative a questioni tecniche di ogni tipo che interessano la marina mercantile impegnata nel commercio internazionale; incoraggiare e facilitare l'adozione generale dei più alti standard possibili in materia di sicurezza marittima, efficienza della navigazione e prevenzione e controllo dell'inquinamento marino causato dalle navi”*. Il linguaggio di questa formulazione consente diverse interpretazioni di ciò che rientra nell'ambito delle “questioni tecniche”, lasciando spazio al dibattito se iniziative come le misure basate sul mercato e l'istituzione e finanziamento di un fondo per la ricerca e lo sviluppo siano considerabili come di competenza dell'IMO. La Convenzione è disponibile per la consultazione al seguente link: <https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/Convention-on-the-International-Maritime-Organization.aspx>

IMO rispetto ad altri contesti ONU (Corbett, Ruwet, Xu, & Weller, 2020). Data la loro dipendenza economica dalle registrazioni sotto bandiera di comodo²⁶, oltre che alla sensibilità agli aumenti dei costi di trasporto marittimo, questi paesi risultano spesso cauti in materia di decarbonizzazione poiché spinti dalla preoccupazione per i potenziali danni economici causati da politiche più incisive in materia di emissioni.

Le sopradescritte sfide che l'Organizzazione Marittima Internazionale si trova ad affrontare pongono un grave rischio di inazione che potrebbe compromettere il raggiungimento degli obiettivi di decarbonizzazione del settore nei tempi prefissati. In risposta all'inerzia dell'IMO percepita sul tema, negli ultimi anni sono emerse diverse iniziative normative sia da parte del settore pubblico che dell'industria stessa. L'Unione Europea, ad esempio, ha incluso a partire da gennaio 2024 il trasporto marittimo all'interno del sistema di scambio di quote di emissione dell'UE (ETS) (European Commission, 2023b). Da parte del settore privato, invece, si può citare ad esempio l'attivismo della Poseidon Principles Association²⁷, il cui obiettivo è spingere le istituzioni finanziarie ad allineare i propri portafogli di investimento nell'industria navale ad un comportamento ambientale responsabile in maniera tale da incentivare la decarbonizzazione di quest'ultima (Poseidon Principles, 2023). Inoltre, un aspetto interessante è anche quello del coinvolgimento delle città come attori chiave nel guidare esperimenti incentrati sulla mitigazione dei cambiamenti climatici, anche in questo caso in risposta all'inazione dei negoziati multilaterali (Madsen & Hansen, 2019).

Tuttavia, sebbene la proattività urbana nel combattere il cambiamento climatico porti a benefici in termini di coinvolgimento ed innovazione, questa dovrebbe essere meglio considerata complementare piuttosto che sostitutiva di un'azione compiuta a livello globale (Bach & Teis, 2023). Allo stesso modo, l'attuazione dei regolamenti UE sulle emissioni da parte delle navi o le iniziative guidate dall'industria non devono essere

²⁶ Secondo il Diritto Internazionale la nazionalità delle navi mercantili risulta dalla bandiera e dai documenti di bordo ed ai sensi dell'articolo 94 della UNCLOS “*Ogni Stato esercita efficacemente la propria giurisdizione e il proprio controllo su questioni di carattere amministrativo, tecnico e sociale sulle navi che battono la sua bandiera*”. Con “*bandiera di comodo*” si intende una pratica commerciale in base alla quale i proprietari immatricolano una nave all'interno del registro navale di Paesi caratterizzati da prassi lassiste che non si traducono in un controllo effettivo. Tra i principali paesi la cui bandiera è definita di convenienza vi sono Panama, Liberia, Isole Marshall, Hong Kong, e Bahamas. Per approfondire: Marrella F. (2021). *Diritto internazionale*, 3 ed., Milano, Giuffrè - Francis Lefebvre (pp. 413 - 415)

²⁷ I Poseidon Principles sono stati sviluppati nel 2019 grazie all'iniziativa di istituti bancari internazionali (Citi, Société Générale e DNB) in collaborazione con aziende leader del settore marittimo (A.P. Møller - Mærsk, Cargill, Euronav, Gram Car Carriers, Lloyd's Register e Watson Farley & Williams) e con il sostegno del Global Maritime Forum, del Rocky Mountain Institute e dell'UMAS. Per approfondire: <https://www.poseidonprinciples.org/finance/#home>

considerate una ragione per abbandonare gli sforzi dell'IMO nell'assumere il ruolo di piattaforma impegnata in un'azione progressiva e comune nell'affrontare la decarbonizzazione del trasporto marittimo.

Unione Europea

Il 14 luglio 2021 la Commissione europea ha adottato il pacchetto “*Fit for 55*”. Questa iniziativa consiste in una serie di proposte interconnesse che, se realizzate nel loro insieme, permetterebbero il compimento dell'ambizione europea di ridurre le emissioni di gas serra di almeno il 55% entro il 2030 rispetto ai livelli del 1990 e di rendere l'Europa un continente neutrale dal punto di vista climatico entro il 2050. Le proposte all'interno del pacchetto *Fit for 55* sono volte a modificare e modernizzare la legislazione europea e a introdurre nuove iniziative. L'obiettivo principale può essere identificato nell'allineamento delle politiche UE agli obiettivi climatici concordati dal Consiglio e dal Parlamento europeo. Il pacchetto mira quindi a stabilire un quadro completo ed equo per il raggiungimento effettivo degli obiettivi climatici. Tra questi figurano la facilitazione di una transizione equa e socialmente giusta, il rafforzamento dell'innovazione e della competitività delle industrie europee (garantendo al contempo condizioni di parità con gli operatori dei Paesi terzi) e, infine, il consolidamento della leadership UE nella lotta globale contro i cambiamenti climatici (European Council, 2023).

Già nel giugno 2013, la Commissione europea aveva delineato un proprio approccio graduale al fine di integrare le emissioni del trasporto marittimo nelle politiche di riduzione dei gas serra UE. Il processo, così come concepito, prevedeva tre fasi sequenziali (Adamowicz, 2022):

- 1) implementazione di un sistema di monitoraggio, comunicazione e verifica (MRV²⁸) delle emissioni;
- 2) definizione di obiettivi di riduzione per il settore del trasporto marittimo;
- 3) introduzione di misure di mercato.

Il Regolamento MRV dell'UE, considerato il passo iniziale e cruciale di questa integrazione, è entrato in vigore il 1° luglio 2015. Questo prevedeva l'obbligo da parte delle compagnie di presentare ai tecnici verificatori un piano di monitoraggio per ciascuna

²⁸ L'acronimo MRV sta per il nome in inglese del sistema: *Monitoring, Reporting and Verification*.

delle proprie navi entro il 31 agosto 2017, indicando il metodo scelto per monitorare e comunicare le emissioni di CO₂. Successivamente, l'effettiva applicazione del regolamento ed il primo periodo di rendicontazione è iniziato il 1° gennaio 2018. La tempistica intercorsa tra l'entrata in vigore e l'effettiva applicazione è stata intesa come metodo per garantire agli Stati membri e le parti interessate un tempo sufficiente per adottare le misure necessarie²⁹ (European Union, 2015).

È importante notare che tale sistema estende la sua copertura anche oltre gli Stati membri dell'Unione, includendo Norvegia e Islanda quali Paesi membri dello Spazio Economico Europeo.

L'attuazione di tale regolamento da parte dell'UE può essere considerata come una delle ragioni che ha spinto poco dopo la comunità internazionale ad approvare un simile meccanismo in sede IMO. Per evitare la progressiva frammentazione della regolamentazione delle emissioni derivanti dal trasporto marittimo, nel 2016 sono stati infatti introdotti degli emendamenti alla Convenzione internazionale per la prevenzione dell'inquinamento causato da navi (MARPOL). In questo modo si è quindi istituito il quadro giuridico per un sistema di raccolta dati (IMO Data Collection System, abbreviato in IMO DCS) sull'inquinamento delle navi³⁰ (IMO, 2016).

Secondo il Regolamento (Ue) 2015/757 del Parlamento europeo e del Consiglio (European Union, 2015) le compagnie di navigazione applicando l'MRV sono tenute a tre obblighi principali:

1. **Monitoraggio:** in conformità con i propri piani di monitoraggio, le compagnie devono mantenere sotto controllo per ogni viaggio le emissioni di gas a effetto serra prodotte dalle proprie navi, il consumo di carburante e altri parametri. Ciò include dati quali la distanza percorsa, il tempo trascorso in mare e il carico trasportato;

²⁹ Whereas 39 del Regolamento (Ue) 2015/757 del Parlamento Europeo e del Consiglio del 29 Aprile 2015: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32015R0757>

³⁰ In base al sistema DCS dell'IMO, le navi di stazza pari o superiore a 5.000 tonnellate sono tenute a registrare i dati di consumo per ogni tipo di carburante utilizzato, nonché altri parametri. I dati devono essere trasmessi allo Stato di bandiera al termine di ogni anno solare. Successivamente, questo, se ritiene che i dati siano stati comunicati correttamente, rilascia alla nave una dichiarazione di conformità. Gli Stati di bandiera sono tenuti poi a trasmettere il materiale raccolto alla banca dati dell'IMO [26]. Per approfondire: *International Maritime Organization*, RESOLUTION MEPC.278(70), Adopted on 28 October 2016, [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.278\(70\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.278(70).pdf)

2. **Emissione di un report:** entro il 30 aprile di ogni anno (il 31 marzo a partire dal 2025), le compagnie sono tenute a presentare alla Commissione e agli Stati di bandiera delle proprie navi, tramite il portale THETIS MRV, una relazione sulle emissioni prodotte. Questa relazione riguarda ogni nave che ha svolto attività di trasporto marittimo all'interno dello Spazio Economico Europeo durante il precedente periodo di riferimento (anno solare).
3. **Conservare i documenti di conformità:** entro il 30 giugno di ogni anno, le compagnie devono garantire che tutte le loro navi attive nel precedente periodo di rendicontazione e che visitano porti dello Spazio Economico Europeo abbiano a bordo un documento di conformità. Questo documento può essere infatti soggetto a ispezioni da parte delle autorità degli Stati membri.

Il Sistema MRV dell'UE obbliga quindi dal 2018 ogni armatore ed operatore la cui nave con un tonnellaggio superiore alle 5000T facesse tappa in un porto dello Spazio Economico Europeo a riferire le emissioni di anidride carbonica prodotte. A partire dal primo di gennaio 2024, inoltre, il sistema di monitoraggio è stato esteso anche ad altre sostanze climalteranti quali metano e protossido di azoto. Il fine ultimo del sistema è quello di fornire un insieme di dati completo e affidabile sul tema in modo da agevolare il legislatore nel prendere decisioni politiche informate la cui implementazione sarà quindi più efficace.

Per quanto riguarda sanzioni ed ammende per chi non rispetti il regolamento, queste sono disciplinate dall'articolo 20 (European Union, 2015). È interessante notare che a prova della determinazione da parte dell'UE nel garantire che questo diventi uno strumento efficace per la riduzione delle emissioni, al punto 3 del suddetto articolo è specificata la possibilità di espulsione di ogni vettore che non abbia rispettato i requisiti di per due o più periodi di rendicontazione consecutivi.

L'attuazione dell'MRV a livello europeo e del DCS da parte dell'IMO si basa sulla convinzione che il processo di riduzione delle emissioni di gas a effetto serra del trasporto marittimo debba svolgersi in maniera graduale ed attraverso più fasi strutturate e studiate. Un monitoraggio, una rendicontazione e un sistema di verifica rigorosi permettono il raccoglimento di una banca dati essenziale sul consumo di carburante, le emissioni di gas serra e l'efficienza energetica delle navi. Questi dati servono quindi poi a supportare lo studio e l'elaborazione di strumenti e strategie ottimali per ridurre le emissioni di gas serra all'interno dell'Unione.

Pur avendo obiettivi comuni, esistono tuttavia alcune differenze fondamentali tra i due sistemi di monitoraggio. In primo luogo, il sistema MRV dell'UE rende pubblici i dati sulle emissioni di CO₂ e sull'efficienza energetica specificatamente per ogni nave. L'obiettivo di questa pratica è quello di incoraggiare l'adozione di standard più efficienti dal punto di vista energetico nel settore sfruttando anche la pressione dell'opinione pubblica. Il DCS dell'IMO, invece, opera secondo il principio di riservatezza (Adamowicz, 2022), fornendo quindi set di dati aggregati completamente in forma anonima. Questo approccio consente all'IMO di stabilire obiettivi e attuare strumenti legislativi senza riferirsi alle singole navi ma al sistema in generale. Un'altra differenza, inoltre, è legata al fatto che il sistema di monitoraggio dell'UE incorpora un solido meccanismo di verifica dei dati da parte di terzi accreditati (European Union, 2015). Questa specifica modalità di gestione del processo di verifica si allinea con gli obiettivi climatici dell'UE, garantendo informazioni affidabili e comparabili per l'elaborazione di politiche informate a livello europeo.

EU Emissions Trading System (EU ETS)

Il sistema di scambio di quote di emissione (*Emissions Trading System*, abbreviato in ETS) dell'UE lanciato nel 2005 è il primo sistema internazionale di scambio di emissioni al mondo e costituisce una componente fondamentale della politica energetica europea. Applicabile in tutti i 27 Stati membri dell'Unione e nei Paesi dell'Associazione Europea di Libero Scambio, il sistema spinge coloro che inquinano ad essere responsabili delle proprie emissioni climalteranti (European Commission, 2023b). Questo approccio, oltre ad incoraggiare gli sforzi per la decarbonizzazione, genera entrate per sostenere la transizione dell'UE verso un futuro a zero emissioni. Come anticipato sopra, sulla scia degli sforzi europei per la decarbonizzazione ed il raggiungimento degli obiettivi dell'*European Green Deal*, l'UE con il lancio del piano *Fit for 55* si è impegnata a riformare il sistema ETS dell'UE rendendolo più ambizioso. A partire dal 1° gennaio 2024 è stato quindi ampliato l'ambito di applicazione del sistema al fine di includere anche le emissioni generate dal trasporto marittimo.

Il sistema ETS dell'UE funziona secondo il principio "*Cap and Trade*". Il tetto massimo (*cap*) è un limite fissato alla quantità totale di gas serra che possono essere emessi dagli impianti e dagli operatori aerei e navali che rientrano nel sistema. Entro questo limite le

quote di emissione possono essere scambiate fra gli operatori (*trade*). Il tetto massimo viene ridotto annualmente in linea con gli obiettivi climatici dell'UE.

L'idea di un *cap* decrescente garantisce che le quote abbiano un valore di mercato sempre superiore a zero dato dalla certezza di scarsità di queste a lungo termine. Il prezzo delle quote funge poi da incentivo economico per le aziende a ridurre le proprie emissioni dove possibile. Infatti, una quota dà il diritto di emettere una tonnellata di anidride carbonica equivalente e, ogni anno, le aziende devono restituire un numero di quote sufficiente a compensare completamente le proprie emissioni per evitare di incorrere in sanzioni. Questo sistema mira a incentivare gli sforzi di riduzione delle emissioni penalizzando economicamente aziende ed operatori che superano le quote assegnate. Alcune quote vengono distribuite gratuitamente³¹, altre invece possono invece essere acquistate sul cosiddetto “*carbon market*” dell'UE. Le aziende possono anche scambiare le quote tra loro, se necessario. Se un impianto o un operatore riduce le proprie emissioni può infatti conservare le quote corrispondenti in eccesso per utilizzarle in futuro o venderle.

Dal 2013 ad oggi, il sistema mercato delle emissioni europeo ha generato entrate per oltre 152 miliardi di euro (European Commission, 2023b). Tale afflusso di denaro confluisce principalmente nei bilanci nazionali. Gli Stati membri utilizzano poi queste entrate per sostenere gli investimenti nazionali nel settore delle energie rinnovabili, nel miglioramento dell'efficienza energetica e nella ricerca e sviluppo di tecnologie a basse emissioni. La vendita delle quote alimenta anche fondi specifici del sistema ETS quali il *Innovation Fund*³² ed il *Modernization Fund*³³. A partire dal 2005, il sistema ETS ha contribuito a ridurre del 41% le emissioni delle centrali elettriche e industriali (European Council, 2023).

³¹ La vendita all'asta è il metodo predefinito per l'assegnazione delle quote di emissione alle imprese che partecipano al sistema ETS. Tuttavia, in settori diversi da quello della produzione di energia, il passaggio alla vendita all'asta sta avvenendo progressivamente. Per questo motivo il settore dei trasporti riceve ancora delle quote a titolo gratuito. Per approfondire la questione: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets/free-allocation_en

³² Per approfondire: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-funding-climate-action/innovation-fund/what-innovation-fund_en

³³ Per approfondire: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-funding-climate-action/modernisation-fund_en

FuelEU Maritime Initiative

Il 23 marzo 2023 il Parlamento, la Commissione ed il Consiglio Europeo hanno raggiunto un punto di accordo su un elemento chiave del pacchetto legislativo *Fit for 55*: la *FuelEU Maritime Initiative*. Questa è un'iniziativa di tipo tecnico concepita per promuovere a livello pratico l'utilizzo di carburanti rinnovabili e a basse emissioni di carbonio specificatamente nel settore marittimo. Affiancandosi alla corrispettiva iniziativa dedicata al settore dell'aviazione, il suo obiettivo generale è quello di concretizzare l'*European Green Deal* fornendo un set di norme che allineino il trasporto marittimo agli obiettivi climatici dell'UE per il 2030 e il 2050. Le nuove norme si applicheranno a partire dal 1° gennaio 2025, ad eccezione degli articoli 8 e 9 che si applicheranno a partire dal 31 agosto 2024.

Tra le norme contenute all'interno della *FuelEU Maritime Initiative* possono essere individuati tre punti chiave: a) la riduzione dell'intensità carbonica dell'energia utilizzata dalle navi; b) l'uso di infrastrutture di approvvigionamento energetico da terra nei principali porti europei (sistema detto *onshore power supply* abbreviato in OPS³⁴); c) incentivare la transizione verso combustibili sostenibili e rinnovabili.

Per quanto riguarda il primo punto, a partire dal 2025, le navi che operano all'interno dei confini dell'Unione Europea o nello Spazio Economico Europeo dovranno coprire il loro fabbisogno energetico attraverso l'uso di combustibili con un'intensità carbonica inferiore a un valore soglia prestabilito. L'intensità di tali gas sarà misurata su base *Well-to-Wake*, considerando quindi l'intero ciclo di vita dal momento della produzione al trasporto ed alla combustione all'interno dei motori.

Secondo la regolamentazione, la soglia di intensità carbonica permessa sarà poi soggetta a una riduzione percentuale su base quinquennale (*Figura 7*) rispetto a un valore di riferimento. Come specificato all'interno delle considerazioni che aprono il testo normativo (European Union, 2023) tale valore è basato sull'energia media utilizzata a

³⁴ La pratica dell'approvvigionamento energetico da terra da parte delle navi in fase di ormeggio è spesso definita anche "*cold ironing*"

bordo delle navi nell'anno 2020³⁵ in accordo con i dati raccolti dall'MRV dell'UE di quell'anno, calcolata pari a 91,16 gCO_{2e}/MJ³⁶.

Proiezione della riduzione della soglia su base quinquennale:

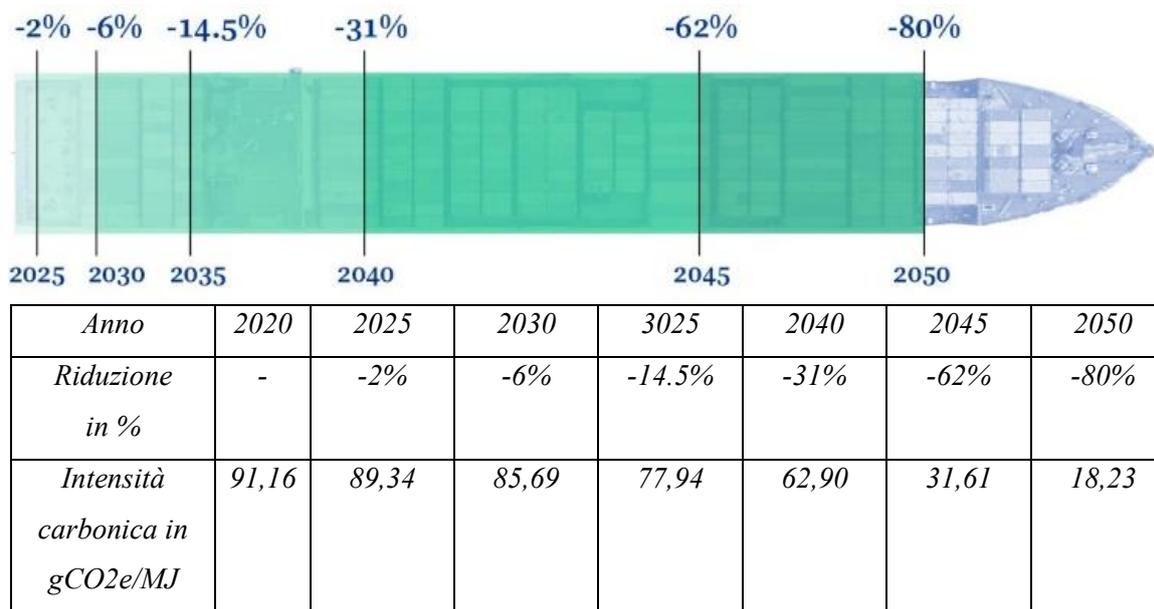


Figura 7

Fonte: European Union (2023) ed elaborazione propria su dati UE

Un altro contenuto di particolare rilevanza all'interno del nuovo regolamento PE-CONS 26/23 è legato all'uso della tecnologia di *Onshore Power Supply*. Tali sistemi sono una soluzione definita come trasformativa da parte dell'European Alternative Fuels Observatory (European Commission, 2023a). L'OPS è infatti un metodo che consente alle navi di spegnere i motori durante i periodi di ormeggio e di collegarsi alla rete energetica del porto per poter alimentare le funzioni di bordo. Oltre a ridurre le emissioni nocive per l'ambiente portuale, i sistemi OPS offrono ulteriori vantaggi quali la riduzione dell'inquinamento acustico e il miglioramento dell'ambiente di lavoro per i marittimi a bordo. Nonostante questi vantaggi, fattori come il costo di sviluppo, la compatibilità con i tipi di nave e la competizione con tecnologie alternative di riduzione delle emissioni influenzano la decisione di porti e terminal di investire in tali sistemi. In genere,

³⁵ Whereas numero 23 della *REGULATION (EU) 2023 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on the use of renewable and low-carbon fuels in maritime transport, and amending Directive 2009/16/EC*: <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/PE-26-2023-INIT/en/pdf>

³⁶ Il mega joule (in sigla MJ) è un multiplo del joule (il cui simbolo è J) ed è un'unità di misura normalmente utilizzata per misurare la forza del lavoro e dell'energia derivante dalla reazione di una determinata materia prima. Secondo i parametri individuati dal Sistema Internazionale, il mega joule è pari ad un milione di joule.

l'installazione di questa tecnologia comprende la creazione di una struttura che ospita apparecchiature tecniche come commutatori, trasformatori e convertitori di frequenza in maniera tale da poter allineare le caratteristiche elettriche della rete di terraferma a quelle della nave, comprese tensione e frequenza.

Nella valutazione d'impatto della Commissione, la maggior parte delle parti interessate ritiene che i requisiti per l'utilizzo dei sistemi OPS siano pertinenti e necessari al raggiungimento degli obiettivi di decarbonizzazione. A questo titolo il loro impiego è stato inserito all'interno della *FuelEU Maritime Initiative* (European Union, 2023). Se l'alimentazione energetica di un porto si basa su fonti rinnovabili, l'allacciamento delle navi alla rete terrestre può ridurre fino a zero le emissioni in fase di ormeggio. Secondo alcuni studi, le emissioni medie di anidride carbonica prodotte dal mix energetico dell'UE sono inferiori di circa il 50% rispetto alle emissioni prodotte dai motori diesel delle navi. Di conseguenza, e in considerazione della crescente quota di energie rinnovabili all'interno del mix energetico europeo, l'uso dell'OPS ha la potenzialità per abbattere l'inquinamento atmosferico prodotto dalle navi in ormeggio e ridurre quindi la quantità di emissioni climalteranti generate complessivamente dal trasporto marittimo.

Per queste motivazioni, a partire dal 1° gennaio 2030 le navi portacontainer e le navi passeggeri di stazza lorda superiore a 5.000 tonnellate, quando attraccate alla banchina di un porto marittimo della Rete Transeuropea di Trasporto (TEN-T)³⁷, dovranno soddisfare il proprio fabbisogno di energia elettrica attraverso sistemi di *onshore power supply*. Entro il 1° gennaio 2035, questo obbligo si estenderà anche ai porti non TEN-T dotati di banchine abilitate all'uso di tali sistemi (European Union, 2023).

Per quanto riguarda il terzo punto che si intende sottolineare, sebbene il regolamento non sia prescrittivo riguardo ai tipi di carburante da utilizzare per raggiungere i target di decarbonizzazione, si prevedono tuttavia misure volte ad incentivare l'adozione di una particolare tipologia di combustibili: i *renewable fuels of non-biological origin* (RFNBO).

³⁷ La Trans-European Transport Network (TEN-T) è uno strumento fondamentale per lo sviluppo di infrastrutture di trasporto coerenti, efficienti, multimodali e di alta qualità in tutta l'UE. Comprende ferrovie, vie navigabili interne, rotte marittime a corto raggio e strade che collegano nodi urbani, porti marittimi e interni, aeroporti e terminali. Attualmente, la TEN-T è composta da due livelli: la rete centrale TEN-T, che collega le città e i nodi principali e che dovrà essere completata entro il 2030, e la rete globale, che collega tutte le regioni dell'UE alla rete centrale e che dovrà essere completata entro il 2050. La revisione della TEN-T includerà un ulteriore strato - la rete centrale estesa - che dovrà essere completata entro il 2040. Per approfondire: https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/infrastructure-and-investment/trans-european-transport-network-ten-t_en

Al fine di creare un quadro giuridico chiaro e prevedibile che possa così incoraggiare lo sviluppo del mercato e la diffusione di tecnologie legate alla produzione di carburanti sostenibili a lungo termine, la *FuelEU Maritime Initiative* ha ritenuto infatti necessario inserire delle misure che fungessero da impulso allo sviluppo di questa specifica categoria di combustibili³⁸. Come già ampiamente discusso nel primo capitolo, gli RFNBO sono anche conosciuti come carburanti sintetici o *e-fuels* e comprendono l'idrogeno puro da fonte rinnovabile ed i carburanti da esso derivati come ad esempio l'e-ammoniaca, l'e-metano e l'e-GNL. Gli incentivi contenuti all'interno del regolamento europeo sono giustificati dal fatto che a questo tipo di combustibili è riconosciuto un ruolo particolarmente promettente per il settore del trasporto marittimo dato dal loro significativo potenziale decarbonizzante e dalla scalabilità. Parlamento e Commissione Europea riconoscono che, se prodotti a partire da energia elettrica rinnovabile e da carbonio catturato direttamente dall'aria, i combustibili sintetici possono consentire un risparmio di emissioni fino al 100% rispetto alle alternative fossili. Inoltre, questa specifica tipologia presenta notevoli vantaggi rispetto ad altri tipi di combustibili sostenibili in termini di efficienza del processo produttivo, e, in particolare, per quanto riguarda il consumo di acqua.

Ad oggi, i costi di produzione dei combustibili rinnovabili di origine non biologica superano ancora significativamente il prezzo di mercato dei combustibili convenzionali e si prevede che questa disparità di costi si manterrà nel medio termine. Proprio per questo motivo, uno degli obiettivi del recente regolamento europeo è stato proprio quello di stabilire una serie di misure volte a creare un framework legale che ne facilitasse l'adozione e l'implementazione.

Specificatamente, il regolamento ha incluso l'introduzione di un cosiddetto "moltiplicatore" che permetterà di poter conteggiare due volte l'energia derivata da RFNBO dandogli quindi un valore virtualmente doppio rispetto a quella derivata da combustibili fossili (European Union, 2023). Dal 1° gennaio 2025 al 31 dicembre 2033 gli operatori che impiegheranno combustibili sintetici saranno di conseguenza agevolati poiché l'entità delle loro emissioni varrà la metà ai fini del calcolo dell'effettiva intensità carbonica dell'energia utilizzata dalla nave. Tale concessione consentirà di incentivare l'uso degli *e-fuels* nonostante i costi di produzione più elevati. Se, nonostante gli incentivi

³⁸ Whereas numero 26 della *REGULATION (EU) 2023 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on the use of renewable and low-carbon fuels in maritime transport, and amending Directive 2009/16/EC*: <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/PE-26-2023-INIT/en/pdf>

sopradescritti, gli RFNBO non riuscissero a costituire almeno l'1% del mix di combustibili utilizzati dal settore del trasporto marittimo entro il 2031 è inoltre prevista l'introduzione di un nuovo target per forzare il raggiungimento del 2% entro il 2034.

La serie di misure a sostegno dei carburanti sintetici rinnovabili contenuta all'interno della *FuelEU Maritime Initiative* dell'UE mira a inviare un segnale chiaro agli operatori navali e ai produttori di combustibili, incoraggiando gli investimenti nell'adozione quella che è considerata una soluzione scalabile, sostenibile e rinnovabile. Stabilendo un obiettivo specifico e dei target finali, il regolamento vuole fornire un livello di certezza ai produttori riguardo alla futura domanda, consentendo al contempo al mercato la flessibilità necessaria per trovare i metodi di adeguamento più efficienti. Riconoscendo la fase nascente per gli RFNBO nel mercato marittimo, il regolamento incorpora salvaguardie e meccanismi di flessibilità per adattarsi a vari potenziali scenari che si svilupperanno sul mercato.

Come accennato precedentemente, sebbene i carburanti rinnovabili di origine sintetica presentino un elevato potenziale per soddisfare le esigenze di decarbonizzazione nel settore marittimo, è possibile che anche altre tipologie di combustibili presentino capacità di decarbonizzazione comparabili. Fattori come la maturità della tecnologia o la scala di disponibilità per il settore marittimo possono influenzare l'adozione di differenti categorie di carburanti rinnovabili e a basse emissioni climalteranti nei diversi porti. Pertanto, il regolamento europeo ha ritenuto essenziale garantire un determinato livello di neutralità ed evitare quindi di discriminare indebitamente altri combustibili capaci di ottenere livelli di riduzione dell'intensità carbonica simili a quelle degli RFNBO, nonché evitare di penalizzare le navi che utilizzano tali combustibili. A tal fine, è importante notare la definizione di una soglia ben precisa per la riduzione dei gas serra quantificate nel 70% (European Union, 2023). Tale soglia è valida non solo per gli *e-fuels* ma si applica anche qualsiasi altra tipologia di combustibile, che sia di origine biologica o sintetica³⁹.

Il settore del trasporto marittimo presenta attualmente livelli relativamente bassi per quanto riguarda la domanda di biocarburanti e carburanti da biomassa proveniente da colture alimentari e mangimi, poiché oltre il 99% dei carburanti marittimi attualmente utilizzati è di origine fossile. Il fatto che la regolamentazione *FuelEU Maritime Initiative*

³⁹ Whereas numero 27 della *REGULATION (EU) 2023 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on the use of renewable and low-carbon fuels in maritime transport, and amending Directive 2009/16/EC*: <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/PE-26-2023-INIT/en/pdf>

tenda ad escluderne la considerazione ai fini del raggiungimento degli obiettivi *Fit for 55* è legato alla volontà di ridurre al minimo qualsiasi rischio di rallentamento del processo di transizione energetica del settore dei trasporti⁴⁰. Specificatamente, si teme un affaticamento del sistema che potrebbe derivare da un trasferimento dei biocarburanti dal trasporto stradale a quello marittimo. Il legislatore ha ritenuto essenziale ridurre al minimo tale spostamento poiché attualmente il trasporto su strada rimane di gran lunga il settore più inquinante e il trasporto marittimo utilizza ancora prevalentemente combustibili di origine fossile. È stato quindi ritenuto opportuno evitare di sponsorizzare la creazione di una domanda potenzialmente elevata di biocarburanti basati su colture alimentari e foraggere e carburanti da biomassa promuovendone l'uso nell'ambito del regolamento (European Union, 2023). Di conseguenza, non sono state applicate a questa tipologia di carburante le medesime agevolazioni attribuite agli *e-fuels*.

2.2 Carriers

La seconda categoria di attori che verrà ora presa in considerazione comprende i carriers marittimi ed in particolare Maersk, CMA CGM e MSC in quanto prime tre compagnie a livello globale per flotte e volumi trasportati. L'analisi si concentrerà sulle strategie di transizione energetica adottate da questi attori chiave data la loro significativa influenza quali propulsori primari della domanda di carburanti sostenibili. In qualità di principali attori del settore, si ritiene che le decisioni portate avanti dalle compagnie di navigazione abbiano infatti il potenziale per plasmare il più ampio panorama del mercato determinandone traiettorie e sviluppo. La crescente tendenza all'integrazione verticale che caratterizza il settore marittimo, inoltre, vede un sempre maggiore numero di porti e terminal diventare componenti integrali delle strategie di espansione delle compagnie di navigazione, sottolineandone il ruolo onnipervasivo all'interno del settore nel suo insieme. Capire come questi vettori affrontano la transizione verso pratiche sostenibili è considerato quindi essenziale ai fini della comprensione della direzione generale che il trasporto marittimo sta prendendo nei confronti della decarbonizzazione.

⁴⁰ Whereas numero 28 della *REGULATION (EU) 2023 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on the use of renewable and low-carbon fuels in maritime transport, and amending Directive 2009/16/EC*: <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/PE-26-2023-INIT/en/pdf>

MAERSK

APM-Maersk è una società di navigazione con sede in Danimarca. Maersk Shipping Line (che da ora verrà abbreviata semplicemente in *Maersk*) è una filiale della società AP Moller-Maersk ed ha dominato il mercato mondiale delle spedizioni di container, detenendo il primo posto per oltre 25 anni. Ampiamente conosciuta per la propria flotta di navi portacontainer, la compagnia ha debuttato nell'arena del trasporto internazionale di container nel 1904. Attualmente, la compagnia dispone di una flotta di circa 675 navi portacontainer con una capacità di circa 4.117.136 TEU⁴¹ (Marine Insight, 2024).

I carburanti prioritari individuati da Maersk

Nel guidare il proprio percorso di transizione energetica, Maersk ha tracciato una sua rotta strategica verso un futuro sostenibile e verde per il trasporto marittimo. La visione della compagnia è ancorata a un'analisi completa dei potenziali combustibili futuri, in linea con l'impegno di raggiungere un trasporto marittimo a zero emissioni. Tra le varie alternative, Maersk pone l'accento su tre tipi di carburante chiave: biodiesel, metanolo verde ed ammoniaca verde (Maersk, 2022b).

In primo luogo, il biodiesel ricavato da rifiuti e residui di materie prime spicca come priorità per dare un impulso iniziale al processo di decarbonizzazione. Aderendo a una politica che prevede l'utilizzo esclusivo di biodiesel di seconda generazione, questa opzione rappresenta infatti un carburante di facile applicazione per le navi e i già motori esistenti. Tuttavia, la sua adozione su larga scala affronta le sfide legate alla limitata disponibilità di materie prime da biomassa adatte alla produzione. Inoltre, la concorrenza nel mercato creata dalla domanda di similari soluzioni da parte dei settori dell'aviazione e del trasporto stradale, come infatti già evidenziato dalle politiche dell'Unione Europea, rende questa una soluzione non considerabile come stabile a lungo termine dal punto di vista commerciale.

Anche per questi motivi, secondo la compagnia danese, in futuro il metanolo verde emergerà come un'alternativa di primo piano. Questo versatile combustibile risulta già oggi utilizzato in sicurezza su un determinato numero di navi e vanta una relativa facilità

⁴¹ Acronimo inglese che sta per *Twenty-foot Equivalent Unit*. Nel settore dei trasporti navali indica il container da 20×8×8 piedi e, di conseguenza, è utilizzato per indicare la capacità di trasporto di una nave portacontainer.

di gestione. Il metanolo verde, come visto in precedenza, può essere categorizzato in bio-metanolo, ottenuto da biomasse sostenibili, ed e-metanolo, prodotto utilizzando energia rinnovabile e CO₂. Sebbene esistano ad oggi vincoli in termini di materie prime adatte e di disponibilità di elettricità rinnovabile, i vantaggi di una gestione ben nota e le attuali applicazioni con successo su alcune navi fanno del metanolo verde una soluzione gettonata e promettente nel medio termine.

Infine, l'ammoniaca verde è presente nella strategia del carrier come possibile carburante del futuro. Ad oggi, l'applicazione dell'ammoniaca verde come carburante marino rappresenta ancora numerose sfide. La sua tossicità intrinseca richiede un'attenta considerazione dei fattori ambientali, sanitari e di sicurezza, richiedendo metodi di bunkeraggio e di movimentazione innovativi e infrastrutture portuali specializzate ancora da sviluppare ed implementare. Anche se la scalabilità potrebbe dunque richiedere più tempo, le prospettive per il futuro rendono l'ammoniaca verde un'opzione promettente ed a tale titolo se ne sta studiando lo sviluppo.

Nell'affrontare la transizione energetica, Maersk risulta essersi impegnata ad esplorare e promuovere in maniera prioritaria queste tre tipologie di combustibili. Secondo la strategia della compagnia, ciascuno di essi contribuisce con un ruolo ben preciso al raggiungimento a fasi dell'obiettivo generale di un trasporto marittimo sostenibile e a zero emissioni.

Strategia e percorso di decarbonizzazione

All'inizio del 2022, Maersk ha dichiarato il proprio impegno a raggiungere emissioni nette zero entro il 2040, anticipando quindi di oltre un decennio l'obiettivo europeo (Maersk, 2022b). Nell'ambito dell'attività marittima di Maersk sono state quindi messe in atto due strategie chiave di decarbonizzazione: il miglioramento dell'efficienza dei combustibili e la transizione verso combustibili verdi.

Per quanto riguarda l'attenzione al miglioramento dell'efficienza del carburante, Maersk dal 2008 al 2022 segnala di aver raggiunto livelli di riduzione dell'intensità di carbonio di quasi il 40%. Tale traguardo è stato raggiunto attraverso opere di ottimizzazione della flotta e della rete marittima, l'utilizzo di navi più efficienti e più grandi e una migliore razionalizzazione delle operazioni portuali in maniera tale da aumentare la produttività dei terminal e ridurre i tempi di attesa delle navi.

Nonostante gli sforzi della compagnia, nel report sulla sostenibilità relativo all'anno 2022 (Maersk, 2022b), si rileva che in tale anno i risultati in termini di efficienza siano stati inferiori alle aspettative, con un aumento dell'1% dell'intensità di carbonio rispetto all'anno precedente. Tuttavia, dallo stesso documento si evince come Maersk rimanga ottimista sul fatto che i problemi sistemici intercorsi in tale anno, legati anche all'uscita dalla pandemia, si avviassero verso una soluzione nell'anno 2023, prevedendo una robusta ripresa dell'efficienza. Al momento della stesura del presente elaborato non era ancora disponibile il report relativo all'anno 2023 e non è quindi possibile verificare la realizzazione delle previsioni della compagnia. Tuttavia, si possono sottolineare gli sforzi portati avanti dal carrier nell'esplorare attivamente soluzioni di retrofitting, come modifiche al design della prua delle navi per migliorare l'efficienza energetica e ridurre quindi le emissioni. Tale iniziativa ha coinvolto non solo le navi di proprietà di Maersk ma è stata estesa anche alle navi noleggiate, che costituiscono circa la metà del tonnello annuo dalla compagnia, con circa 40 progetti in fase di implementazione tra il 2022 e il 2023.

Sebbene i miglioramenti dell'efficienza energetica contribuiscano alla riduzione dei gas serra, Maersk riconosce come il raggiungimento dell'ambizioso obiettivo di zero emissioni entro il 2040 dipenda anche e soprattutto dalla transizione verso combustibili verdi. L'azienda prevede quindi di raggiungere i propri obiettivi attraverso un graduale rinnovamento della flotta, garantendo che tutte le navi di nuova costruzione possano essere alimentate con carburanti sostenibili. Oltre alle misure di efficientamento sopradescritte, il percorso di transizione energetica intrapreso include anche la conversione delle navi già esistenti adattando i motori ai carburanti verdi e l'uso di navi a noleggio ad essi compatibili.

È importante notare che nel 2021 Maersk è stata la prima compagnia di navigazione commerciale a commissionare navi alimentate a metanolo, assumendo dunque un atteggiamento pionieristico nel settore ed impegnandosi ad ordinare solo navi in grado di navigare con carburanti verdi. Negli anni successivi la compagnia ha poi ampliato questo impegno e, dopo un ultimo ordine di sei navi ha raggiunto la quota di 24 ordini totali di portacontainer abilitate all'uso del metanolo. 12 delle navi in ordine avranno una capacità di 16.000 TEU, sei avranno una capacità di 17.000 TEU e le rimanenti altre sei di 9.000 TEU (Maersk, 2023c).

La prima nave portacontainer al mondo alimentata a metanolo, battezzata col nome di “Laura Mærsk” è stata inaugurata a Copenaghen a settembre 2023 in una cerimonia che ha visto la partecipazione della presidente della Commissione europea Ursula von der Leyen (Maersk, 2023b). La nave ha una capacità di 2100 TEU ed è stata costruita dalla Hyundai Heavy Industries in Corea del Sud.

Inaugurazione della nave portacontainer alimentata a metanolo verde “Laura Mærsk”



Figura 8

Fonte: Maersk (2023)

Una seconda nave alimentata a metanolo è prevista entrare in servizio nei primi mesi del 2024 sulla linea che collega l'Asia all'Europa, con scali a Shanghai, Tanjung Pelepas, Colombo e Amburgo, mentre la prima destinazione sarà Ningbo, in Cina. Questa portacontainer, costruita anch'essa in Corea del Sud, avrà una capacità di 16.000 TEU e, come le altre, sarà dotata di un motore a doppia alimentazione che consentirà di operare utilizzando metanolo, biodiesel e carburante convenzionale (Maersk, 2023d).

L'approvvigionamento di carburanti verdi su scala rimane la sfida principale per i vettori, per questo motivo Maersk è impegnata attivamente nella ricerca di partner che possano assicurare la soddisfazione della domanda. Attraverso diverse partnership strategiche istituite negli ultimi anni, Maersk è stata in grado raggiungere molteplici protocolli d'intesa gettando quindi le basi per il raggiungimento del proprio target stabilito in circa 5 milioni di tonnellate di metanolo verde entro l'anno 2030. Un tale risultato può essere

considerato ambizioso data la nascita relativamente recente del mercato di questa tipologia carburanti. Lo sviluppo di solidi partenariati ai fini di garantire un approvvigionamento stabile di nuovi combustibili appare come primo passo fondamentale per lo sviluppo di un modello commerciale funzionale. Proprio per questo motivo la compagnia di navigazione è attiva nella ricerca impegnandosi nell'espansione verso altre opportunità di partnership e di investimento che possano favorire ulteriormente la propria transizione verso i carburanti verdi.

La ricerca di partenariati abbraccia sia il settore privato che quello pubblico, Maersk sta infatti collaborando con i governi disposti a promuovere l'innovazione e la scalabilità attraverso incentivi e politiche. Specificatamente, a marzo 2022 è stata ad esempio firmata una partnership con le autorità del Governo egiziano per esplorare la produzione di carburante verde su larga scala nel paese nordafricano attraverso uno studio di fattibilità sulla produzione di idrogeno verde (Maersk, 2022a). Inoltre, a novembre dello stesso anno, Maersk e il Governo spagnolo hanno firmato un protocollo generale di collaborazione per esplorare simili opportunità di produzione di combustibili verdi su larga scala in Spagna (Government of Spain, 2022).

Come detto in apertura, il metanolo è considerato dalla compagnia danese come l'unica opzione di carburante verde scalabile in questo decennio. Tuttavia, anche per questa specifica alternativa sarà necessario del tempo per raggiungerne una disponibilità sufficiente e stabile che possa soddisfare la domanda. Per questa ragione, Maersk ritiene necessario prendere in considerazione un carburante alternativo *drop-in* per colmare il divario tra l'alternativa verde e i competitor fossili in questa prima fase di decarbonizzazione. I biocarburanti sono tra i migliori combustibili adatti al ruolo *drop-in*, questi non richiedono infatti modifiche al motore o la miscelazione con alternative fossili. A differenza degli *e-fuels* derivati da gassificazione, materie prime fossili riciclate o da elettricità rinnovabile che sono ancora in fase di sviluppo (come appunto l'e-metanolo), i biocarburanti sono considerabili come soluzioni immediatamente praticabili per iniziare il processo di decarbonizzazione del settore. Non essendo necessari motori navali speciali per il loro utilizzo, tutte le navi Maersk potenzialmente possono attualmente già utilizzare miscele di biocarburanti marini che vanno dal 10% al 100% (Maersk, 2023a).

Proprio per questo motivo, uno dei principali progetti transizione del carrier danese, il Maersk ECO Delivery Ocean, è basato ad oggi sull'uso del biodiesel⁴² (Maersk, 2022b) miscelato al 30%⁴³. L'ECO Delivery di Maersk è un'iniziativa che mira a fornire ai clienti della compagnia la possibilità di scegliere un'opzione di shipping sostenibile. Scegliendo questo prodotto, chi spedisce un container sa che Maersk acquisterà e utilizzerà una quantità di carburante verde (in questo caso biodiesel) sufficiente a ridurre l'impronta di emissioni di carbonio che il trasporto di tale container produrrà durante il suo viaggio. Nel 2022, oltre 200 clienti di Maersk hanno testato il prodotto. È interessante notare che il 35% del volume delle merci movimentate utilizzando l'ECO Delivery provenisse da regioni fuori dall'Europa e dal Nord America (Maersk, 2022b), questo può essere infatti considerato un segnale dell'impegno nel combattere gli effetti climalteranti del settore anche al di fuori dei mercati più avanzati.

La catena di approvvigionamento dei carburanti verdi per Maersk

Come ripetuto più volte nel primo capitolo, una delle questioni prioritarie nel delineare una strategia di decarbonizzazione è la valutazione della provenienza delle materie prime necessarie alla produzione dei carburanti verdi, operando quindi in un'ottica *Well-to-Wake*. Per quanto riguarda i biocarburanti, ad esempio, è di fondamentale importanza considerare l'influenza che la scelta della biomassa utilizzata per la produzione gioca sull'intensità carbonica finale del prodotto. Essendo la domanda di biocarburanti in continua crescita, un'accurata selezione fonti di biomassa appare fondamentale per evitare conseguenze sociali, ambientali ed economiche negative. Come suggerito infatti

⁴² Esistono due tipi di biodiesel utilizzati nel settore navale: il FAME (*Fatty Acid Methyl Esters*) e l'HVO (*Hydrotreated Vegetable Oil*). Il FAME è molto meno costoso dell'HVO ed anche i residui della sua produzione possono essere combustibili all'interno dei motori delle navi, con un notevole risparmio. Inoltre, a parità di riduzione del livello di emissioni raggiunto, il FAME utilizzato richiede un minor numero di processi di trasformazione. Infine, l'HVO oltre ad avere costi di produzione elevati presenta anche un numero limitato di fornitori a livello globale. Per tutti questi motivi, il programma ECO Delivery Ocean di Maersk si basa oggi su questa specifica tipologia di biocarburante. Per approfondire: https://www.maersk.com/~/_/media_sc9/maersk/solutions/transportation-services/eco-delivery/info-sheet-about-bio-fuels-maersk.pdf

⁴³ Il biodiesel può essere preparato in diverse concentrazioni, solitamente indicate come "B%", dove "B" sta per Biodiesel e "%" è il contenuto percentuale. Il B100 (biodiesel puro) è tipicamente utilizzato per produrre miscele a basso contenuto di biodiesel ed è raramente usato come carburante per i trasporti. Il B30, invece, è più diffuso perché rappresenta un buon equilibrio tra costi, emissioni, prestazioni nei climi freddi, compatibilità con i materiali e capacità di agire come solvente. Inoltre, questa miscela è anche stata convalidata dall'Organizzazione Marittima Internazionale. L'intera flotta di navi Maersk ha ricevuto l'approvazione a miscelare fino al 30% nel 2022. Per approfondire: https://www.maersk.com/~/_/media_sc9/maersk/solutions/transportation-services/eco-delivery/info-sheet-about-bio-fuels-maersk.pdf

dalla *FuelEU Maritime Initiative* (European Union, 2023), in un mondo con una popolazione che supera gli 8 miliardi di persone, l'imperativo è evitare la scelta di materie prime che possano entrare in competizione con cibo e mangimi. Tenendo conto di queste considerazioni, Maersk segnala di adottare un approccio rigoroso, accettando come biomassa esclusivamente rifiuti e residui e rifiutando qualsiasi coltura di prima generazione come mais, soia, colza, olio di palma. Questa posizione precauzionale mira a mitigare i rischi etici associati ai crescenti casi di frode legati ai finanziamenti e ai progetti di bonifica ambientale. Un esempio su tutti è quello dell'industria dell'olio di palma, il quale solleva preoccupazioni di tipo ambientale, sociale e di governance per carriers come Maersk. La produzione di questa specifica biomassa è infatti legata ad un ampio disboscamento delle foreste tropicali ed a una relativa diminuzione della biodiversità vegetale e animale. Inoltre, data la difficoltà di ricostruzione della catena di approvvigionamento, tale industria comporta anche un elevato rischio di frode. Per questi motivi, la compagnia danese riferisce di rifiutare categoricamente qualsiasi materia prima direttamente o indirettamente collegata al settore dell'olio di palma.

Per quanto riguarda invece le materie prime definite di seconda generazione o di scarto, vi è ad esempio l'olio da cucina esausto (UCO)⁴⁴. Un primo viaggio sperimentale risale al 2019, anno in cui la nave portacontainer *Mette Maersk* ha navigato tra Rotterdam e Shanghai alimentandosi con una miscela al 20% di biocarburante ricavato da UCO, la prima volta per una nave portacontainer di tale stazza (Sherrard, 2019).

Tuttavia, la sfida è rappresentata da questa tipologia di carburanti è determinata dalla loro limitata scalabilità, data la disponibilità limitata di tali risorse a livello globale. Al contrario, il metanolo offre una soluzione più versatile, in quanto può essere prodotto da una gamma più ampia di materie prime, disponibili in quantità significativamente maggiori. Questa può essere infatti considerata come una scelta strategica in linea con l'impegno della compagnia nell'affrontare le problematiche ambientali garantendo al contempo la scalabilità nella ricerca e la disponibilità di carburanti sostenibili.

Nel caso della catena di approvvigionamento del bio-metanolo, la biomassa persa in considerazione da Maersk come materia prima comprende i residui provenienti da agricoltura e silvicoltura, come ad esempio la paglia, ed alla frazione biogenica dei rifiuti

⁴⁴ Acronimo inglese che sta per *Used Cooking Oil*. Per approfondire: A van Grinsven (2020) *Used Cooking Oil (UCO) as biofuel feedstock in the EU*; https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2021/07/CE_Delft_200247_UCO_as_biofuel_feedstock_in_EU_FINAL%20-%20v5_0.pdf

urbani (Maersk, 2022b). Da notare è che, oltre a servire come materia prima, l'utilizzo di queste risorse offre ulteriori vantaggi ambientali evitando le emissioni derivanti dalla decomposizione di queste nei campi o nelle discariche. Per quanto invece riguarda l'emetano Maersk all'interno del proprio report sulla sostenibilità relativo all'anno 2022 (Maersk, 2022b) segnala l'uso esclusivo come materie prime di CO₂ biogenica in combinazione con idrogeno verde. Con anidride carbonica biogenica si intende la CO₂ risultante come sottoprodotto di processi quali la trasformazione del biogas in biometano o di settori industriali quali centrali elettriche a biomassa e industrie cartiere. Per quanto riguarda l'idrogeno verde, invece, per definizione Maersk si riferisce anch'essa a quello prodotto attraverso l'elettrolisi dell'acqua alimentata esclusivamente da energia elettrica rinnovabile. In questo caso, la compagnia risulta impegnata nello sviluppo di una produzione sempre maggiore di energia pulita, riconoscendo i notevoli volumi di elettricità richiesta ai fini della produzione di *e-fuel* su scala industriale.

CMA CGM

CMA CGM, la principale compagnia di navigazione francese di container, è la terza compagnia per capacità di TEU. CMA CGM è nata nel 1978 da una serie di fusioni tra società di navigazione precedentemente costituite. Attualmente, la compagnia dispone di una flotta di 624 navi che operano su oltre 150 rotte a livello globale. La capacità di carico è di circa 3.578.494 TEU (Marine Insight, 2024).

I carburanti prioritari individuati da CMA CGM

In qualità di importante fornitore di logistica a livello mondiale, il Gruppo CMA CGM offre una gamma completa di servizi di trasporto che comprende la modalità marittima, stradale, aerea, su chiatta e su rotaia. Pur vantando un rapporto emissioni di CO₂ per tonnellata trasportata relativamente basso, il trasporto marittimo costituisce la principale fonte di emissioni per volume all'interno del Gruppo, costituendo il 90% delle emissioni totali. Per dimostrare il proprio impegno nei confronti della transizione energetica, la compagnia francese ha stabilito un obiettivo Net Zero Carbon per il 2050, aspirando ad essere leader nelle soluzioni di trasporto a zero emissioni di carbonio. Per raggiungere questo ambizioso obiettivo, il Gruppo ha deciso di strutturare la propria strategia di transizione su tre leve chiave di decarbonizzazione (CMA CGM, 2022a): a)

implementazione di navi, veicoli e aerei all'avanguardia per ottimizzare il consumo energetico; b) adozione di nuove fonti energetiche, tra cui il gas naturale liquefatto, il biometano, il metano sintetico e il biodiesel; c) raggiungere un'eccellenza operativa che possa quindi ottimizzare consumi ed emissioni.

A complemento di questi sforzi, CMA CGM effettua investimenti significativi in ricerca e sviluppo per promuovere l'implementazione di soluzioni ecologiche ed all'avanguardia. Gli obiettivi del Gruppo che fanno da corollario al suo impegno Net Zero Carbon includono l'introduzione di 95 navi a doppia alimentazione (verde e fossile) entro il 2026, la produzione di elettricità 100% a basse emissioni di carbonio per i propri magazzini logistici attraverso l'installazione di 1,8 milioni di metri quadrati di pannelli fotovoltaici entro il 2025 e l'impiego di 1.000 camion e furgoni elettrici entro lo stesso anno (CMA CGM, 2022a). Tali ambiziosi obiettivi sottolineano l'impegno costante del Gruppo francese nel promuovere pratiche sostenibili e nel guidare l'innovazione in tutta la sua gamma di servizi di trasporto.

Come sottolineato dal secondo punto della strategia di decarbonizzazione della compagnia, è fondamentale ai fini della transizione energetica l'individuazione di specifici carburanti che possano supportare gli obiettivi ambientali. Con questo fine, la compagnia di navigazione francese a settembre 2022 ha annunciato la creazione di un *energy fund* denominato PULSE stanziando un budget di 1,5 miliardi di dollari (CMA CGM, 2023b). Tra gli obiettivi specifici del fondo, spicca quello di sostenere la nascita di impianti di produzione su scala industriale di biocarburanti, biometano, e-metano, metanolo verde e altri carburanti alternativi. Il fondo si concentrerà anche sulla garanzia dell'aumento della disponibilità di volumi di questi carburanti per CMA CGM attraverso partnership strategiche e investimenti.

Nell'osservare le scelte strategiche della compagnia, può essere notato come negli ultimi anni questa abbia eletto il gas naturale liquefatto quale carburante principale per dare impulso alla propria transizione energetica. Questo combustibile è stato definito dalla compagnia come "carburante di transizione" (Bergman, 2022) per la propria flotta di navi portacontainer ultra-grandi, in quanto al contempo sono state intraprese iniziative nella produzione di alternative più sostenibili quali biometano ed e-metano. Questi sforzi sottolineano l'impegno della compagnia a sperimentare soluzioni sostenibili e ad abbracciare una gamma diversificata di combustibili alternativi nel suo percorso verso la decarbonizzazione.

Inoltre, la compagnia impiega in questa prima fase il biodiesel specificatamente di seconda generazione e, per le fasi future si sta approcciando al metanolo verde sintetico ed al bio-metanolo. In linea con questo impegno, tra il 2022 ed il 2023 CMA CGM ha ordinato 18 navi alimentate metanolo le cui prime consegne sono previste tra il 2025 ed il 2026 (Reuters, 2023). Altre alternative come l'idrogeno liquefatto e l'ammoniaca rappresentano per il momento un elemento di studio e non vengono esclusi per un'applicazione futura una volta che la tecnologia ed il mercato saranno pronti.

Strategia e percorso di decarbonizzazione

Come già accennato, la strategia tracciata dalla compagnia per il proprio percorso di transizione è divisa in tre punti fondamentali: implementazione tecnologica, adozione di nuove fonti energetiche e ottimizzazione operativa.

Per quanto riguarda l'implementazione tecnologica, il Gruppo CMA CGM ha adottato un approccio globale nel portare avanti la prima fase del suo processo di decarbonizzazione intraprendendo un'ambiziosa rigenerazione della propria flotta e delle infrastrutture. Negli ultimi anni la compagnia francese ha intrapreso numerose iniziative atte alla riduzione del consumo di carburante e, di conseguenza, delle emissioni di gas serra. Queste includono un attento monitoraggio dei consumi, il rinnovamento della flotta e l'adeguamento delle navi ai miglioramenti tecnici della propulsione, dell'idrodinamica e dell'aerodinamica. L'enfasi posta dalla compagnia sulla necessità di mantenere un parco navi all'avanguardia contribuisce in modo significativo alla strategia di riduzione delle emissioni di carbonio. I continui miglioramenti, come ad esempio la modifica dei bulbi di prua, delle eliche ed altre installazioni permettono il miglioramento dell'idrodinamica e dell'aerodinamica riducendo quindi i consumi. A titolo esemplificativo, degno di nota è un progetto che ha previsto lo studio ed in seguito l'implementazione di deflettori del vento. Questi, applicati per la prima volta dalla compagnia sulla portacontainer CMA CGM Marco Polo (16.000 TEU) hanno richiesto sei mesi di sviluppo ed hanno migliorato l'aerodinamica della nave permettendo una riduzione del consumo di carburante del 2%.

Oltre ad applicare i meccanismi di ottimizzazione già disponibili e testati, il Gruppo è anche attivo nell'esplorazione di soluzioni tecniche emergenti. Questo approccio poliedrico garantisce a CMA CGM una posizione proattiva nel processo di transizione energetica del settore e nella promozione di pratiche marittime sostenibili. Un esempio di questa intraprendenza può essere visto nell'ampliamento del portafoglio del gruppo

attraverso l'acquisizione di una partecipazione in Neoline, un progetto pionieristico incentrato sullo sviluppo di navi commerciali a propulsione prevalentemente eolica (CMA CGM, 2023a). Neoline si distingue per il suo impegno nella propulsione a vela integrata da tecnologie industriali innovative e mature che garantiscono prestazioni e flessibilità operativa. Attraverso il CMA CGM Fund for Energies, CMA CGM sta sostenendo la costruzione della prima nave ro-ro⁴⁵ che sarà varata nel giugno 2025 e opererà sulle rotte transatlantiche. Grazie ai suoi 3.000 metri quadrati di vele, questa nave emetterà dall'80% al 90% in meno di gas climalteranti rispetto a una nave tradizionale di dimensioni comparabili, e praticamente non emetterà SO_x, NO_x e particolato. L'acquisizione di una partecipazione in Neoline consentirà al Gruppo francese di migliorare la propria conoscenza della tecnologia a vela, considerata un'interessante soluzione a medio termine sulle rotte più ventose.

Dal punto di vista dell'innovazione dei carburanti utilizzati e per portare avanti il proprio impegno e variare il mix energetico della sua flotta, come riportato all'interno del CSR Report per l'anno 2022⁴⁶ (CMA CGM, 2022a), CMA CGM ha deciso di commissionare 77 navi “*e-methane ready*” e 18 navi alimentate a metanolo entro il 2026. Per garantire ulteriormente l'ottimizzazione dei consumi, uno specifico dipartimento della compagnia è stato dedicato allo studio di soluzioni per migliorare il design e la propulsione delle navi di nuovo ordine, introducendo inoltre una politica di rinnovo regolare della flotta esistente per mantenerla aggiornata.

Recentemente, CMA CGM ha inoltre recepito l'obbligo in base al regolamento *FuelEU Maritime* (European Union, 2023) per tutte le navi che fanno scalo in un porto dell'UE di utilizzare entro il 2030 i sistemi di alimentazione da terra in fase di ormeggio. Attualmente le navi della compagnia effettuano questa procedura già in maniera abituale nei porti della California, in conformità alle normative locali, e volontariamente in vari altri porti che offrono questo tipo di servizio, principalmente in Cina e in Europa. La pratica del *onshore power supply* verrà quindi gradualmente estesa al resto della flotta in quanto tutte le nuove navi ordinate saranno pre-equipaggiate per utilizzare i sistemi di alimentazione da terra, in modo da essere pronte quando i porti europei verranno attrezzati in maniera capillare. Il Gruppo francese ha inoltre attuato un importante piano di rinnovamento delle sue navi

⁴⁵ Il termine “ro-ro” è un'abbreviazione per roll-on/roll-off, ovvero un tipo di traghetto progettato per trasportare carichi specificatamente su ruote come automobili, autocarri oppure vagoni ferroviari.

⁴⁶ Anche in questo caso, come per le informazioni relative alla compagnia Maersk, Al momento della stesura del presente elaborato non era ancora disponibile il report relativo all'anno 2023. Questo sarà con probabilità disponibile nei primi mesi del 2024

esistenti in questo senso. Tra il 2015 e il 2020, 52 navi sono state modificate incorporando un sistema di alimentazione da terra. Nel 2021 e nel 2022, rispettivamente 10 e 16 navi hanno seguito lo stesso procedimento. Attualmente, il 26% della flotta CMA CGM risulta dotato di sistemi di alimentazione da terra (Sustainable Ships, 2023).

Dal 2022, CMA CGM sta inoltre affrontando strategicamente la decarbonizzazione della sua rete globale di terminal. In accordo con il report CSR per l'anno 2022 l'azienda è impegnata in una duplice missione: promuovere lo sviluppo di attrezzature e procedure portuali che abbiano un basso impatto ambientale e, allo stesso tempo, generare e fornire un flusso energetico di origine sostenibile all'interno dei suoi terminal (CMA CGM, 2022a). Questo approccio proattivo è stato fondamentale per programmare le azioni dell'azienda, la quale, ha portato avanti l'ambizioso piano d'azione per una dozzina di terminal prioritari già nel 2023. All'interno di questi terminali e depositi il programma di mitigazione dell'impatto ambientale si è infatti tradotto nell'installazione di pannelli fotovoltaici, ove possibile, l'utilizzo di attrezzature di movimentazione ibride, strategie di riduzione del consumo di carburante, l'incorporazione di biodiesel e l'adozione di un'illuminazione a LED ad alta efficienza energetica.

Una rappresentazione esemplare di questo impegno è evidente al Malta Freeport Terminal, dove oltre 25.000 metri quadri di pannelli fotovoltaici sono stati installati sui tetti, parcheggi, pensiline per autobus e stazioni di ricarica per auto elettriche. Questo progetto, notevole per la sua scala e diversità, si è tradotto in una riduzione di oltre 2.000 tonnellate di CO₂ all'anno, sottolineando l'impatto tangibile sforzi di decarbonizzazione da parte della compagnia francese (CMA CGM, 2022a).

Il terzo punto della strategia tracciata dalla compagnia francese per il proprio percorso di transizione riguarda l'ottimizzazione delle proprie operazioni. In questo senso, CMA CGM punta ad impiegare strategicamente l'eccellenza operativa riconoscendone il potenziale ruolo centrale nel processo di riduzione delle emissioni di CO₂ del Gruppo. Un esempio applicativo della strategia è l'implementazione di tre cosiddetti "Centri Flotta" ovvero centri operativi che lavorano ininterrottamente in tutti i fusi orari. Questi svolgono un ruolo cruciale nell'assistenza alle navi, fornendo informazioni meteorologiche ottimizzate in tempo reale e suggerendo le rotte più efficienti tenendo conto di fattori quali le condizioni atmosferiche. Nel 2022, i Centri Flotta di CMA CGM si sono concentrati specificamente sull'ottimizzazione dell'impronta di carbonio dei viaggi delle navi: attraverso un coordinamento delle velocità di viaggio è stato possibile ridurre i tempi

di attesa attraverso un innovativo sistema di “appuntamenti” in 10 terminal chiave. Inoltre, l’implementazione di queste garanzie sui giorni di attracco ha permesso alle navi di rallentare fino a 14 giorni prima di raggiungere il porto successivo, portando a un significativo risparmio energetico e a una riduzione delle emissioni di gas serra (CMA CGM, 2022a).

Per migliorare ulteriormente l’efficienza energetica, all’interno dei Centri Flotta è stato istituito poi un reparto specificatamente dedicato all’efficienza Energetica. Compito di questo è identificare i comportamenti operativi più efficienti e responsabili da parte delle navi, valutando anche la qualità del carburante e degli additivi che possono migliorare le prestazioni dei motori. Il reparto assicura l’impiego delle navi più efficienti dal punto di vista energetico su rotte commerciali specifiche, tenendo in considerazione non solo la loro capacità di carico ma anche la loro prestazione energetica complessiva. Questo approccio globale può essere interpretato come un impegno di CMA CGM per sfruttare l’ottimizzazione e l’eccellenza operativa quali componenti critiche della propria strategia di decarbonizzazione.

La catena di approvvigionamento dei carburanti verdi per CMA CGM

CMA CGM ha strategicamente abbracciato il gas naturale liquefatto (GNL) come elemento cardine della sua iniziativa di decarbonizzazione, riconoscendone i duplici vantaggi di potenziale decarbonizzante e disponibilità della materia. L’adozione del GNL come combustibile si traduce infatti, come già visto nel capitolo dedicato, in una notevole riduzione delle emissioni di SO_x, NO_x, CO₂ e particolato (Agarwala, 2022). La maturità della tecnologia del GNL è sottolineata dall’esistenza di un’infrastruttura di trasporto e distribuzione ben sviluppata e, in accordo con le dichiarazioni della compagnia (CMA CGM, 2022a), lo sviluppo in corso e gli studi di collaborazione con i partner mirano a ridurre al minimo le emissioni di metano lungo l’intera catena del valore.

Nel corso degli ultimi anni la compagnia è stata vista impegnata nella creazione di partnership strategiche con i principali fornitori di GNL, come TotalEnergies e Shell (CMA CGM, 2017). Proprio queste collaborazioni hanno aperto la strada all’incorporazione del gas naturale liquefatto come combustibile marino in scali importanti come Rotterdam, Marsiglia e Singapore. Marsiglia nello specifico risulta essere il principale hub di bunkeraggio del GNL in Francia ed aspira a servire l’intero

Mediterraneo e l'Europa meridionale (CMA CGM, 2022a). Sebbene l'uso del GNL favorisca una generale riduzione delle emissioni, diversi studi indicano tuttavia che l'uso di questo carburante non possa essere considerato una soluzione a lungo termine per rispettare gli impegni di passare a un regime di emissioni nette zero entro il 2050. Questo scetticismo è legato al fatto che, essendo un carburante di origine fossile, non possono essere trascurate le emissioni legate alla fase di estrazione, trasporto, liquefazione e rigassificazione. Un'osservazione limitata alle emissioni *Tank-to-Wake* può infatti fornire un falso senso di fiducia nei confronti del potenziale decarbonizzante del GNL, il quale andrebbe meglio studiato in un'ottica *Well-to-Wake* (Agarwala, 2022). Anche per questo motivo, l'impegno di CMA CGM risulta essere esteso in maniera lungimirante oltre l'uso del GNL convenzionale, in quanto contempla attivamente alternative più sostenibili quali biometano, metano sintetico ed e-metano, dimostrando la dedizione dell'azienda all'avanzamento di soluzioni sostenibili.

Inaugurazione della nave CMA CGM Paraty (alimentata a GNL e con deflettore del vento)



Figura 10

Fonte: LNG Prime (2023)

Per quanto riguarda il biometano, questo è incorporato nella strategia di decarbonizzazione di CMA CGM in forma liquefatta. Come anche Maersk, il carrier francese si rifornisce di biogas ricavato esclusivamente da rifiuti e residui umidi, evitando quindi di entrare in competizione con altri settori legati a cibo e mangimi (CMA CGM,

2022a). A dimostrazione di questo impegno, nel 2021 il carrier francese ha stretto una partnership con alcuni attori chiave per esplorare la fattibilità della creazione della prima unità di produzione in Francia di biometano liquefatto utilizzando come biomassa i rifiuti umidi cittadini. Questo sforzo collaborativo ha coinvolto EveRé, gestore di un impianto di trattamento dei rifiuti domestici biologici dell'area metropolitana di Aix-Marseille-Provence, Elengy, filiale del gestore dei terminali GNL presso il porto di Fos-sur-Mer e TotalEnergies. L'unità di produzione di biogas proposta mirava ad utilizzare la parte biodegradabile dei rifiuti domestici della regione di Marsiglia ed ha giocato un ruolo fondamentale nell'avviare la decarbonizzazione dei servizi di trasporto marittimo in partenza dal porto della città, a beneficio in particolare delle navi del Gruppo alimentate a GNL (TotalEnergies, 2021). Inoltre, per garantire i volumi necessari al sostentamento della propria flotta, la compagnia ha investito nella società francese Wage Energy, anch'essa specializzata nella produzione di biometano dal gas di discarica e, allo stesso tempo, si è lanciata in un progetto volto a sviluppare la produzione e liquefazione del biometano con l'azienda TITAN, un produttore di biometano liquefatto nei Paesi Bassi. Sempre nei Paesi Bassi, nel dicembre 2021 in collaborazione con Shell, il carrier francese ha completato la prima operazione di bunkeraggio di biometano al porto di Rotterdam. La proattività e l'iniziativa del carrier francese nella creazione di partnership internazionali ha permesso a questa lo sviluppo di una catena di approvvigionamento stabile e diversificata. Tali sforzi si sono tradotti tra il 2020 e il 2022 nella produzione di circa 42.000 tonnellate di biometano (CMA CGM, 2022a).

Il Gruppo CMA CGM è inoltre attivo in un progetto che mira alla produzione di gas metano sintetico sfruttando i rifiuti secchi (non quindi di origine strettamente biologica) come cartone, pallet e TetraPak. Questi, dopo essere stati sottoposti ad un processo di pirogassificazione ad alta temperatura permettono la produzione di una tipologia di metano sintetico rinnovabile. Questo tipo di tecnologia vanta un potenziale di riduzione dei gas serra di circa -75%, posizionandosi come soluzione chiave per l'approvvigionamento di carburanti gassosi rinnovabili. Nel luglio 2022, CMA CGM ha rivelato il suo investimento strategico con ENGIE nel progetto Salamandre, situato a Le Havre (ENGIE, 2022). Questa iniziativa innovativa mira, a partire dal 2026, alla produzione di 11.000 tonnellate di metano sintetico liquefatto all'anno. Il progetto Salamandre rappresenta il risultato iniziale di una solida partnership tra le due compagnie

ed ha l'obiettivo dichiarato di generare 200.000 tonnellate di metano sintetico a basse emissioni di carbonio entro il 2028.

Inoltre, CMA CGM è attivamente impegnata nello sviluppo di una catena di approvvigionamento di e-metano liquefatto, una tipologia di gas rinnovabile derivato dall'idrogeno verde in combinazione con la CO₂ catturata. Questa soluzione vanta un impressionante potenziale di riduzione delle emissioni pari a circa il -85% (CMA CGM, 2022a). L'utilizzo dell'e-metano è facilmente implementabile all'interno della flotta esistente di navi gasiere, beneficiando quindi di un'infrastruttura di trasporto e distribuzione ben consolidata grazie all'utilizzo della rete del gas esistente. Inoltre, CMA CGM dispone già oggi di 28 navi portacontainer "e-methane ready" a doppia alimentazione (ora alimentate a GNL fossile) e avrà un totale di 44 navi di questo tipo in servizio entro la fine del 2024 (CMA CGM, 2022b).

Sebbene la soluzione sia prevista come disponibile a partire dal 2025, la compagnia francese sta già affrontando sfide significative legate alla scalabilità di questa tecnologia innovativa. Tra queste, l'intensa concorrenza per l'accesso a progetti di produzione di idrogeno verde e cattura di CO₂. Per sopperire a queste difficoltà e dare vita ad una catena di approvvigionamento stabile e scalabile, l'azienda partecipa attivamente al progetto Jupiter 1000 guidato da GRT Gaz a Fos-sur-Mer, ovvero il primo progetto pilota di Francia dedicato alla produzione di e-metano (CMA CGM, 2022b). Questa iniziativa si serve della cosiddetta tecnologia "Power-to-Gas": prevede lo stoccaggio di elettricità rinnovabile sotto forma di idrogeno verde e la successiva conversione in e-metano utilizzando la CO₂ sottoprodotta come gas di scarico di un vicino impianto. Inoltre, CMA CGM sta stringendo una partnership strategica con ENGIE per far progredire ulteriormente questa soluzione trasformativa.

All'interno del ventaglio di carburanti per la decarbonizzazione, CMA CGM sta adottando attivamente anche il biodiesel di seconda generazione ricavato da rifiuti e residui di biomassa, con particolare attenzione a materiali quali l'olio da cucina usato. Come anche Maersk, la compagnia francese ha deciso deliberatamente di utilizzare esclusivamente biocarburanti di seconda generazione sulla scorta della *FuelEU Maritime Initiative*. Dal 2020, CMA CGM ha implementato con successo questa soluzione, con progetti in corso volti al suo sviluppo e alla sua promozione negli anni a venire (CMA CGM, 2022a).

Sebbene il biodiesel rappresenti una scelta sostenibile, anche CMA CGM come Maersk riconosce le sfide associate alla scalabilità di questa soluzione. La disponibilità limitata e la concorrenza tra i vari settori del trasporto, tra cui l'aviazione, ed il trasporto su ruota, rappresentano infatti ostacoli sostanziali. Per affrontare queste sfide, CMA CGM dichiara di collaborare strettamente con i suoi partner, lavorando collettivamente per l'aumento della produzione di biodiesel affrontando le questioni normative e per garantire una transizione sostenibile verso questa fonte di carburante (CMA CGM, 2022a).

CMA CGM risulta essere attivamente impegnata nello sviluppo di metanolo derivato da rifiuti di biomassa (bio-metanolo) o idrogeno verde (e-metanolo). Questa soluzione lungimirante fa parte degli sforzi dell'azienda per diversificare ed ampliare le alternative sostenibili a propria disposizione. Tuttavia, anche in questo caso le sfide legate alla concorrenza per l'accesso fonti di idrogeno a basse emissioni e di cattura della CO₂, insieme alle considerazioni normative associate, sono punti focali importanti nello sviluppo di questa tecnologia.

La compagnia prevede che i progetti di produzione di bio/e-metanolo la relativa implementazione di questa soluzione prenderanno avvio nel 2025-2026, con programmi e partnership in corso di sviluppo che si svilupperanno nei prossimi anni (CMA CGM, 2022a). In linea con questo impegno, CMA CGM ha ordinato 18 navi a metanolo, con le prime consegne previste tra il 2025 ed il 2026. Specificatamente, nel giugno 2023 risultano essere state commissionate sei portacontainer da 15.000 TEU alla China State Shipbuilding Corporation (CSSC), con consegna prevista per il 2025, ed altre 12 navi di questo stesso tipo nel mese di aprile 2023. Questi ordini hanno rappresentato un accordo record da 3 miliardi di dollari con CSSC (Reuters, 2023). La compagnia si sta impegnando in modo proattivo nelle discussioni con i fornitori per facilitare progetti industriali su larga scala, con l'obiettivo di garantire una produzione di bio-metanolo ed e-metanolo sufficiente al sostentamento della propria futura flotta.

Come alternativa nel lungo termine per il futuro, CMA CGM sta anche esplorando attivamente il potenziale dell'idrogeno liquefatto (CMA CGM, 2022a). Tuttavia, i vincoli operativi e legislativi legati alla gestione della catena di approvvigionamento necessari per soddisfare gli standard di sicurezza del settore presentano sfide significative. Le caratteristiche fisiche dell'idrogeno, tra cui la liquefazione a bassissime temperature (-253°C) e la sua relativamente bassa densità energetica, contribuiscono alla complessità della sua operatività e del suo utilizzo. Inoltre, l'attuale disponibilità limitata, il costo

elevato e la mancanza di infrastrutture per il trasporto e il bunkeraggio aggravano ulteriormente queste sfide.

Analogamente, anche l'ammoniaca in forma liquefatta è presa in considerazione come soluzione futura. In questo caso, data l'elevata tossicità della sostanza, i vincoli di sicurezza nelle fasi di stoccaggio, bunkeraggio e utilizzo rimangono un elemento di preoccupazione. Inoltre, la bassa densità energetica dell'ammoniaca comporta una significativa perdita di volume del carico in funzione di una maggiore quantità di carburante necessaria a bordo. Infine, la tecnologia legata a questo prodotto è ancora in fase di studio e la disponibilità di ammoniaca verde rimane ad oggi limitata. Con la consapevolezza di queste sfide, CMA CGM dichiara di essere attivamente impegnata in studi di ricerca e sviluppo a lungo termine investendo per superare i vincoli tecnologici e di sicurezza (CMA CGM, 2022a), in maniera tale da rendere sia l'idrogeno liquefatto che l'ammoniaca opzioni praticabili per il futuro.

Mediterranean Shipping Company - MSC

La *Mediterranean Shipping Company* (MSC) è una compagnia di navigazione internazionale svizzera fondata nel 1970. Attraverso una serie di acquisti di navi nuove e vecchie, nel solo 2023 MSC ha aggiunto quasi 100 navi alla propria flotta. Ad oggi, con circa 800 navi, il conglomerato è considerato una delle più grandi compagnie di trasporto merci a livello globale, con una capacità di circa 5.614.057 TEU (Marine Insight, 2024).

I carburanti prioritari individuati da MSC

L'impegno di MSC a raggiungere l'azzeramento delle emissioni è settato entro l'anno 2050. Allineandosi all'Accordo di Parigi, l'obiettivo generale della compagnia è garantire che il riscaldamento globale non superi di 1,5°C i livelli preindustriali. In questo senso, per quanto riguarda la decarbonizzazione del trasporto marittimo, MSC dichiara (MSC, 2022b) di prevedere per il futuro l'uso di una combinazione di combustibili a zero emissioni, riconoscendo tuttavia allo stesso tempo l'incertezza che circonda la loro disponibilità. Pur riconoscendo tale sfida, le previsioni della compagnia evidenziano che i carburanti sostenibili diventeranno sempre più disponibili a partire dal 2030, garantendo una significativa accelerazione della riduzione delle emissioni nel settore. Per questo motivo, obiettivo di MSC è quello di preparare la propria flotta all'adozione di carburanti

verdi non appena questi siano disponibili applicando una revisione ed aggiornamento continuo e periodico del proprio percorso di decarbonizzazione. Con questi fini, MSC dichiara di esplorare attivamente potenziali partnership nel campo dei carburanti marini verdi e specificatamente a base di idrogeno (MSC, 2022b). In questo senso, è applicata una stretta collaborazione con sviluppatori di tecnologie per la generazione di elettricità rinnovabile da energia solare ed eolica per l'elettrolisi dell'idrogeno e per la successiva produzione di *e-fuels* quali metano sintetico, metanolo verde e ammoniaca verde.

Nel ventaglio di potenziali combustibili decarbonizzanti presi in considerazione dalla compagnia (MSC, 2022b), il GNL di origine biologica e sintetica, l'e-metanolo e bio-metanolo come anche l'ammoniaca verde sono considerati quali potenziali fonti di alimentazione per le navi più grandi. La compagnia prevede la graduale sostituzione del GNL di origine fossile con quello prodotto da biomassa ed elettricità rinnovabile. Entro il 2030/2035, MSC proietta una disponibilità di gas liquefatto bio e sintetico sufficiente a soddisfare la metà della domanda del settore. Entro l'inizio e la metà del 2040, invece, si ritiene vi sarà il raggiungimento del 100% (MSC, 2022b).

Per quanto riguarda il metanolo, MSC dichiara di collaborare attivamente con i fornitori di energia in maniera tale da testare e sviluppare le future catene di approvvigionamento, nonostante le sfide ad oggi legate alla disponibilità degli impianti di produzione a livello portuale. L'idrogeno verde, considerato nella sua funzione potenziale di carburante *drop-in*, è considerato all'interno della strategia della compagnia svizzera come ipotetico combustibile per le navi più piccole, con cicli di rifornimento più brevi, oltre che come materia prima fondamentale per gli *e-fuels*. Anche tecnologie sperimentali quali le batterie e le celle a combustibile a idrogeno sono allo studio per il trasporto marittimo specificatamente a corto raggio.

Infine, è da notare l'interesse mostrato dalla compagnia circa lo sviluppo di opzioni di propulsione alternative come i reattori a sali fusi⁴⁷. Questi, sono considerati come promettenti sia per le applicazioni a bordo delle navi sia come fonte di elettricità per la produzione di *e-fuels* (MSC, 2022b). Questo approccio olistico e variegato può essere

⁴⁷ I reattori a sali fusi (MSR) sono una classe di reattori nucleari a fissione in cui il refrigerante primario del reattore nucleare e/o il combustibile sono costituiti da una miscela di sali fusi con un materiale fissile. I reattori a sali fusi offrono vantaggi in termini di maggiore efficienza e minore produzione di rifiuti. Alcuni progetti non richiedono combustibile solido, il che elimina la necessità di produrlo e smaltirlo. Negli ultimi anni, il crescente interesse per questa tecnologia ha portato a rinnovate attività di sviluppo, anche nel settore marino mercantile. Per approfondire: *Modular Molten Salt Nuclear Power for Maritime Propulsion* <https://maritime-executive.com/editorials/modular-molten-salt-nuclear-power-for-maritime-propulsion>

visto come sintomo dell'impegno della compagnia per un futuro diversificato e sostenibile riguardo la transizione energetica del settore marittimo.

Carburanti verdi individuati da MSC:

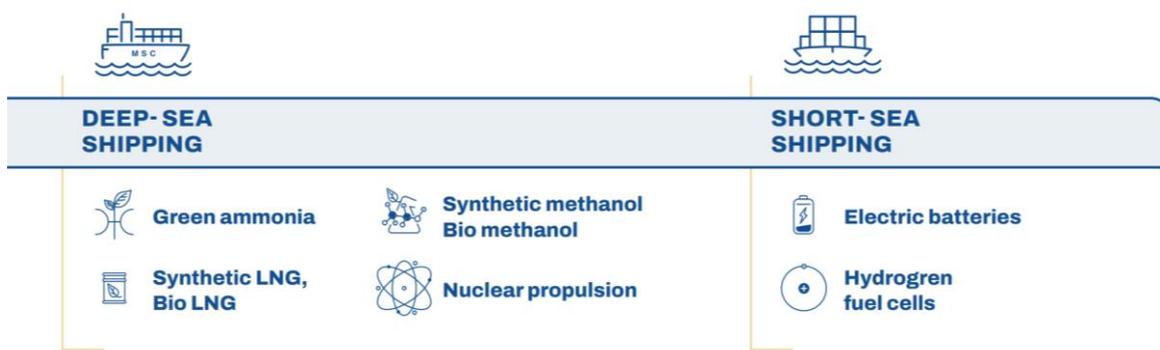


Figura 11

Fonte: MSC (2021)

Strategia e percorso di decarbonizzazione

MSC, nel suo impegno a raggiungere l'azzeramento delle emissioni entro il 2050, ha deciso di seguire la *Science Based Target Setting Guidance for the Maritime Transport Sector*⁴⁸. Questa funge da intermediario fornendo i criteri, le linee guida e i processi di convalida necessari per facilitare l'adozione di obiettivi decarbonizzanti basati sulla scienza sui quali costruire la propria strategia di transizione. A partire dal 2021, MSC valuta infatti i propri obiettivi di riduzione delle emissioni in linea con uno standard Net Zero riconosciuto a livello internazionale, sottolineando un approccio scientifico e pratico per la decarbonizzazione a breve, medio e lungo termine.

La strategia di transizione verde del carrier svizzero, come anche per i competitors, si trova ad affrontare sfide in termini di progettualità per il futuro delle proprie navi. Un esempio in particolare è legato al ripensamento delle flotte per adattarle ai nuovi carburanti. Anche in questo caso, la compagnia si trova a dover portare avanti la necessità di mantenere la competitività e la flessibilità delle proprie navi in un panorama di

⁴⁸ La Science Based Targets Initiative (SBTi) è un'iniziativa di cooperazione che coinvolge organizzazioni come il Global Compact delle Nazioni Unite ed il WWF. L'iniziativa mira a promuovere l'azione delle imprese per il clima, consentendo alle aziende e alle istituzioni finanziarie di tutto il mondo di fissare obiettivi di riduzione delle emissioni di gas serra basati su dati scientifici. L'obiettivo di SBTi è allineare questi obiettivi al consenso scientifico, dimezzando le emissioni entro il 2030 e raggiungendo lo zero netto entro il 2050. L'ente opera sia come *Standard Setter*, sviluppando standard scientifici, sia come *Validation Entity*, garantendo l'allineamento degli obiettivi con l'Accordo di Parigi. Una volta convalidati, le aziende possono comunicare di avere un obiettivo scientifico convalidato dall'SBTi, contribuendo agli obiettivi climatici globali. Per approfondire: <https://sciencebasedtargets.org/about-us>

incertezza riguardo i combustibili decarbonizzanti. Proprio per questo motivo l'approccio scelto da MSC nel tracciare il proprio percorso di transizione energetica è quello di concentrarsi sullo sviluppo di navi progettate per essere "*fuel-capable*", consentendo quindi la combustione di carburanti convenzionali oggi ma pronte per la successiva conversione ai carburanti verdi domani. Nel breve termine, MSC persegue quindi attivamente la progettazione e lo sviluppo di più tipologie navi pronte ad essere alimentate da soluzioni *green* quando queste saranno disponibili su scala. Attraverso gli investimenti in nuove tecnologie la compagnia dichiara di impegnarsi con partner per progetti di *retrofit*. Un esempio è l'applicazione di sistemi di cattura e stoccaggio del carbonio a bordo presenti in un primo progetto a partire dal 2024. Nell'ambito della strategia globale di MSC, il piano di rinnovamento della flotta svolge un ruolo cruciale. Nel corso del 2022 attraverso interventi mirati di innovamento che hanno incluso ad esempio la sostituzione delle eliche e delle prue a bulbo, oltre che l'implementazione di ulteriori misure di risparmio energetico, la compagnia è stata capace di migliorare l'efficienza delle proprie navi fino al 30%.

In prospettiva, la flotta di MSC si sta poi espandendo (MSC, 2022b) con la consegna di 14 navi "*multi-fuel-ready*" di nuova costruzione nel 2023. Seguiranno poi altre 23 anvi nel 2024, 42 nel 2025 e 16 nel 2026. Metà di queste sarà inoltre potenzialmente dotata anche di un sistema di lubrificazione ad aria per migliorare ulteriormente l'efficienza dei consumi. Grazie a queste aggiunte, nel 2024 circa il 9% del tonnellaggio movimentato della flotta MSC sarà affidato a navi potenzialmente a basse emissioni, aumentando progressivamente a 16% nel 2025 e a circa il 20% nel 2026. La strategia di transizione prevede inoltre l'eliminazione graduale delle navi meno efficienti dal punto di vista energetico, assicurando quindi il mantenimento di una flotta moderna capace di far progredire il percorso di decarbonizzazione della compagnia. A breve termine, le navi a combustibile convenzionale saranno sostituite da navi a doppia alimentazione ora funzionanti a GNL ma convertibili ad ammoniac.

Nel 2022 MSC ha inoltre avviato un sistema di gestione delle navi basato sull'elaborazione dei dati in tutta la sua flotta utilizzando l'intelligenza artificiale e l'apprendimento automatico per l'analisi dei dati (MSC, 2022b). Questo sistema raccoglie dati ai fini del risparmio energetico, ottimizzando il consumo di carburante e

implementando attività come la pianificazione efficiente dei carenaggi ⁴⁹. La pianificazione delle rotte di passaggio e le velocità sono determinati poi utilizzando sofisticati strumenti di previsione meteorologica con il fine di ottimizzare tempistiche e consumi.

La catena di approvvigionamento dei carburanti verdi per MSC

A differenza di Maersk e CMA CGM, la compagnia MSC non condivide molte informazioni riguardo la strategia che utilizza per delineare e implementare la propria catena di approvvigionamento di carburanti verdi. Tuttavia, attraverso i report resi disponibili si può comprendere il tentativo da parte del carrier svizzero di dare vita ad una serie di partnership con operatori specializzati del settore (MSC, 2022b). Nel perseguimento dei propri obiettivi legati alle pratiche marittime sostenibili, MSC ha infatti attivamente creato numerosi partenariati strategici, esemplificando il proprio impegno ed interesse ad esplorare e adottare una gamma diversificata di carburanti sostenibili.

Un esempio di collaborazione significativa riguarda un memorandum d'intesa siglato con Shell. Nel 2021 le due compagnie hanno infatti avviato una partnership a lungo termine incentrata sullo sviluppo di tecnologie e soluzioni innovative per i combustibili (Shell, 2021). La collaborazione ha l'obiettivo dichiarato di ridurre le emissioni della tecnologia esistente e promuovere un futuro a zero emissioni per l'industria marittima. A livello pratico la partnership, nata dopo un decennio di collaborazione, si adoperava nell'implementazione di carburanti a zero emissioni, celle a combustibile e tecnologie di efficientamento energetico. Inoltre, il partenariato prende in esame anche i combustibili derivati dall'idrogeno, il metanolo e la transizione dal gas naturale liquefatto di origine fossile al bio-GNL o a varianti sintetiche. Questo approccio poliedrico posiziona entrambe le aziende come leader nella definizione della traiettoria di decarbonizzazione del settore. Con simili obiettivi, MSC collabora inoltre attivamente con organismi specializzati che mirano ad imprimere un'accelerazione all'innovazione, all'adozione e alla diffusione dei carburanti verdi. Alcuni esempi sono il Methanol Institute, incentrato sul metanolo quale soluzione a lungo termine e l'Hydrogen Council e l'European Clean

⁴⁹ Con carenaggi si intendono le operazioni periodiche mediante la quale le navi vengono portate completamente o parzialmente in secco all'interno di bacini per eseguire lavori di manutenzione o di riparazione degli scafi.

Hydrogen Alliance, entrambi dedicati a sostenere la diffusione su larga scala delle tecnologie legate all'idrogeno pulito. MSC appare inoltre tra i membri della Society for Gas as a Marine Fuel e della Sustainable Biomethane Alliance (MSC, 2022b).

Una componente integrante del programma Net Zero di MSC è la *Biofuel Solution* (MSC, 2022a). Disponibile in porti selezionati, la *Biofuel Solution* offre ai clienti della compagnia la possibilità di rifornirsi utilizzando biocarburanti certificati e sostenibili specificatamente di seconda generazione permettendo quindi a questi di decarbonizzare le proprie catene di approvvigionamento. Questa soluzione è ad oggi uno dei principali programmi di riduzione delle emissioni lanciato dalla compagnia. Attraverso l'iniziativa, MSC si occupa dell'approvvigionamento e del bunkeraggio di biocarburante sostenibile derivato da fonti quali l'olio da cucina usato, considerato un biocarburante di seconda generazione da fonte responsabile. Questo viene poi miscelato con combustibile marino convenzionale concorrendo all'abbattimento delle emissioni climalteranti.

Come già precedentemente evidenziato, la *Mediterranean Shipping Company* all'interno della propria strategia di transizione riconosce il potenziale del gas naturale liquefatto quale combustibile decarbonizzante e, in questa prima fase, lo adotta in quanto risulta disponibile in quantità scalabili. Tuttavia, MSC risulta impegnata, come anche il competitor CMA CGM, nel processo di redesign della propria catena di approvvigionamento cercando attivamente di sostituire il gas di origine fossile con alternative più sostenibili. Sebbene la gran parte del GNL utilizzato ad oggi dalla compagnia sia infatti estratto dal sottosuolo, è previsto un futuro spostamento verso l'adozione delle versioni sintetiche e a base di biomassa. La partecipazione dichiarata ad iniziative di collaborazione globali come la Methane Abatement in Maritime Innovation Initiative rappresenta l'impegno di MSC nel richiedere e sostenere l'aumento della disponibilità di bio-GNL in Europa. Per quanto riguarda l'introduzione dell'ammoniaca, all'interno del report sulla sostenibilità relativo all'anno 2022 (MSC, 2022b), MSC dichiarava invece una collaborazione attiva con il California's Air Quality Management District ed un altro non meglio specificato leader tecnologico di settore. In questo caso, la partnership era indirizzata specificatamente alla sperimentazione di azioni di *retrofitting* di alcune navi in maniera tale da renderle alimentabili doppiamente con carburanti convenzionali ed ammoniaca. I primi risultati delle sperimentazioni sono attesi per il 2025.

Infine, è stata inaugurata anche una collaborazione con la Commissione europea nell'ambito del progetto Horizon Europe⁵⁰ incentrato sull'implementazione di due tipi di motori marini a doppia alimentazione con l'ammoniaca quale combustibile principale. Il progetto, il cui completamento è previsto per il 2025, dovrebbe portare a una riduzione delle emissioni di almeno l'80%.

2.3 Porti

Di fronte alla globalità della sfida posta dal cambiamento climatico, una grande varietà di attori è stata coinvolta nell'imperativo della decarbonizzazione. Nel caso del trasporto marittimo, una volta delineato l'emergere di specifici carburanti, il quadro normativo attorno ad essi generatosi e visto l'agire dei principali carriers operanti nel continente europeo, si ritiene necessario concentrarsi ora sul ruolo delle infrastrutture portuali.

Come è stato osservato precedentemente, nel contesto europeo il *Green Deal* emerge come catalizzatore centrale per rimodellare l'economia dell'UE nel proprio percorso verso la sostenibilità. Tale processo porta con sé una necessaria rivalutazione globale legata alla fornitura di energia pulita nel settore dei trasporti e, in questo panorama di trasformazione, i porti emergono come attori centrali. Questi poli multifunzione ospitano infatti oggi una grande varietà di industrie, tra cui quella energetica (sia fossile che verde), del gas, manifatturiera e del trasporto marittimo containerizzato, rappresentando quindi nel loro insieme un punto di osservazione strategico per la promozione del cambiamento sostenibile.

L'esempio che il presente elaborato intende evidenziare è quello del Porto di Rotterdam. Il piano di decarbonizzazione portato avanti specificatamente da questo scalo è ritenuto infatti essere esemplare nell'approccio alla transizione energetica del settore del trasporto marittimo. La strategia che vede il porto impegnato in maniera duplice sul fronte della produzione di energia sostenibile e dell'implementazione di strutture di distribuzione di carburanti a basse e zero emissioni può essere interpretata infatti come esemplificazione

⁵⁰ Horizon Europe è il principale programma di finanziamento dell'UE per la ricerca e l'innovazione, con un budget di 95,5 miliardi di euro. Affronta i cambiamenti climatici, contribuisce al raggiungimento degli Obiettivi di sviluppo sostenibile delle Nazioni Unite e stimola la competitività e la crescita dell'UE. Per approfondire: https://research-and-innovation.ec.europa.eu/funding/funding-opportunities/funding-programmes-and-open-calls/horizon-europe_en#:~:text=Horizon%20Europe%20is%20the%20EU's,the%20EU's%20competitiveness%20and%20growth.

pratica del concetto espresso dal binomio luogo di produzione – luogo di distribuzione. Tale concetto verrà poi ulteriormente analizzato all'interno del capitolo conclusivo specificatamente in funzione del ruolo che questo potrà giocare sull'assetto dei flussi logistici mediterranei ed europei.

Il Porto di Rotterdam

Il porto di Rotterdam si attesta come il principale scalo europeo. Con un'estensione di quarantadue chilometri verso l'entroterra, l'area del porto comprende una vasta rete di strutture che ospitano numerose attività industriali, in particolare legate alla raffinazione. Lo scalo olandese funge infatti da punto di passaggio cruciale per le importazioni di carbone, petrolio greggio e gas naturale liquefatto. A partire dal 2016, lo scalo è stato coinvolto all'interno di un percorso di decarbonizzazione che si è articolato in un processo pluriennale culminato nel “*2019 Rotterdam Climate Agreement*” (Energieswitch, 2019), ovvero un piano generale per la decarbonizzazione. Grazie al contributo dei principali stakeholder dell'industria, del governo e della società civile dell'area di Rotterdam e non solo, sono stati delineati numerosi accordi volti a ridurre collettivamente le emissioni della città e del porto del 49% entro il 2030 rispetto ai livelli del 2017. L'accordo sul clima si concentra su quattro categorie di intervento chiave: 1) migliorare l'efficienza energetica dell'industria esistente; 2) trasformare il sistema energetico passando dai combustibili fossili all'elettricità verde e all'idrogeno; 3) compiere una transizione verso un nuovo sistema di materiali e combustibili; 4) promuovere un settore del trasporto più sostenibile (Port of Rotterdam, 2020).

Le stime legate all'implementazione dei progetti portati avanti all'interno di questa strategia prevedono complessivamente una riduzione di 23 milioni di tonnellate di CO₂. Ovvero 35% dell'obiettivo totale di riduzione di anidride carbonica assunto dall'intera nazione dei Paesi Bassi per il 2030 (65 milioni di tonnellate).

Il primo pilastro attraverso il quale il Porto di Rotterdam sta portando avanti il proprio percorso di decarbonizzazione è incentrato sul miglioramento dell'efficienza e lo sviluppo di nuove infrastrutture (Port of Rotterdam, 2020). Questo primo step si articola specificatamente attraverso la strutturazione di una rete che interconnetta le industrie presenti all'interno dell'area portuale al fine di ottimizzare le risorse energetiche da queste generate e consumate. Con questo obiettivo, sono state ad esempio attuate misure legate allo sfruttamento del calore generato dalle attività industriali del porto per riscaldare

abitazioni, uffici e serre nel prossimo futuro. Contemporaneamente, è stato sviluppato un sistema di cattura e stoccaggio di CO₂ nel fondale del mare, elemento che è stato precedentemente sottolineato quale indispensabile per la produzione sostenibile di *e-fuels*. Inoltre, è in atto uno sforzo per aumentare la capacità di produzione di energia eolica offshore e migliorare la sostenibilità dei processi industriali, integrando al contempo la produzione di idrogeno. L'enfasi sull'implementazione di infrastrutture dedicate all'espansione della capacità della rete elettrica per far fronte all'evoluzione del panorama energetico si allinea perfettamente con il secondo pilastro della strategia di decarbonizzazione del porto, sottolineandone l'importanza quale prerequisito critico per lo sviluppo di un nuovo sistema energetico.

Il secondo step della strategia di decarbonizzazione è dedicato all'implementazione di un nuovo sistema energetico. In questo senso, l'Autorità portuale di Rotterdam è attivamente impegnata nello sviluppo di un sistema completo specificatamente dedicato alla produzione e gestione dell'idrogeno. Secondo quanto dichiarato dal porto, il sistema si concentrerà infatti sull'adozione dell'idrogeno blu e verde all'interno processi industriali e nei trasporti.

Il network dell'idrogeno in fase di sviluppo comprende soprattutto due elementi cruciali: un parco di conversione ed un'infrastruttura di trasporto. Il sito di conversione sarà dedicato alla trasformazione dell'elettricità generata parchi eolici offshore in idrogeno verde mediante elettrolisi. Coprendo una superficie di 24 ettari, questo sarà situato su un'estensione artificiale del porto e nel suo sviluppo vede coinvolte le compagnie Nobian e BP. Nell'ambito del progetto, denominato H2-Fifty⁵¹, entro il 2025 verrà installato un elettrolizzatore con una capacità di 250 MW il cui obiettivo sarà quello di produrre da 20.000 a 30.000 tonnellate di idrogeno verde. L'idrogeno sostenibile andrà a sostituire le varianti grigia ed integrare quella blu attualmente prodotte generando un risparmio di circa 270.000 tonnellate di CO₂ all'anno (HyCC).

Inoltre, la compagnia leader Hynetwork Services, in collaborazione con l'Autorità Portuale di Rotterdam, è alla guida dello sviluppo di un idrogenodotto che costituirà la spina dorsale dell'infrastruttura di distribuzione di H₂ della città. I piani futuri prevedono poi l'integrazione di questa condotta nella rete nazionale e internazionale dell'idrogeno, stabilendo collegamenti con regioni le regioni limitrofe.

⁵¹ Per approfondire: <https://www.h2-fifty.com/about/>

Emission Services, 2023) e l'implementazione di strumenti di *onshore power supply*, in accordo anche con le già menzionate regolamentazioni europee (European Union, 2023). Inoltre, due aspetti del quarto pilastro la cui analisi appare strettamente necessaria in relazione alla presente analisi sono poi lo sforzo da parte dello scalo portuale nello sviluppo di un'infrastruttura che lo renda leader nel bunkeraggio di carburanti verde e, al contempo, lo slancio nella creazione di una rete di corridoi verdi che colleghino il porto con altri scali che condividono una visione simile. Queste due iniziative non solo appaiono cruciali per gli obiettivi del presente elaborato, ma sono anche strettamente collegate tra loro.

In qualità di sito di bunkeraggio più grande d'Europa, Rotterdam fornisce annualmente circa 9,5 milioni di tonnellate di carburante alle compagnie che vi transitano, ergendosi quindi quale attore significativo all'interno del panorama globale del rifornimento navale. Riconoscendo gli imperativi legati alla decarbonizzazione del settore marittimo, lo scalo olandese ha intrapreso un percorso di diversificazione della propria offerta di carburanti impegnandosi ad essere pioniere nel settore dei combustibili navali sostenibili.

Come già osservato sopra, per quanto riguarda i biocarburanti Rotterdam risulta già essere uno dei principali produttori e fornitori per il mercato europeo e sta attualmente espandendo in maniera ulteriore le proprie capacità produttive in tale senso. Guardando invece al gas naturale liquefatto Rotterdam vanta il primato europeo quale primo porto nel continente ad aver reso possibile il rifornimento di GNL. Degno di nota è il progetto del cosiddetto "Gate terminal", infrastruttura specificatamente dedicata al trattamento ed alla distribuzione della sostanza. Il Gate terminal funge da vera e propria porta d'accesso alle importazioni di GNL proveniente da varie località del mondo, il quale viene poi ridistribuito attraverso piccole navi cisterna gasiere o trasportato tramite gasdotti. In questo senso, Rotterdam funge da hub europeo per il gas naturale liquefatto sia per il trasporto marittimo che per quello stradale (Port of Rotterdam, 2023b).

Anche per quanto riguarda il metanolo, lo scalo olandese rafforza ulteriormente la propria posizione di leader nel bunkeraggio sostenibile. In particolare, Rotterdam risulta essere il più grande hub di distribuzione di metanolo dell'Europa nord-occidentale. All'interno dello scalo operano i maggiori commercianti e produttori di CH₃OH, tra cui le compagnie Methanex, OCI e Proman (Port of Rotterdam, 2021). Attualmente risultano transitare dallo scalo circa 100.000 tonnellate l'anno di metanolo verde e si prevede che tale volume aumenti nel vicino futuro.

Inoltre, è in fase di implementazione l'Advanced Methanol Rotterdam (AMR) ovvero un impianto all'avanguardia dedicato alla produzione di carburanti rinnovabili (con un focus sul metanolo) in collaborazione con GIDARA Energy. Secondo le stime, a partire dal 2026 l'AMR sarà in grado di produrre circa 90.000 tonnellate di metanolo rinnovabile grazie alla conversione di 180.000 tonnellate di rifiuti locali non riciclabili che attualmente vengono inceneriti. La previsione in termini di risparmio di emissioni di anidride carbonica l'anno grazie a questo progetto è di 350.000 tonnellate (Port of Rotterdam, 2022).

Un aspetto rilevante strettamente collegato allo sviluppo di infrastrutture per il rifornimento di carburanti sostenibili è poi la creazione di cosiddetti “corridoi verdi” ovvero una rete di relazioni ed accordi con altri attori ai fini di tracciare una comune strategia di collegamento sostenibile a livello ambientale. Questo sforzo collaborativo prevede di riunire fornitori di carburante, porti e compagnie di navigazione per garantire la disponibilità della giusta tecnologia, dei carburanti verdi e di relative strutture di bunkeraggio su rotte ben specifiche e delineate. Un esempio di questa strategia è l'accordo siglato con il porto svedese di Göteborg nel 2022 (Rotterdam, 2022). In quella sede i due scali nordeuropei si sono impegnati a sviluppare un quadro comune di cooperazione per stimolare l'uso di carburanti alternativi ed allinearsi quindi all'Accordo sul Clima di Parigi. In questo caso il corridoio verde si estenderà oltre la rotta Rotterdam-Göteborg, collegandosi a una rete più ampia di corridoi d'alto mare dove verrà garantita la disponibilità di carburanti sostenibili.

In sostanza, l'attenzione che il Porto di Rotterdam ha saputo finora rivolgere ad aspetti quali lo sviluppo di un sistema di produzione di energia sostenibile strettamente collegato alla produzione di un range di carburanti verdi, unito all'implementazione di infrastrutture di bunkeraggio e alla creazione di corridoi verdi, indica un approccio esemplare che può essere definito olistico e completo nei confronti del fenomeno della decarbonizzazione dell'industria marittima.

Il Porto di Valencia

In linea con le direttive del *Green Deal* europeo, l'Autorità Portuale di Valencia (APV) ha elaborato una strategia per ridurre drasticamente le proprie emissioni di gas climalteranti derivanti dalle attività portuali. Ciò comporta l'attuazione di diversi progetti

di innovazione incentrati sull'efficientamento energetico, la mitigazione dell'impatto climatico, l'economia circolare e sulla transizione verso combustibili puliti e fonti rinnovabili. All'interno del documento *Project Port Authority of Valencia strategy towards Zero Emissions by 2030* (ValenciaPort, 2021) è dichiarata la collaborazione con circa 45 aziende all'interno e all'esterno del cluster portuale di Valencia con l'obiettivo finale di raggiungere le emissioni zero entro il 2030. Questo sforzo collaborativo si estende a sette regioni spagnole e ai Paesi limitrofi. Il Porto di Valencia si distingue in quanto principale porto spagnolo del Mediterraneo. Nel 2022 ha registrato la movimentazione di 5,1 milioni di TEU, classificandosi come il quarto porto più trafficato d'Europa (il primo nel Mediterraneo) ed è stato addirittura scelto come hub mediterraneo di MSC (Gardham, 2022).

L'Autorità Portuale di Valencia delineava già alcune delle linee generali per la propria strategia di sostenibilità all'interno del *PAV's Environmental and Energy Policy* (ValenciaPort, 2016). Con tale documento lo scalo garantiva infatti che le attività portuali sarebbero state in linea con determinati principi ambientali e avrebbero perseguito obiettivi di miglioramento continuo. L'Autorità Portuale di Valencia riconosce lo strettissimo legame tra un fiorente sviluppo del trasporto marittimo e dello scambio di merci e l'integrazione di pratiche di gestione eco-efficienti. Proprio per questo motivo è stata fatta dello sviluppo sostenibile una priorità fondamentale per il porto, che dichiara infatti di essere impegnato nel bilanciamento tra il rispetto dell'ambiente con la crescita economica e sociale (ValenciaPort, 2016). All'interno del documento di programmazione per lo sviluppo sostenibile dello scalo è dichiarata infine la promozione di un variegato sistema di gestione ambientale ed energetico, impegnando le parti nell'ottimizzazione dei consumi. Questo impegno ha comportato l'inserimento di considerazioni ambientali all'interno dei processi di pianificazione, una continua analisi e monitoraggio dell'impatto ambientale delle attività e il rispetto delle normative comunitarie.

L'applicazione pratica dei documenti programmatici sopracitati ha visto lo scalo spagnolo impegnato nella lotta contro il cambiamento climatico e nella decarbonizzazione sotto diversi punti di vista e con molteplici iniziative. L'idrogeno, ad esempio, è uno dei settori chiave che vede l'impegno del porto. Proprio per questo motivo lo scalo marittimo è stato riconosciuto dal governo spagnolo come punto di riferimento nell'ambito della "Roadmap dell'idrogeno" e, a questo titolo, partecipa a molteplici progetti internazionali, tra cui l'iniziativa europea "H2Ports" (H2Ports, 2023).

Questa specifica iniziativa è guidata dalla Valencia Port Foundation in collaborazione con l’Autorità Portuale di Valencia ed è finanziata dal programma *Clean Hydrogen JU* dell’Unione Europea. L’obiettivo principale è quello di implementare celle a combustibile e tecnologie a idrogeno nei porti e di valutarne l’impiego sui macchinari portuali al fine di offrire soluzioni pratiche mantenendo alte le prestazioni delle operazioni, la sicurezza e riducendo le emissioni locali. Il Porto di spagnolo vanta un’ottima esperienza nel campo della manipolazione dell’idrogeno in quanto ha iniziato a lavorare con questa materia già nel 2019, prima che l’iniziativa europea prendesse piede (ValenciaPort, 2023). A livello pratico, *H2Ports* testerà due soluzioni innovative che utilizzano le tecnologie delle celle a combustibile e una stazione di rifornimento mobile di idrogeno progettata per le esigenze del progetto. In particolare, un *Reach Stacker*⁵² sarà sottoposto a test presso il MSC Terminal Valencia⁵³, mentre uno *Yard Tractor*⁵⁴ sarà testato presso il Valencia Terminal Europa⁵⁵, affiliato al gruppo Grimaldi (H2Ports, 2023). Nell’arco di due anni, il progetto prevede l’utilizzo quotidiano delle attrezzature in operazioni portuali reali per monitorarne l’efficienza energetica, le prestazioni e la sicurezza. Inoltre, verranno valutate anche questioni più ampie come i fattori umani, le normative, la futura diffusione commerciale della tecnologia e la sensibilizzazione all’adozione dell’idrogeno come combustibile alternativo nelle attrezzature portuali.

Oltre alle iniziative sopra menzionate, nell’ambito del progetto H2Ports è stata sviluppata una stazione di rifornimento di idrogeno per garantire un’adeguata e costante fornitura di

⁵² I *Reach Stacker* sono degli specifici carrelli elevatori utilizzati per la movimentazione dei container. Primo nel suo genere, il *Reach Stacker* alimentato ad idrogeno si prevede sarà in grado di supportare operazioni continue a emissioni zero e di ottenere prestazioni a paragonabili a quelle di un carrello elevatore convenzionale alimentato con un motore diesel. Si prevede che i costi di manutenzione saranno ridotti grazie all’eliminazione del motore, della trasmissione e di altri componenti meccanici. Inoltre, i livelli di rumorosità saranno bassi e, se alimentato con idrogeno verde, il bilancio delle emissioni di carbonio potrà essere considerato quasi neutro.

⁵³ Il Terminal MSC di Valencia appartiene alla Mediterranean Shipping Company. Si trova in una posizione strategica a 350 km da Madrid ed è il terminal più importante del gruppo nell’area del Mediterraneo occidentale. MSC Terminal Valencia è in grado di operare con le più grandi navi portacontainer (oltre 20.000 TEU di capacità).

⁵⁴ Gli *Yard Tractor* sono delle specifiche locomotrici/trattori che operano all’interno del cosiddetto “sottosistema di trasporto orizzontale” nei terminal portuali, occupandosi del trasporto delle merci tra l’ormeggio ed i piazzali di deposito, nonché della circolazione interna delle merci all’interno dei diversi terminals. Questa macchina presenta importanti opportunità per la sua conversione da alimentazione ibrida elettrica-batteria a celle a combustibile a idrogeno, in quanto le modifiche necessarie sono, a differenza di altre macchine, convenienti e fattibili dal punto di vista finanziario e operativo.

⁵⁵ Valencia Terminal Europa (VTE), con una superficie operativa totale di circa 360.000 metri quadrati, è parte del Gruppo Grimaldi ed è uno dei più importanti terminal portuali per auto ed operazioni ro-ro del Sud Europa. VTE gestisce notevoli volumi ed è specializzato nella movimentazione auto nuove, sia per l’importazione che per l’esportazione in Spagna e all’estero. L’importanza del terminal è determinata dal fatto che gli stabilimenti automobilistici situati nella regione di Valencia hanno una quota del 10% circa delle esportazioni automobilistiche spagnole.

H₂ per il funzionamento parallelo del *Reach Stacker* e dello *Yard Tractor* da sotto di test nel progetto. Poiché ciascuno dei due progetti pilota si svolgerà in diversi terminal del porto di Valencia, la stazione di rifornimento sviluppata doveva essere una soluzione flessibile e mobile, soprattutto considerando che le attrezzature di movimentazione portuale non possono circolare al di fuori dell'area dei terminal.

Il 17 gennaio 2023 (ValenciaPort, 2023) il distretto di Valencia ha ricevuto il primo carico di idrogeno per rifornire la stazione di rifornimento. Questo storico traguardo lo ha reso il primo porto in Europa a disporre di un impianto a idrogeno in condizioni di effettiva operatività. Quello installato rappresenta l'unico impianto in grado di soddisfare il fabbisogno dei terminal attraverso sistema mobile di distribuzione ed un serbatoio fisso che dedicato all'immagazzinamento di questo combustibile. Questo traguardo è considerato dall'Autorità Portuale di Valencia come un punto di svolta per la comunità portuale ed uno stimolo per altri porti europei ad iniziare a testare i carburanti del futuro. In linea generale, è possibile affermare che l'iniziativa *H2Ports* mira a promuovere la transizione dell'industria portuale europea verso un modello operativo efficace e a basse o zero emissioni di carbonio pilotando, valutando e dimostrando nuove tecnologie principalmente a celle a combustibile. I progetti pilota che sono in fase di test nell'ambito del progetto sono le prime esperienze di utilizzo delle tecnologie a idrogeno nel campo delle attrezzature di movimentazione portuale in Europa. Da notare è che l'iniziativa prevede un investimento complessivo di oltre quattro milioni di euro e vede coinvolti attori sia pubblici che privati: come già menzionato, oltre alla Fondazione Valenciaport, partecipano infatti anche aziende quali MSC Terminal Valencia e Grimaldi Group.

Infine, oltre alla costruzione vera e propria infrastruttura di rifornimento, il progetto *H2Ports* analizzerà anche l'approccio migliore per espandere e sviluppare la logistica di approvvigionamento dell'idrogeno e la strategia migliore per il rifornimento non solo per i macchinari portuali ma anche per applicazioni più ampie. Si ritiene infatti che la disponibilità di infrastrutture di rifornimento nel porto di Valencia creerà l'ambiente perfetto per testare i potenziali usi futuri delle celle a combustibile nel settore marittimo-portuale, che si intenderà sfruttare non solo durante il periodo di prova ma anche in seguito (H2Ports, 2023). L'approccio dello scalo spagnolo nei confronti dell'idrogeno guarda abbraccia infatti lo stoccaggio, la distribuzione ma anche la produzione stessa di combustibili puliti. Con questo obiettivo è stato inserito all'interno della strategia di decarbonizzazione 2030 del porto (ValenciaPort, 2021) anche la realizzazione di un

elettrolizzatore da 1 MW⁵⁶ all'interno dello scalo marittimo per fornire idrogeno verde i vari progetti pilota. Questo sarà in grado di produrre più di 420 kg di H₂ al giorno, per un totale annuo di 54.000 kg. La fonte di energia rinnovabile utilizzata nell'alimentazione dell'impianto sarà costituita dagli impianti fotovoltaici che l'Autorità Portuale installerà all'interno dello scalo, per un totale di 7,5 MW.

Inoltre, è prevista la realizzazione e di impianti di sintesi del e-metanolo sfruttando l'idrogeno verde e la CO₂ catturata dall'atmosfera (ValenciaPort, 2021). Sfruttando il metanolo verde prodotto, è poi intenzione del Porto di Valencia quella di utilizzarlo all'interno di una cella a combustibile per produrre elettricità ed alimentare i sistemi di *Onshore Power Supply* per le navi attraccate.

Proprio per tutti questi motivi il porto spagnolo di Valencia è ritenuto essere uno dei possibili leader nello sviluppo dei carburanti a base di idrogeno anche per applicazioni quali l'utilizzo come carburante navale. La posizione geografica del porto all'interno delle principali rotte mediterranee e la grandissima disponibilità di energia rinnovabile (specificatamente solare) della regione in cui questo è situato potrebbero tradursi nello sviluppo di infrastrutture adatte alla produzione di idrogeno verde su larga scala e, conseguentemente, vedere Valencia sorgere come hub di distribuzione mediterraneo.

Il Porto di Tanger-Med

Situato ai margini del continente africano e di fronte al continente europeo, il Marocco ha per sua natura una propensione come ponte tra i due. Lo sviluppo dello scalo di Tanger-Med è stato un mezzo per capitalizzare questa posizione strategica al crocevia tra Europa e Africa. Situato sullo Stretto di Gibilterra, uno dei più importanti passaggi commerciali marittimi del mondo, lo scalo si trova a circa 40km dalla città di Tangeri, nel nord del Marocco, ed ha registrato una crescita impressionante nel 2022. I lavori per il grande progetto di sviluppo che ha portato al potenziamento del porto sono iniziati nei primi anni 2000 e, grazie ad una sapiente strategia di ampliamento ed ammodernamento, oggi Tanger-Med è un hub logistico globale con una capacità nominale di lavorazione di 9 milioni di TEU. Nel 2022 lo scalo marocchino ha gestito 7,6 milioni di TEU, 7 milioni di passeggeri, 700.000 camion e 1 milione di veicoli. Inoltre, Tanger-Med si è sviluppato come piattaforma industriale per oltre 1.100 aziende che rappresentano un volume d'affari

⁵⁶ Il megawatt (MW), come unità di misura della potenza, rappresenta un milione di watt.

annuo di 59 miliardi di dirham (quasi cinque miliardi e mezzo di euro) in vari settori come quello automobilistico, aeronautico, logistico, tessile e commerciale (O'Farrell, 2023).

Il complesso comprende in sé tre porti: Tanger-Med Port, composto da due terminal container, un terminal ferroviario, un terminal per idrocarburi, un terminal per carichi generali e un terminal per veicoli; Tanger-Med Port Passengers, che dispone di otto ormeggi dedicati al transito di passeggeri, veicoli e unità di carico; e Tanger-Med 2 Port, composto da altri due terminal container. Da notare è che circa il 35% del commercio africano con il resto del mondo passa attraverso Tanger-Med, grazie ad un network di collegamenti che lo legano a circa 40 altri porti africani (O'Farrell, 2023). Proprio grazie a queste caratteristiche, il porto marocchino è stato capace di attirare a sé molte aziende europee, attratte da una situazione vista come *win-win*: Tanger-Med offre loro una base in un Paese politicamente ed economicamente stabile perfetto per esportare in Europa e per estendere la propria portata d'azione anche nell'Africa subsahariana.

Proprio per questi motivi, i quattro terminal container risultano essere gestiti da APM Terminals, parte della compagnia di navigazione e logistica danese Maersk, da Eurogate, con sede a Brema (Germania), e da Tanger Alliance (di cui sono comproprietari l'operatore portuale marocchino Marsa Maroc, l'operatore terminalistico italiano Contship Italia, il tedesco Eurogate e la compagnia di navigazione tedesca Hapag Lloyd).

Dal punto di vista della sostenibilità, lo scalo di Tanger-Med è incluso all'interno del più ampio progetto che vede impegnato il Governo marocchino nella lotta al riscaldamento globale. In questo senso, il porto sta contribuendo alla riduzione delle emissioni di gas serra portando avanti un processo di transizione energetica che vede coinvolte le proprie infrastrutture ed attività. Nel 2020, Tanger-Med ha ad esempio dotato i propri edifici amministrativi di pannelli fotovoltaici ed ha implementato un progetto di gestione intelligente della rete di illuminazione all'interno delle proprie zone di attività. Nello stesso anno è stato avviato un audit energetico per ottenere un quadro aggiornato dell'uso e del consumo di energia in maniera tale da permettere un'analisi delle opportunità di risparmio energetico e attuare un relativo piano d'azione mirato e più preciso (Tanger-Med, 2020). Lo sfruttamento di sistemi fotovoltaici si è rivelato particolarmente efficace e permette quindi oggi l'alimentazione dell'intera Stazione Marittima del complesso portuale.

L'energia è al centro della strategia di sviluppo sostenibile dell'Autorità Portuale di Tanger-Med ed in particolare la riduzione della dipendenza dai combustibili fossili

rappresenta un punto focale del piano. Per sostenere questo approccio, è stata definita una strategia energetica che mira a raggiungere l’azzeramento al 100% delle emissioni entro il 2030 (Tanger-Med, 2023) attraverso l’implementazione di quattro aree strategiche: a) Fornitura di elettricità verde a tutti gli utenti dell’ecosistema portuale; b) efficienza energetica, controllo della domanda di energia e ottimizzazione dei consumi; c) transizione verso la mobilità sostenibile, con la messa in strada di veicoli di servizio 100% all’interno del porto e la creazione di un’infrastruttura adatta a supportare la transizione all’idrogeno sostenibile; d) favorire l’economia circolare.

Le due leve principali individuate per poter supportare questa strategia di decarbonizzazione sono l’implementazione di competenze integrate e soluzioni innovative con i partner industriali dello scalo e sostenendo a livello governativo la sperimentazione e la ricerca di nuove soluzioni tecnologiche.

Per quanto riguarda l’idrogeno, questo oltre ad essere incluso tra i focus del percorso di transizione del porto, è anche parte dei più ampi sforzi del paese nordafricano per affermarsi come pioniere delle energie rinnovabili. Il Marocco punta infatti a utilizzare l’idrogeno verde come chiave di volta della sua transizione verde. Il Ministero marocchino dell’Energia, delle Miniere e dell’Ambiente proprio in questo senso ha dato vita nel 2019 ad una specifica Commissione nazionale per l’idrogeno (Green Hydrogen Organization, 2023), la quale ha poi definito una tabella di marcia per sviluppo della risorsa. Tale strategia si basa essenzialmente su tre pilastri: mercato e domanda⁵⁷, sviluppo tecnologico con riduzione dei costi e, infine, individuazione di possibili cluster produttivi (e relative misure per il loro finanziamento). Grazie ad un consolidato modello produttivo di energia rinnovabile ed alla vantaggiosissima posizione geografica, il potenziale del paese come produttore ed esportatore di idrogeno verde appare dunque visibile.

Entro il 2030, il Paese prevede un mercato locale di 4 TWh ed un mercato di esportazione di 10 TWh. Tali proiezioni, complessivamente richiederebbero ad oggi la costruzione di circa 6 GW di nuova capacità produttiva di energetica rinnovabile e, secondo le stime di governo garantirebbero la creazione di oltre 15.000 posti di lavoro diretti e indiretti (Green Hydrogen Organization, 2023). Inoltre, a dimostrazione del potenziale del paese nordafricano in questo settore, lo studio del 2019 “Economic Opportunities of Power-to-X in Morocco” ha dimostrato che, se il paese fosse capace di sostenere una crescita a

⁵⁷ In questo senso si intende la volontà di creare un *famerwork* legislativo che crei migliori condizioni allo sviluppo dell’esportazione ed alla gestione dello stoccaggio

lungo termine della propria produzione elettrica (espandendo la rete, pianificando ed investendo), il Marocco potrebbe essere capace di catturare fino al 4% della domanda globale di idrogeno verde entro il 2030 (Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research, 2019).

Nel portare avanti le proprie iniziative relative all'idrogeno verde, Rabat ha dato avvio a marzo 2021 all'iniziativa GreenH2 Maroc, ovvero il primo cluster dell'idrogeno verde del Paese. Dedicato alla promozione dello sviluppo e allo sviluppo su scala industriale dell'idrogeno sostenibile, questo cluster pone l'accento sulla ricerca e sullo scambio di conoscenze. Il suo obiettivo generale è quello di dare impulso all'industria dell'H₂ in Marocco, promuovendo, sostenendo e coordinando progetti di collaborazione sia a livello nazionale che internazionale (Cluster Green H2, 2022).

Per tutte le ragioni espresse sopra si ritiene che il porto di Tanger-Med possa giocare a un ruolo cardine all'interno del mondo della produzione dell'idrogeno verde e dei relativi carburanti per uso navale. Conseguentemente, lo scalo marocchino potrebbe veder accrescere il proprio peso geoeconomico all'interno del bacino Mediterraneo e contribuire ad una ridefinizione delle rotte marittime motivata dalla decarbonizzazione del settore.

III Gli aspetti geoeconomici

L'importanza dell'idrogeno

Negli ultimi anni, l'idrogeno ha attirato molta attenzione nel dibattito sulla transizione energetica e sulla decarbonizzazione. Come ampiamente discusso all'interno dei precedenti capitoli, per quanto riguarda il tema trattato dal presente elaborato, ovvero il trasporto marittimo a lungo raggio, è possibile affermare che la massima valorizzazione dell'idrogeno sia raggiunta solo quando questo viene convertito negli *e-fuels* suoi derivati. Tra questi, l'e-metano, l'e-metanolo e l'e-ammoniaca sono oggi emersi come i più promettenti. Tale affermazione trova conferma nell'osservazione degli specifici investimenti portati avanti dai più importanti carriers marittimi. Inoltre, è stato sottolineato come la sostenibilità ambientale di tali carburanti sia pienamente raggiunta solamente quando questi siano prodotti utilizzando idrogeno verde ottenuto attraverso un processo di elettrolisi dell'acqua alimentato da fonti sostenibili. Come conseguenza delle precedenti affermazioni, appare quindi chiaro il forte legame tra questi carburanti e la disponibilità di energia rinnovabile.

Due elementi specifici sono stati identificati dall'IRENA quali principali drivers della domanda globale di idrogeno verde prevista per il 2050 (IRENA, 2022a): a) la mobilitazione di numerosi governi e istituzioni internazionali per raggiungere l'obiettivo di emissioni nette zero entro la metà di questo secolo⁵⁸; b) l'abbassamento generale dei costi delle energie rinnovabili e degli elettrolizzatori, elementi questi alla base della produzione.

Grazie a questi due fattori, è previsto che l'idrogeno sostenibile e i suoi derivati andranno a costituire una percentuale significativa della domanda mondiale di energia entro il 2050, in netto contrasto con la loro trascurabile presenza nell'attuale panorama energetico. Le proiezioni dell'IRENA, della IEA, della Energy Transition Commission (ETC), di Bloomberg e dell'Hydrogen Council (*Figura 13*) sono concordi nel prevedere la completa eliminazione dell'attuale produzione di idrogeno grigio, basato sui combustibili fossili.

⁵⁸ In questo senso l'idrogeno verde è emerso come elemento chiave all'interno di molteplici strategie nazionali ed internazionali per avere una ragionevole possibilità di limitare l'aumento della temperatura globale a 1,5°C e raggiungere emissioni nette zero entro il 2050.

Al contempo, l'idrogeno verde è previsto emergere invece come metodo di produzione primario, integrato dall'idrogeno blu.

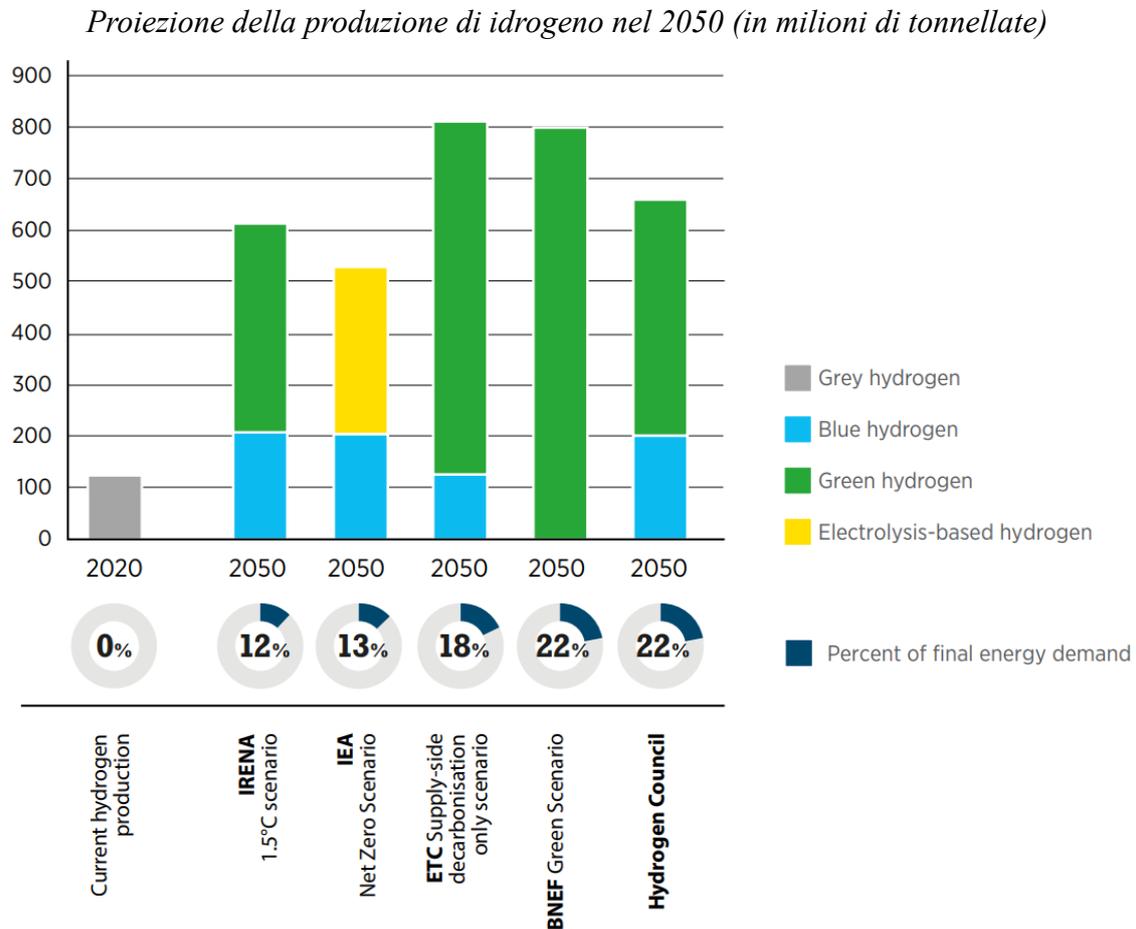


Figura 13

Fonte: IRENA (2022)

Sulla base di queste considerazioni, appare chiara la necessità di un'analisi degli elementi legati alla produzione di idrogeno verde, in primis la disponibilità di energia rinnovabile e le infrastrutture ad essa legate. Intrecciando poi queste considerazioni con le esigenze pratiche legate all'utilizzo degli *e-fuels* ai fini della decarbonizzazione dell'industria marittima, il presente elaborato intende sottolineare il possibile impatto sulla geografia politica economica dei trasporti marittimi europei e mediterranei.

Verso un mercato dell'idrogeno?

Attualmente, circa l'85% della produzione e del consumo di idrogeno avviene in un ciclo chiuso all'interno delle stesse industrie. Piuttosto che svilupparsi su una scala più ampia che ne permetta il commercio, questo rimane infatti tendenzialmente legato a contesti prettamente locali (IEA, 2019a). Tale particolarità è legata principalmente alle

complessità logistiche ed ai costi associati al trasporto che ne ostacolano la distribuzione su larga scala. Ciononostante, secondo l'IRENA vi è una crescente aspettativa che nel vicino futuro l'idrogeno si possa evolvere in un bene commercializzato e scambiato a livello internazionale (IRENA, 2022a). In particolare, l'idrogeno verde rappresenta un'opportunità per il cosiddetto "trasporto del sole", ovvero, essendo un *energy carrier*, questo permette di essere utilizzato quale sistema per il trasferimento di energia da fonte rinnovabile (in questo caso principalmente solare) attraverso le frontiere.

Alcuni fattori chiave nel determinare quali siano le regioni più adatte alla produzione di idrogeno sostenibile sono l'abbondanza di energia elettrica sostenibile (quindi conseguentemente la disponibilità di fonti rinnovabili), la disponibilità di terreno per gli impianti, l'accesso all'acqua ed alla CO₂ per la sintesi e, infine, la presenza di infrastrutture adatte alla trasformazione ed al successivo trasporto o stoccaggio del prodotto. La combinazione di questi fattori determina poi il prezzo finale del combustibile e, di conseguenza, le regioni che presentano tale combinazione di elementi saranno in grado di offrire al mercato un idrogeno verde economicamente competitivo. Da notare è che la principale componente legata ai costi di produzione è il costo dell'elettricità.

Guardando specificatamente al continente europeo, si prospetta che la produzione locale sarà con tutta probabilità inferiore rispetto alla domanda (IRENA, 2022a). Proprio per questo motivo il trasporto di idrogeno su lunghe distanze viene preso in considerazione.

Per poter essere trasportato l'idrogeno deve prima essere trasformato in un diverso stato rispetto a quello gassoso in cui si trova naturalmente. Una delle possibili strade prevede la liquefazione. In questo caso è richiesto il raffreddamento del gas al di sotto del suo punto critico a circa - 240°C, o - 253°C per mantenere uno stato completamente liquido a pressione atmosferica. La liquefazione si ottiene poi attraverso una serie di processi di compressione, raffreddamento ed espansione. Tale processo consuma una notevole quantità di energia e, inoltre, circa il 25-35% della quantità iniziale di idrogeno viene persa (Riaz, 2021). Un altro approccio consiste nell'utilizzare l'ammoniaca (NH₃) come vettore di idrogeno. Come osservato all'interno del capitolo specificatamente dedicato, l'ammoniaca verde è infatti ottenuta sintetizzando l'idrogeno sostenibile con l'azoto (N). Questa è considerata un mezzo efficiente e sicuro per il trasporto di idrogeno in grandi quantità. Infine, l'idrogeno può essere trasportato utilizzando i cosiddetti *Liquid Organic Hydrogen Carriers*, ovvero composti organici in grado di assorbire e rilasciare idrogeno attraverso reazioni chimiche (IRENA, 2022a). Questi possono fungere da vettori per il

trasporto e lo stoccaggio ed hanno il vantaggio di non necessitare un particolare raffreddamento per il mantenimento.

Una volta trasformato, il trasporto vero e proprio della sostanza può avvenire principalmente secondo due metodologie: via nave o via conduttura. La scelta fra queste opzioni è legata a fattori quali la distanza ed il volume movimentato andando quindi a determinare un rapporto costo-efficacia. Attualmente, risultano essere in funzione circa 4.600km di condutture dedicate all'idrogeno nell'Europa nord-occidentale, in Russia e negli Stati Uniti, e sono in corso progetti per la creazione di sistemi integrati quali la "Hydrogen Backbone"⁵⁹ europea (European Hydrogen Backbone Initiative, 2023). La scelta di ricorrere alla soluzione delle condutture per il trasporto dell'idrogeno necessita tuttavia di similari riflessioni rispetto a quelle che vengono fatte quando si intraprende la costruzione di un gasdotto dedicato al GNL. La creazione di un cordone ombelicale d'acciaio che lega produttore e consumatore comporta infatti un'attenta analisi geopolitica legata al percorso della conduttura, la quale, per definizione, è rigida e quindi difficilmente rimodulabile in caso di problemi o tensioni internazionali. Inoltre, la scelta di ricorrere alla realizzazione di un idrogenodotto acquisisce senso solamente quando esiste una domanda significativa di prodotto, la quale si prevede rimarrà tale nel prossimo futuro.

Un'altra soluzione presa in considerazione è la possibilità di trasportare più semplicemente l'elettricità rinnovabile attraverso sistemi di cavi e trasformarla in idrogeno solamente una volta giunta alla fine della rete. Anche in questo caso, tuttavia, la scelta dipende da vari fattori, tra cui la topografia del terreno e la distanza.

L'opzione del trasporto via nave, oltre ad essere flessibile e rimodulabile, offre un'alternativa praticabile per le lunghe distanze. La nave Suiso Frontier rappresenta il primo esempio di nave gasiera al mondo in grado di trasportare idrogeno liquefatto (Kawasaki Heavy Industries, 2019). Il prototipo è stato lanciato nell'ambito di un progetto pilota condotto da un consorzio che comprende le giapponesi J-Power, Kawasaki Heavy Industries oltre che Shell e AGL. Analogamente, sono in corso progetti simili in Corea del Sud e Norvegia.

⁵⁹ L'iniziativa Hydrogen Backbone (EHB) mira ad accelerare il percorso di decarbonizzazione dell'Europa attraverso la definizione del ruolo critico delle infrastrutture per l'idrogeno (basate su gasdotti esistenti e nuovi) per consentire lo sviluppo di un mercato paneuropeo dell'idrogeno competitivo, liquido, rinnovabile e a basse emissioni di carbonio. L'iniziativa mira a promuovere la concorrenza di mercato, la sicurezza dell'approvvigionamento, la sicurezza della domanda e la collaborazione transfrontaliera tra i Paesi europei e i loro vicini. Per approfondire: <https://ehb.eu/#mission>

Nonostante i progressi promettenti, le tecnologie che permettono il trasporto di idrogeno sono ancora in fase di sviluppo e affrontano sfide non indifferenti. L'idrogeno è il gas con la densità più bassa in natura e presenta un grado di infiammabilità particolarmente alto se miscelato con l'aria. Per questi e altri motivi, contrariamente a quanto molti credono, adattare le esistenti infrastrutture dedicate al trasporto di GNL all'idrogeno si rivela un'impresa complessa, costosa e per nulla scontata.

Tutte le considerazioni di cui sopra, vanno però riviste nel momento in cui si considera l'idrogeno nella sua funzione di elemento alla base della produzione di carburanti specificatamente destinati ad alimentare il trasporto containerizzato. Se ha infatti senso pensare di trasportare l'idrogeno attraverso le frontiere per utilizzarlo come fonte di alimentazione per processi produttivi o industriali che non possono essere delocalizzati, questo stesso ragionamento perde di significato quando si considera l'utilizzo della sostanza come carburante navale. L'esempio dell'e-ammoniaca appare chiaro nell'esprimere questo concetto: essendo questa un vettore funzionale alla movimentazione dell'idrogeno, appare sensata l'idea di spostarla via nave nel caso in cui questa voglia essere utilizzata ad esempio come fertilizzante in un paese che non ha caratteristiche compatibili con la produzione in loco. Al contrario, se la stessa sostanza è invece concepita come carburante per l'alimentazione navale, risulta illogica l'idea di spostarla e apparirebbe invece più razionale il rifornimento della nave direttamente in loco riducendo la catena di trasporto ed ottimizzando quindi i costi. Questa concettualizzazione è alla base del ragionamento portato avanti dalla presente analisi circa le motivazioni che possono portare i carriers ad orientarsi all'approvvigionamento di *e-fuels* direttamente nei porti dei paesi produttori, evitando il trasporto del carburante verso altri scali.

Per poter immaginare una nuova mappa geoeconomica dei trasporti marittimi influenzata dalla variabile dell'idrogeno verde, si ritiene necessario osservare quali paesi e regioni siano previsti emergere come leader produttori/esportatori di idrogeno verde. Come osservato precedentemente, una significativa disponibilità di energia rinnovabile e la conseguente possibilità di produzione di elettricità sostenibile a basso costo sono ritenuti essere caratteristiche primarie per poter emergere come leader nella produzione di idrogeno verde. Sulla base di questa considerazione le analisi portate avanti dall'Agenzia Internazionale per le Energia Rinnovabili (IRENA, 2022a) evidenzia come Africa,

Americhe, Medio Oriente e Oceania vantano il potenziale più elevato. Al contrario, l'Europa, il Nord-Est asiatico e il Sud-Est asiatico presentano risorse più limitate.

Se la disponibilità di fonti rinnovabili appare come un fattore critico, anche altre considerazioni quali le infrastrutture esistenti, il sostegno governativo, il contesto imprenditoriale, la stabilità politica e le dinamiche del settore energetico possono influenzare il potenziale di un Paese nell'emergere come grande produttore di idrogeno verde o meno. La classificazione tra futuri importatori ed esportatori implica tuttavia la valutazione ed il confronto tra il potenziale di produzione nazionale, il tasso di consumo interno, la domanda esterna prevista entro il 2050 ed i costi di mercato. In questo senso, secondo l'Agenzia (IRENA, 2022a) emergono tre gruppi distinti di Paesi. Il primo gruppo comprende quelli con capacità di produzione di idrogeno verde a basso costo in volumi superiori a quelli richiesti dal consumo interno, che li posiziona quindi come potenziali esportatori: Australia, Cile, Marocco e Spagna rientrano in questa categoria. Il secondo gruppo è composto da Paesi ritenuti in grado di raggiungere l'autosufficienza nella produzione e consumo, ovvero Cina e Stati Uniti. Infine, il terzo gruppo comprende i Paesi di cui è prevista la dipendenza dalle importazioni per soddisfare la domanda interna: Giappone, Corea del Sud ed alcune regioni di Europa e America Latina.

Un fattore interessante da notare è che secondo tali proiezioni per Paesi che attualmente dipendono dalle importazioni energetiche⁶⁰, come Cile, Marocco e Namibia, lo sviluppo di una produzione ed un mercato dell'idrogeno verde rappresenta un'opportunità di trasformazione economica ed indipendenza energetica guidata dall'abbondante potenziale rinnovabile (IRENA, 2022a). Inoltre, i Paesi che riusciranno ad affermarsi come esportatori leader di idrogeno verde e dei suoi derivati avranno anche la possibilità di rafforzare la propria importanza geopolitica e geoeconomica nel panorama energetico globale.

Sulla base delle proiezioni dell'IRENA appena analizzate, per quanto riguarda lo scopo del presente elaborato, va sottolineato l'emergere del sud-ovest del Mediterraneo, specificatamente del Marocco, e della Spagna quali potenziali produttori di grandi quantitativi di idrogeno verde da energia solare (*figura 14*). Da notare è anche il potenziale produttivo della fascia che va dal nord della Francia e si estende fino alla Norvegia (*figura 15*). Questa regione, pur mancando di esposizione solare, vanta infatti

⁶⁰ Attualmente il Cile importa circa il 65% del suo fabbisogno energetico, il Marocco il 91% e la Namibia il 74%.

un grande potenziale eolico sia *onshore* che *offshore* che risulta essere ampiamente sviluppato. Un esempio pratico di questa considerazione è il caso precedentemente analizzato del Porto di Rotterdam. La strategia di decarbonizzazione dello scalo olandese mostra infatti una grande capacità di emergere nel panorama produttivo dell'idrogeno sostenibile proprio per merito del sapiente sviluppo dei parchi eolici *offshore* nel Mare del Nord.

Distribuzione del potenziale produttivo di energia solare (figura 14) ed eolica (figura 15)

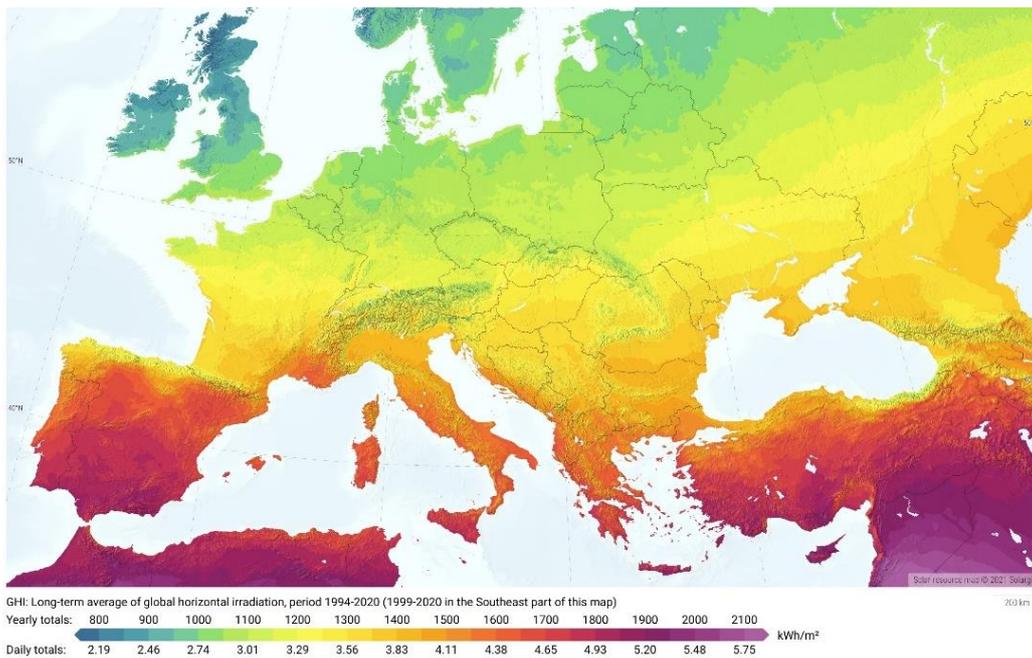


Figura 14

Fonte: Solargis (2021)

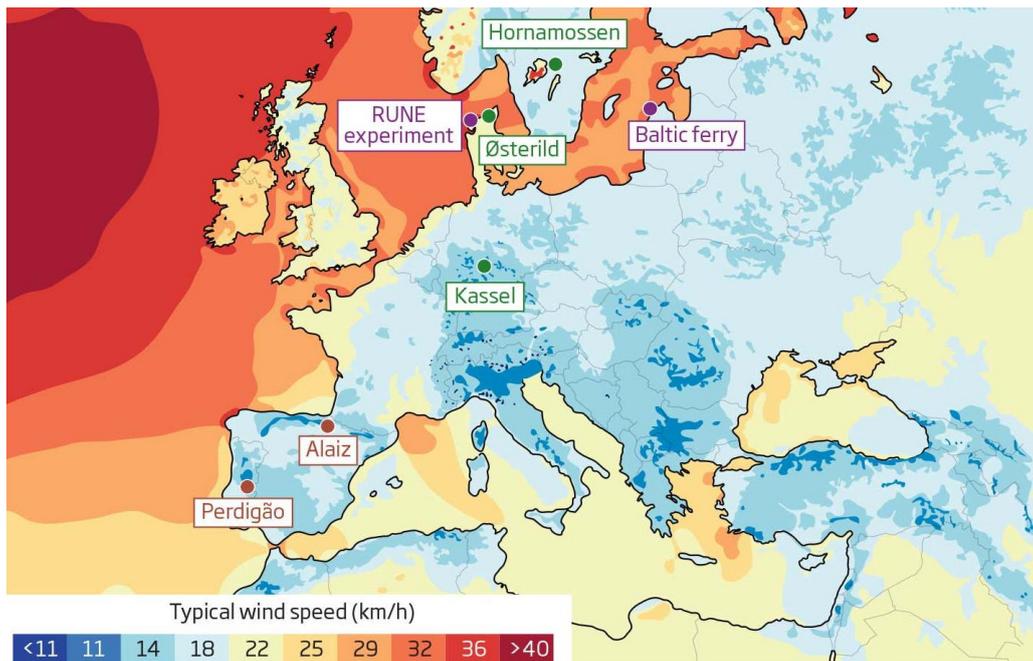


Figura 15

Fonte: New Scientist (2017)

Verso una nuova mappa geoeconomica?

Le sopradescritte trasformazioni della geografia del commercio energetico sono ritenute essere possibili fonti modificatrici delle dinamiche dei flussi logistici marittimi e del conseguente volume di merci gestito dai porti marittimi. Gli scali che aspirano ad avere un ruolo come snodo centrale della rete logistica globale dovranno infatti allineare strategicamente i propri sforzi commerciali con i cambiamenti previsti nei flussi energetici. In questo senso, sarà ad esempio imperativo per questi creare partnership con le principali imprese private e collaborare con i governi locali, regionali e nazionali per integrarsi in questo nuovo scenario.

Andando ora ad intersecare le proiezioni legate alla produzione di idrogeno verde con le logiche che determinano specificatamente le rotte dello shipping mediterraneo ed europeo, il presente elaborato si pone l'obiettivo di identificare alcuni possibili elementi chiave del cambiamento ritenuti di valore geoeconomico e pertanto meritevoli di una particolare attenzione nel prossimo futuro.

Per comprendere le rotte del trasporto containerizzato europeo e mediterraneo bisogna innanzitutto distinguere le differenti peculiarità che hanno segnato il destino dei porti nord-europei rispetto a quelli sud-europei.

Il Mediterraneo ha assunto un ruolo significativo nella definizione delle rotte marittime globali soprattutto grazie alla propria posizione strategica come ponte tra oriente e occidente. Con l'avvento della containerizzazione alla fine degli anni Settanta e la riapertura del Canale di Suez dopo la Seconda guerra mondiale, l'emergere dei traffici imperniati sulle economie dell'Asia orientale ne ha cementato l'importanza (Cerreti, Marconi, & Sellari, 2019). In questo contesto, soprattutto a partire dalla metà degli anni Novanta, i porti mediterranei si sono sviluppati secondo un preciso modello: quello del porto *transshipment*⁶¹. Tale modello si concentra sulle attività di trasbordo marittimo, ovvero smistamento dei container principalmente tra grandi navi e navi di dimensioni minori, dette *feeder*. L'applicazione di questo sistema ha permesso di far fronte

⁶¹ I porti *transshipment* (o di trasbordo) fungono da intermediari. Qui le merci vengono trasferite da una nave all'altra, anziché essere trasportate direttamente alla destinazione finale. Nel contesto del Mar Mediterraneo, i porti di trasbordo fungono da hub chiave per consolidare i carichi provenienti da varie origini e distribuirli a più destinazioni all'interno della regione e oltre. Questi porti dispongono in genere di infrastrutture e strutture di movimentazione efficienti per gestire grandi volumi di merci e facilitare il trasferimento agevole delle merci tra diverse imbarcazioni. I porti di trasbordo svolgono un ruolo cruciale nell'ottimizzazione delle rotte di trasporto, nella riduzione dei costi e nel miglioramento dell'efficienza complessiva della catena di approvvigionamento. Il concetto di porto *transshipment* si contrappone a quello di porto *gateway* che caratterizza invece i principali porti nordeuropei.

all'aumento dei volumi di merci in circolazione collegando i principali scali alle altre regioni portuali e sopperendo alla mancanza di una rete estesa di collegamenti interni nei retroporti.

I porti nord-europei invece, pur non situandosi naturalmente all'interno della rotta oriente-occidente, hanno saputo sfruttare i vantaggi offerti dalla geografia dei propri retroporti. L'assenza di rilievi montuosi, una rete di fiumi navigabili e la sapiente costruzione di una rete di canali, ferrovie e centri intermodali ha permesso infatti ai porti del *Northern range*⁶² come Rotterdam o Anversa di assumere il modello di porti *gateway*. Questo specifico modello ha reso gli scali delle vere e proprie porte d'accesso verso l'Europa centrale e settentrionale, sincronizzando l'attività di porti e retroporti. Questa differenza tra gli scali marittimi nord-europei e sud-europei ha determinato un prevalere dei primi che negli anni si è poi sviluppato in un divario infrastrutturale che ha cristallizzato il predominio del *Northern Range* e tuttora influenza le rotte. Ad oggi, gli scali di Rotterdam, Anversa e Amburgo vantano infatti traffici di container maggiori rispetto a quelli degli scali mediterranei.

La distinzione tra porti *transshipment* e porti *gateway* è uno degli elementi che influenza il tracciamento delle rotte del trasporto containerizzato in Europa.

Le compagnie di navigazione marittima, per ottimizzare i costi, cercano di offrire servizi il più possibile diretti tra gli scali principali. Nella definizione delle rotte, tuttavia, è necessaria una conciliazione con la posizione dei porti intermedi. Ecco che entra quindi in gioco il concetto di "deviazione marittima" (*figura 16*) (Notteboom, Pallis & Rodrigue, 2022), ovvero la distanza aggiuntiva minore dalle principali rotte necessaria per servire un determinato porto di scalo. I porti a meno di cento miglia nautiche da una rotta marittima principale sono considerati a bassa deviazione. Maggiore sarà invece la distanza, maggiore sarà la riluttanza delle compagnie nel servirsi di un determinato porto. La validità di questa considerazione è tuttavia discutibile alla luce di determinate variabili che possano rendere attrattivo lo scalo. La presenza di un *hinterland* sviluppato o, come

⁶² Con il termine *Northern range* si intende il sistema portuale che si estende da Le Havre ad Amburgo. La crescita significativa delle infrastrutture portuali di questa regione è in parte dovuta ai vantaggi naturali della regione, tra cui fiumi navigabili e terreni pianeggianti. Inoltre, la costruzione di una rete di canali interni, ferrovie e centri intermodali perfettamente integrati con i porti ne ha facilitato lo sviluppo. Le politiche di sviluppo di questa regione sono state sinergiche piuttosto che competitive, contribuendo all'efficienza complessiva del sistema. Questo macrosistema portuale è stato capace di ampliare il proprio *hinterland* ben oltre i confini fisici del continente estendendosi fino all'Italia settentrionale. Al contrario, i porti del Mediterraneo, caratterizzati da un retroterra più impervio, hanno gradualmente perso il loro vantaggio competitivo, inizialmente garantito dalla collocazione geografica.

intende sostenere quest'analisi, la disponibilità di *e-fuels* a prezzi competitivi per il rifornimento, potrebbero infatti giocare un ruolo in questo senso. La deviazione marittima rimane ad oggi un gioco di equilibri tra la frequenza e i costi del servizio, il numero di vettori a disposizione di una compagnia e lo sviluppo industriale ed economico attorno ad un determinato scalo. Nel prossimo futuro, anche la presenza di impianti di produzione e distribuzione di e-metanolo, e-metano ed e-ammoniaca potranno invece giocare un peso in questo processo.

Gli scali mediterranei e nord-europei e le fasce di deviazione

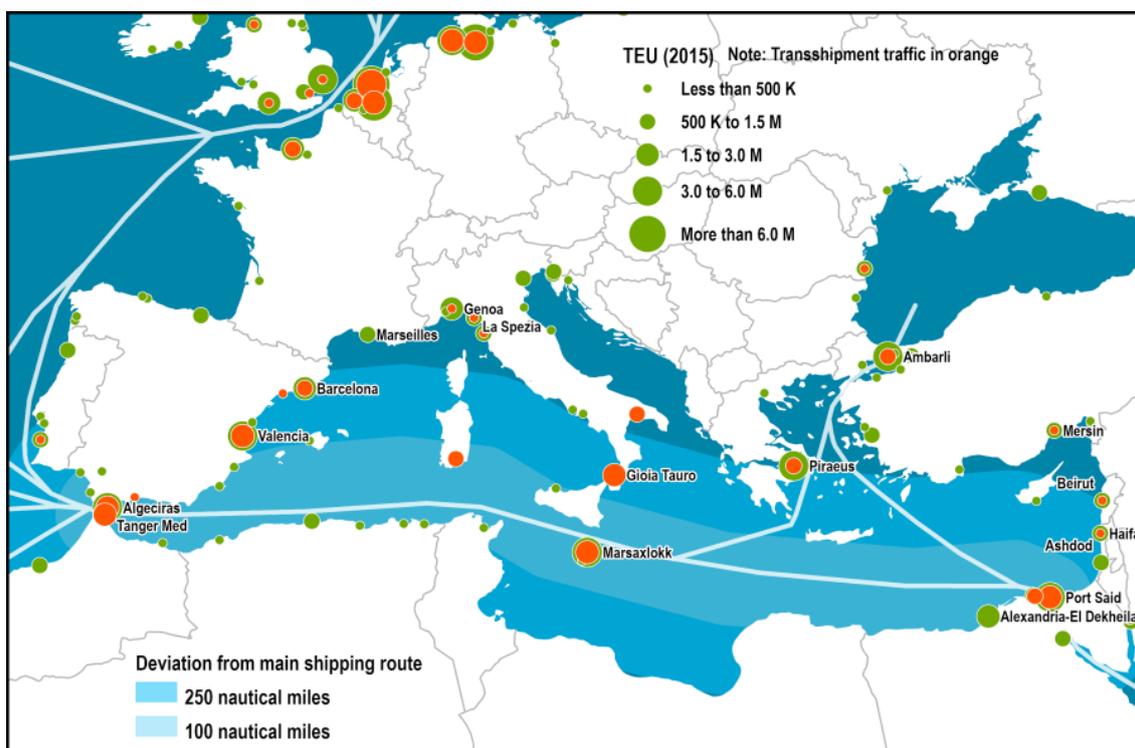


Figura 16

Fonte: Notteboom, Pallis & Rodrigue (2022)

Levando dall'equazione la variabile dei carburanti sostenibili, ad oggi nella configurazione delle rotte lungo il Mediterraneo è visibile il processo sopradescritto. Marsaxlokk a Malta, Gioia Tauro e Cagliari in Italia e Valencia ed Algeciras in Spagna sono un esempio di questo sistema basato sul concetto di *hub-and-spoke*⁶³. Questi scali sono stati selezionati per servire i continenti, non le regioni, fungendo da punti di

⁶³ I servizi *hub-and-spoke* si riferiscono a un modello di rete di trasporto in cui un porto *hub* centrale funge da punto focale per il consolidamento e la distribuzione delle merci, mentre porti più piccoli, noti come *spokes*, si collegano all'*hub* centrale. Nella regione del Mediterraneo, i servizi *hub-and-spoke* sono comunemente utilizzati per semplificare le operazioni di trasporto marittimo. Le merci provenienti da diverse origini vengono consolidate nel porto *hub* e poi distribuite ai porti *spoke* attraverso servizi di "feederaggio" programmati. Questa rete consente una gestione efficiente dei carichi, tempi di transito più rapidi e una migliore connettività tra le diverse regioni del Mediterraneo.

trasbordo e snodo per rotte minori. I terminal sono tipicamente di proprietà, in tutto o in parte, dei vettori che li utilizzano in modo da renderli il più efficienti possibile dal punto di vista dei costi e delle tempistiche di manovra. Ciò ha portato alla nascita di hub di *transshipment* quasi puri, ossia in cui le attività di movimentazione container da nave a nave è tipicamente superiore al 65% del totale di quelle effettuate (Notteboom, Satta, Persico, Vottero, & Rossi, 2023).

Il sistema *hub-and-spoke* mostra una serie di vulnerabilità, in particolare legate alle fluttuazioni del mercato, specificatamente all'effetto che queste hanno sul volume dei container in transito, e all'emergere di nuovi scali più competitivi (Rodrigue & Notteboom, 2010).

Per quanto riguarda soprattutto quest'ultimo aspetto, è da notare la "libera competizione" caratterizza questo mercato permessa proprio dal fatto che questi scali non sono pensati per servire specifiche regioni quanto più come snodi per i continenti. In questo senso, trovandosi su rotte marittime a lunga distanza si trovano a competere con un ampio ventaglio di possibili altri hub intermedi. In genere, l'emergere di nuovi scali genera una maggiore concorrenza, l'abbassamento dei prezzi e fornisce ai carriers più opzioni di rotta. Allo stesso tempo, tuttavia, questo fattore mina le reti *hub-and-spoke* già consolidate rendendo fragile il sistema.

Queste dinamiche a partire dagli anni 2000 hanno rivelato le debolezze dei sistemi puramente *hub-and-spoke* rispetto a quello basato sugli itinerari più lineari ed i porti *gateway*. I vettori rivedono continuamente le proprie strategie di rotta e questo ha introdotto una tendenza verso un minor numero di trasbordi a favore un maggior numero di viaggi diretti. A dimostrazione di questo, negli ultimi anni Maersk, MSC e CMA-CGM hanno dato sempre maggiore priorità alle rotte dirette verso i porti *gateway* (Rodrigue & Notteboom, 2010). Come reazione a questo processo, gli hub di trasbordo hanno intrapreso un percorso di riorientamento cercando di riacquisire un maggior grado di appeal per la compagine. Un esempio è lo scalo spagnolo di Algeciras, il quale si è incentrato sul ruolo di snodo est-ovest e nord-sud affrontando però allo stesso tempo la concorrenza del nuovo arrivato Tanger-Med. Il risultato netto di questi sviluppi spiega il leggero calo della quota di mercato degli hub del Mediterraneo occidentale negli ultimi anni.

Per quanto riguarda la questione dei porti *newcomers* il Mar Mediterraneo negli ultimi anni è stato caratterizzato dall'emergere di nuovi hub di trasbordo soprattutto in Nord Africa avvantaggiati da un grado di deviazione molto basso dalle rotte principali. Gli esempi principali sono Tanger-Med in Marocco, Djazair e Djen-Djen in Algeria e Port Said in Egitto. In questo panorama è interessante notare come i porti spagnoli di Valencia e Barcellona siano stati in grado di mantenere un certo livello di crescita grazie al loro attraente *hinterland*. In questo caso, i carichi di trasbordo movimentati in entrambi i porti sono cresciuti nonostante il maggior grado deviazioni dalle principali rotte marittime dirette ai porti *gateway* del Nord Europa. Valencia, ad esempio, ha movimentato 5,1 milioni di TEU nel 2022, classificandosi come il quarto porto più trafficato d'Europa (il primo nel Mediterraneo) ed è stato addirittura scelto come hub mediterraneo di MSC (Gardham, 2022).

È all'interno di queste dinamiche si inserisce la nuova variabile dei carburanti a base di idrogeno. Come accennato precedentemente, si ritiene che proprio questo elemento possa rivelarsi come una nuova variabile all'interno dell'equilibrio geoeconomico delle rotte marittime. Specificatamente, nel contesto della decarbonizzazione dello shipping marittimo tramite la graduale ed auspicata transizione verso quelli che sono stati identificati come i migliori carburanti alternativi, la capacità di offrirne volumi significativi a prezzi vantaggiosi potrebbe essere sfruttata da parte degli scali per attirare a sé i carriers. In questo senso, va sottolineato nuovamente lo strettissimo legame tra gli *e-fuels* e la disponibilità di energia rinnovabile per la loro produzione. Ecco che allora le regioni geografiche che abbondano di risorse quali eolico e solare potrebbero sfruttare tale potenziale in questo senso alimentando lo sviluppo dei porti più vicini.

Calando queste considerazioni nello specifico contesto mediterraneo ed europeo, è prevedibile un rafforzamento dei porti spagnoli. Questi ultimi godono infatti già di un solido posizionamento all'interno delle principali rotte marittime, e, allo stesso tempo, sono inseriti in un contesto geografico del tutto favorevole alla produzione di idrogeno verde. Similmente, procedendo sulla falsa riga di questo ragionamento, è del tutto plausibile l'emergere dei porti nordafricani. Come menzionato precedentemente, questi sono già caratterizzati da una forte capacità competitiva all'interno del panorama dei porti *transhipment* mediterranei poiché rappresentano un basso grado di deviazione per i carriers dalle rotte principali. Aggiungendo a quest'equazione anche l'enorme potenziale

di produzione energetica sostenibile a costi competitivi rispetto alla costa nord del Mediterraneo, è facile immaginare una crescita del loro peso geoeconomico.

A sostegno di questa visione ci sono le azioni portate avanti del carrier danese Maersk, il quale si è accordato con il Governo egiziano e con Governo spagnolo per esplorare le opportunità di produzione di combustibili verdi su larga nei due paesi (Maersk, 2022a) (Government of Spain, 2022).

Per quanto riguarda invece il nord Europa, i grandi porti *gateway* del *Nothern Range*, se vorranno mantenere la propria attrattività, dovranno sapientemente sfruttare i parchi eolici indirizzando l'energia sostenibile generata verso un sistema di produzione di idrogeno ed *e-fuels*.

Il binomio luogo di produzione – luogo di distribuzione

Si ritiene che lo sviluppo del fenomeno della decarbonizzazione marittima porterà ad un emergere sempre maggiore del concetto di porto come hub di produzione e distribuzione di carburanti sostenibili. Gli scali che sapranno quindi sapientemente implementare questo binomio emergeranno sulla mappa geoeconomica dei trasporti marittimi.

Un buon numero di porti marittimi svolge già un ruolo essenziale come hub di importazione o esportazione di energia, gestendo flussi di combustibili fossili quali carbone, petrolio greggio e gas naturale. Conseguentemente, i porti marittimi sono spesso anche sede di grandi impianti di produzione energetica. L'esistenza di questo legame è determinata dalle caratteristiche dei cluster portuali moderni. L'ampia estensione, la connessione al network logistico sia terrestre che marittimo e la presenza di grandi distretti industriali produttivi sono alcune delle ragioni che spingono le aziende produttrici di energia a insediarsi nelle aree portuali. La presenza di centrali elettriche e di infrastrutture per la distribuzione dell'energia all'interno degli scali rappresenta inoltre un grande valore aggiunto e si traduce spesso in un più ampio sviluppo dell'ecosistema portuale.

Oggi, il processo di transizione energetica sfida l'attuale assetto dei porti come hub energetici tradizionali. In questo scenario, il graduale declino ed abbandono delle attività legate ai combustibili fossili in favore di un approccio alla produzione, movimentazione e stoccaggio delle energie rinnovabili sottoforma di idrogeno verde emerge come necessità. Potenzialmente, ciò può comportare implicazioni di vasta portata per gli scali marittimi. Si prevede infatti che l'idrogeno verde assumerà un ruolo di primo piano nel

nuovo panorama energetico emergente all'interno porti. Specificatamente, l'emergere di carburanti quali e-metanolo, e-metano ed e-ammoniaca come alternative per l'alimentazione navale darà ai porti la possibilità di svolgere un ruolo cruciale nel processo di produzione e distribuzione di questi combustibili. Lo schema sul quale sono settati flussi logistici mondiali risente del fenomeno della globalizzazione e vede i porti come attori impegnati in una sfida di supremazia per emergere ed aumentare il volume di merci movimentate. In questo contesto, gli scali che puntano ad una posizione di forza sulla mappa geoeconomica dovranno essere attivi in tutte le parti della catena del valore dell'idrogeno. Una posizione favorevole, una rete infrastrutturale ben sviluppata, una forte connettività marittima a livello mondiale, terminal e logistica all'avanguardia, ecosistemi industriali efficienti e ben funzionanti e una solida base di vettori clienti saranno tutti fattori importanti che consentiranno a un porto marittimo di assumere un ruolo rilevante nell'economia emergente dell'idrogeno, posizionandosi come hub di produzione e distribuzione.

Un'intersecazione del binomio luogo di produzione – luogo di distribuzione di idrogeno verde con le logiche che determinano la scelta da parte dei vettori dei porti dove effettuare tappa e rifornimento sottolinea ancor di più la rilevanza di questo concetto.

L'idea di "deviazione marittima" minima gioca infatti un forte ruolo nel determinare i porti in cui rifornirsi di carburante. Ad oggi il mercato del bunkeraggio è fortemente condizionato dalle caratteristiche della rete marittima globale. In linea generale, possono essere individuati due pattern principali che determinano la localizzazione dei siti di rifornimento di carburanti convenzionali (Notteboom, Pallis & Rodrigue, 2022): a) la centralità di un porto nelle rotte principali e b) la prossimità geografica ai principali colli di bottiglia della rete marittima mondiale.

Per quanto riguarda il primo punto, si vede l'emergere dei principali porti *gateway* che registrano un gran numero di scali e volumi di container. Porti quali Rotterdam, Anversa, Hong Kong e Los Angeles/Long Beach rientrano all'interno di queste caratteristiche. Guardando invece al secondo punto, il fattore geografico fa sentire il proprio peso. La prossimità di determinati scali ai principali stretti che vedono il transito del commercio mondiale e la conseguente vicinanza fisica alle rotte li rende infatti luoghi appetibili per operazioni di trasbordo combinate al rifornimento. Esempi di questo fenomeno sono visibili nello stretto di Hormuz dove emerge lo scalo di Fujairah, a Gibilterra dove sorge Algeciras, e Panama. Da notare in questo panorama è infine il porto Singapore, che

rappresenta il principale sito di bunkeraggio di carburanti convenzionali a livello globale. Questa posizione dominante è sì legata all'intensità del traffico marittimo sulle rotte che dall'estremo oriente puntano verso l'Europa e che sono costrette a transitare attraverso lo Stretto di Malacca ma anche al peculiare ruolo che la città stato ha sviluppato come centro di raffinazione del petrolio (Notteboom, Pallis & Rodrigue, 2022). Questo esempio evidenzia il rilievo del binomio luogo di produzione – luogo di distribuzione nel determinare il successo di determinati scali su altri. Il presente elaborato intende sottolineare come l'aggiunta della variabile dell'idrogeno sostenibile a quest'equazione possa modificare gli assetti sopradescritti, generando una nuova mappa del bunkeraggio.

Conclusion

Il presente elaborato si proponeva di analizzare la transizione energetica dello shipping marittimo verso carburanti sostenibili a base di idrogeno nel contesto mediterraneo ed europeo. È stato sottolineato come operando una sovrapposizione della mappa della disponibilità di energia rinnovabile con le logiche che determinano i flussi mercantili si possa ipotizzare un'evoluzione delle rotte così come le conosciamo oggi. Nel mondo globalizzato la competizione tra gli scali per emergere e convogliare i flussi si acuisce e mostra un particolare grado di plasmabilità. Osservare lo sviluppo dei cluster produttivi di idrogeno verde è ritenuto essere un nuovo elemento di particolare importanza per navigare gli sviluppi geoeconomici e geopolitici in divenire.

Sulla base delle considerazioni finora fatte, può già essere evidenziato uno scenario che vede una possibile emersione come leaders di questa trasformazione i porti spagnoli e nordafricani. Proprio questi ultimi sono ritenuti essere degli osservati speciali in quanto presentano una serie di caratteristiche che li eleva a veri e propri competitors per gli scali europei. Come è stato osservato, la quantità di energia rinnovabile in Europa è limitata e, soprattutto, vede la competizione di numerosi settori per il suo utilizzo. In questo senso non è possibile pensare che tutto il potenziale energetico sostenibile del continente sia indirizzato alla produzione di idrogeno verde ed alla decarbonizzazione specificatamente del trasporto marittimo. È quindi questo scenario che permette la speculazione circa un ipotetico riequilibrio delle rotte verso la sponda sud del Mediterraneo. Allo stesso tempo, si riconosce che il tracciamento e la formazione dei flussi marittimi risentono di numerosi altri fattori che concorrono alla mappa finale dei trasporti. Ecco, quindi, che la variabile dell'idrogeno verde si inserisce ed aggiunge al ventaglio di elementi che il settore pubblico e privato dovrà considerare per navigare un settore in fase di evoluzione.

Bibliografia

- Adamowicz, M. (2022). Decarbonisation of maritime transport – European Union measures as an inspiration for global solutions? *Marine Policy*, 1 - 6. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2022.105085>
- Agarwala, N. (2022). Is LNG the solution for decarbonised shipping? *Journal of International Maritime Safety, Environmental Affairs, and Shipping*, 6(4), 158-166. doi: 10.1080/25725084.2022.2142428
- Aluko, L. (2023). *Future of green methanol: biomethanol, e-methanol, or both?* Venezia: Illuminem. Retrieved from <https://illuminem.com/illuminemvoices/future-of-green-methanol-biomethanol-emethanol-or-both>
- American Bureau of Shipping. (2021). *Sustainability Witepaper: Hydrogen as Marine Fuel*. Spring: American Bureau of Shipping. Retrieved from <https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/publications/whitepapers/hydrogen-as-marine-fuel-whitepaper-21111.pdf>
- Bach, H., & Teis, H. (2023). IMO off course for decarbonisation of shipping? Three challenges for stricter policy. *Marine Policy*, 147. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308597X22004262?via%3Dihub>
- Balcombe, P. (2019). How to decarbonise international shipping: Options for fuels, technologies and policies. *Energy Conversion and Management - Elsevier*. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890418314250?via%3Dihub>
- Balcombe, P. (2022). *Total Methane and CO2 Emissions from Liquefied Natural Gas*. New York: Enviromenta Science Technology. Retrieved from <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.2c01383>
- Bergman, J. (2022). *CMA CGM designates US\$1.5Bn for energy transition*. Rivera. Retrieved from <https://www.rivieramm.com/news-content-hub/news-content-hub/cma-cgm-designates-us15bn-for-energy-transition-72746>
- Buitendijk, M. (2022, 02 11). *Flagships' hydrogen powered river barge Zulu 06 on its way to France*. Retrieved from SWZ Maritime: <https://swzmaritime.nl/news/2022/02/11/flagships-hydrogen-powered-river-barge-zulu-06-on-its-way-to-france/>
- Cerreti, C., Marconi, M., & Sellari, P. (2019). *Spazi e Poteri: geografia politica, geografia economica, geopolitica*. Bari: Laterza.
- CertifHy. (2022). *CertifHy – Implementing an EU-wide certification system for clean Hydrogen*. Brussels: CertifHy. Retrieved from https://www.certifhy.eu/wp-content/uploads/2022/05/04_Implementing-an-EU-wide-certification-system_New-Certifhy-GO-Scheme-documents.pdf
- Cluster Green H2. (2022). *HYDROGÈNE AU MAROC, UNE DYNAMIQUE ET DES OPPORTUNITÉS*. Rabat. Retrieved from <https://www.greenh2.ma/>
- CMA CGM. (2017). *Strategic Agreement between Total and CMA CGM on Liquefied Natural Gas Fuel Supply for CMA CGM New Build Container Ships*. Marseille: CMA CGM. Retrieved from <https://www.cma-cgm.com/news/1841/strategic-agreement-between->

total-and-cma-cgm-on-liquefied-natural-gas-fuel-supply-for-cma-cgm-new-build-container-ships

- CMA CGM. (2022a). *2022 CSR REPORT*. Marseille: CMA CGM. Retrieved from <https://cmacgm-group.com/en/sustainability/our-publications>
- CMA CGM. (2022b). *CMA CGM becomes partner to the Jupiter 1000 project, France's first industrial demonstrator of hydrogen and e-methane's production, piloted by GRTgaz*. Marseille: CMA CGM. Retrieved from <https://www.cma-cgm.com/news/4089/cma-cgm-becomes-partner-to-the-jupiter-1000-project-france-s-first-industrial-demonstrator-of-hydrogen-and-e-methane-s-production-piloted-by-grtgaz?cat=environment>
- CMA CGM. (2023a). *Launch of the construction of the first Ro-Ro sailing ship: CMA CGM partners with Neoline*. Marseille: CMA CGM. Retrieved from <https://cmacgm-group.com/en/news-media/launch-construction-first-ro-ro-sailing-ship-cma-cgm-partners-neoline>
- CMA CGM. (2023b). *PULSE, CMA CGM Energy Fund*. Marseille: CMA CGM. Retrieved from <https://cmacgm-group.com/en/fund-for-energies>
- Committee on Climate Change. (2018). *Hydrogen in a low-carbon economy*. London: Committee on Climate Change. Retrieved from <https://www.theccc.org.uk/wp-content/uploads/2018/11/Hydrogen-in-a-low-carbon-economy.pdf>
- Corbett, J., Ruwet, M., Xu, Y.-C., & Weller, P. (2020). Climate governance, policy entrepreneurs and small states: explaining policy change at the International Maritime Organisation. *Environmental Politics*, 29(5), 825-844. doi:10.1080/09644016.2019.1705057
- Dahlgren, S. (2022). Biogas-based fuels as renewable energy in the e transport sector: An overview of the potential of using CBG, LBG and other vehicle fuels produced from biogas. *Biofuels*, 13(5), 587-599. Retrieved from <https://doi.org/10.1080/17597269.2020.1821571>
- EMSA. (2023). *Potential of ammonia as fuel in shipping*. Lisbona: European Maritime Safety Agency. Retrieved from <https://www.emsa.europa.eu/newsroom/latest-news/item/4834-update-on-potential-of-biofuels-for-shipping.html>
- Energieswitch. (2019). *Rotterdam Climate Agreement*. Rotterdam: Energieswitch. Retrieved from https://cdn.locomotive.works/sites/5ab410c8a2f42204838f797e/content_entry5ab410faa2f42204838f7990/5be174d6337f770010c1b69f/files/1.2.2_Rotterdam_Climate_Agreement_ENG.pdf
- ENGIE. (2022). *CMA CGM and ENGIE set to co-invest in the Salamander project, to produce second-generation biomethane*. Le Havre: ENGIE. Retrieved from <https://en.newsroom.engie.com/news/cma-cgm-and-engie-set-to-co-invest-in-the-salamander-project-to-produce-second-generation-biomethane-decd-314df.html>
- European Commission. (2023a). *European Alternative Fuels Observatory: Ports and infrastructure (Onshore Power Supply)*. Bruxelles: European Commission. Retrieved from <https://alternative-fuels-observatory.ec.europa.eu/transport-mode/inland-waterways/ports-and-infrastructure>

- European Commission. (2023b). *Reducing emissions from the shipping sector*. Bruxelles: European Commission. Retrieved from https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport/reducing-emissions-shipping-sector_en
- European Council. (2023). *Fit for 55*. Bruxelles: European Union. Retrieved from <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/>
- European Hydrogen Backbone Initiative. (2023). *European Hydrogen Backbone (EHB) initiative*. Bruxelles: European Hydrogen Backbone (EHB) initiative. Retrieved from <https://ehb.eu/>
- European Union. (2015). *REGULATION (EU) 2015/757 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 29 April 2015 on the monitoring, reporting and verification of carbon dioxide emissions from maritime*. Bruxelles: Official Journal of the European Union. Retrieved from <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32015R0757>
- European Union. (2023). *REGULATION (EU) 2023 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on the use of renewable and low-carbon fuels in maritime transport, and amending Directive 2009/16/EC*. Bruxelles: European Union. Retrieved from <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/PE-26-2023-INIT/en/pdf>
- Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research. (2019). *STUDY ON THE OPPORTUNITIES OF "POWER-TO-X" IN MOROCCO: 10 HYPOTHESES FOR DISCUSSION*. Karlsruhe: Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research. Retrieved from <https://publica-rest.fraunhofer.de/server/api/core/bitstreams/5156d310-48ac-4e84-a6ec-3e657b93e198/content>
- Gardham, R. (2022). *The ten busiest ports in Europe*. Investment Monitor. Retrieved from <https://www.investmentmonitor.ai/logistics/the-ten-busiest-ports-in-europe/?cf-view>
- Garrido, J., & Hervas, M. (2023). *Europe leads green shipping with new Fit for 55 regulations: AFIR, FuelEU, EU ETS*. Barcelona: Pier Next. Retrieved from <https://piernext.portdebarcelona.cat/en/economy/europe-leads-green-shipping-fit-for-55-regulations-afir-fueleu-eu-ets/>
- Government of Spain. (2022). *The President of the Government of Spain agrees with the CEO of Maersk to advance plans for the production of green fuels for maritime transport in Spain*. Madrid: La Moncloa. Retrieved from https://www.lamoncloa.gob.es/lang/en/presidente/news/Paginas/2022/20221103_sanchez-skou.aspx
- Green Hydrogen Organization. (2023). *GH2 Country Portal – Morocco*. Rabat: Green Hydrogen Organization. Retrieved from <https://gh2.org/countries/morocco>
- H2Ports. (2023). *H2Ports*. Bruxelles: H2Ports. Retrieved from <https://h2ports.eu/about/>
- Hanna Bacha, Bergeek, A., Bjørgum, Ø., Teis, H., Kenzhagaliyeva, A., & Steen, M. (2020). Implementing maritime battery-electric and hydrogen solutions: a technological innovation systems analysis. *Transportation Research Part D*, 87. doi:<https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102492>
- Hansson, J. (2019). *Alternative marine fuels: Prospects based on multi-criteria decision analysis involving Swedish stakeholders*. Göteborg: Elsevier. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.05.008>

- HyCC. (n.d.). *H2-Fifty, Rotterdam*. Retrieved from HyCC:
<https://www.hycc.com/en/projects/h2-fifty>
- Hydrogen Europe. (2021). *How hydrogen can help decarbonise the maritime sector*. Bruxelles: Hydrogen Europe. Retrieved from https://hydrogeneurope.eu/wp-content/uploads/2021/11/How-hydrogen-can-help-decarbonise-the-maritime-sector_final.pdf
- IEA & AMF. (2020). *Methanol as Motor Fuel*. Abu Dhabi: Advanced Motor Fuels. Retrieved from https://iea-amf.com/app/webroot/files/file/Annex%20Reports/AMF_Annex_56.pdf
- IEA. (2019a). *The Future of Hydrogen: Seizing today's opportunities*. Paris: International Energy Agency. Retrieved from <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>
- IEA. (2019b). *Towards zero-emissions CCS in power plants using higher capture rates of biomass*. Paris: The International Energy Agency. Retrieved from <https://climit.no/app/uploads/sites/4/2019/09/IEAGHG-Report-2019-02-Towards-zero-emissions.pdf>
- IEA. (2021a). *Global Hydrogen Review 2021*. Paris: International Energy Agency. Retrieved from <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2021>
- IEA. (2021b). *Zero-emission carbon capture and storage in power plants using higher capture rates*. Paris: The International Energy Agency. Retrieved from <https://www.iea.org/articles/zero-emission-carbon-capture-and-storage-in-power-plants-using-higher-capture-rates>
- IMO. (2011). *ANNEX 19: RESOLUTION MEPC.203(62)*. London: International Maritime Organization. Retrieved from <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Technical%20and%20Operational%20Measures/Resolution%20MEPC.203%2862%29.pdf>
- IMO. (2016). *RESOLUTION MEPC.278(70) Amendments to MARPOL Annex VI*. London: International Maritime Organization. Retrieved from [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.278\(70\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.278(70).pdf)
- IMO. (2019). *Proposal to establish an International Maritime Research and Development Board (IMRB). Submitted by ICS, BIMCO, CLIA, INTERCARGO, INTERFERRY, INTERTANKO, IPTA, and WSC*. London: International Maritime Organization. Retrieved from <https://www.ics-shipping.org/wp-content/uploads/2020/08/proposal-to-establish-an-international-maritime-research-and-development-board-imrb.pdf>
- IMO. (2020a). *Fourth IMO GHG Study 2020*. London: International Maritime Organization. Retrieved from <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Fourth%20IMO%20GHG%20Study%202020%20-%20Full%20report%20and%20annexes.pdf>
- IMO. (2020b). *IMO working group agrees further measures to cut ship emissions*. London: International Maritime Organization. Retrieved from <https://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/pages/36-ISWG-GHG-7.aspx>
- IMO. (2020c). *INTERIM GUIDELINES FOR THE SAFETY OF SHIPS USING METHYL/ETHYL ALCOHOL AS FUEL*. London: International Maritime Organization. Retrieved from <https://www.register-iri.com/wp-content/uploads/MSC.1-Circ.1621.pdf>

- IMO. (2023a). *Progress on safety guidelines for hydrogen- and ammonia-fuelled ships*. London: International Maritime Organization. Retrieved from <https://www.imo.org/en/MediaCentre/Pages/WhatsNew-1968.aspx>
- IMO. (2023b). *Revised GHG reduction strategy for global shipping adopted*. London: International Maritime Organization. Retrieved from <https://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/pages/Revised-GHG-reduction-strategy-for-global-shipping-adopted-.aspx>
- International Chamber of Shipping. (2021, November 05). *Lack of R&D investment “the greatest blocker to shipping’s decarbonisation”, ministerial COP26 conference to be told*. Retrieved from International Chamber of Shipping: Press Release: <https://www.ics-shipping.org/press-release/lack-of-rd-investment-the-greatest-blocker-to-shippings-decarbonisation/>
- International Transport Forum. (2018). *Decarbonising Maritime Transport - Pathways to zero-carbon shipping by 2035*. Paris: OECD Publishing. Retrieved from <https://www.oecd-ilibrary.org/docserver/b1a7632c-en.pdf?expires=1700503429&id=id&accname=guest&checksum=611042B8BA5E89A2A801032492817DD8>
- IPCC. (2019). *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change. Retrieved from <https://www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>
- IRENA. (2013). *Production of Bio-methanol*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency. Retrieved from https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2013/IRENA-ETSAP-Tech-Brief-I08-Production_of_Bio-methanol.pdf?rev=5ea20e7c84c4472f8eed8111ff8daf9#:~:text=Bio%2D%20methanol%20can%20be%20produced,hydro%2D%20gen%20and%20other%20molecules.
- IRENA. (2020). *Green hydrogen cost reduction: Scaling up electrolyzers to meet the 1.5°C climate goal*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency. Retrieved from https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Dec/IRENA_Green_hydrogen_cost_2020.pdf
- IRENA. (2021a). *A Pathway to Decarbonise The Shipping Sector by 2050*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency. Retrieved from <https://www.irena.org/Publications/2021/Oct/A-Pathway-to-Decarbonise-the-Shipping-Sector-by-2050>
- IRENA. (2021b). *Innovation Outlook: Renewable methanol*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency. Retrieved from <https://www.irena.org/publications/2021/Jan/Innovation-Outlook-Renewable-Methanol>
- IRENA. (2022a). *Geopolitics of the Energy Transformation: the Hydrogen Factor*. Abu Dhabi: IRENA. Retrieved from <https://www.irena.org/publications/2022/Jan/Geopolitics-of-the-Energy-Transformation-Hydrogen>
- IRENA. (2022b). *Hydrogen*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency. Retrieved from <https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Hydrogen>

- ITF. (2020). *Navigating towards cleaner maritime shipping: Lessons from the Nordic region*. Paris: International Transport Forum. Retrieved from <https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/navigating-cleaner-maritime-shipping.pdf>
- Kawasaki Heavy Industries. (2019). *World's First Liquefied Hydrogen Carrier SUISSO FRONTIER Launches Building an International Hydrogen Energy Supply Chain Aimed at Carbon-free Society*. Tokyo: Kawasaki Heavy Industries. Retrieved from https://global.kawasaki.com/en/corp/newsroom/news/detail/?f=20191211_3487&wovn=it
- Knowler, G. (2021, November 27). *Container lines blast IMO for 'stalling' on fuel research*. Retrieved from Journal of Commerce: https://www.joc.com/article/container-lines-blast-imo-stalling-fuel-research_20211127.html
- London Government. (2021, 06 23). *Mayor launches England's first hydrogen double decker buses*. Retrieved from london.gov.uk: <https://www.london.gov.uk/press-releases/mayoral/englands-first-hydrogen-double-deckers-launched>
- Longspur Reserch. (2023). *Methanol Gains Momentum*. London: Longspur Capital Markets. Retrieved from <https://www.methanol.org/wp-content/uploads/2023/07/Methanol-and-shipping-210323.pdf>
- Madsen, S. H., & Hansen, T. (2019). Cities and climate change - examining advantages and challenges of urban climate change experiments. *European Planning Studies*, 27(2), 282–299. doi:<https://doi.org/10.1080/09654313.2017.1421907>
- Maersk. (2022a). *Maersk explores new ways to accelerate green fuel production*. Copenhagen: Maersk. Retrieved from <https://www.maersk.com/news/articles/2022/03/28/maersk-explores-new-ways-to-accelerate-green-fuel-production>
- Maersk. (2022b). *Sustainability Report 2022*. Copenhagen: Maersk. Retrieved from https://www.maersk.com/~/_/media_sc9/maersk/corporate/sustainability/files/resources/2022/maersk-sustainability-yearly-report_2022.pdf?la=en&hash=CF327884FAD1B65ABB57607BA9B721CA
- Maersk. (2023a). *Biofuel – a sustainable change without having to change anything else*. Compeaghen: Maersk. Retrieved from https://www.maersk.com/~/_/media_sc9/maersk/solutions/transportation-services/eco-delivery/info-sheet-about-bio-fuels-maersk.pdf
- Maersk. (2023b). *EU Commission President Names Landmark Methanol Vessel “Laura Mærsk”*. Copenhagen: Maersk. Retrieved from <https://www.maersk.com/news/articles/2023/09/14/eu-commission-president-names-landmark-methanol-vessel-as-laura-maersk>
- Maersk. (2023c). *Maersk orders six methanol powered vessels*. Copenhagen: Maersk. Retrieved from <https://www.maersk.com/news/articles/2023/06/26/maersk-orders-six-methanol-powered-vessels>
- Maersk. (2023d). *Maersk to deploy first large methanol-enabled vessel on Asia - Europe trade lane*. Copenhagen: Maersk. Retrieved from <https://www.maersk.com/news/articles/2023/12/07/maersk-to-deploy-first-large-methanol-enabled-vessel-on-asia-europe-trade-lane>

- Mallouppas, G., & Yfantis, E. (2021). Decarbonization in Shipping Industry: A Review of Research, Technology Development, and Innovation Proposals. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(4), 415. doi:<https://doi.org/10.3390/jmse9040415>
- MAN Energy Solutions. (2020). *MAN B&W two-stroke engine operating on ammonia*. Copenhagen: MAN Energy Solutions.
- Marine Insight. (2024). *20 Largest Container Shipping Companies In The World In 2024*. Marine Insight. Retrieved from <https://www.marineinsight.com/know-more/10-largest-container-shipping-companies-in-the-world/>
- Meet Hydrogen. (2021, 09 21). *Foshan - the hydrogen technology city*. Retrieved from <https://meethydrogen.com/>: <https://meethydrogen.com/resource/foshan-the-hydrogen-technology-city>
- MMM Center for Zero Carbon Shipping. (2021). *Ammonia Documentation for NavigaTE 1.0*. Copenhagen: Mærsk Mc-Kinney Møller Center for Zero Carbon Shipping.
- MMM Center for Zero Carbon Shipping. (2022). *The role for investors in decarbonizing global shipping*. Copenhagen: Mærsk Mc-Kinney Møller Center for Zero Carbon Shipping. Retrieved from <https://www.zerocarbonshipping.com/publications/the-role-for-investors-in-decarbonizing-global-shipping/>
- MSC. (2022a). *MSC Introduces New Biofuel Solution to Help Customers Cut Supply Chain Emissions*. Geneva: MSC. Retrieved from <https://www.msc.com/en/newsroom/news/2022/june/msc-introduces-new-biofuel-solution-to-help-customers-cut-supply-chain-emissions>
- MSC. (2022b). *MSC's 2022 Sustainability Report*. Geneva: MSC. Retrieved from https://www.msc.com/-/media/files/sustainability/reports/2022_msc_sustainability_report.pdf
- Notteboom, T., Pallis, A., & Rodrigue, J.-P. (2022). *Port Economic, Management and Policy*. New York: Routledge. Retrieved from <https://www.routledge.com/Port-Economics-Management-and-Policy/Notteboom-Pallis-Rodrigue/p/book/9780367331559>
- Notteboom, T., Satta, G., Persico, L., Vottero, B., & Rossi, A. (2023). Operational productivity and financial performance of pure transshipment hubs versus gateway terminals: An empirical investigation on Italian container ports. *Research in Transportation Business & Management*, 47. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2023.100967>
- O'Farrell, S. (2023, October 19). *Tanger Med's unique trajectory*. Retrieved from FDI Intelligence: <https://www.fdiintelligence.com/content/feature/tanger-meds-unique-trajectory-83006>
- Port of Rotterdam. (2020). *Strategy and research*. Rotterdam. Retrieved from <https://www.portofrotterdam.com/en/port-future/energy-transition/strategy-and-research>
- Port of Rotterdam. (2021). *Waterfront Shipping takes leadership role in demonstrating simplicity of methanol bunkering to marine industry*. Rotterdam: Port of Rotterdam. Retrieved from <https://www.portofrotterdam.com/en/news-and-press-releases/waterfront-shipping-takes-leadership-role-demonstrating-simplicity-methanol>
- Port of Rotterdam. (2022). *Gidara Energy AMR will convert non-recyclable waste into advanced biofuels*. Rotterdam: Port of Rotterdam. Retrieved from

<https://www.portofrotterdam.com/en/news-and-press-releases/gidara-energy-amr-will-convert-non-recyclable-waste-into-advanced-biofuels>

- Port of Rotterdam. (2023a). *Rotterdam is already home to Europe's largest biofuel cluster*. Rotterdam: Port of Rotterdam. Retrieved from <https://www.portofrotterdam.com/en/news-and-press-releases/rotterdam-is-already-home-to-europes-largest-biofuel-cluster>
- Port of Rotterdam. (2023b). *Rotterdam is the port for import, export and bunkering of LNG in Europe*. Retrieved from Port of Rotterdam: <https://www.portofrotterdam.com/en/news-and-press-releases/gidara-energy-amr-will-convert-non-recyclable-waste-into-advanced-biofuels>
- Poseidon Principles. (2023). *Poseidon Principles 2023 Annual Disclosure Report*. Copenhagen: Poseidon Principles Association. Retrieved from <https://www.poseidonprinciples.org/finance/wp-content/uploads/2023/12/Poseidon-Principles-2023-Annual-Disclosure-Report.pdf>
- Reuters. (2023). *Shipowners, port operators ramp up methanol-fuelling projects*. Reuters. Retrieved from [https://www.reuters.com/markets/commodities/shipowners-port-operators-ramp-up-methanol-fuelling-projects-2023-08-21/#:~:text=*CMA%20CGM%20\(CMACG.,%243%20billion%20deal%20with%20CS SC](https://www.reuters.com/markets/commodities/shipowners-port-operators-ramp-up-methanol-fuelling-projects-2023-08-21/#:~:text=*CMA%20CGM%20(CMACG.,%243%20billion%20deal%20with%20CS SC)
- Riaz, A. (2021). *Harnessing Liquid Air Cold Energy for Performance Enhancement of Hydrogen*. Yeungnam: Yeungnam University. Retrieved from https://www.energy-proceedings.org/wp-content/uploads/2022/03/Proceedings-ICAE2021_277.pdf
- Rodrigue, J.-P., & Notteboom, T. (2010). Foreland-based regionalization: Integrating intermediate hubs with. *Research in Transportation Economics*, 27(1), 19-29. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0739885909000626>
- Rotterdam, P. o. (2022). *Ports of Rotterdam and Gothenburg kick off Green Corridor initiative for sustainable shipping*. Rotterdam: Port of Rotterdam. Retrieved from <https://www.portofrotterdam.com/en/news-and-press-releases/port-of-rotterdam-and-port-of-gothenburg-kick-off-green-corridor-initiative>
- SEA\LNG & SGMF. (2019). *Well-To-Wake GHG Emission Study On LNG As A Marine Fuel*. London: Thinkstep. Retrieved from https://sea-lng.org/wp-content/uploads/2019/04/190410_SEALNG_GHG_Messaging_Document_DIGITAL-compressed.pdf
- Shell. (2021). *Shell and MSC sign collaboration agreement on decarbonising shipping*. Amsterdam: Shell. Retrieved from <https://www.shell.com/business-customers/trading-and-supply/trading/news-and-media-releases/shell-and-msc-sign-collaboration-agreement-on-decarbonising-shipping.html>
- Sherrard, A. (2019). Mette Maersk maritime biofuel-pilot a resounding success. *Bioenergy International*. Retrieved from <https://bioenergyinternational.com/mette-maersk-maritime-biofuel-pilot-a-resounding-success/>
- Sustainable Ships. (2023). *CMA CGM*. Sustainable Ships. Retrieved from <https://www.sustainable-ships.org/rules-regulations/cma-cgm>

- Tanger-Med. (2020). *CSR Report 2020*. Tangier: Tanger-Med. Retrieved from <https://www.tangermedport.com/wp-content/uploads/2022/08/Rapport-RSE-2020-VENG.pdf>
- Tanger-Med. (2023). *Energy transition*. Tangier: Tanger-Med. Retrieved from <https://www.tangermed.ma/en/csr/energy-transition/>
- Teréga. (2023). *Synthetic Methane: Teréga Working Today For The Future Of Gas*. Pau: Teréga. Retrieved from <https://www.terega.fr/en/gas-future/new-gases-and-sustainable-processes/synthetic-methane-terega-working-today-for-the-future-of-gas#:~:text=This%20means%20that%20synthetic%20methane,Pyro%2Dgasification>
- TNO. (2020). *E-Fuels Offer An Opportunity To Reduce Carbon Emissions*. Amsterdam: TNO Innovation for life. Retrieved from <https://www.tno.nl/en/newsroom/2020/09/fuels-crucial-sustainable-heavy/>
- Total Energies. (2021). *Energy transition in shipping: First BioLNG production project at a French port*. Marseille: Total Energies. Retrieved from <https://totalenergies.com/media/news/press-releases/energy-transition-shipping-first-biolng-production-project-french-port>
- UMAS. (2022). *Future Maritime Fuels in the USA – the options and potential pathways*. London: UMAS.
- UNCTAD. (2023). *Review of Maritime Transport 2023*. New York: United Nations Publications. Retrieved from https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2023_en.pdf
- ValenciaPort. (2016). *PAV's Environmental and Energy Policy*. Valencia: ValenciaPort. Retrieved from <https://www.valenciaport.com/wp-content/uploads/politicaENG.pdf>
- ValenciaPort. (2021). *Project Port Authority of*. Valencia: ValenciaPort. Retrieved from <https://sustainableworldports.org/wp-content/uploads/Supporting-info-PAV-Strategy-towards-zero-emissions-by-2030-.pdf>
- ValenciaPort. (2023). *Valencia, Port of Hydrogen*. Valencia: ValenciaPort. Retrieved from <https://www.valenciaport.com/en/valencia-port-of-hydrogen/#:~:text=%2D%20Valencia%20is%20the%20Port%20of,installation%20in%20real%20operating%20conditions>.
- Wallenius Wilhelmsen. (2023). *Wallenius Wilhelmsen's next generation vessels are coming*. Retrieved from Wallenius Wilhelmsen: <https://www.walleniuswilhelmsen.com/news/wallenius-wilhelmsens-next-generation-vessels-are-coming>
- Xycle. (2023). *CHEMICAL RECYCLING,*. Retrieved from Xycle: <https://xyclegroup.com/>
- Zero Emission Services. (2023). *Zero Emission Services: all-in concept for emission-free inland shipping*. Retrieved from Zero Emission Services: <https://zeroemissionservices.nl/en/homepage/>