

**EXPERT PANEL FOR POLLUTING EMISSIONS REDUCTION
EXPAPER**

**Combustibili alternativi per il settore
marittimo**

**Giorgio Zamboni
Università di Genova**

Consiglio Nazionale delle Ricerche



NAPOLI 24-25 NOVEMBRE 2022

Obiettivi IMO

- - 40%* delle emissioni di CO₂ per transport work ** per l'anno 2030
- - 70%* delle emissioni di CO₂ per transport work per l'anno 2050
- - 50%* delle emissioni di gas serra per l'anno 2050
- - 100% delle emissioni di gas serra “as soon as possible in this century”

* rispetto alle emissioni registrate nel 2008

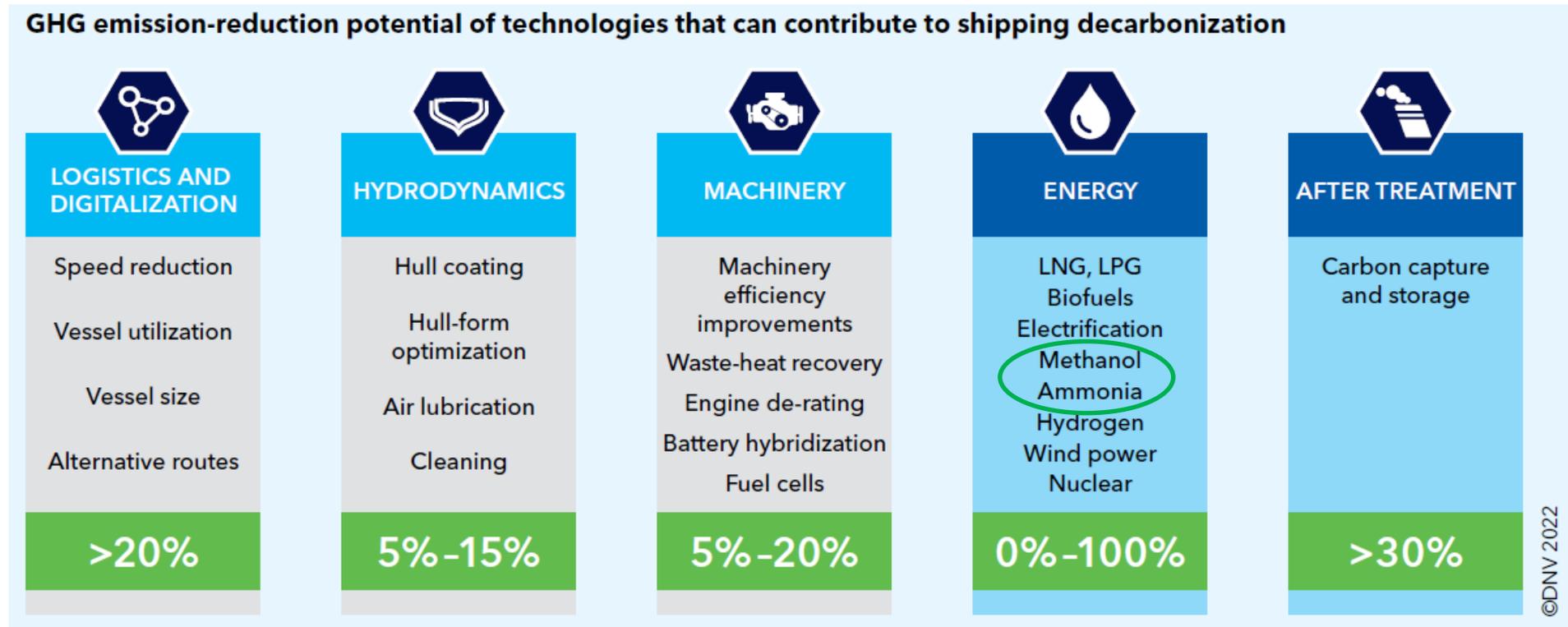
** transport work dipendente da portata/stazza lorda e velocità di riferimento

Obiettivi per il 2050 rivalutati nel 2023 (tra le proposte anche completa decarbonizzazione)

Obiettivi UE

- Inserimento del settore marittimo nell'Emissions Trading System
- Aggiornamento della "Renewable Energy Directive"
- Riduzione "well-to-wake GHG intensity" per promuovere l'utilizzo di combustibili carbon-neutral: -75% nel 2050 rispetto a 2020 (proposta di Regolamento Fuel EU Maritime, in approvazione in questo periodo per essere applicato a partire dal 2024/2025)

Tecnologie per la decarbonizzazione del settore marittimo



Fonte: DNV Maritime Forecast 2050, 2022

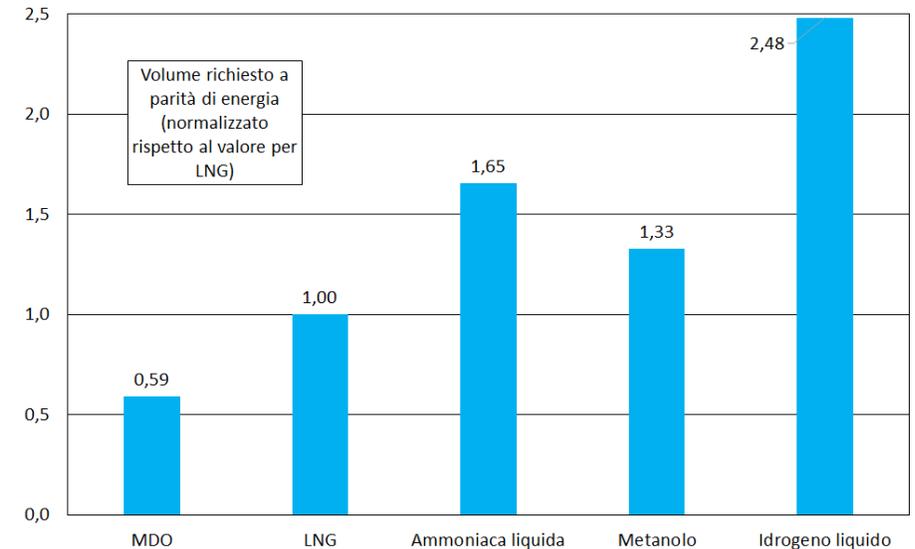
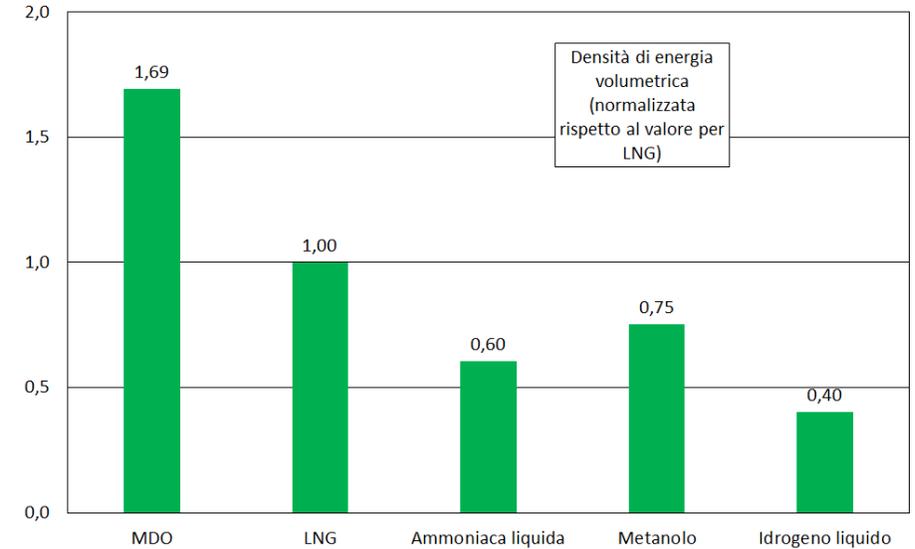
Proprietà fisiche dei combustibili

	MDO	Metano/LNG	Ammoniaca	Metanolo	Idrogeno
Densità (STP ¹) [kg/m ³]	< 900	0,72/430-470 ¹	0,73/682 ¹	790	0,08/71 ¹
Punto di ebollizione a 1 bar [°C]	170-350	-161,5	-33	65	-253
Calore di vaporizzazione [kJ/kg]	270-300	510	1.370	1.100	461

¹ STP = standard temperature and pressure; ammoniaca, dati per stato liquido a 10 bar, t = -33 °C; LNG, dati per stato liquido a 1 bar, t = -162 °C; idrogeno, dati per stato liquido a 1 bar, t = -253 °C)

Proprietà chimiche dei combustibili

	MDO	Metano/LNG	Ammoniaca	Metanolo	Idrogeno
Contenuto di O ₂ in massa [%]	0	0	0	49,93	0
Contenuto di H in massa [%]	14	25,13	17,79	12,58	100
Contenuto di C in massa [%]	86	74,87	0	37,48	0
Potere calorifico inferiore [MJ/kg]	42,5/42	50/49	18,7	19,7-20,26	120
Densità di energia volumetrica [MJ/m ³]	35.700	32,50/21.100	13,7/12.750	15.871	9,60/8.500
Rapporto aria-combustibile stechiometrico [kg/kg]	14,5	17,65	6,06	6,50	34,20
Emissione specifica di CO ₂ [g/MJ]	72,8	54,87	0	68,44	0
Temperatura adiabatica di fiamma [K]	2.300	2.225	1.850	1.910-2.143	2.390-2.483



Proprietà dei combustibili

	MDO	Metano/LNG	Ammoniaca	Metanolo	Idrogeno
Limite di infiammabilità inferiore in aria riferito a λ	0,48	0,59	0,70	0,23	0,15
Limite di infiammabilità superiore in aria riferito a λ	1,35	1,99	1,54	1,81	10,57
Energia minima di accensione in aria [mJ]		0,28	8	0,14	0,011-0,02

	MDO	Metano/LNG	Ammoniaca	Metanolo	Idrogeno
Numero di ottano (RON)	15-25	120	> 130	109	130 ($\lambda=2,5$)
Numero di cetano	> 35	-10	-	3	-
Velocità fronte di fiamma laminare [m/s] (condizione stechiometriche)	-	0,34 – 0,38	0,015 – 0,07	0,36 – 0,43	3,5

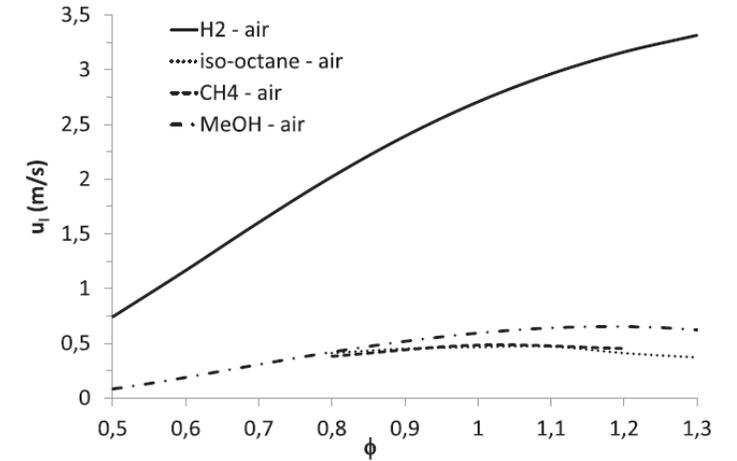
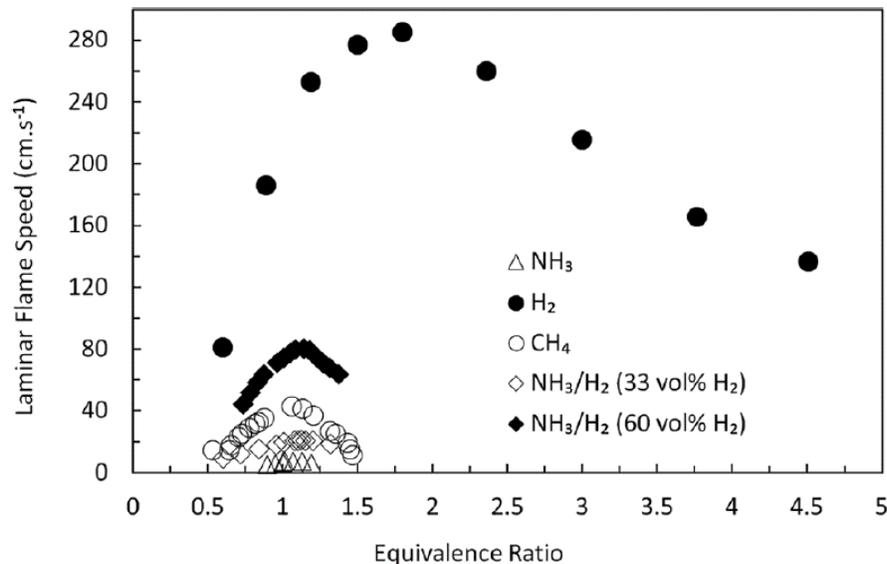


Fig. 5. Laminar burning velocities of hydrogen (H₂), iso-octane, methane (CH₄) and methanol (MeOH) at 1 bar and 360 K.

Fonte: Verhelst, S., Turner, J.W.G., Sileghem, L., Vancoillie, J., Methanol as a fuel for internal combustion engines. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2018.10.001>

Fonte: Lesmana, H., Zhang, Z., Li, X., Zhu, M., Xu, W., Zhang, D., NH₃ as a Transport Fuel in Internal Combustion Engines: A Technical Review. *Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASME*, 2019. DOI: 10.1115/1.4042915

Motori ad accensione per compressione dual-fuel

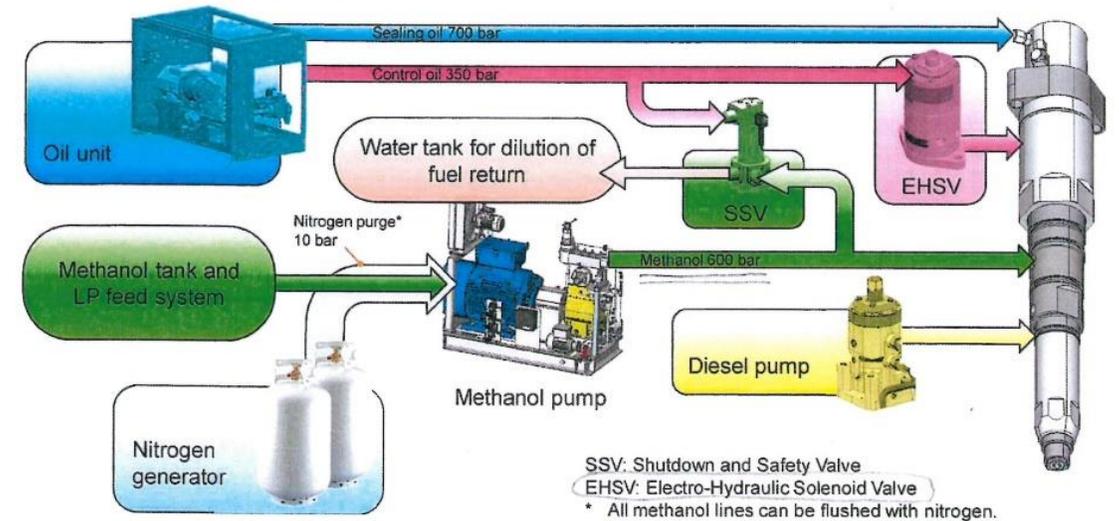
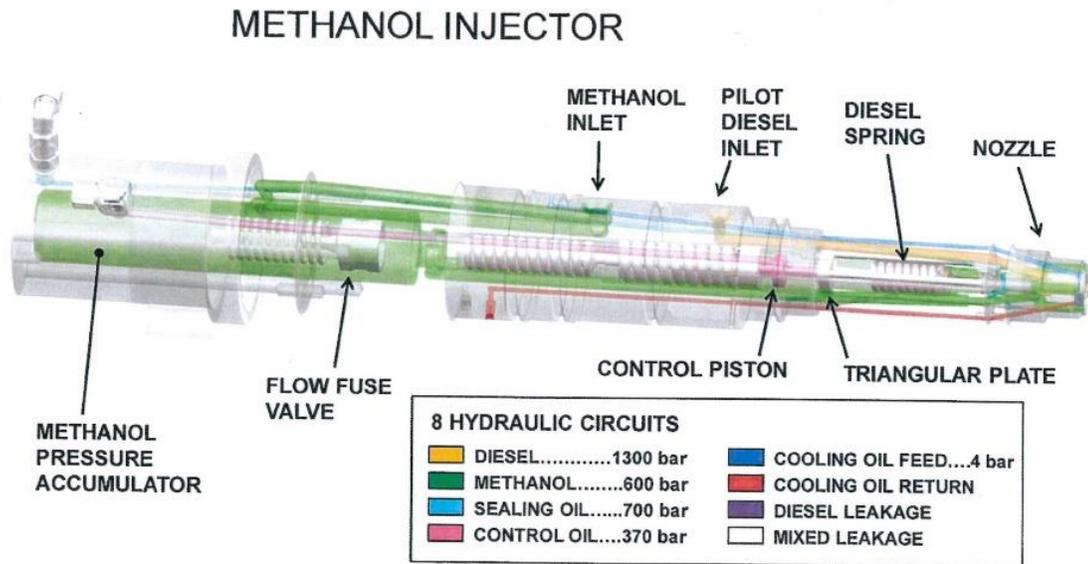
- Motori dual-fuel, nei quali l'iniezione di combustibile convenzionale permette l'accensione della carica aria-combustibile alternativo (metanolo o ammoniacca)
- Tasso di sostituzione: quota di energia fornita dal combustibile alternativo rispetto al totale:

$$TS = \frac{m_{\text{combustibile alternativo}} \times PCI_{\text{combustibile alternativo}}}{(m_{\text{combustibile alternativo}} \times PCI_{\text{combustibile alternativo}} + m_{\text{MGO}} \times PCI_{\text{MGO}})}$$

Tecnologie disponibili:

1. Iniezione del combustibile alternativo nel condotto di aspirazione (fumigation concept, opzione per retrofit, ma limiti sul tasso di sostituzione)
2. Iniezione diretta di una miscela gasolio/combustibile alternativo in prossimità del PMS (limiti di miscibilità)
3. Iniezione diretta dei due combustibili con singolo iniettore
4. Iniezione diretta dei due combustibili con doppio iniettore

Iniezione diretta con singolo iniettore

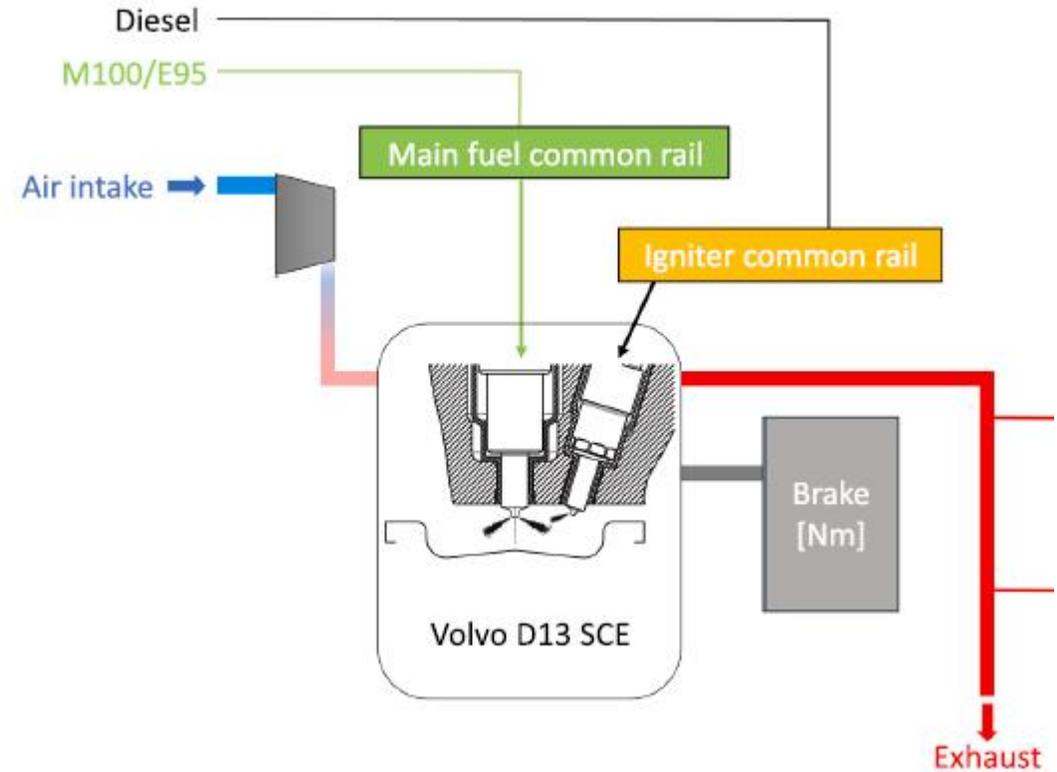
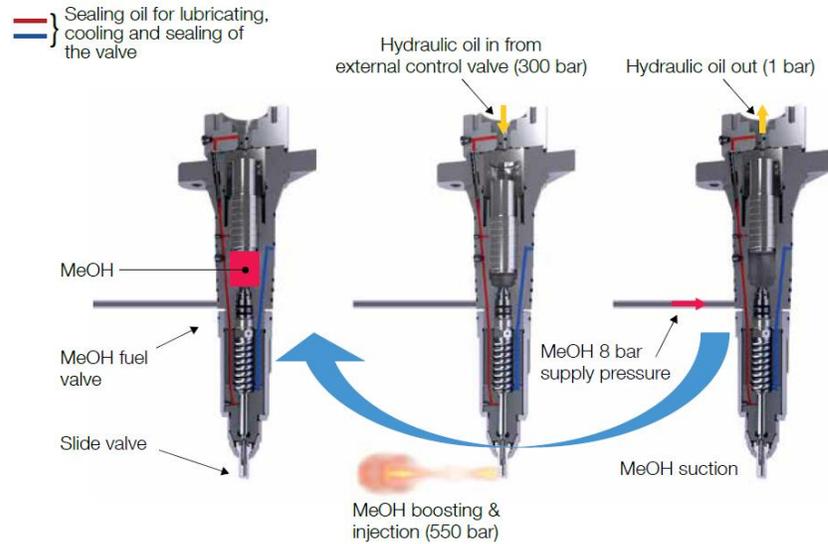


- Motore Wartsila 32 Methanol: tasso di sostituzione all'85% del carico massimo del motore = 92%, dovuto alla portata minima iniettabile di gasolio da parte dell'iniettore
- Tasso di sostituzione variabile con il carico
- Riduzione CO₂: 92% nel caso di green methanol (well-to-wake) → rendimento motore costante al variare del combustibile

Fonti: Wartsila Gas Engine Development & Methanol Adaptation, 2015; Wartsila 32 Methanol – The power to reach carbon-neutral, webinar 22 marzo 2022

Iniezione diretta con doppio iniettore

Principle of the BFIV – Booster Fuel Injection Valve.



Fonti:

Using Methanol Fuel in the MAN B&W ME-LGI Series

Saccullo, M., Nygren, A., Benham, T., Denbratt, I., Alcohol flexible HD single cylinder diesel engine tests with separate dual high pressure direct fuel injection. *Fuel*, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120478>

Emissioni

- Limitata disponibilità di dati sperimentali in letteratura per motori dual fuel ad iniezione diretta
- Influenza delle interazioni tra i due combustibili sulla combustione e formazione di inquinanti al variare del tasso di sostituzione

Metanolo

- riduzione delle emissioni di SO_x , PM e NO_x
- Formaldeide?

Ammoniaca:

- Eliminazione degli inquinanti contenenti carbonio
- Contributo alle emissioni di NO_x da NO fuel
- Formazione N_2O
- Ammonia slip

Emissioni di gas serra well-to-wake

Combustibile	HFO	MGO	LNG	Bio-LNG	E-LNG	Metanolo	Bio-metanolo	E-metanolo	NG-ammonia	E-ammonia
Riferimento	Emissioni di gas serra well-to-wake in [gCO _{2eq} /MJ]									
1)	86,6	-	80,9	51,1	-	89,4	18,2	-	-	-
2)	96,5	88,9	93,8	55,5	-	93,8	6	-	-	-
3)	200,0	194,4	186,1	100,0	-	216,7	27,8	-	-	-
4)	-	90,8	85,7	-	1,7	-	-	0,9	126,7	5,3
5)	-	-	57,5	4	0	-	8	0	17	0
6)	-	90,8	76,3	-	57,8*	103,2	16,2	71,9*	126,3	0,0

* In questo riferimento gli elettrocombustibili sono considerati combustibili rinnovabili di origine non biologica (RFNBO)

Fonti:

- 1) Brynolf, S., Fridell, E., Andersson, K., *Environmental assessment of marine fuels: liquefied natural gas, liquefied biogas, methanol and bio-methanol. Journal of Cleaner Production*, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.03.052>
- 2) Foretich, A., Zaimas, G. G., Hawkins, T. R., Newes, E., *Challenges and opportunities for alternative fuels in the maritime sector. Maritime Transport Research*, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.martra.2021.100033>
- 3) Balcombe, P., Brierley, J., Lewis, C., Skatvedt, L., Speirs, J., Hawkes, A., Staffell, I., *How to decarbonise international shipping: Options for fuels, technologies and policies. Energy Conversion and Management*, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.12.080>
- 4) Lindstad, E., Lagemann, B., Rialland, A., Gamlem, G. M., Valland, A., *Reduction of maritime GHG emissions and the potential role of E-fuels. Transportation Research Part D*, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.103075>
- 5) Lagemann, B., Lindstad, E., Fagerholt, K., Rialland, A., Erikstad, S. O., *Optimal ship lifetime fuel and power system selection. Transportation Research Part D*, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.103145>
- 6) *Fuel EU Maritime (2021) + Direttiva UE n.2001 (2018).*

Altri aspetti

- **Ammoniaca: corrosiva, tossica, irritante per le vie respiratorie, ecc.**
- **Metanolo: tossico**
- **Sviluppo delle tecnologie: MCI già disponibili per metanolo, previsti nel 2025/2026 per ammoniaca**
- **Sviluppo dei regolamenti per bunkeraggi, utilizzo a bordo, ecc.: secondo DNV, metanolo già normato, ammoniaca nel 2028**
- **Influenza del sistema di stoccaggio su densità di energia**
- **Produzione combustibili da fonti rinnovabili: disponibilità e costi**
- **Rete di distribuzione**
- **...**

UniGe

DIME