

**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 CO<sub>2</sub> per transport work \*\* per l'anno 2030
- - 70%\* delle emissioni di CO<sub>2</sub> 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

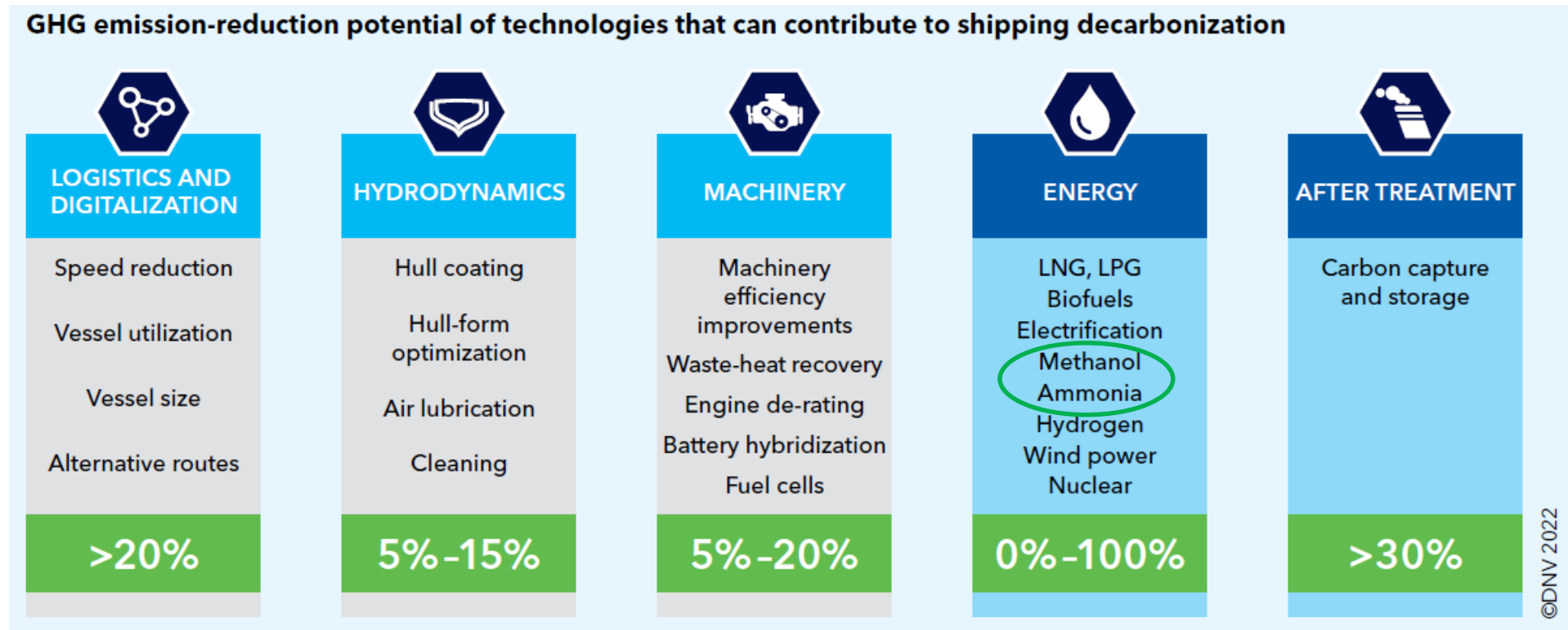
\*\* transport work dipendente da portata/stazza lorda e velocità di riferimento

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

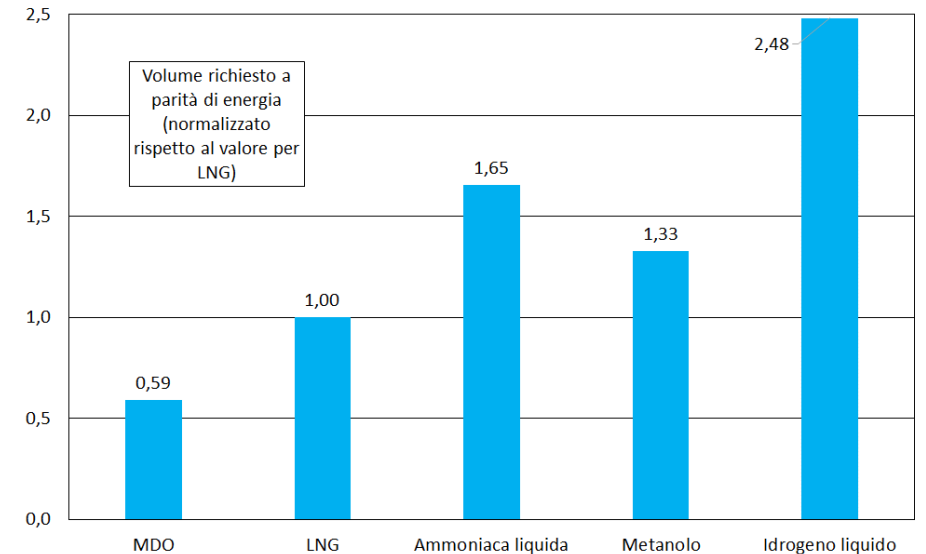
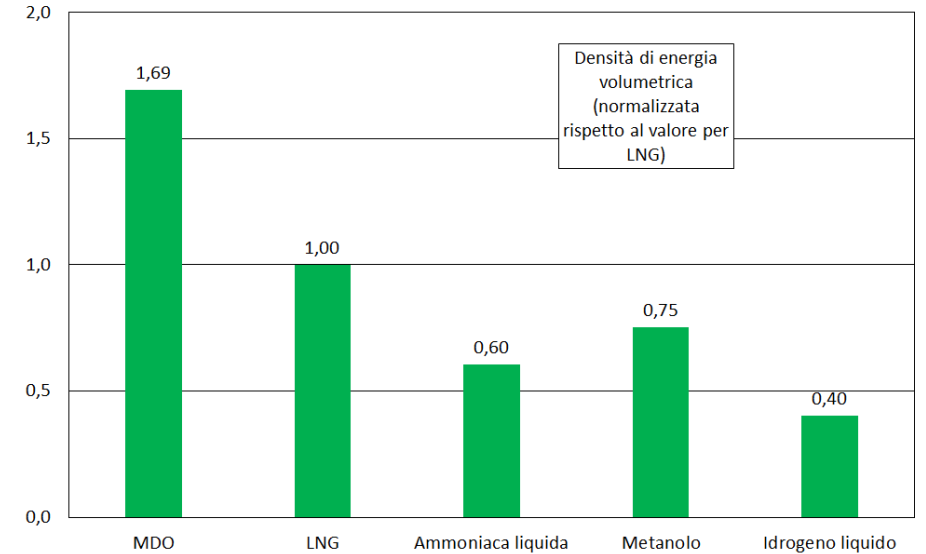
# Proprietà fisiche dei combustibili

	MDO	Metano/LNG	Ammoniaca	Metanolo	Idrogeno
Densità (STP <sup>1</sup> ) [kg/m <sup>3</sup> ]	< 900	0,72/430-470 <sup>1</sup>	0,73/682 <sup>1</sup>	790	0,08/71 <sup>1</sup>
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

<sup>1</sup> 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 <sub>2</sub> 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 <sup>3</sup> ]	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 <sub>2</sub> [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 $\lambda$	0,48	0,59	0,70	0,23	0,15
Limite di infiammabilità superiore in aria riferito a $\lambda$	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

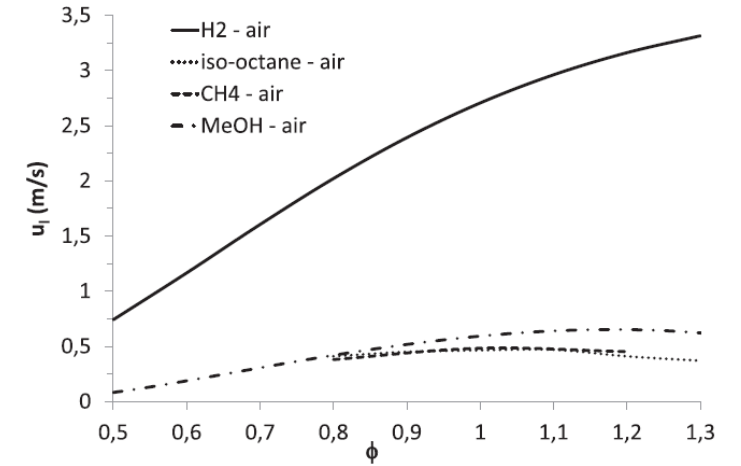
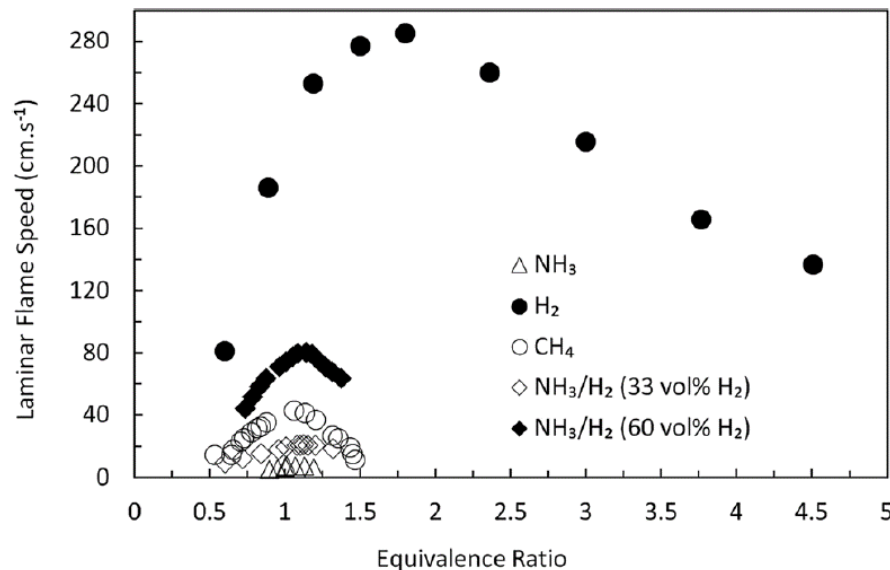


Fig. 5. Laminar burning velocities of hydrogen (H<sub>2</sub>), iso-octane, methane (CH<sub>4</sub>) and methanol (MeOH) at 1 bar and 360 K.

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., NH<sub>3</sub> 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:

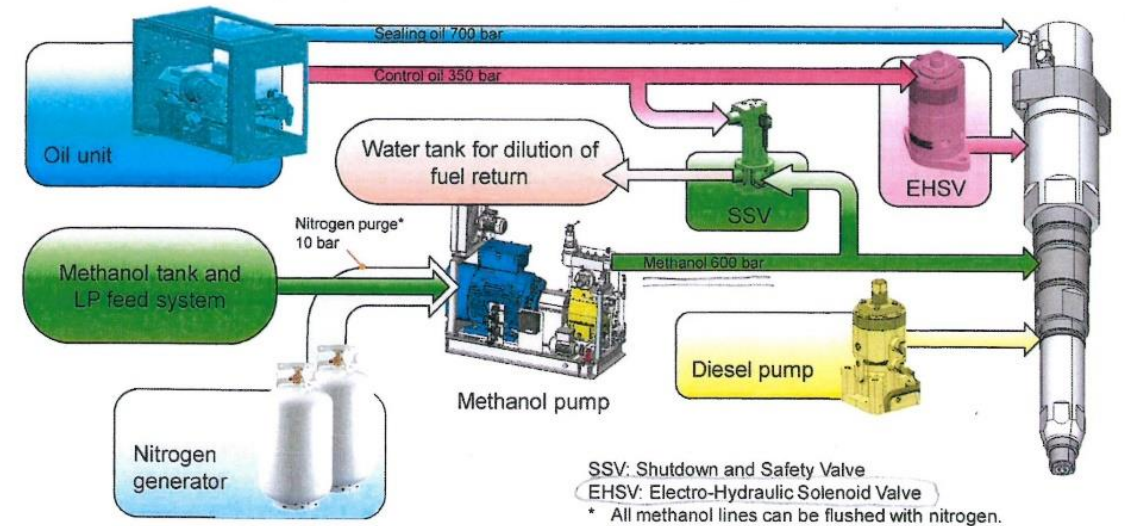
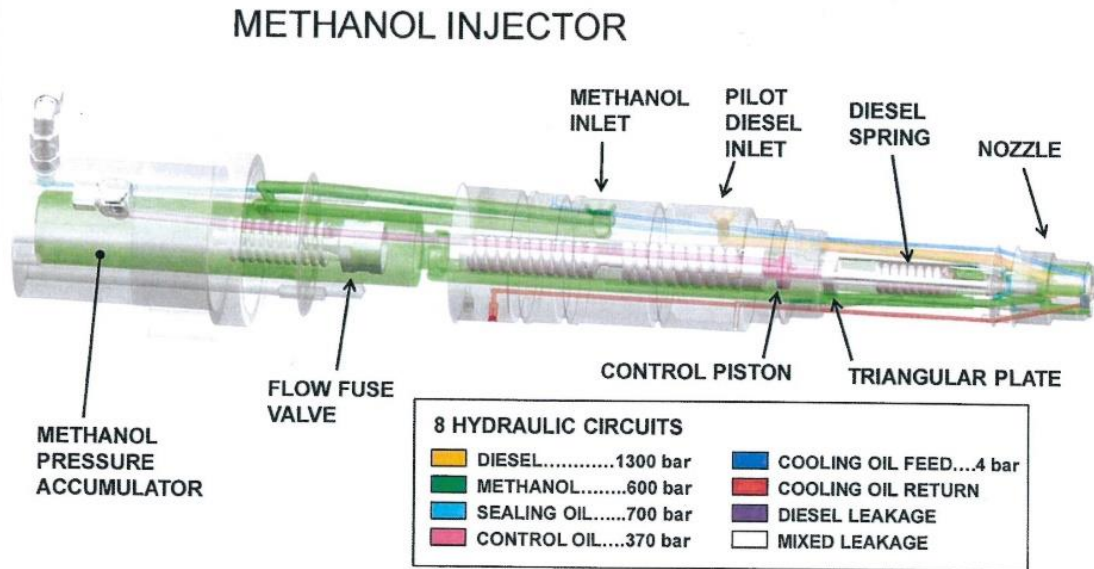
$$TS = \frac{m_{\text{combustibile alternativo}} \times PCI_{\text{combustibile alternativo}}}{(m_{\text{combustibile alternativo}} \times PCI_{\text{combustibile alternativo}} + m_{\text{MGO}} \times PCI_{\text{MGO}})}$$

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

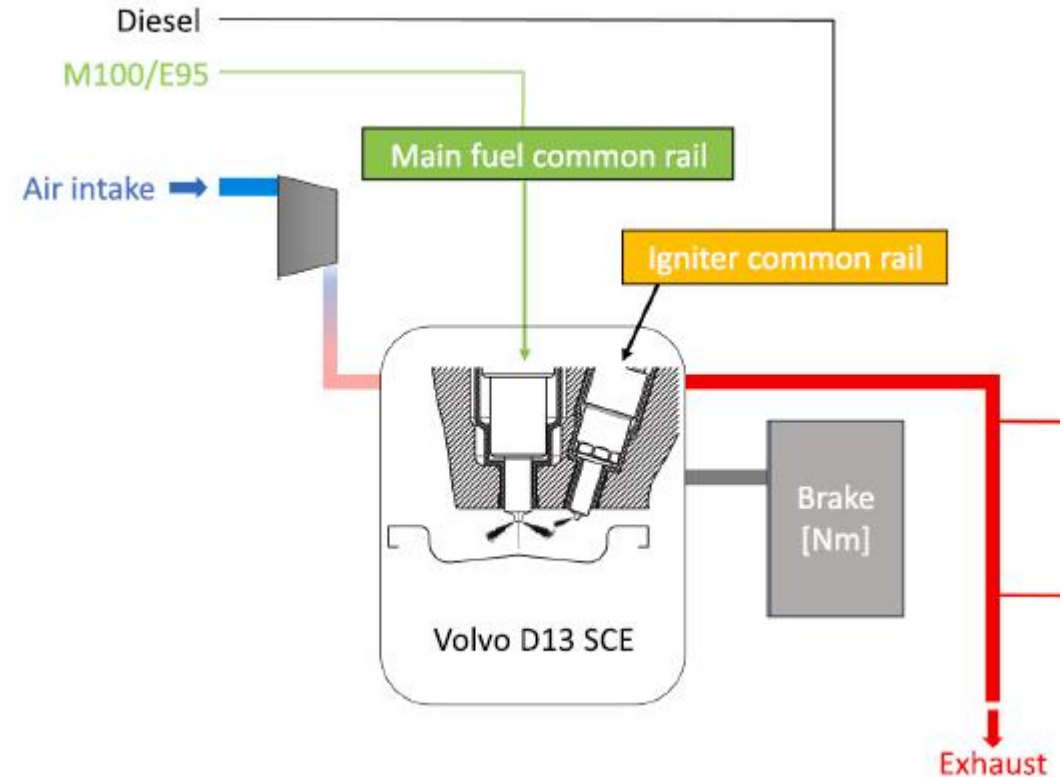
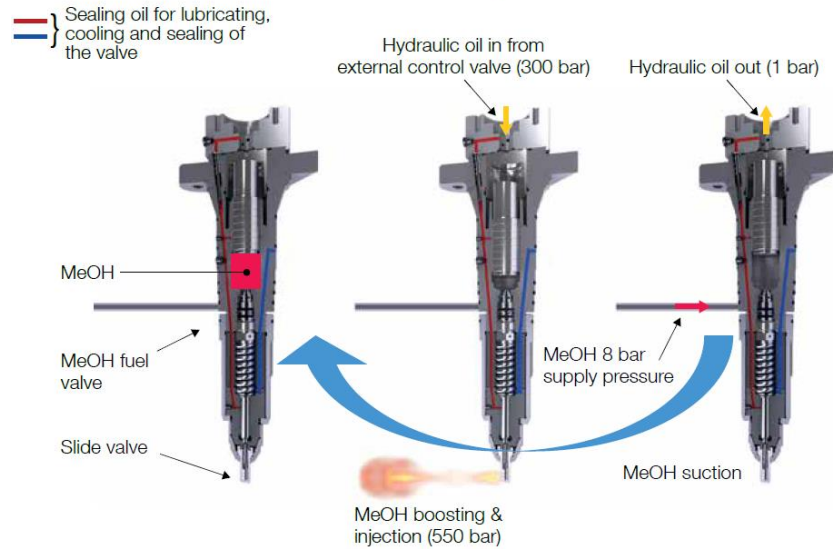


- Motore Wartsila 32 Methanol: tasso di sostituzione all'85% del carico massimo del motore = 92%, dovuto alla portata minima iniettabile di gasolio da parte dell'iniettore
- Tasso di sostituzione variabile con il carico
- Riduzione CO<sub>2</sub>: 92% nel caso di green methanol (well-to-wake) → rendimento 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  $\text{SO}_x$ , PM e  $\text{NO}_x$
- Formaldeide?

## Ammoniaca:

- Eliminazione degli inquinanti contenenti carbonio
- Contributo alle emissioni di  $\text{NO}_x$  da NO fuel
- Formazione  $\text{N}_2\text{O}$
- 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
<b>Riferimento</b>	Emissioni di gas serra well-to-wake in [gCO <sub>2eq</sub> /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*	<b>126,3</b>	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**