

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria dell'Energia

***Relazione per la prova finale
«Motori dual fuel con particolare
attenzione ai motori navali»***

Tutor universitario: Prof.ssa Anna Stoppato

Laureando: Vladan Marinovic

Matricola: 1221148

Padova, 15/07/2022

Motore ad accensione per compressione (motore diesel): è **affidabile** e ha un **elevato rendimento termico**, ma presenta **emissioni inquinanti e nocive**



Interesse nel miglioramento del motore tramite l'utilizzo di combustibili alternativi



Gas naturale:

- ampiamente disponibile ed economico
- eco-compatibile
- elevato numero di ottano

I motori che usano il gas naturale come combustibile principale sono chiamati **dual fuel**: la combustione necessita di una piccola quantità di diesel

In ambito navale la tecnologia dual fuel è diffusa e consolidata, in quanto permette di adeguare le emissioni ai livelli stabiliti dalle diverse normative

- Dimostrare che **l'impiego del gas** naturale come combustibile principale nei motori ad accensione per compressione è una valida **soluzione ai problemi legati alle emissioni** dei motori diesel
 - ↳ Viene proposta un'analisi comparativa delle prestazioni e delle emissioni (NO_x , CO, HC, PM, CO_2) ottenute dal motore alimentato a diesel e dallo stesso motore funzionante in modalità dual fuel
- Capire in che modo vengono implementati concretamente i benefici della tecnologia dual fuel
 - ↳ Vengono analizzate le principali caratteristiche costruttive ed operative del motore navale **W50DF**

Component	Typical analysis (vol.%)	Range (vol.%)
Methane	94.9	87.0–96.0
Ethane	2.5	1.8–5.1
Propane	0.2	0.1–1.5
Isobutane	0.03	0.01–0.3
<i>n</i> -Butane	0.03	0.01–0.3
Isopentane	0.01	Trace to 0.14
<i>n</i> -Pentane	0.01	Trace to 0.14
Hexane	0.01	Trace to 0.06
Nitrogen	1.6	1.3–5.6
Carbon dioxide	0.7	0.1–1.0
Oxygen	0.02	0.01–0.1
Hydrogen	Trace	Trace to 0.02

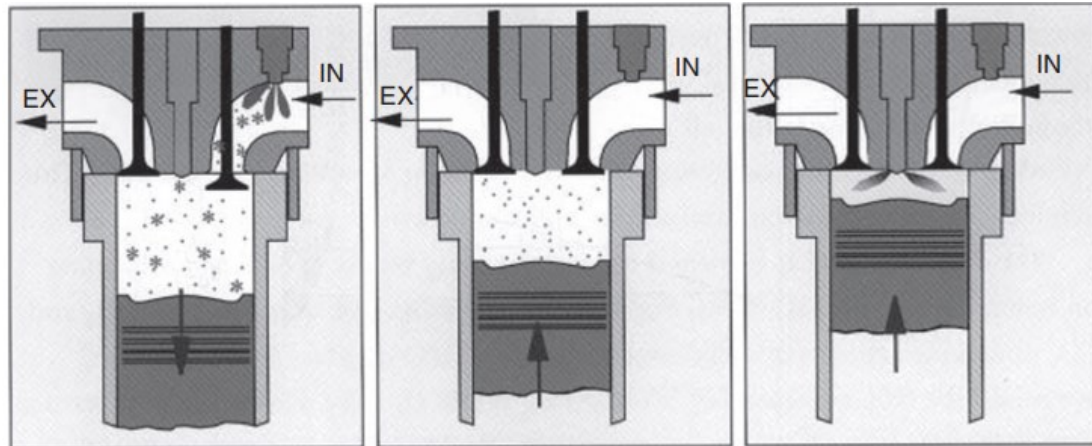
Fuel properties	Natural gas	Diesel	Gasoline
Low heating value (MJ/kg)	48.6	42.5	43.5
Heating value of stoichiometric mixture (MJ/kg)	2.67	2.79	2.78
Cetane number	–	52.1	13–17
Octane number	130	–	85–95
Auto-ignition temperature (°C)	650	180–220	310
Stoichiometric air–fuel ratio (kg/kg)	17.2	14.3	14.56
Carbon content (%)	75	87	85.5

- Miscela di sostanza gassose, in gran parte idrocarburi, di cui il componente principale è il metano (CH₄). La composizione varia in base alla collocazione geografica del giacimento.
- Rapporto C/H è 1/4: a parità di energia erogata produce meno CO₂ rispetto ad altri combustibili fossili durante la combustione
- Potere calorifico inferiore simile a quelli di benzina e diesel
- Elevata temperatura di autoaccensione: è un combustibile sicuro
- Alto numero di ottano: adatto per l'utilizzo in motori con elevato rapporto volumetrico di compressione



È un ottimo sostituto della benzina nei motori ad accensione comandata; non può essere impiegato direttamente nei motori ad accensione per compressione (scarsa tendenza all'autoaccensione)

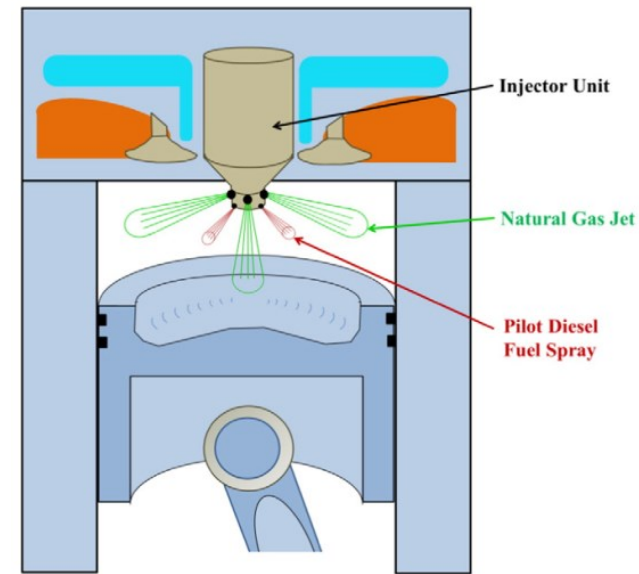
- Aspirazione: gas naturale immesso nel collettore di aspirazione
- Compressione: iniezione di diesel pilota con la funzione di innesco della carica
- Espansione: l'autoaccensione del diesel pilota comporta l'accensione della carica



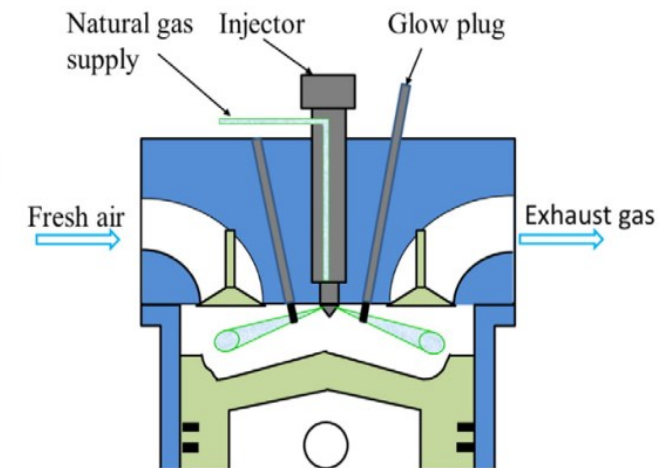
Il motore non richiede eccessive modifiche:
la conversione è facilmente attuabile

Altre soluzioni:

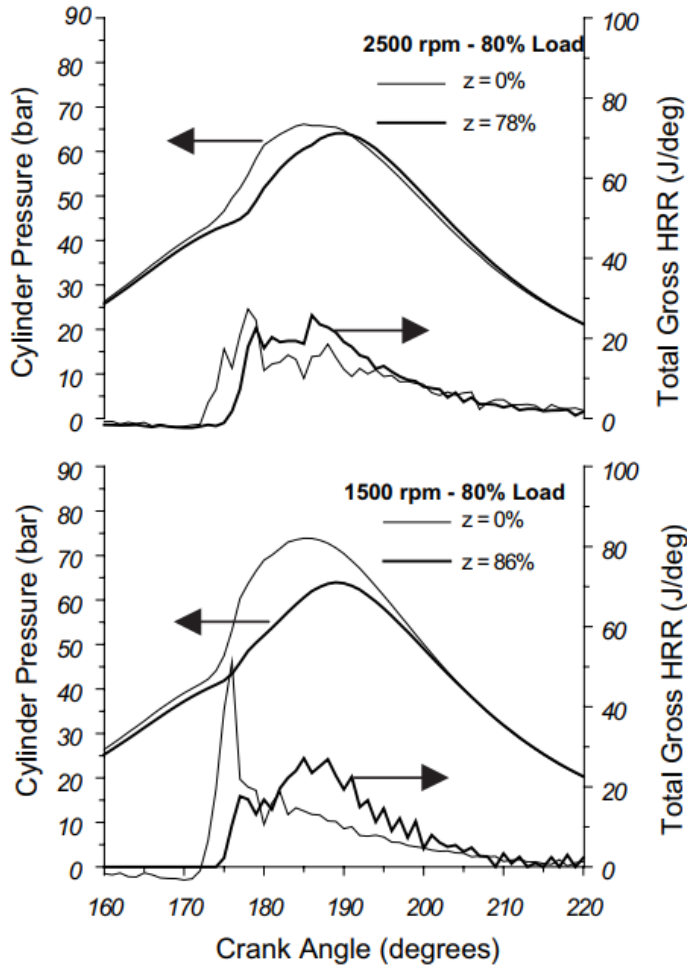
- HPDI (high pressure direct injection): gas naturale iniettato ad elevata pressione durante la compressione
- Accensione per compressione assistita: diesel pilota sostituito da candela, iniezione del gas a fine compressione



HPDI



Accensione per
compressione assistita



COMBUSTIONE

- A carichi minori la miscela è magra: **combustione più lenta**
- A N maggiori la T_{motore} è maggiore: fiamma più veloce → **combustione più rapida**

CURVA DI RILASCIO TERMICO

- Spostata verso l'espansione → **indica un ritardo nell'inizio della combustione**
- Nell'espansione è più alta ma non contribuisce all'aumento della pressione

PRESSIONE NEL CILINDRO

- $c_{pgas} (0,53kcal/kg) > c_{paria} (0,28kcal/kg)$
→ tempo di ritardo maggiore
- Combustione più lenta, spostata nell'espansione

Pressioni minori

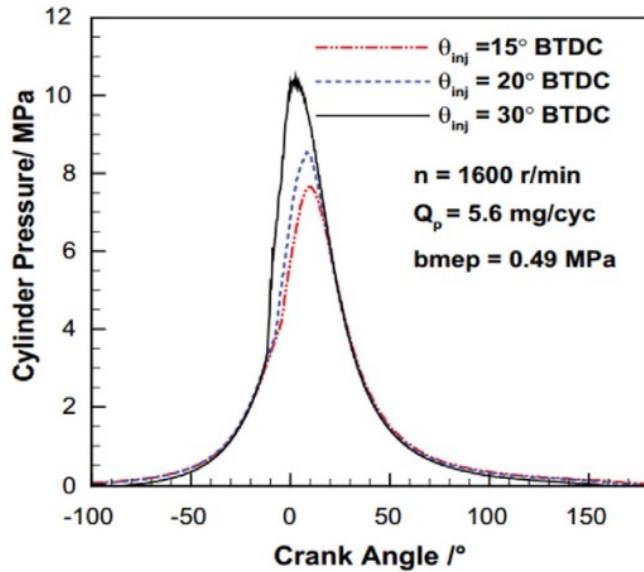
Effetto più marcato a N minori, perché combustione più lenta

- Combustione lenta
- Tempo di ritardo maggiore → **combustione avviene durante espansione**

Picco di pressione minore

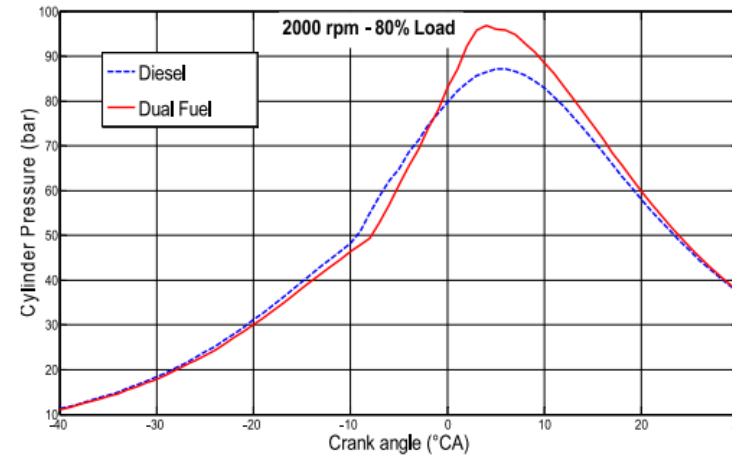
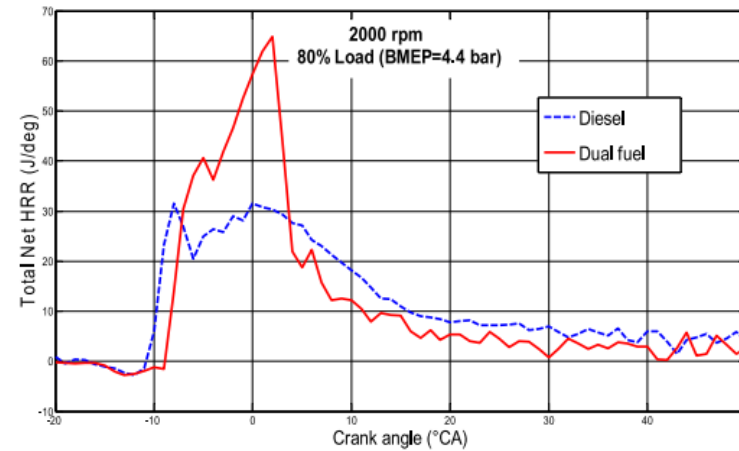
Pressione dipende da:

- Quantità di diesel pilota
- Tempo di iniezione



**Anticipo iniezione →
→ pressione maggiore**

Variando quantità e tempo di iniezione del diesel pilota è possibile **migliorare le prestazioni del motore**



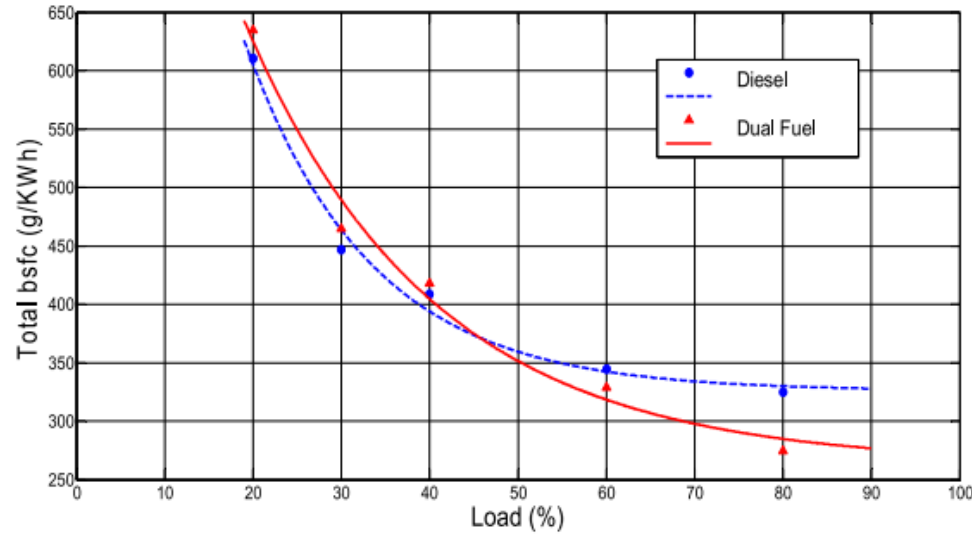
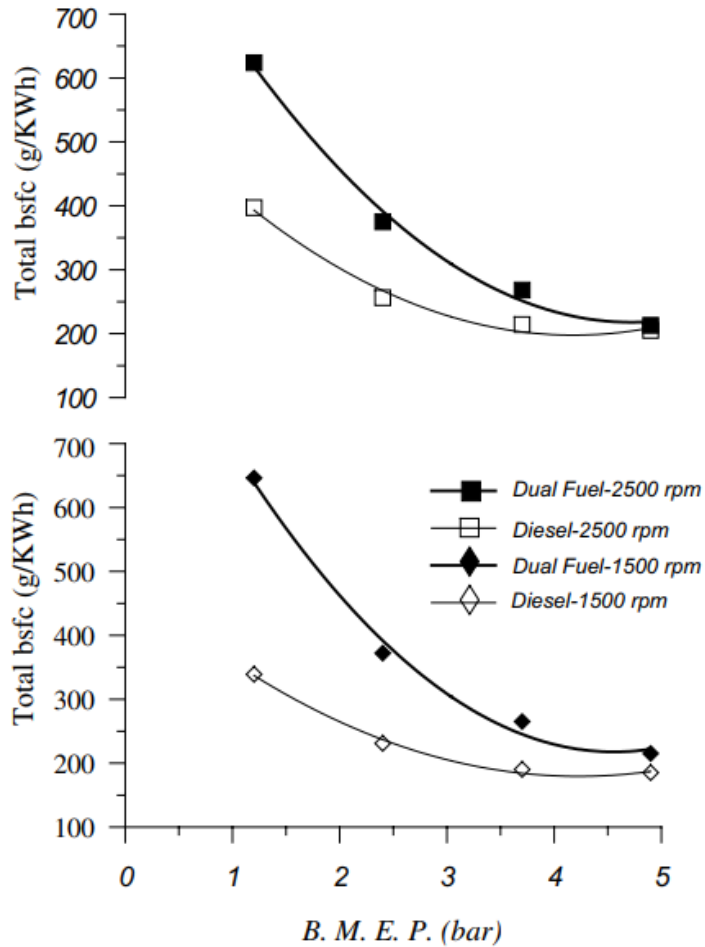
POTENZA: è proporzionale al potere calorifico e al rendimento volumetrico η_{vol}

- $Hu_{gas/aria} < Hu_{diesel/aria}$
- Gas sostituisce parte dell'aria → η_{vol} diminuisce

↓
La potenza diminuisce

Tuttavia la **riduzione di potenza è ridotta**, pari a circa 2,1% per un motore heavy duty. È possibile supplire alla diminuzione modificando le condizioni operative del motore

Quantità di combustibile utilizzata per unità di energia prodotta

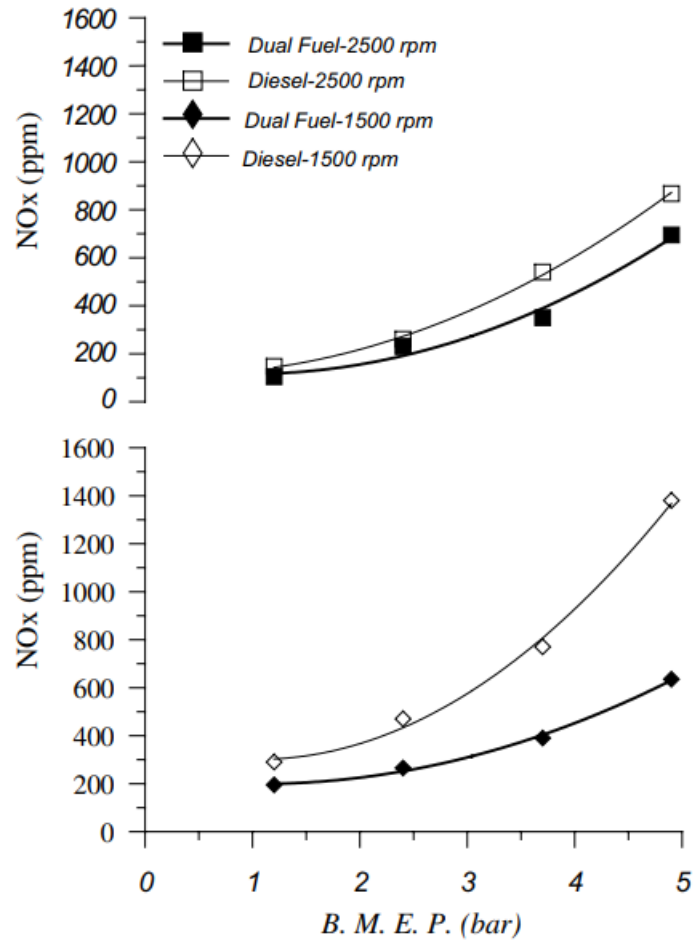


A carichi inferiori → combustione lenta e
 $T_{\text{combustione}}$ bassa
↓
Combustione poco efficiente
↓
Aumento del consumo specifico di carburante

A carichi intermedi ed elevati
↓
Combustione più stabile dovuta alla miscela più ricca
↓
Combustione più efficiente
↓
Diminuzione del consumo specifico di carburante

In modalità dual fuel è possibile ottenere un BSFC minore di quello ottenuto in modalità diesel

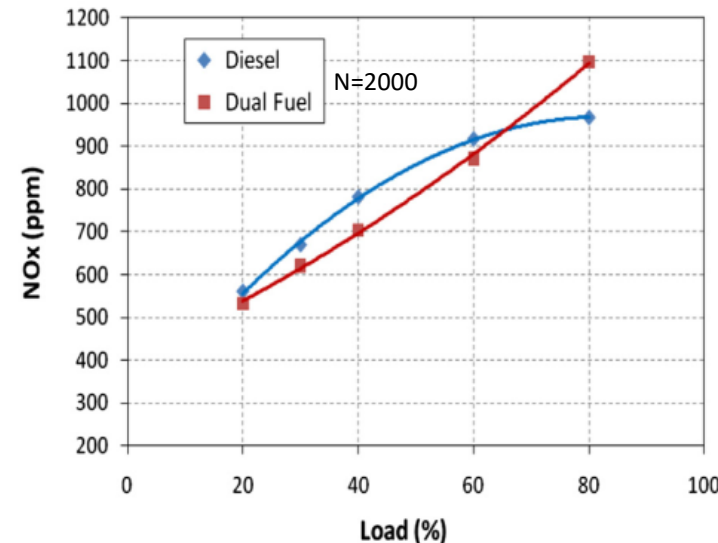
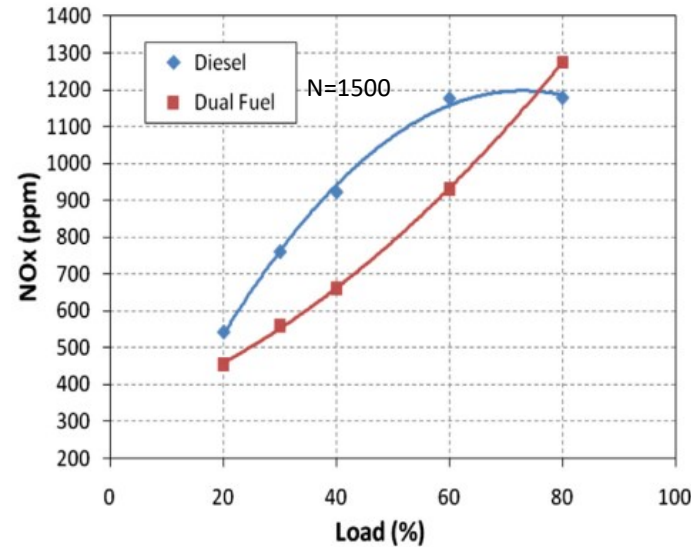
Si formano per dissociazione e ossidazione di N_2 dell'aria comburente a T elevate ($>1500^\circ C$): *Thermal* NO_x



Diminuzione di NO_x :

- Minore T della compressione ($c_{pgas} > c_{paria}$)
- Tempo di ritardo maggiore e miscela magra $\rightarrow T_{comb}$ minore
- Concentrazione minore di O_2 nella carica per la presenza del gas naturale

Variando quantità e tempo di iniezione del diesel pilota si può diminuire ulteriormente la quantità di NO_x

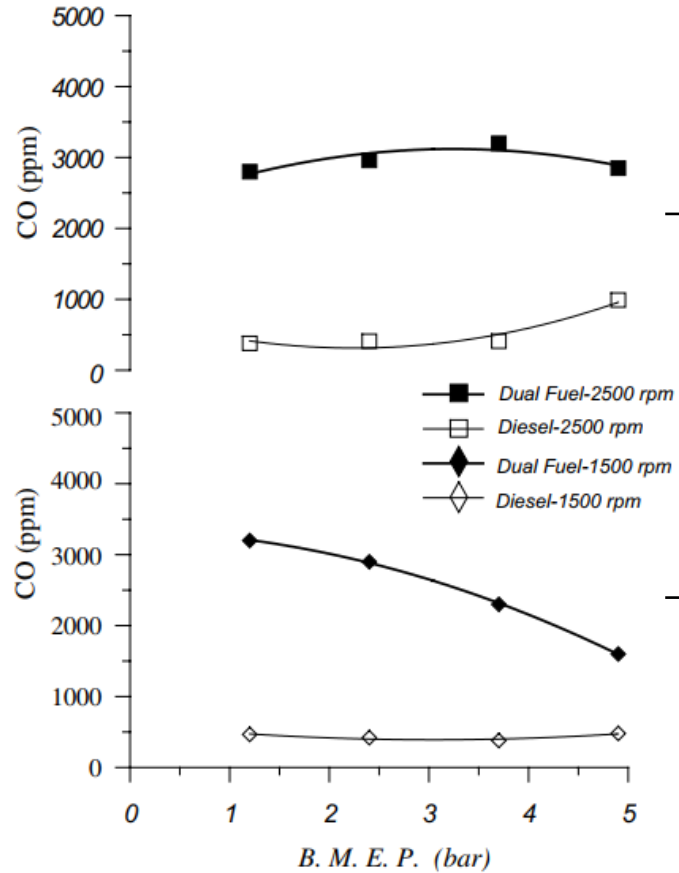


Aumento di NO_x :

- Miglioramento della combustione $\rightarrow T_{comb}$ maggiore

In generale per N maggiori il tempo di permanenza dei gas è minore \rightarrow minore quantità di NO_x , sia per diesel che dual fuel

Risultato dell'ossidazione parziale (combustione incompleta) del carbonio



Tempo di residenza
minore → ossidazione
incompleta → elevato
CO

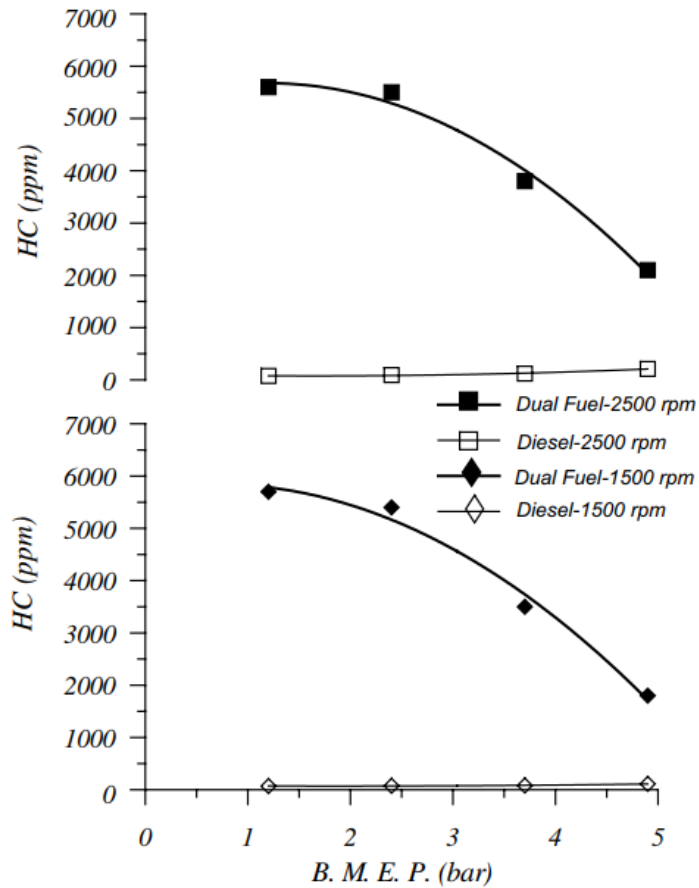
A carichi maggiori
combustione migliore
→ riduzione CO

- Zone della carica non sono interessate dalla fiamma
- Miscelamento di carica fredda e carica interessata da combustione
- Localmente miscela troppo magra per propagare la fiamma

Temperatura insufficiente
per permettere l'ossidazione
completa

Aumento significativo di CO

Prodotto della combustione incompleta

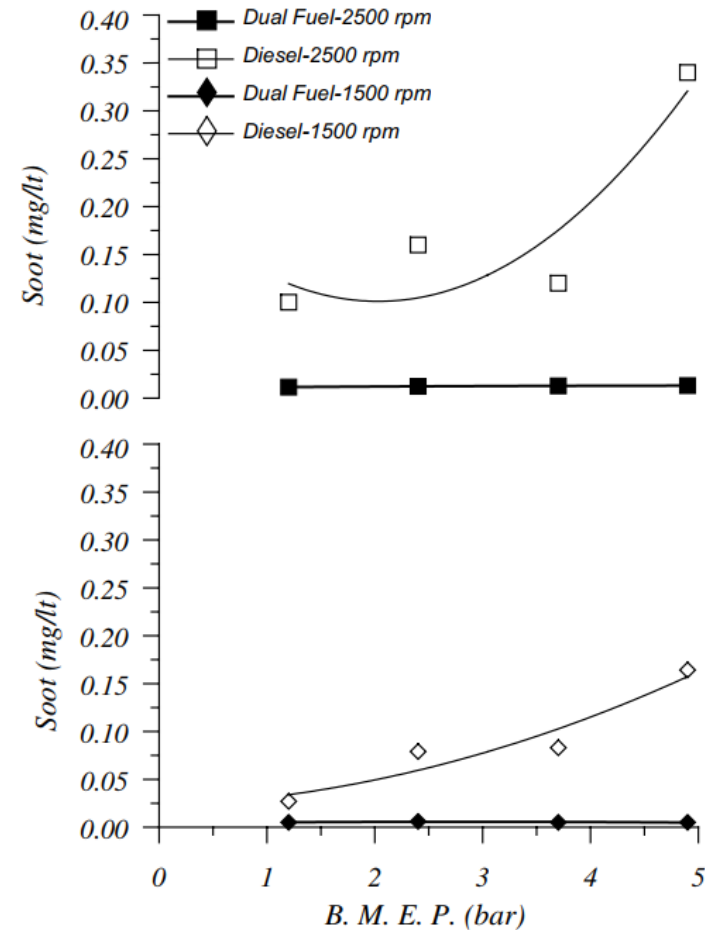


- Zone della carica non interessate dalla fiamma o troppo magre \rightarrow T insufficiente per combustione completa
- Incrocio delle valvole

Aumento considerevole di HC

Per carichi maggiori combustione più stabile \rightarrow riduzione di HC

Composto carbonioso formato nella combustione diffusiva

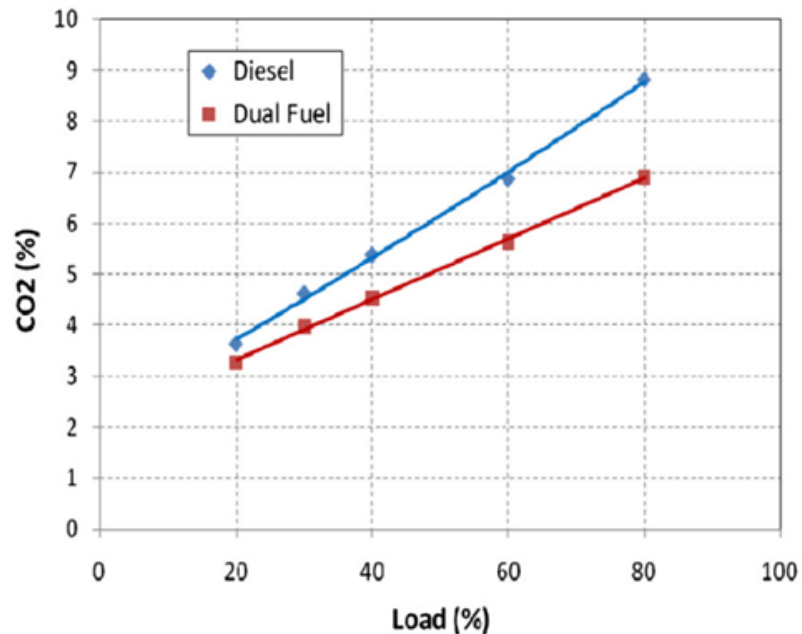


Drastica riduzione di PM:

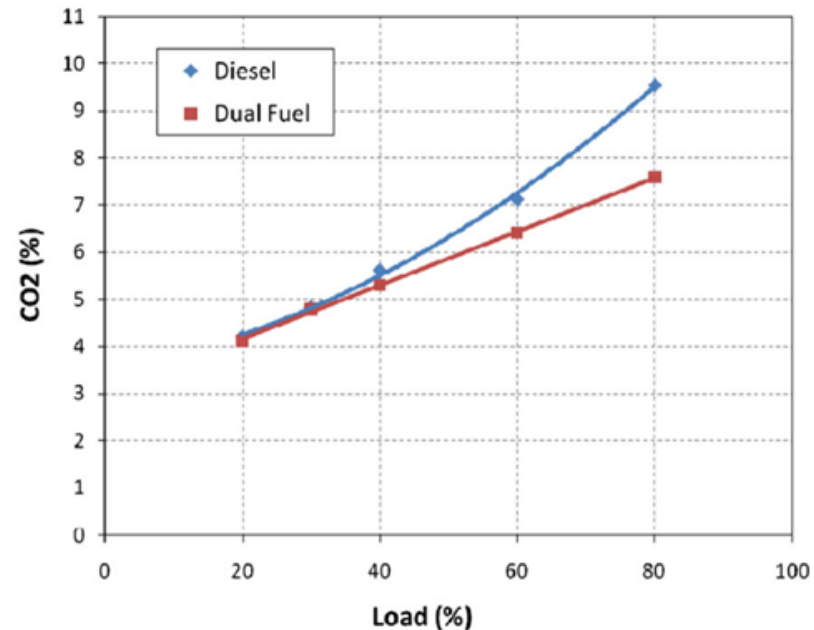
- Gas naturale ha combustione priva di fuliggine
- Solo diesel pilota ha combustione diffusiva
- Tempo di ritardo permette buona miscelazione della carica

Prodotto dell'ossidazione (combustione) completa del carbonio

Il carbonio prima subisce un'ossidazione parziale → CO; poi se la temperatura è sufficientemente elevata ed è presente ossigeno l'ossidazione si completa → CO₂



(a) N=1500 rpm



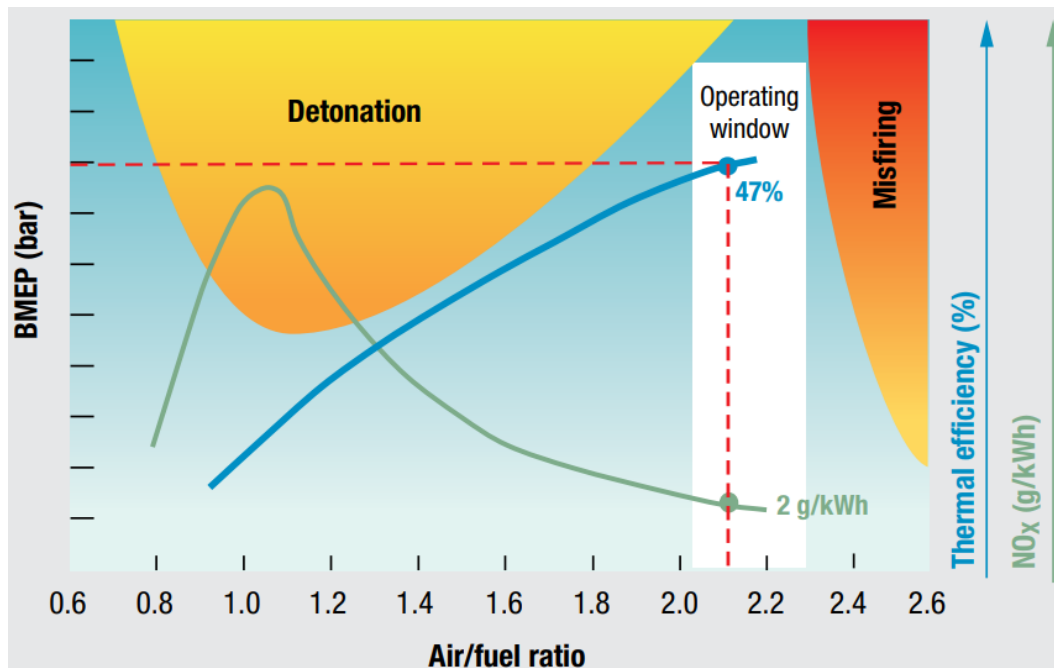
(b) N=2000 rpm

Diminuzione di CO₂ dovuta a:

- Persistente combustione parziale → solo una parte della carica si ossida in CO₂
- Il metano ha minor numero di atomi di C a parità di energia fornita dalla combustione → produce meno CO₂ rispetto ad altri idrocarburi

- Potenza: 950 kW/cilindro, 5,7-17,1 MW
- Alimentazione: oli combustibili leggeri e pesanti, varie qualità di gas naturale
- $\eta=47\%$
- $\lambda=2,2$ e diesel pilota 1% del carico nominale

→ Emissioni di NO_x minimizzate



AVVIAMENTO

- Olio combustibile e diesel pilota; a $N=300$ giri/min e con combustione stabile progressiva sostituzione dell'olio combustibile con gas naturale

TRANSIZIONE TRA MODALITÀ DI FUNZIONAMENTO

- Da diesel a dual fuel: a carico $<80\%$ progressiva sostituzione del diesel con gas naturale (abilitata alimentazione del diesel pilota), durata della transizione circa 1min
- Da dual fuel a diesel: transizione automatica e rapida (1s), sostituzione istantanea del gas naturale con olio combustibile, rimane abilitata alimentazione del diesel pilota per prevenire ostruzioni dell'iniettore. Avviene in caso di guasto del sistema di alimentazione del gas

SISTEMA ALIMENTAZIONE GAS NATURALE:

- Sistema common rail distribuisce il gas al motore a circa 4 bar
- Nel **collettore di aspirazione** di ogni cilindro è posta una **valvola** di immissione del gas **controllata elettronicamente** e indipendente da valvole di scarico e aspirazione
→ **lavaggio del cilindro senza scarico di gas incombusto**
→ **corretta quantità di gas immessa**
→ **migliore combustione**

SISTEMA ALIMENTAZIONE OLIO COMBUSTIBILE:

- **Impianti separati** per olio combustibile e diesel pilota
- Per olio combustibile sistema tradizionale attuato da albero a camme
- Diesel pilota distribuito con sistema CR a circa 900 bar, **iniettori attuati elettronicamente** controllano **quantità e tempo di iniezione**

CONTROLLO DELLA CARICA:

- Attraverso controllo della **quantità di gas immessa** (valvole di immissione)
- Attraverso **sistema di sovralimentazione** → allo scarico è posta **valvola wastegate controllata elettronicamente** che permette a gas di scarico il bypass della turbina → regolazione quantità di aria all'uscita dal compressore

WECS

Wärtsilä electronic control system: **sistema elettronico** che monitora la combustione (detonazione e mancata accensione) e controlla il funzionamento di valvole e iniettori per garantire il **funzionamento ottimale**



Con l'utilizzo del gas naturale:

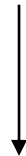
- Riduzione di NO_x dell'85% rispetto alle vigenti norme IMO
- Riduzione del 25% di CO_2 rispetto al funzionamento diesel
- Abbattimento quasi totale di fuliggine e SO_x



Nella configurazione 18V, a 500 giri/min il motore eroga 17100 kW. Raggiunge i 13,7 m di lunghezza, e ha un peso di 240 tonnellate.

L'impiego del gas naturale per mezzo della tecnologia dual fuel comporta:

- Riduzione delle emissioni di NO_x , PM, CO_2
- Aumento delle emissioni di HC e CO
- Riduzione della potenza del motore
- Aumento del consumo specifico



Questi parametri sono fortemente influenzati da quantità e tempo di iniezione del diesel pilota e dalla composizione della miscela aria/gas naturale

Lo sviluppo di sistemi di controllo sofisticati permette di sfruttare appieno i benefici derivanti dall'impiego del gas naturale come combustibile primario



Ne sono un esempio i motori dual fuel navali

- [1] Lijiang Wei, Peng Geng, A review on natural gas/diesel dual fuel combustion, emissions and performance, 2015
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378382015301715>
- [2] R.G. Papagiannakis, D.T. Hountalas, Combustion and exhaust emission characteristics of a dual fuel compression ignition engine operated with pilot Diesel fuel and natural gas, 2004
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890404000330>
- [3] Mohand Said Lounici, Khaled Loubar, Lyes Tarabet, Mourad Balistrrou, Dan-Catalin Niculescu, Mohand Tazerout, Towards improvement of natural gas-diesel dual fuel mode: An experimental investigation on performance and exhaust emissions, 2013
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544213009584>
- [4] Pounder's marine diesel engines and gas turbines, capitolo 3
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081027486000037>
- [5] Pounder's marine diesel engines and gas turbines, capitolo 24
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081027486000244>
- [6] Wärtsilä 50DF engine technology
<https://cdn.wartsila.com/docs/default-source/Power-Plants-documents/w%C3%A4rtsil%C3%A4-50df.pdf>
- [7] Wärtsilä 50DF product guide
<https://cdn.wartsila.com/docs/default-source/product-files/engines/df-engine/product-guide-o-e-w50df.pdf?sfvrsn=9>
- [8] <https://www.motortrend.com/features/1810-wartsila-50df-mighty-and-efficient?galleryimageid=b72aa260-5be9-4753-8b0d-12a79a638f24>