



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI TRIESTE



Dipartimento di  
Ingegneria  
e Architettura



# Corso di MACCHINE [065IN] Corso di MACCHINE MARINE [100IN]

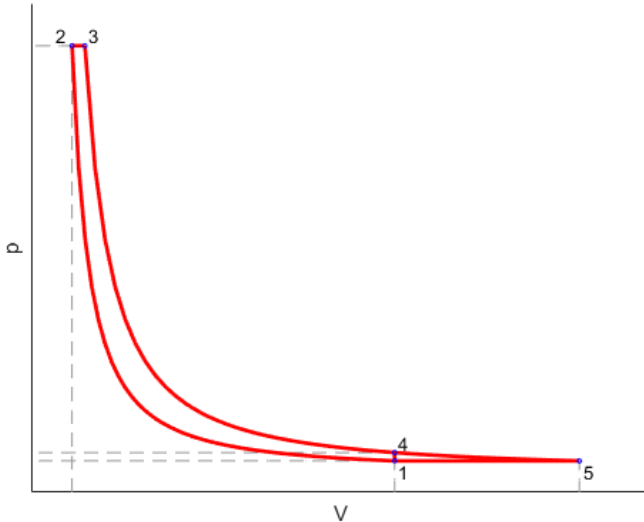
*Prof. Rodolfo Taccani*  
*Prof. Lucia Parussini*  
*Prof. Marco Bogar*

**A.A. 2022-2023**

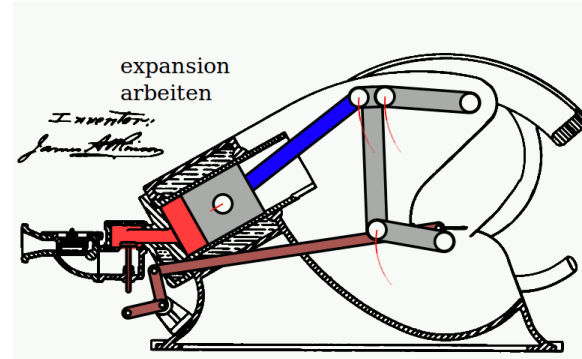
# Esercitazione

## Confronto di un motore 4T marino nelle varianti Diesel e Atkinson

Si vuole calcolare il ciclo ideale e il rendimento indicato del motore 4T [Wartsila 6L46F](#) per applicazione marina per propulsione (ME CPP variable speed) nelle varianti Diesel e Atkinson.



Ciclo ideale Diesel (1-2-3-4) e Atkinson (1-2-3-5)



Schematizzazione motore a ciclo Atkinson

# Esercitazione

## Confronto di un motore 4T marino nelle varianti Diesel e Atkinson

### *Dati motore*

Dalla scheda tecnica del motore Wartsila 6L46F a 4 tempi con 6 cilindri in linea (6L) alimentato con combustibile liquido tradizionale (F) considerando il funzionamento al 100% del carico si ricavano i seguenti dati di interesse:

$\tau = 4$  tempi

$C = 580$  mm (corsa)

$D = 460$  mm (alesaggio)

$\bar{u}_p = 11.6$  m/s (velocità media dello stantuffo, quindi è un motore medium speed essendo  $7 \text{ m/s} \leq \bar{u}_p \leq 12 \text{ m/s}$ )

$n = 600$  giri/min

$P = 1200$  kW (potenza per cilindro)

Assumendo che le condizioni del punto 1 siano quelle dell'aria a temperatura e pressione dopo l'intercooler, dalla scheda tecnica si ricava che la temperatura dell'aria dopo il raffreddamento è

$T_1 = 50^\circ\text{C}$

$SFOC = 183.4$  g/kWh (consumo specifico) ipotizzando di utilizzare HFO come combustibile

# Esercitazione

## Confronto di un motore 4T marino nelle varianti Diesel e Atkinson

### *Dati motore (stimati)*

Dai data sheet del produttore i dati ottenibili sono insufficienti per procedere con i calcoli.  
Dobbiamo quindi stimare i restanti parametri.

Delle condizioni del punto 1 conosciamo solo la temperatura, per la pressione si può ipotizzare un valore di pressione di sovralimentazione  
 $p_1 = 4.8$  bar.

# Esercitazione

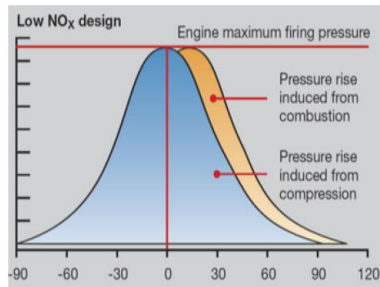
## Confronto di un motore 4T marino nelle varianti Diesel e Atkinson

### *Dati motore (stimati)*

Per la pressione massima di combustione si considera il fatto che nei Diesel marini per avere una bassa produzione di NOx si effettua una combustione ritardata avendo dunque il massimo della pressione dovuta alla compressione coincidente con quella dovuta alla combustione. Dal confronto dei motori in tabella si osserva un valore di pressione massima di  $200 \div 208$  bar per un motore del 2006.

Assumiamo quindi

$$p_2 = p_3 = 200 \text{ bar}$$



Andamento pressioni motore marino  
per contenere produzione di NOx

| MOTORE                    | MAN B&W<br>9L 58/64 | MAN B&W<br>18 V 48/60B | WARTSILA<br>9L 64 | MaK<br>M43C |
|---------------------------|---------------------|------------------------|-------------------|-------------|
| Anno                      | 1985                | 2006                   | 2006              | 2006        |
| n. cilindri               | 9 in linea          | 18 a V                 | 9 in linea        | 9 in linea  |
| C [mm]                    | 640                 | 600                    | 900               | 610         |
| D [mm]                    | 580                 | 480                    | 640               | 430         |
| C/D                       | 1,10                | 1,25                   | 1,40              | 1,42        |
| n [giri/min]              | 428                 | 514                    | 333,3             | 514         |
| v <sub>m</sub> [m/s]      | 9,13                | 10,28                  | 10,00             | 10,45       |
| p <sub>me</sub> [bar]     | 23                  | 25,8                   | 25                | 26,4        |
| P [kW]                    | 12.510              | 21.600                 | 18.090            | 9.000       |
| P/cil [kW]                | 1.390               | 1.200                  | 2.010             | 1.000       |
| p <sub>max</sub> [bar]    | –                   | 200                    | –                 | 208         |
| c <sub>i</sub> [g/kWh]    | 177                 | 176                    | 175               | 177         |
| c <sub>otto</sub> [g/kWh] | 0,8                 | 0,8                    |                   | 0,6         |
| Massa [t]                 | 213                 | 265                    | 320               | –           |
| M/P [kg/kW]               | 17                  | 12                     | 17                | –           |

# Esercitazione

## Confronto di un motore 4T marino nelle varianti Diesel e Atkinson

*Dati motore (stimati)*

Rimane da determinare il volume al PMS ( $V_2$ ) e quello al PMI ( $V_1$ ).

Si sa che  $\rho_v$  (rapporto di compressione volumetrico)

$$\rho_v = \frac{V_1}{V_2} = \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{1/k}$$

Inoltre

$$V_1 - V_2 = \pi \frac{D^2}{4} C$$

Quindi

$$V_1 = 0.1036 \text{ m}^3$$

$$V_2 = 0.0072 \text{ m}^3$$

Si ricorda che: HFO  $H_i = 41 \text{ MJ/kg}$

# Esercitazione

## Confronto di un motore 4T marino nelle varianti Diesel e Atkinson

1-2 adiabatica

2-3 isobara

3-4-5 adiabatica

4-1 isocora

5-1 isobara

Per gas ideali:

Trasformazione adiabatica

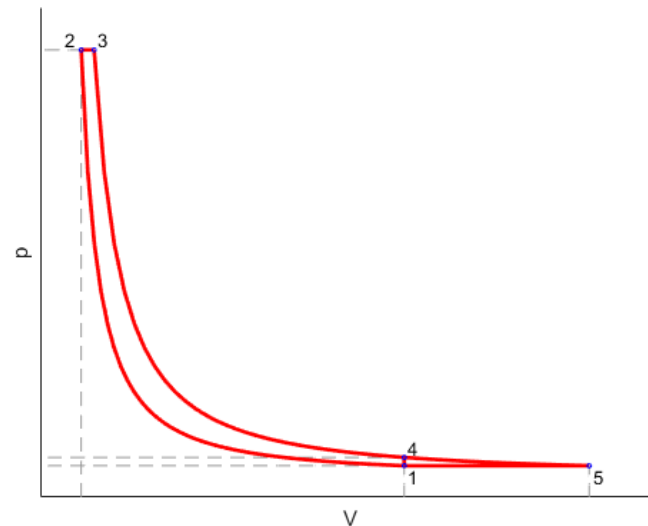
$$pV^k = cost$$
$$pT^{k/(1-k)} = cost$$

Trasformazione isobara

$$\frac{V}{T} = cost$$

Trasformazione isocora

$$\frac{p}{T} = cost$$



# Esercitazione

## Confronto tra motore tradizionale (F) e dual fuel (DF)

Si vuole calcolare il volume del serbatoio di combustibile e le potenze termiche recuperabili da un motore 4 tempi alimentato con HFO, LNG e CNG.

Si fa riferimento a due motori Wartsila 16 cilindri a V : [16V46F](#) e [16V46DF](#), di cui il secondo è dual fuel.

Si chiede di determinare

- ☐ il volume dei serbatoi per garantire un'autonomia di 7 giorni con un carico dell'85% nel caso di funzionamento con HFO, LNG e CNG
- ☐ potenza termica recuperabile dai gas di scarico del motore e dalle acque di raffreddamento delle camicie
- ☐ nel caso di alimentazione con LNG determinare le portate di fluido caldo per rigassificare l'LNG e per portarlo alla temperatura di immissione e la potenza del compressore per poterlo iniettare alla pressione richiesta.

# Esercitazione

## Confronto tra motore tradizionale (F) e dual fuel (DF)

### 16V46F

motore alimentato con combustibile liquido tradizionale per la propulsione navale (ME) a velocità variabile (CPP variable speed)

#### *DATI*

$n = 600$  giri/min

$P = 1200$  kW/cilindro potenza per cilindro

$z = 16$  cilindri

$SFOC = 173.0$  g/kWh consumo specifico all'85% del carico

caratteristiche dei gas di scarico dopo il turbocompressore all'85% del carico massimo e HFO come combustibile

$\dot{m}_f = 29.6$  kg<sub>f</sub>/s portata massica dei fumi

$T_f = 336^\circ\text{C}$

$Q_{JW} = 2400$  kW recupero attraverso l'acqua di raffreddamento delle camicie (Jacket Water HT-circuit) al 100% del carico

# Esercitazione

## Confronto tra motore tradizionale (F) e dual fuel (DF)

### 16V46DF

motore dual fuel per la propulsione navale (ME) a velocità variabile (CPP variable speed) alimentato a gas naturale, che possiamo stoccare come gas naturale liquefatto (LNG) o gas naturale compresso (CNG)

### *DATI*

$n = 600$  giri/min

$P = 1145$  kW/cilindro potenza per cilindro

$z = 16$  cilindri

Considerando che il carico è pari all'85% di quello massimo si ricava

$BSEC = 7373.3$  kJ/kWh consumo specifico del solo combustibile gassoso

*pilot fuel consumption* = 1.2 g/kWh consumo della fiamma pilota

caratteristiche dei gas di scarico dopo il turbocompressore

$\dot{m}_f = 29.3$  kg<sub>f</sub>/s carico 100%  $\dot{m}_f = 21.9$  kg<sub>f</sub>/s carico 75% portata massica dei fumi

$T_f = 367^\circ\text{C}$  carico 100%  $T_f = 384^\circ\text{C}$  carico 85%  $T_f = 390^\circ\text{C}$  carico 75%

# Esercitazione

## Confronto tra motore tradizionale (F) e dual fuel (DF)

### 16V46DF

motore dual fuel per la propulsione navale (ME) a velocità variabile (CPP variable speed) alimentato a gas naturale, che possiamo stoccare come gas naturale liquefatto (LNG) o gas naturale compresso (CNG)

### *DATI*

Caratteristiche del sistema ad alta temperatura di raffreddamento ad acqua (HT cooling water system)

Temperatura prima dei cilindri al 100% carico  $T_{in} = 75^{\circ}\text{C}$

Temperatura dopo raffreddamento  $T_{out} = 93^{\circ}\text{C}$

La potenza recuperabile dall'acqua di raffreddamento delle camicie al 100% del carico è  $Q_{JW} = 2224 \text{ kW}$ .

Gli ultimi dati di interesse riguardano il sistema di alimentazione del combustibile ovvero le caratteristiche alle quali va portato il gas naturale per l'immissione nel motore

$p = 600 \div 800 \text{ kPa}$  pressione in ingresso minima al 100% carico

$T = 0 \div 60^{\circ}\text{C}$  temperatura di ingresso del gas

# Esercitazione

## Confronto tra motore tradizionale (F) e dual fuel (DF)

### 16V46DF

motore dual fuel per la propulsione navale (ME) a velocità variabile (CPP variable speed) alimentato a gas naturale, che possiamo stoccare come gas naturale liquefatto (LNG) o gas naturale compresso (CNG)

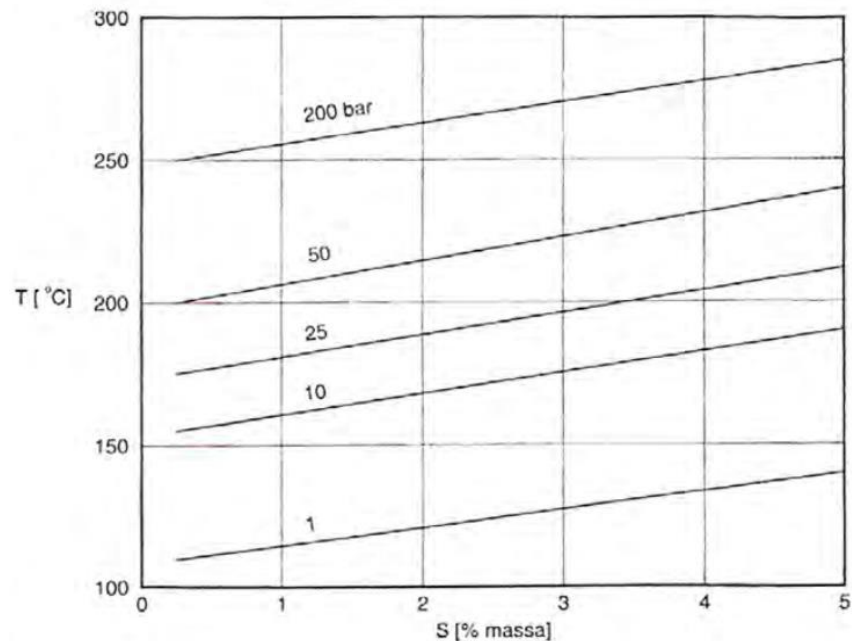
### *DATI*

In funzione delle condizioni di stoccaggio del gas naturale si ricavano i seguenti valori di entalpia e densità approssimando il gas natural come metano:

| Modalità<br>stoccaggio | p [bar] | T [°C] | $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ] | h [kJ/kg] |
|------------------------|---------|--------|-----------------------------|-----------|
| LNG                    | 1       | -162   | 423.11                      | -1.8014   |
| CNG                    | 300     | 25     | 212.65                      | 692.52    |
| CNG                    | 700     | 25     | 307.99                      | 693.42    |

# Esercitazione

## Confronto tra motore tradizionale (F) e dual fuel (DF)



Andamento della temperatura di rugiada dell'acido solforico al variare della percentuale in massa di zolfo contenuto nel combustibile e per differenti valori della pressione

# Esercitazione

## Confronto tra motore tradizionale (F) e dual fuel (DF)

Diagramma p-h del metano. Sono indicate schematicamente le trasformazioni del processo di rigassificazione con pressione di esercizio intorno ad 7 bar: compressione del liquido (1-2) e vaporizzazione (2-3).

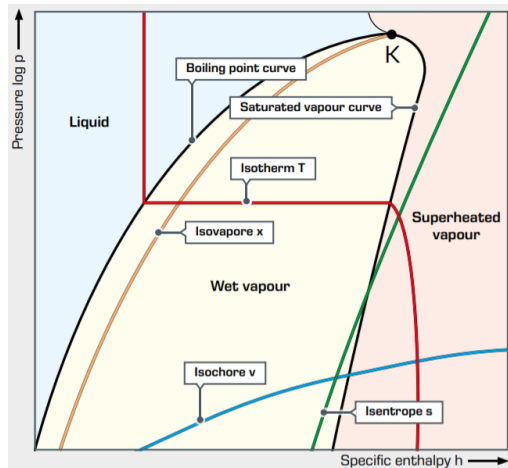
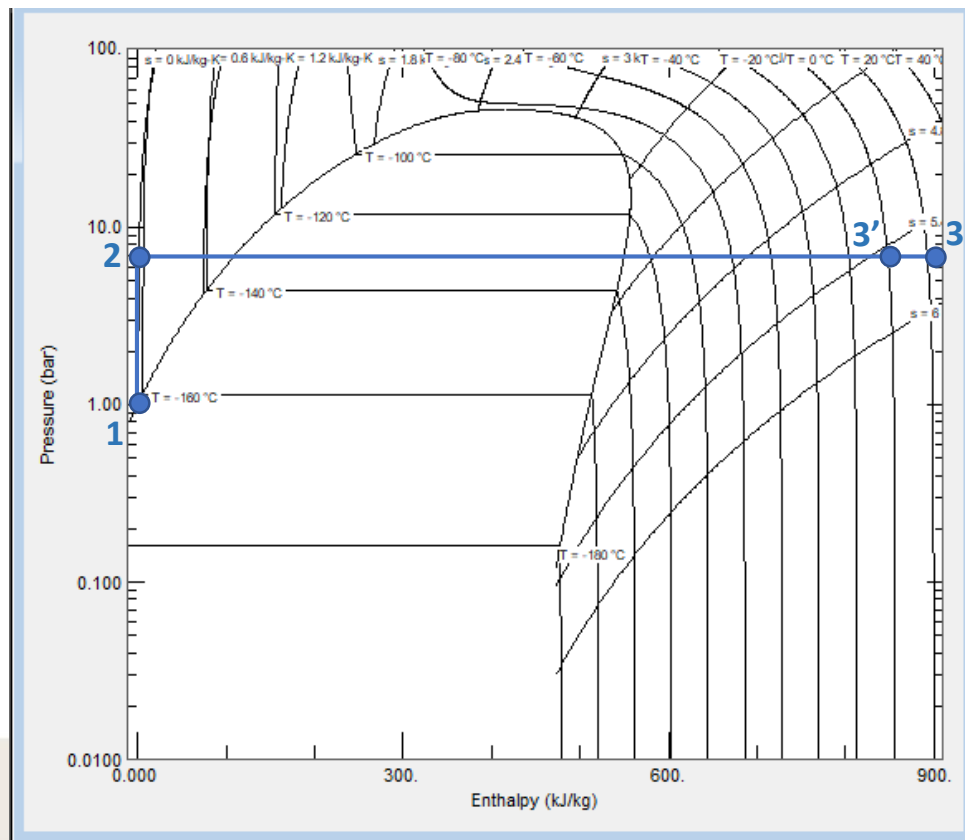


Diagramma p-h





**UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI TRIESTE**



Dipartimento di  
**Ingegneria  
e Architettura**