



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI TRIESTE



Dipartimento di
Ingegneria
e Architettura



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

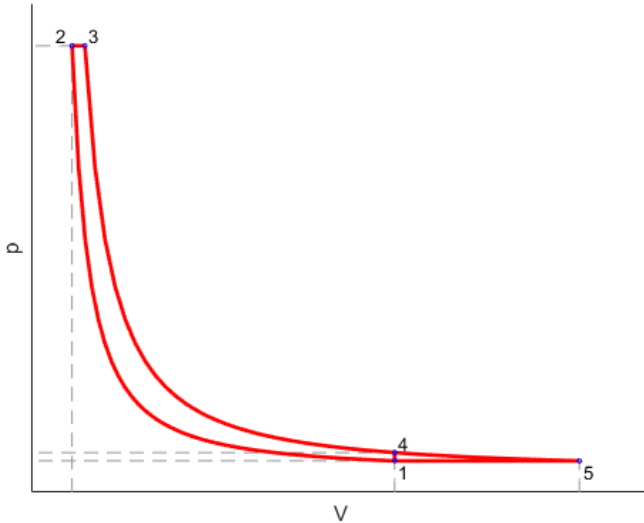
Prof. Rodolfo Taccani
Prof. Lucia Parussini
Prof. Ronelly De Souza

A.A. 2025-2026

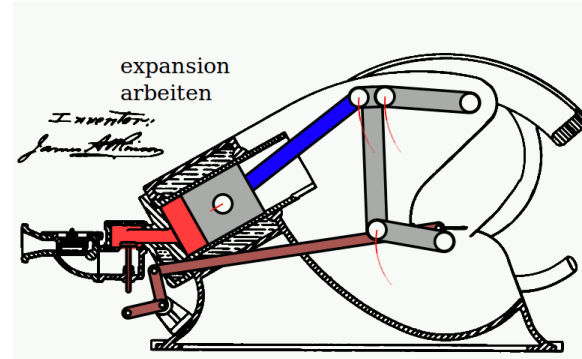
Esercitazione

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

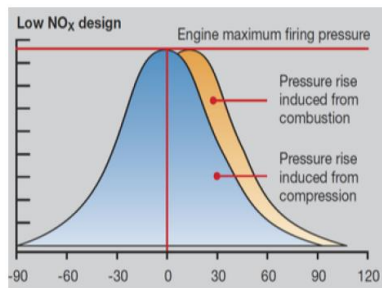
Confronto di un motore 4T marino nelle varianti Diesel e Atkinson

Dati motore (stimati)

Per la pressione massima di combustione si considera il fatto che nei Diesel marini per avere una bassa produzione di NO_x 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 ÷ 208 bar per un motore del 2006.

Assumiamo quindi

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



Andamento pressioni motore marino
per contenere produzione di NO_x

MOTORE	MAN B&W 9L 58/64	MAN B&W 18 V 48/60B	WARTSILA 9L 64	MaK 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 _m [m/s]	9,13	10,28	10,00	10,45
p _{me} [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 _{max} [bar]	–	200	–	208
c _i [g/kWh]	177	176	175	177
c _{otto} [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 ρ_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

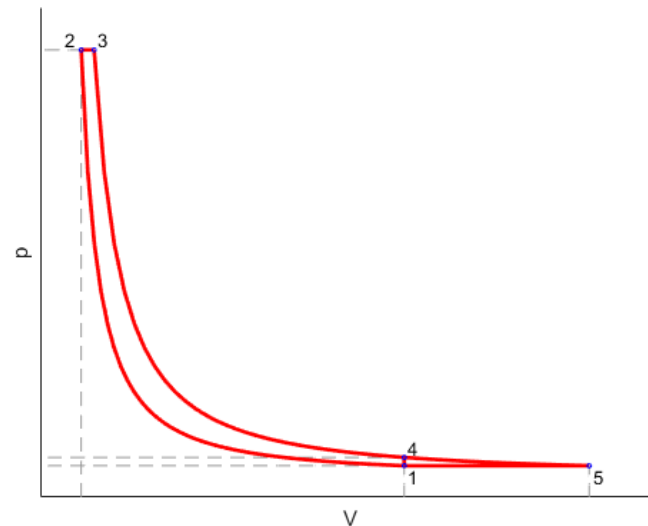
$$pV^k = \text{cost}$$
$$pT^{k/(1-k)} = \text{cost}$$

Trasformazione isobara

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

Trasformazione isocora

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



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_f/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_f/s carico 100% $\dot{m}_f = 21.9$ kg_f/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)

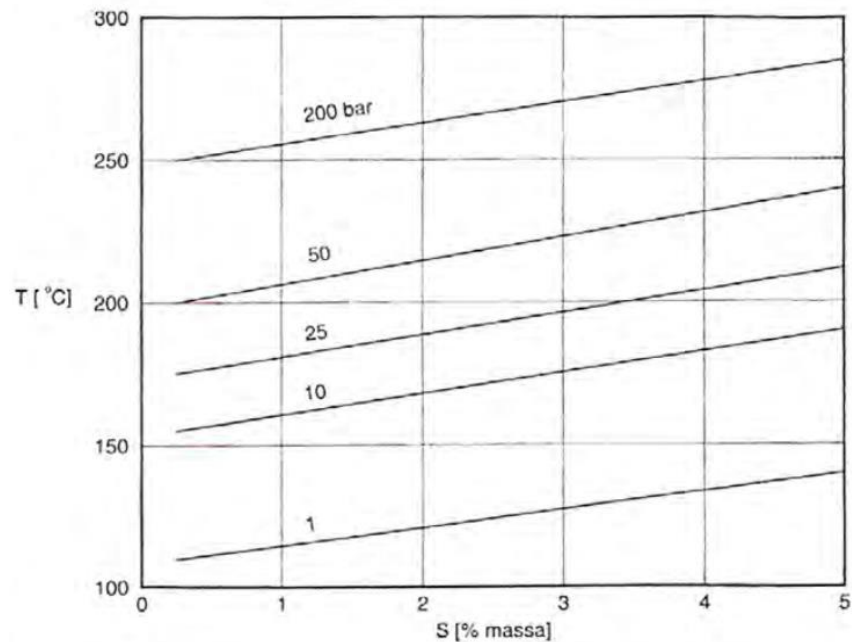
DATI

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 stoccaggio	p [bar]	T [°C]	ρ [kg/m ³]	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).

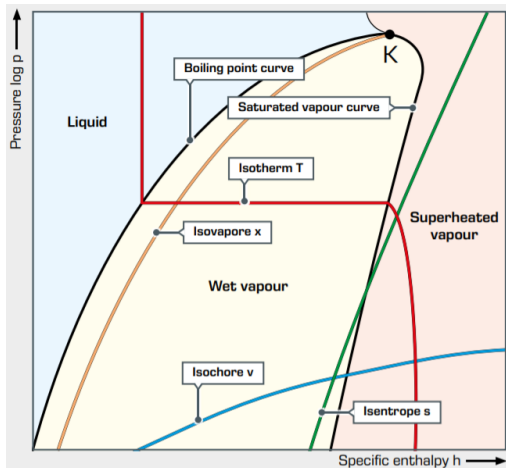
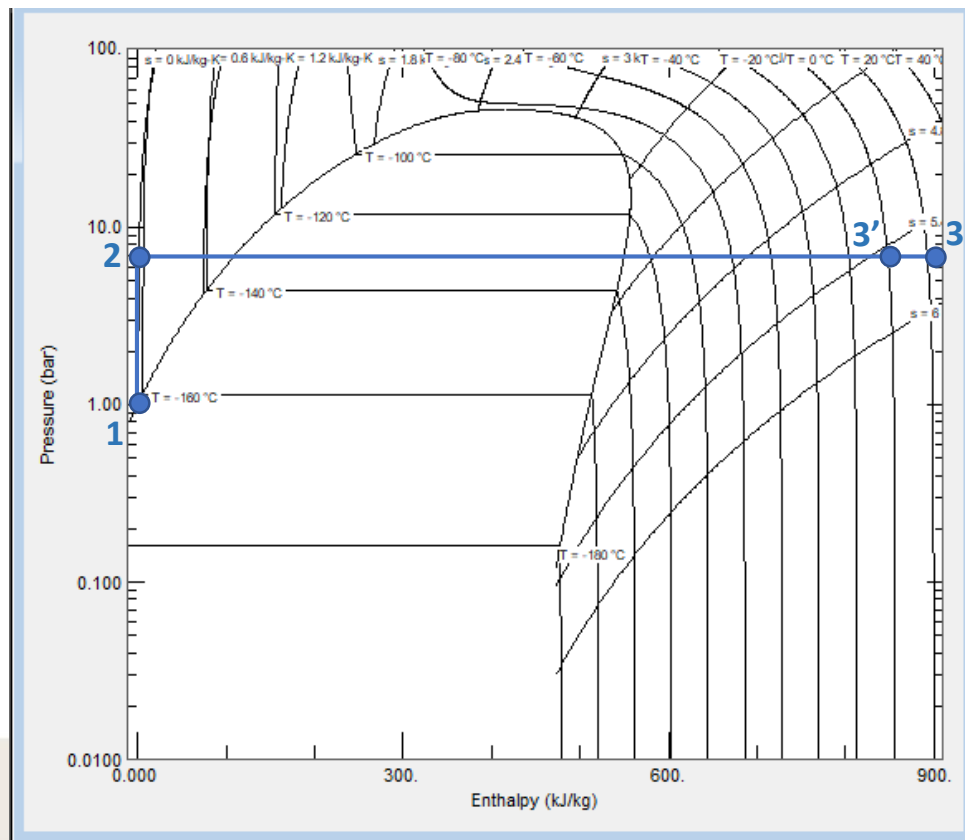


Diagramma p-h





UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI TRIESTE



Dipartimento di
**Ingegneria
e Architettura**