



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI DI TRIESTE

*Vittorio BUCCI*

**Progetto di impianti di propulsione navale**

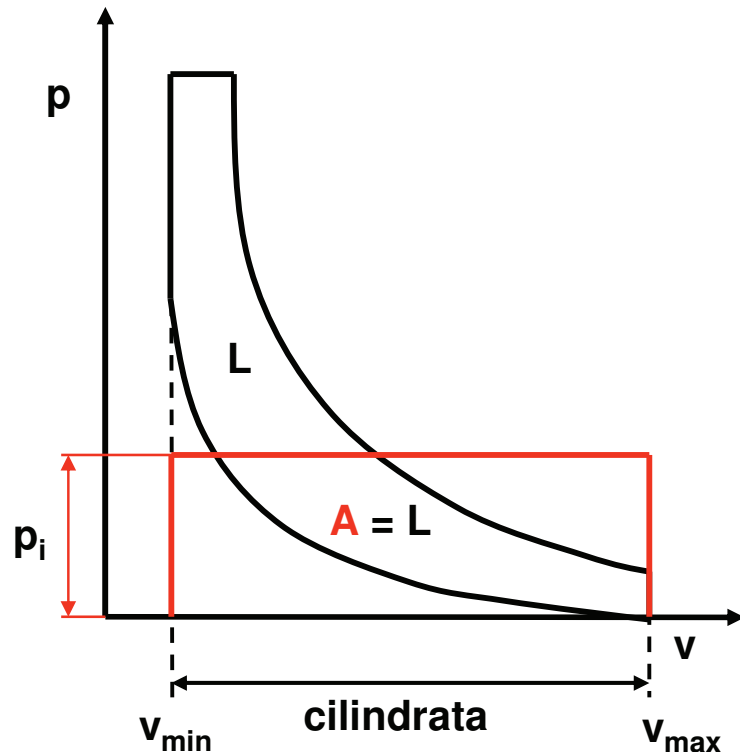
## **3.3 CALCOLO DELLA POTENZA**

---

Anno Accademico 2017/2018

# Impianti di propulsione navale

## Motori alternativi a combustione interna – Calcolo della potenza



- La pressione interno cilindro durante il ciclo varia continuamente e rende complesso il calcolo della potenza del motore;
- Tale calcolo è molto più semplice utilizzando una pressione convenzionale costante durante tutto il ciclo denominata “pressione media indicata” (p.m.i);
- Con riferimento al diagramma p-v accanto, l’area del ciclo rappresenta il lavoro “L” fatto dal fluido;
- La “pressione media indicata” (p.m.i.) è pari all’altezza del rettangolo con base la cilindrata ed area uguale a quella del ciclo;
- L’unità di misura SI della p.m.i è il “Pa”, o il “kPa”, ma tutti i costruttori di motori usano ancora il “bar”, pari a 100 kPa, unità di misura non SI ma attualmente ancora accettata.

# Impianti di propulsione navale

## Motori alternativi a combustione interna – Calcolo della potenza indicata

- Il valore della forza media totale agente sullo stantuffo è data dalla relazione:

$$F_i = 100 \cdot \pi \cdot \frac{D^2}{4} \cdot p_i \text{ [kN]}$$

- Il lavoro “ $L_i$ ” compiuto da tale forza durante la corsa utile del motore è dato da:

$$L_i = 100 \cdot \pi \cdot \frac{D^2}{4} \cdot p_i \cdot C \text{ [kNm]}$$

- Il termine  $\pi \frac{D^2}{4} C$  è la cilindrata “ $V$ ” e pertanto l’espressione del lavoro risulta:

$$L_i = 100 \cdot p_i \cdot V \text{ [kNm]}$$

- La potenza “ $P_i$ ” è pari al lavoro “ $L_i$ ” per il numero di corse fatte nell’unità di tempo e, definito con “ $n$ ” il numero di giri al minuto, per un motore a 4T che completa il ciclo in due giri risulta:

$$P_i = 100 \cdot \frac{p_i \cdot V}{2} \cdot \frac{n}{60} = 100 \cdot \frac{p_i \cdot V \cdot n}{120} \text{ [kW]}$$

- Analogamente, per un motore a 2T, che completa il ciclo in un giro, risulta

$$P_i = 100 \cdot \frac{p_i \cdot V \cdot n}{60} \text{ [kW]}$$

# Impianti di propulsione navale

## Motori alternativi a combustione interna – Calcolo della potenza effettiva

- Le formule precedenti possono essere generalizzate in un'unica formula definendo con “h” il numero di tempi del motore. Risulta pertanto:

$$P_i = 100 \cdot \frac{p_i \cdot V \cdot n}{30 \cdot h} \text{ [kW]}$$

- La potenza indicata “ $P_i$ ” è calcolata dal ciclo indicato, la cui area rappresenta il lavoro compiuto dai gas all'interno del cilindro durante un ciclo completo;
- La potenza effettiva “ $P_e$ ” è quella trasmessa ad un utilizzatore esterno ed è minore di quella indicata a causa della potenza meccanica “ $P_m$ ” assorbita dagli attriti interni al motore. Si può scrivere pertanto:

$$P_e = P_i - P_m$$

- Il rendimento meccanico  $\eta_m$  di un motore è definito dal rapporto tra la potenza effettiva e quella indicata:

$$\eta_m = \frac{P_e}{P_i}$$

# Impianti di propulsione navale

## Motori alternativi a combustione interna – Calcolo della potenza effettiva

- Per il calcolo della potenza effettiva è utile definire la “pressione media effettiva” (p.m.e) con la relazione:

$$p_e = \eta_m \cdot p_i$$

- Analogamente la formula per il calcolo della potenza effettiva risulta:

$$P_e = 100 \cdot \frac{p_e \cdot V \cdot n}{30 \cdot h} \text{ [kW]}$$

- La formula per il calcolo della “pressione media effettiva” risulta pertanto:

$$p_e = \frac{30 \cdot h \cdot P_e}{100 \cdot V \cdot n} \text{ [bar]}$$

# Impianti di propulsione navale

## Motori alternativi a combustione interna – Riepilogo rendimenti

- **Rendimento termico ciclo teorico:**  $\eta_c = \frac{\text{area ciclo teorico}}{\text{calore speso}}$
- **Rendimento indicato:**  $\eta_i = \frac{\text{area ciclo indicato}}{\text{area ciclo teorico}}$
- **Rendimento termodinamico definito come rapporto tra il lavoro indicato e calore speso per ottenerlo, quindi pari al prodotto dei due precedenti rendimenti:**

$$\eta_t = \eta_c \cdot \eta_i = \frac{\text{area ciclo teorico}}{\text{calore speso}} \cdot \frac{\text{area ciclo indicato}}{\text{area ciclo teorico}} = \frac{\text{area ciclo indicato}}{\text{calore speso}}$$

- **Rendimento totale definito come rapporto tra il lavoro utile o effettivo e il calore speso per ottenerlo, quindi pari al prodotto del rendimento termodinamico per il rendimento meccanico:**

$$\eta = \eta_m \cdot \eta_t = \frac{\text{lavoro utile}}{\text{area ciclo indicato}} \cdot \frac{\text{area ciclo indicato}}{\text{calore speso}} = \frac{\text{lavoro utile}}{\text{calore speso}}$$

# Impianti di propulsione navale

## Motori alternativi a combustione interna – Riepilogo rendimenti

- Il rendimento totale ovviamente può essere espresso in termini di energia e diviene quindi:

$$\eta = \frac{\text{Potenza utile}}{\text{Energia del combustibile consumata nell'unità di tempo}}$$

- Normalmente il consumo di combustibile dichiarato dai costruttori di motori diesel alle condizioni di riferimento ISO è dato nella seguente forma:

$$C_c = \frac{\text{grammi consumati}}{\text{potenza utile per ora}} \left[ \frac{\text{g}}{\text{kWh}} \right]$$

- L'energia del combustibile consumata nell'unità di tempo diviene pertanto:

$$P_c = \frac{C_c \cdot P_e \cdot 1000 \cdot (\text{P.C.I.})}{1000 \cdot 3600} = \frac{C_c \cdot P_e \cdot (\text{P.C.I.})}{3600} \text{ [kW]}$$

- Il rendimento totale del motore si può esprimere con la seguente relazione:

$$\eta = 100 \cdot \frac{3600 \cdot P_e}{C_c \cdot P_e \cdot (\text{P.C.I.})} = 100 \cdot \frac{3600}{C_c \cdot (\text{P.C.I.})} \text{ [%]}$$

con  $C_c$  in g/kWh e (P.C.I.) in MJ/kg.

# Impianti di propulsione navale

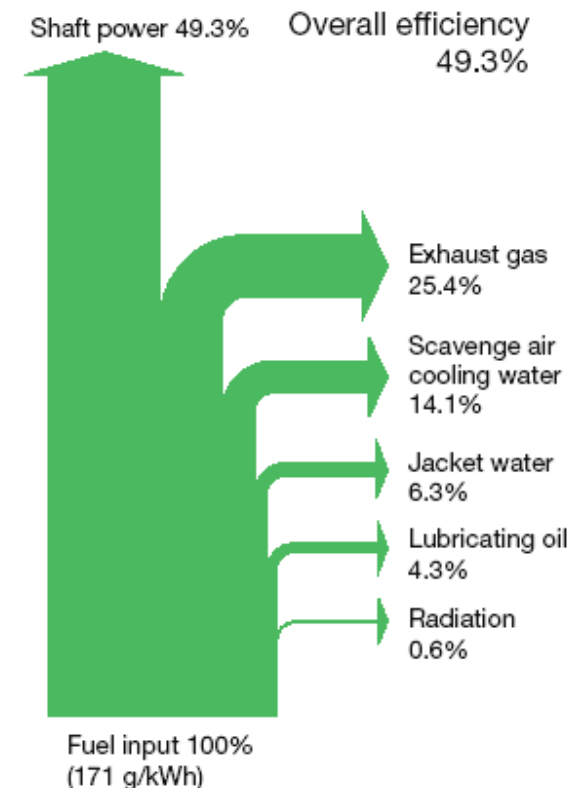
## Motori alternativi a combustione interna – Riepilogo rendimenti

- E' tradizione consolidata nel campo motoristico esprimere i rendimenti con il diagramma di Sankey, che in funzione del consumo di combustibile riporta il bilancio energetico completo del motore con la potenza utile e tutte le potenze dissipate. Tale diagramma per il motore 12RT-Flex 96C è rappresentato nella seguente figura a lato:

- Applicando la formula precedente a tale motore e considerando un (P.C.I.) = 42,7 MJ/kg, si ottiene ovviamente lo stesso rendimento del diagramma di Sankey:

$$\eta = 100 \cdot \frac{3600}{171 \cdot 42,7} = 49,3 \text{ [%]}$$

- Tuttavia, noti i dati di input, la costruzione grafica di tale diagramma non è semplice. Pertanto nel seguito il rendimento verrà espresso, per comodità, con i più semplici e facili da costruire diagrammi a torta, i quali restano meno “tecnici” ma altrettanto espressivi del bilancio termico del motore.

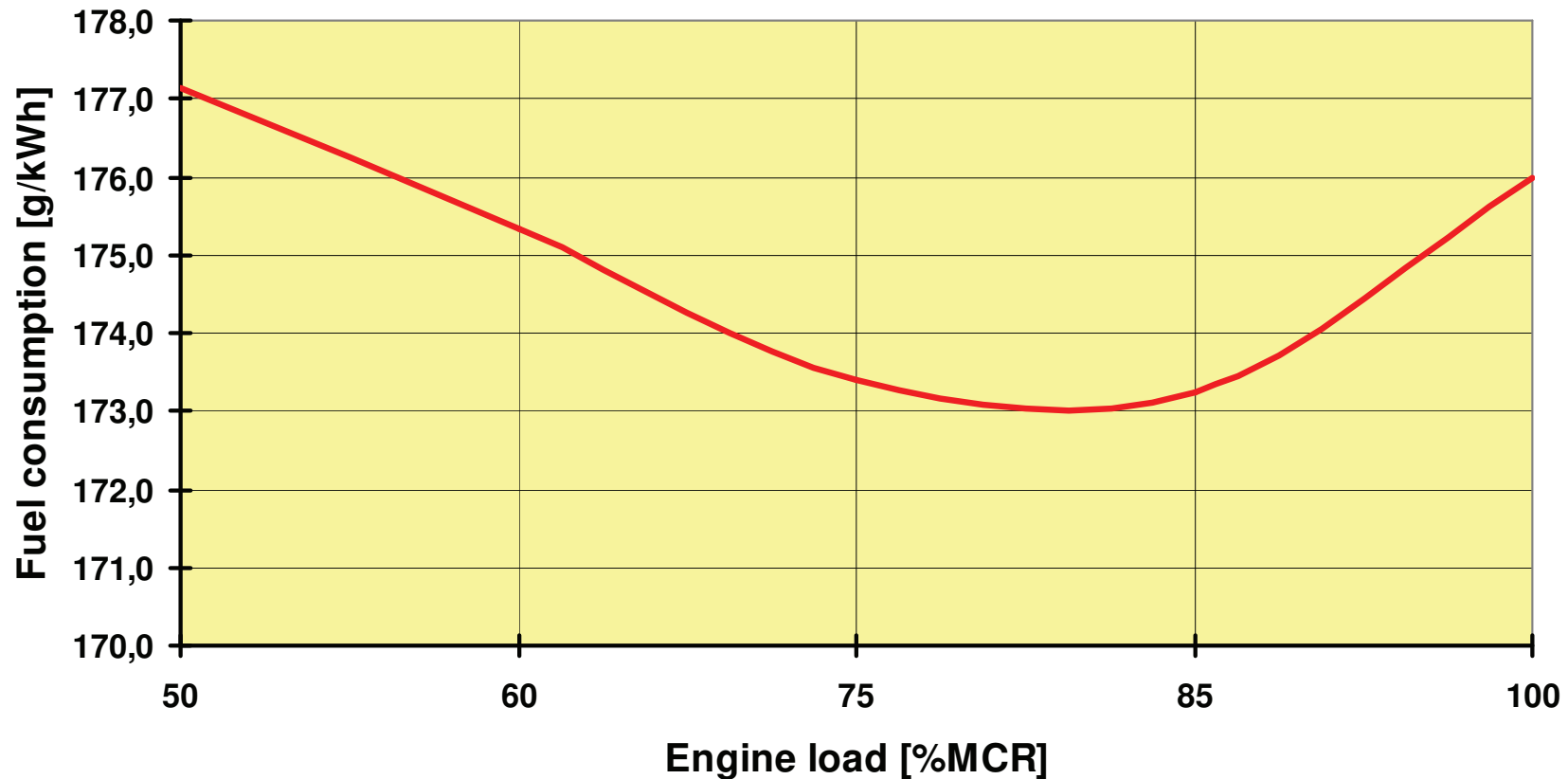




# Impianti di propulsione navale

## Motori alternativi a combustione interna – Riepilogo rendimenti

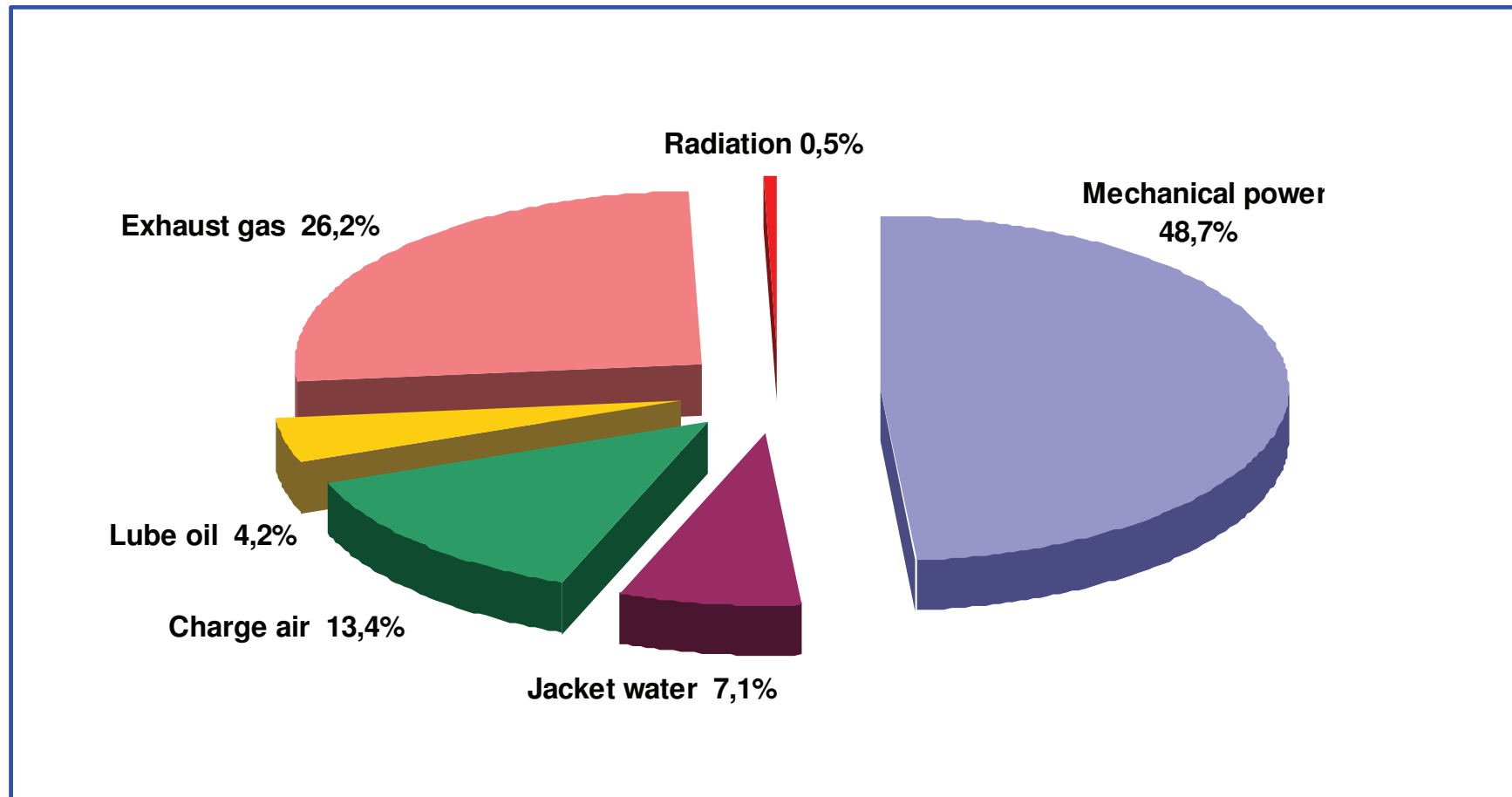
- Grafico del consumo di combustibile del motore Wärtsilä tipo 8RTA62U-B in funzione del carico:



# Impianti di propulsione navale

## Motori alternativi a combustione interna – Riepilogo rendimenti

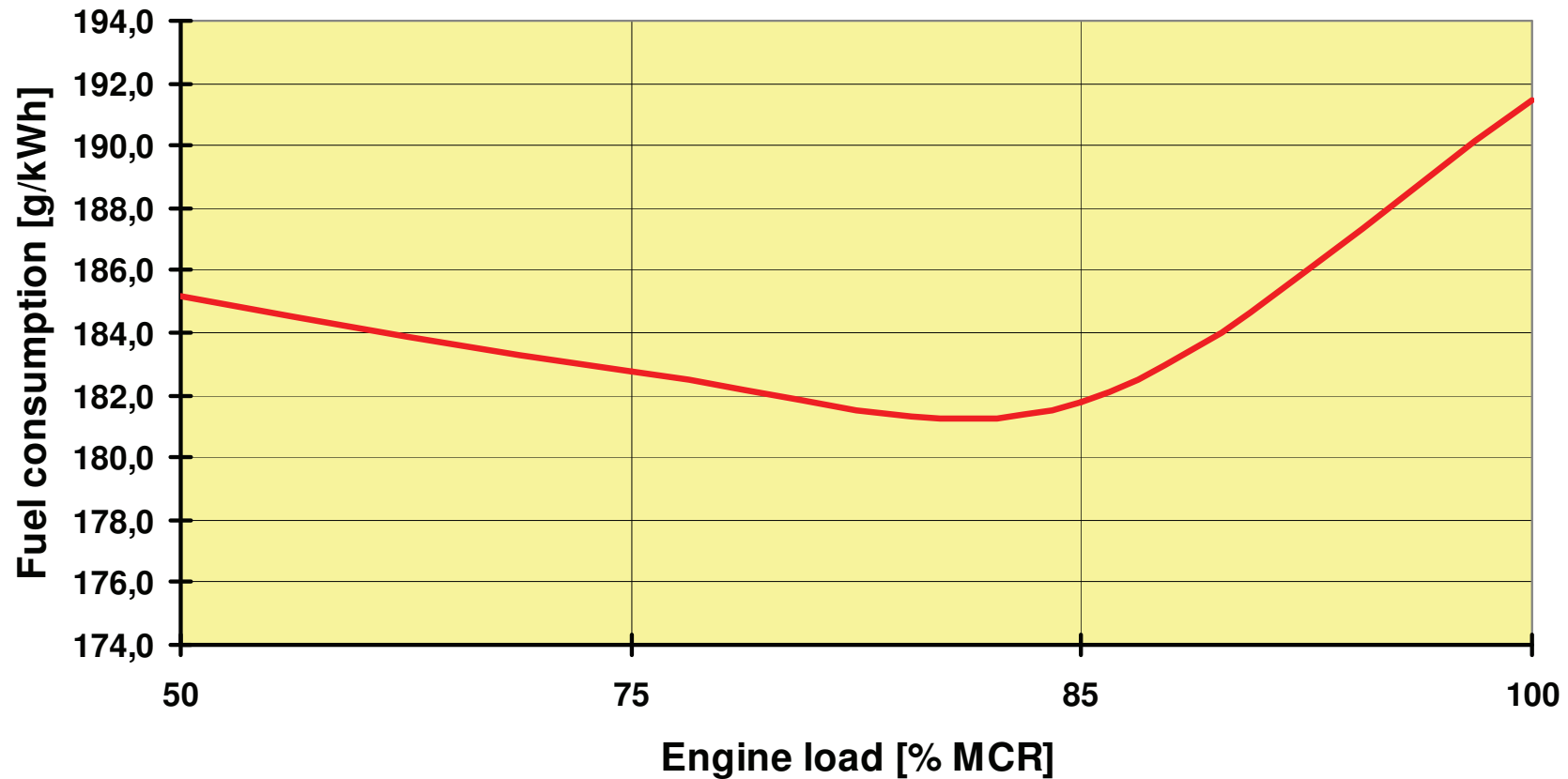
- Bilancio energetico del motore Wärtsilä tipo 8RTA62U-B all'85% del carico:



# Impianti di propulsione navale

## Motori alternativi a combustione interna – Riepilogo rendimenti

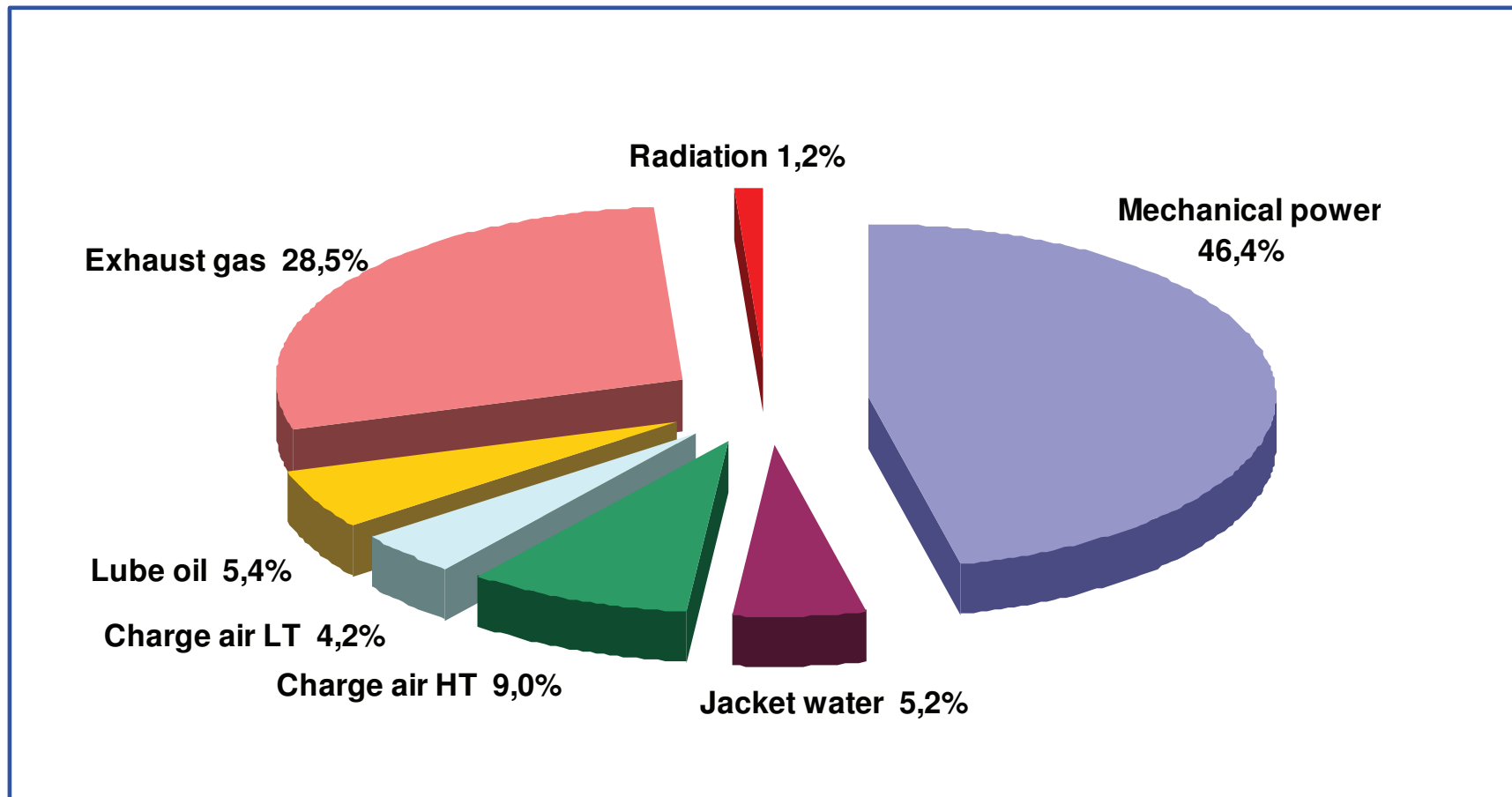
- Grafico del consumo di combustibile del motore Wärtsilä tipo 12V46D in funzione del carico:



# Impianti di propulsione navale

## Motori alternativi a combustione interna – Riepilogo rendimenti

- Bilancio energetico del motore Wärtsilä tipo 12V46D all'85% del carico:



# Impianti di propulsione navale

## Motori alternativi a combustione interna – Calcolo momento torcente

- La potenza “ $P_e$ ” ed il momento torcente “ $M$ ” sono legati dalla seguente relazione:

$$P_e = M \cdot \omega$$

nella quale “ $\omega$ ” [rad/s] è la velocità angolare di rotazione legata alla velocità di rotazione “ $n$ ” [giri/min] dalla relazione:

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60}$$

- Il momento torcente si ricava pertanto dalla seguente relazione:

$$M = \frac{P_e}{\omega} = P_e \cdot \frac{60}{2 \cdot \pi \cdot n} = 9,5493 \cdot \frac{P_e}{n} \text{ [Nm]}$$

- Sostituendo alla potenza “ $P_e$ ” l’espressione trovata in precedenza, si ricava il legame tra il momento torcente e la p.m.e.:

$$M = \frac{P_e}{\omega} = P_e \cdot \frac{60}{2 \cdot \pi \cdot n} = 100 \cdot \frac{p_e \cdot V \cdot n}{30 \cdot h} \cdot \frac{60}{2 \cdot \pi \cdot n} = 100 \cdot \frac{p_e \cdot V}{\pi \cdot h} \text{ [Nm]}$$

# Impianti di propulsione navale

## Motori alternativi a combustione interna – Parametri significativi

- La velocità media dello stantuffo durante il ciclo è un parametro che definisce il livello di sollecitazione e le condizioni di funzionamento dell'insieme stantuffo-fasce elastiche-camicia ed ha una notevole influenza sul rendimento meccanico del motore;

- Ricordando che “C” è la corsa dello stantuffo ed “n” è il numero di giri al minuto, tale velocità risulta:

$$v_e = 2 \cdot C \cdot \frac{n}{60} = \frac{C \cdot n}{30} [\text{ms}^{-1}]$$

- Un altro parametro significativo per confronti fra diversi motori è il rapporto tra la corsa e il diametro del cilindro:

$$\mu = \frac{C}{D}$$

- Generalmente sono definiti motori a corsa corta o “quadri” quelli con il rapporto  $\mu$  minore o prossimo ad 1;
- Viceversa, sono definiti motori a corsa lunga quelli con il rapporto  $\mu$  maggiore di 1.

# Impianti di propulsione navale

## Motori alternativi a combustione interna – Parametri significativi

- Aumento della pressione massima interno cilindro e della pressione media effettiva

