



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI DI TRIESTE

Vittorio BUCCI

Progetto di impianti di propulsione navale

3.8 ESERCITAZIONE ACCOPPIAMENTO ELICA/MOTORE

Anno Accademico 2017/2018

Impianti di propulsione navale

Accoppiamento elica - motore

Riepilogo delle grandezze fondamentali relative all'interazione carena – elica.

- 1) Rispetto alle condizioni di prova in acqua indisturbata (“open water”), nella realtà l'elica si trova ad operare in acqua disturbata dal passaggio della carena. In generale, l'acqua attorno alla poppa assume un moto di avanzamento nella stessa direzione della nave, moto che viene denominato “scia”. L'esistenza della scia fa sì che l'elica non si muova rispetto all'acqua alla velocità della nave V , ma ad una velocità minore V_A , chiamata “velocità di avanzamento”. La velocità della scia può essere definita come differenza fra velocità della nave e velocità di avanzamento :

$$V_w = V - V_A$$

Il “fattore di scia” w introdotto da Taylor esprime la velocità della scia come frazione della velocità della nave :

$$V_w = wV \quad \text{da cui :} \quad V - V_A = wV \quad \text{e quindi} \quad V_A = V(1 - w)$$

Impianti di propulsione navale

La scia è dovuta a tre cause principali :

- a) la resistenza d'attrito della carena causa una corrente diretta nel senso del moto che aumenta di velocità e di ampiezza verso poppa, producendo ivi una scia avente una considerevole velocità in avanti rispetto all'acqua circostante;**
- b) le linee di corrente adiacenti alla carena determinano un incremento di pressione a poppa poichè ivi esse tendono ad avvicinarsi fra loro. Ciò significa che in questa zona la velocità relativa dell'acqua adiacente alla carena sarà minore della velocità nave e determinerà una scia diretta in avanti che andrà a sommarsi a quella creata dall'attrito;**
- c) la nave forma un sistema di onde alla superficie dell'acqua e le particelle d'acqua delle creste hanno una velocità diretta verso prora dovuta al loro moto orbitale, mentre nei cavi le particelle hanno velocità diretta verso poppa. La velocità orbitale darà luogo quindi ad una componente di scia positiva o negativa a seconda che il sistema di onde abbia rispettivamente la cresta o il cavo in vicinanza dell'elica.**

La scia totale, formata da queste tre componenti, è nella maggioranza dei casi positiva, eccetto che per carene ad alta velocità di forme particolarmente fini.

Impianti di propulsione navale

- 2) Quando una carena viene rimorchiata, attorno alla poppa si crea un'area di alta pressione con una risultante diretta in avanti il cui effetto è quello di diminuire la resistenza totale. In una carena autopropulsa si hanno i seguenti fenomeni :
- a) l'azione dell'elica, il cui effetto è quello di accelerare l'acqua che fluisce attraverso il suo disco, riduce la pressione a poppa,
 - b) l'aumento della velocità del flusso a poppa crea un aumento della resistenza d'attrito.

Il primo fenomeno prevale in genere sul secondo. Ciò equivale ad un aumento della resistenza R_T e quindi della spinta T necessaria a far avanzare la carena. Solitamente si ragiona in termini di “riduzione di spinta”, piuttosto che di “incremento di resistenza”, come forse sarebbe più logico : si considera che della spinta totale T una parte, $T - R_T$, venga perduta. Il rapporto fra spinta perduta e spinta totale si definisce “fattore di riduzione di spinta” t :

$$t = \frac{T - R_T}{T} \quad \text{da cui :} \quad R_T = (1 - t)T$$

Impianti di propulsione navale

- 3) L'elica in acqua indisturbata, funzionante alla velocità di avanzo V_A , ha un rendimento cosiddetto in "open water" η_o dato dal rapporto fra potenza di spinta P_T e potenza assorbita all'asse P_{D_o} . Poichè :

$$P_T = TV_A \quad P_{D_o} = 2\pi n Q_o \quad \text{si ha :} \quad \eta_o = \frac{P_T}{P_{D_o}} = \frac{TV_A}{2\pi n Q_o}$$

ove Q_o è il momento motore assorbito dall'elica alla velocità di rotazione n .
Dietro carena, le medesime grandezze T , V_A ed n saranno associate ad un momento assorbito Q diverso da Q_o .

Si definirà allora un rendimento dell'elica dietro carena :

$$\eta_B = \frac{P_T}{P_D} = \frac{TV_A}{2\pi n Q}$$

Il rapporto fra rendimento dietro carena e rendimento in "open water" si definisce "rendimento rotativo relativo"

$$\eta_R = \frac{\eta_B}{\eta_o} = \frac{Q_o}{Q}$$

Impianti di propulsione navale

Tale rendimento esprime la differenza fra momenti torcenti in “open water” e dietro carena dovuta principalmente alle seguenti cause :

- a) la scia eterogenea dietro carena fa sì che le varie sezioni di pala dell'elica ruotino in condizioni di flusso diverse rispetto al flusso indisturbato e sviluppino rendimenti del pari diversi,**
- b) le porzioni relative di flusso laminare e turbolento attorno alle pale sono diverse nelle due condizioni; nelle condizioni dietro carena la turbolenza del flusso è maggiore.**

Il valore del rendimento rotativo relativo non si discosta molto dall'unità : in generale varia da 0.95 a 1 per le navi bielica e da 1 a 1.1 per le navi monoelica.

Impianti di propulsione navale

4) La catena dei rendimenti

- La potenza effettiva P_E è la potenza necessaria per muovere la nave alla velocità V contro la resistenza R_T

$$P_E = R_T V$$

- La potenza di spinta P_T è la potenza sviluppata dall'elica che esercita la spinta T alla velocità di avanzamento V_A

$$P_T = T V_A$$

- L'impianto propulsivo "consegna" all'elica in "open water" la potenza P_{D_o}

$$P_{D_o} = 2\pi n Q_o$$

- L'impianto propulsivo "consegna" all'elica dietro carena la potenza P_D

$$P_D = 2\pi n Q$$

Impianti di propulsione navale

Definiamo la catena dei rendimenti :

$$\eta_D = \frac{P_E}{P_D} = \frac{P_E}{P_T} \frac{P_T}{P_{D_o}} \frac{P_{D_o}}{P_D} = \eta_H \eta_o \eta_R$$

ove :

η_D rendimento propulsivo (“quasi-propulsive coefficient”)

η_H rendimento di carena (“hull efficiency”)

$$\eta_H = \frac{P_E}{P_T} = \frac{R_T V}{TV_A} = \frac{R_T V}{\frac{R_T}{1-t} V (1-w)} = \frac{1-t}{1-w}$$

Impianti di propulsione navale

Il prodotto $\eta_o \eta_R$ è pari al rendimento dell'elica dietro carena η_B , come già definito :

$$\eta_B = \frac{P_T}{P_D} = \frac{P_T}{P_{D_o}} \frac{P_{D_o}}{P_D} = \eta_o \eta_R$$

Con riferimento alla figura seguente, notiamo che la potenza consegnata all'elica P_D è decurtata, rispetto alla potenza alla flangia motore P_B , delle perdite che si verificano nel riduttore di giri e nei cuscinetti e boccole della linea d'alberi :

$$P_D = \frac{P_D}{P_S} \frac{P_S}{P_B} P_B = \eta_S \eta_{RG} P_B$$

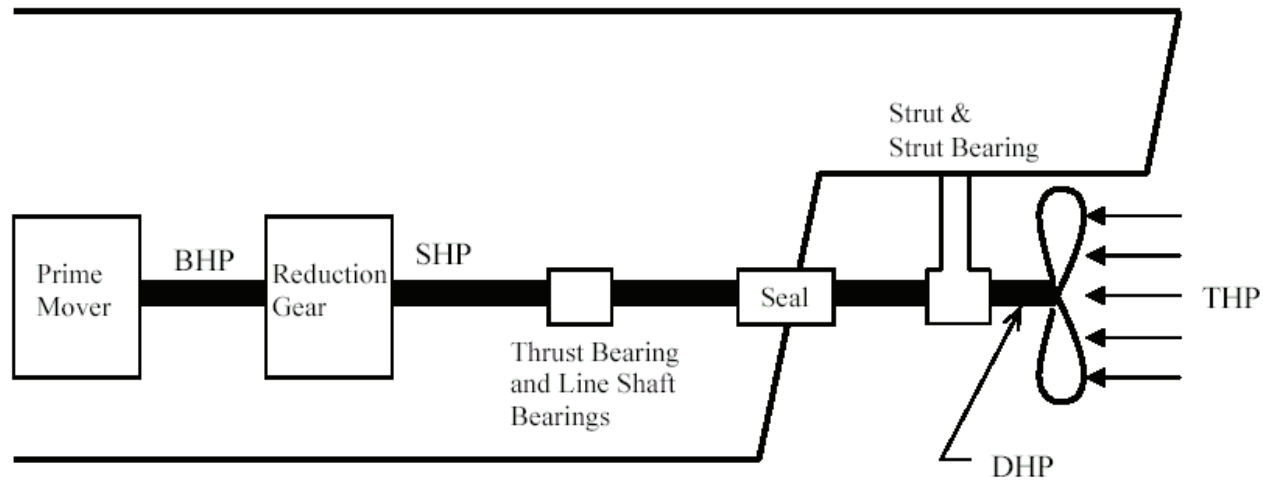
P_B potenza alla flangia motore

P_S potenza asse

η_S rendimento linea alberi

η_{RG} rendimento riduttore di giri

Impianti di propulsione navale



Impianti di propulsione navale

5) I coefficienti adimensionali dell'elica

Molte delle conoscenze riguardanti le prestazioni delle eliche sono state ottenute da esperienze su modelli. Per ricavare le leggi che reggono il comportamento dell'elica, si è soliti provare l'elica modello senza porre la carena innanzi ad essa. Tale condizione di prova è nota come “open water”. Essa si realizza in vasca ponendo l'elica in testa ad una “barchetta” che reca a prora l'albero di azionamento dell'elica. La barchetta viene mossa dal carro della vasca e contiene i dispositivi di azionamento dell'elica e di registrazione dei dati della prova. Il dispositivo di prova fa sì che l'elica avanzi in un flusso indisturbato con velocità di avanzo nota V_A . I valori della spinta T , del momento torcente applicato all'albero Q_o e dei giri n vengono registrati.

La prova viene condotta mantenendo costanti, fra modello ed elica al vero, il coefficiente di avanzo $J = V_A / nD$ e il numero di Froude $V_A / (gD)^{0.5}$. Non è invece possibile ottenere l'uguaglianza dei numeri di Reynolds e dei numeri di cavitazione fra modello ed elica al vero.

L'analisi dimensionale delle grandezze significative della prova porta a definire i seguenti coefficienti adimensionali :

Impianti di propulsione navale

- Coefficiente di avanzo $J = \frac{V_A}{nD}$

- Coefficiente di spinta $K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4}$

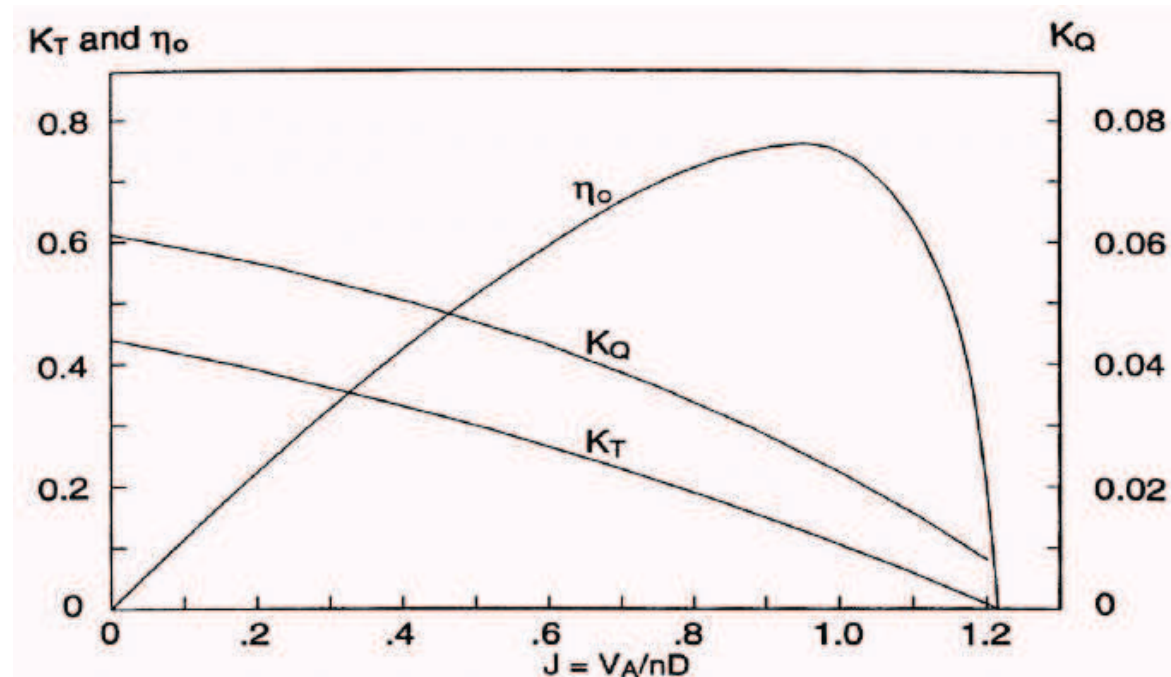
- Coefficiente di momento $K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5}$

Dai risultati sperimentali vengono dedotte le curve $K_T = K_T(J)$ e $K_Q = K_Q(J)$
A parità di J , i coefficienti K_T e K_Q sono uguali per il modello e l'elica al vero.
Il rendimento in "open water" può essere espresso da :

$$\eta_o = \frac{P_T}{P_{D_o}} = \frac{TV_A}{2\pi n Q_o} = \frac{K_T \rho n^2 D^4 V_A}{2\pi K_Q \rho n^3 D^5} = \frac{K_T}{K_Q} \frac{V_A}{2\pi n D} = \frac{K_T}{K_Q} \frac{J}{2\pi}$$

Impianti di propulsione navale

Esempio di diagramma $J - K_T - K_Q - \eta_o$:



Impianti di propulsione navale

Come si passa :

- 1) dalla curva di resistenza nave alla curva di carico dell'elica,
- 2) dalla curva di carico dell'elica alla potenza al freno del motore.

-
- 1) la curva di resistenza nave $R_T = f(V)$ può essere descritta dall'equazione :

$$R_T = c_1 V^2$$

ove c_1 non è una grandezza costante ma è in genere composta da un fattore di resistenza c_o dipendente dalla velocità e da un fattore moltiplicativo che tiene conto delle resistenze aggiuntive dipendenti dalle condizioni di servizio :

$$R_T = y c_o V^2$$

c_o : funzione di V. Esprime la resistenza nave nelle condizioni nominali (carena pulita, mare calmo, acque profonde, ...)

y : fattore moltiplicativo per le condizioni di servizio effettive (SEA MARGIN)

Impianti di propulsione navale

Ricordando quanto visto nell'introduzione si ha :

$$R_T = c_1 V^2 = c_1 \left(\frac{V_A}{1-w} \right)^2$$

Se Z_p è il numero delle eliche, la spinta della singola elica T sarà :

$$T = \frac{R_T}{Z_p (1-t)} = \frac{c_1 V_A^2}{Z_p (1-t)(1-w)^2} = c_8 V_A^2$$

Abbiamo introdotto il coefficiente c_8 :

$$c_8 = \frac{c_1}{Z_p (1-t)(1-w)^2}$$

Impianti di propulsione navale

Si risale ora al coefficiente di spinta della singola elica :

$$K_{Ts} = \frac{T}{\rho n^2 D^4} = \frac{c_8 V_A^2}{\rho n^2 D^4} = \frac{c_8}{\rho D^2} \frac{V_A^2}{n^2 D^2} = \frac{c_8 J^2}{\rho D^2} = c_7 J^2$$

ove :

$$c_7 = \frac{c_8}{\rho D^2} = \frac{c_1}{Z_p (1-t)(1-w)^2} \frac{1}{\rho D^2}$$

Per ragioni di chiarezza abbiamo contraddistinto il coefficiente K_T con l'indice "s" : esso è infatti relativo alla spinta richiesta dalla nave.

In questa fase del calcolo si suppone di aver già determinato le caratteristiche dell'elica da installare, o tramite scelta di un'elica di serie (per esempio elica "B" di Wageningen) o tramite progetto diretto dell'elica medesima.

La trattazione di entrambi i metodi esula dagli scopi di queste note.

Supporremo in particolare di conoscere diametro, rapporto passo/diametro, rapporto EAR e il diagramma $J - K_T - K_Q$ in "open water" dell'elica.

Impianti di propulsione navale

Avendo calcolato C_7 , è possibile tracciare per punti la curva

$$K_{Ts} = c_7 J^2$$

nel diagramma $J - K_T - K_Q - \eta_o$ dell'elica.

L'intersezione della curva K_{Ts} con la curva K_T dell'elica prescelta consente ora di individuare tutti i parametri mancanti (vedi diagramma a pagina seguente).

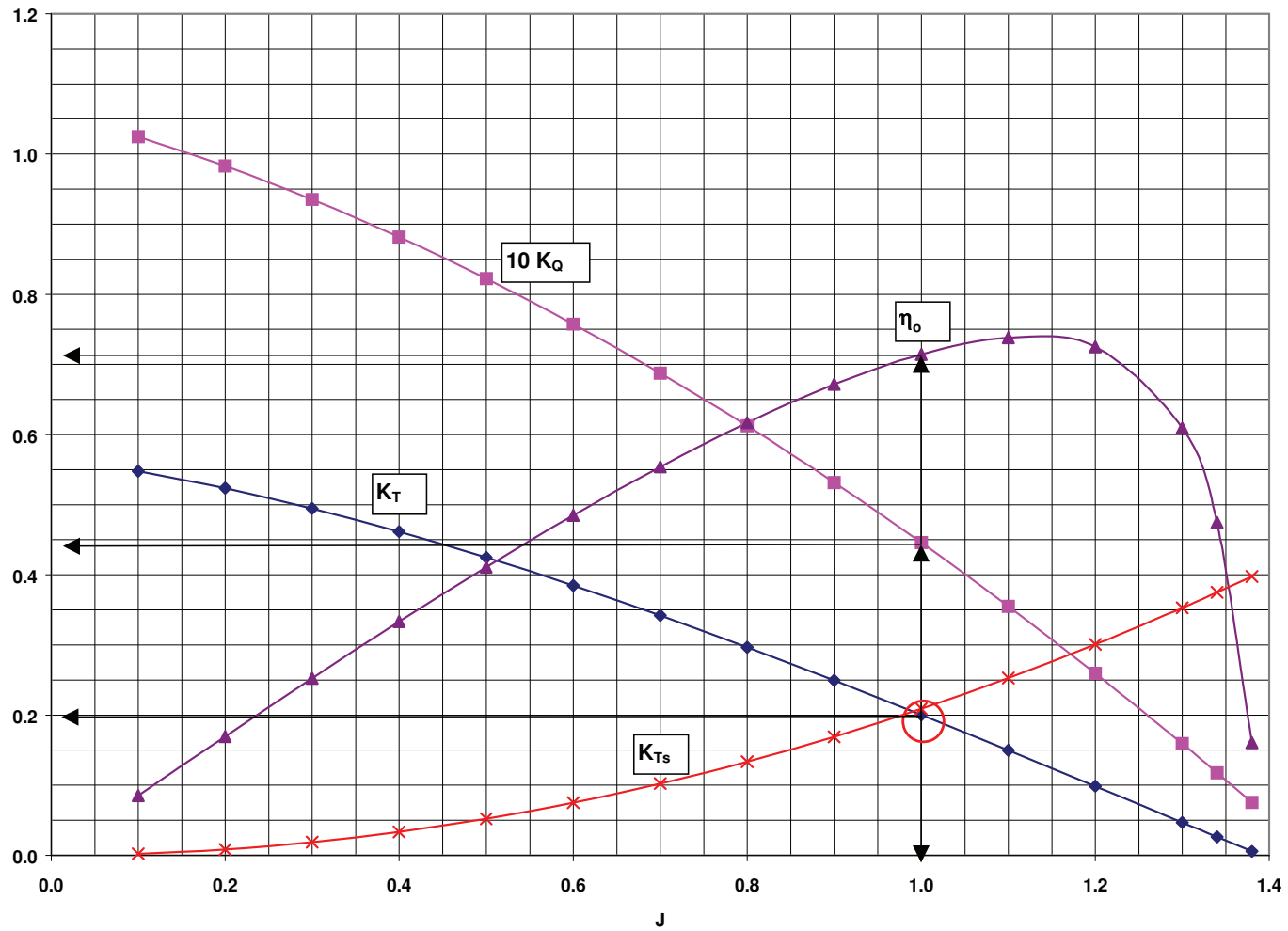
In particolare, leggendo in ascissa il valore di J , si ricava immediatamente il numero di giri dell'elica n :

$$n = \frac{V_A}{JD} = \frac{V(1-w)}{JD} = c_3 V$$

ove

$$c_3 = \frac{1-w}{JD}$$

Impianti di propulsione navale



Impianti di propulsione navale

Si ricavano inoltre :

- il momento assorbito dall'elica in "open water" : $Q_o = K_Q \rho n^2 D^5$

e, ricordando la definizione di rendimento rotativo relativo : $\eta_R = \frac{Q_o}{Q}$

- il momento assorbito dietro carena : $Q = \frac{K_Q}{\eta_R} \rho n^2 D^5$

Infine si ricava il valore della potenza consegnata all'elica, ossia il carico dell'elica cercato :

$$P_D = 2\pi n Q = 2\pi \frac{K_Q \rho n^3 D^5}{\eta_R} = c_4 n^3$$

ove :

$$c_4 = 2\pi \frac{K_Q \rho D^5}{\eta_R}$$

Impianti di propulsione navale

Con questo procedimento, partendo dalla curva di resistenza nave $R_T = f(V)$

nota l'elica e il relativo diagramma dei coefficienti in "open water",

siamo giunti alla curva di carico dell'elica $P_D = c_4 n^3$

Nel caso particolare in cui $R_T = c_1 V^2$ con c_1 costante,

anche c_4 sarà una costante e la curva dell'elica sarà una cubica.

Per dimostrarlo, ipotizziamo, semplificando, che w , t , η_R non varino al variare di V .

Allora, se $c_1 = \text{cost.}$, sono costanti anche c_8 e c_7 e quindi la curva K_{T_S} rimane invariata al variare della velocità.

Pertanto anche i parametri J e K_Q saranno invariati e c_4 sarà costante.

Impianti di propulsione navale

Un'altra conseguenza di rilievo è che, nell' ipotesi $c_1 = \text{costante}$, la velocità nave varia linearmente con i giri dell'elica.

Ricordiamo che :

$$n = \frac{V_A}{JD} = \frac{V(1-w)}{JD} = c_3 V$$

Poichè $J = \text{cost.}$, anche $c_3 = \text{cost.}$

Impianti di propulsione navale

Come si passa :

- 1) dalla curva di resistenza nave alla curva di carico dell'elica,
- 2) dalla curva di carico dell'elica alla potenza al freno del motore.

-
- 2) nota la curva di carico dell'elica, $P_D = c_4 n^3$

si ricava la potenza al freno erogata dal motore considerando la composizione e i rendimenti della linea di trasmissione interposta fra motore e elica.

Siano :

Z_m	numero di motori accoppiati all'asse
P_B	potenza del singolo motore
n_m	giri motore
i	rapporto di riduzione dei giri fra motore ed asse
η_{RG}	rendimento riduttore di giri
η_S	rendimento linea alberi (cuscinetti, boccole, ...)

Impianti di propulsione navale

Tenendo conto che :

$$P_D = c_4 n^3 \qquad P_D = \eta_{RG} \eta_S Z_m P_B \qquad n = \frac{n_m}{i}$$

Sarà :

$$c_4 \left(\frac{n_m}{i} \right)^3 = \eta_{RG} \eta_S Z_m P_B$$

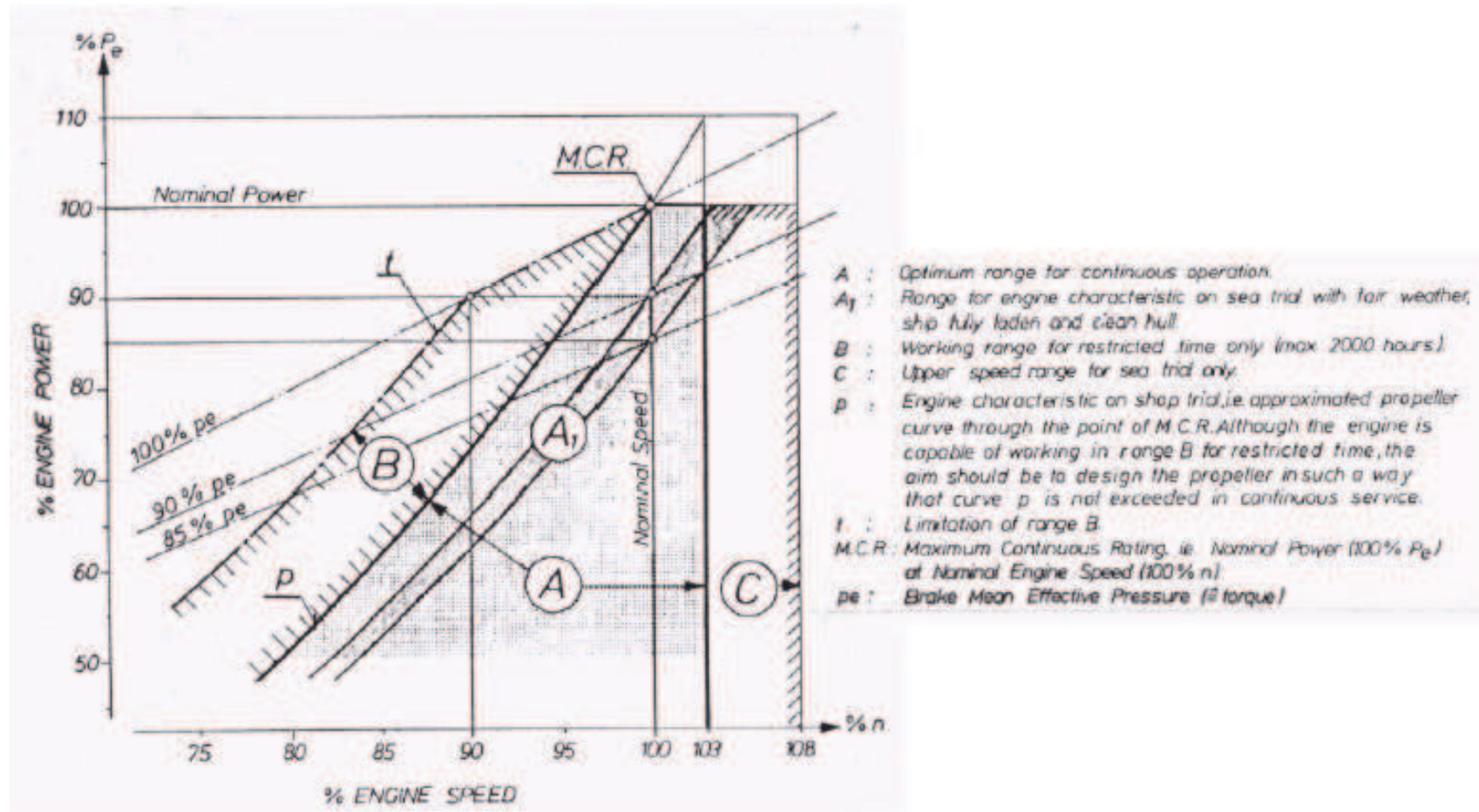
$$P_B = \frac{c_4}{\eta_{RG} \eta_S Z_m} \left(\frac{n_m}{i} \right)^3 = c_9 n_m^3$$

ove :

$$c_9 = \frac{c_4}{\eta_{RG} \eta_S Z_m i^3}$$

Pertanto, per il fatto di essere accoppiato all'elica, il motore dovrà erogare alla flangia di accoppiamento una potenza proporzionale al cubo dei giri.

Impianti di propulsione navale



Impianti di propulsione navale

Funzionamento dell'elica in condizioni "off-design"

L'elica si trova sovente ad operare in condizioni diverse da quelle per cui è stata progettata. In questi casi è importante verificare se l'impianto propulsivo funziona in condizioni soddisfacenti o meno : è importante, ad esempio, accertare se sussistono rischi di sovraccarico che possano pregiudicare la sicurezza di funzionamento dell'apparato motore. Ricordiamo che i moderni motori diesel, altamente sovralimentati, sono particolarmente sensibili ai sovraccarichi termici e meccanici che si verificano quando l'elica richiede loro una coppia rilevante a giri relativamente bassi.

Le condizioni "off-design" principali sono :

- La nave naviga a velocità diversa dalla velocità di progetto
- La resistenza della carena è variata in conseguenza di :
 - incrostazioni marine
 - dislocamento diverso da quello di progetto
 - stato del mare diverso da quello di progetto
 - navigazione in bassi fondali
 - la nave rimorchia attrezzature particolari
- In navi a più eliche, un'elica è fuori servizio (ruota in folle o è bloccata)
- Cambio del passo elica in eliche a pale orientabili

Impianti di propulsione navale

- **in configurazioni propulsive a più motori, varia il numero dei motori connessi all'albero dell'elica**
- **in impianti propulsivi dotati di prese di potenza (PTO), varia la potenza prelevata dalla PTO (per esempio, per azionare l'alternatore asse)**
- **in impianti dotati di riduttori di giri a diverse velocità, varia il rapporto di riduzione fra motore ed elica**

Impianti di propulsione navale

Eliche a pale orientabili

Per avere un'idea generale di quale sia il campo operativo di un'elica a pale orientabili, è opportuno tracciare un diagramma $P_D - n$ nel quale si riporta la potenza all'elica P_D in funzione della velocità n per diversi valori del rapporto passo / diametro P/D .

Nel diagramma vengono tracciate pure le curve P_D-n per valori costanti della velocità nave.

Si preferisce usare la potenza all'elica P_D in luogo della potenza alla flangia motore P_B per rendere il diagramma indipendente da ogni deduzione di potenza lungo la linea d'alberi dovuta per esempio ad un alternatore asse, alle perdite per attrito di cuscinetti e boccole, ecc.

Il diagramma P_D-n si basa su una curva di resistenza totale della nave in condizioni ben definite e sulle curve $J-K_T-K_Q$ dell'elica. Da tener presente che le curve $J-K_T-K_Q$ saranno tante quanti sono i valori da considerare per il rapporto passo / diametro P/D dell'elica.

Impianti di propulsione navale

Eliche a pale orientabili

Poichè la curva di resistenza varia a seconda delle condizioni, saranno necessari diversi diagrammi P_D - n per nave a pieno carico o in zavorra, condizioni di carena pulita o sporca, mare calmo o situazione meteomarina avversa, ecc.

In genere si parte dal diagramma per una condizione ben nota : nave a pieno carico con carena pulita e mare calmo.

Vediamo ora i metodi che consentono di ricavare :

- le curve P_D - n per diversi valori del rapporto passo / diametro P/D .
Le curve si tracciano, partendo dalla curva di resistenza nave, con il metodo già esposto.
- le curve P_D - n per valori costanti della velocità nave.
Si adotta il metodo seguente.

Impianti di propulsione navale

Eliche a pale orientabili

Essendo noti :

- il diametro D dell'elica
- la velocità di avanzo V_A
- la spinta T

è possibile calcolare la costante K_T / J^2 :

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4} \quad J = \frac{V_A}{nD}$$

$$\frac{K_T}{J^2} = \frac{T}{\rho n^2 D^4} \frac{n^2 D^2}{V_A^2} = \frac{T}{\rho D^2 V_A^2} = \text{cost.}$$

Impianti di propulsione navale

Eliche a pale orientabili

Nel piano delle curve J - K_T - K_Q , l'equazione $K_T = \text{cost.} \times J^2$ rappresenta una parabola che interseca le curve K_T corrispondenti ai vari rapporti passo / diametro. Ad ogni intersezione si rilevano i valori di J e, a partire da essi, quelli di K_Q e η_o . Noti tali valori, si calcolano P_D e n . Alla fine si compila una tabella del tipo :

Per la V_A data	P/D	J	K_Q	η_o	P_D	n
	valore 1					
	valore 2					
	valore n					

Per ogni riga, la coppia di valori P_D - n individua un punto sulla curva potenza – giri relativa al valore i -esimo del rapporto passo / diametro P/D.

Poichè tutti punti P_D - n della tabella sono stati ricavati per la stessa velocità V_A , la curva che li unisce è proprio la curva P_D - n a velocità costante cercata.

Si nota che la curva presenta un valore minimo di potenza in corrispondenza ad un dato numero di giri (rendimento ottimale).

Impianti di propulsione navale

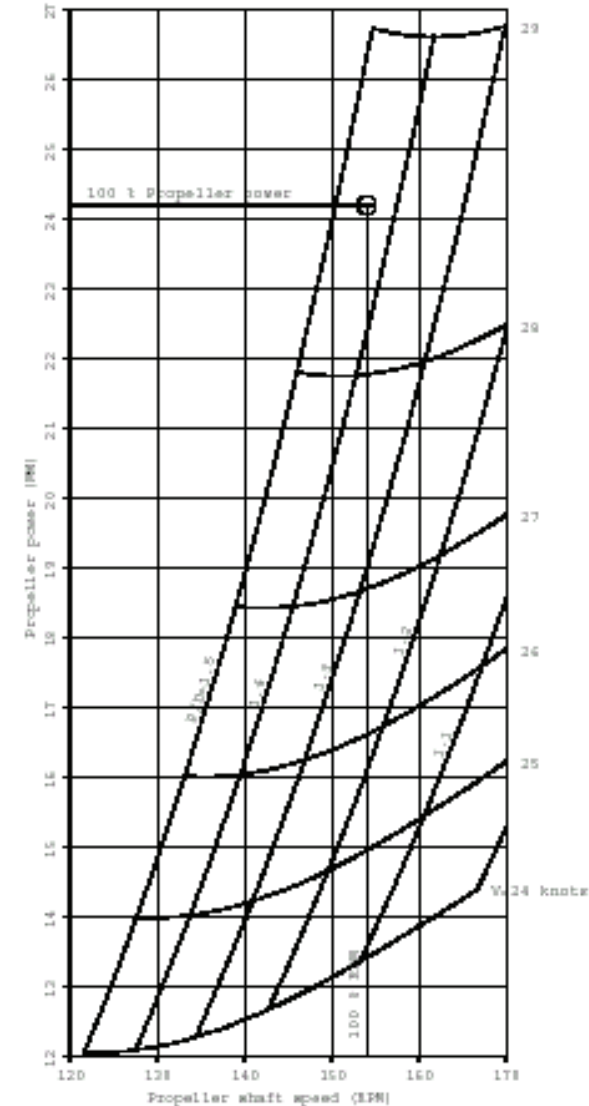
Eliche a pale orientabili

La sequenza di calcoli, ripetuta per vari valori di V_A , dà luogo ad un diagramma del tipo di quello riportato accanto.

Scopo del diagramma è quello di facilitare l'esecuzione delle curve combinate passo-giri e del sistema di controllo del carico che l'impianto elica a pale orientabili impone al motore di propulsione.

PROPELLER DATA

Diameter	5.400 m
Hub diameter	1.710 m
No of Blades	4
AE/A0	0.750
P/D	1.343



Impianti di propulsione navale

Caratteristiche dei motori primi

La caratteristica di un motore primo rappresenta la relazione fra la potenza, o il momento torcente, e il numero di giri sviluppati alla flangia di accoppiamento del motore.

La caratteristica può essere definita per qualsiasi tipo di macchina motrice: per esempio un motore diesel, una turbina a gas, una turbina a vapore o un motore elettrico.

Verranno nel seguito presentate le caratteristiche del motore diesel, della turbina a gas, della turbina a vapore e di un motore elettrico sincrono controllato in frequenza.

Impianti di propulsione navale

MOTORE DIESEL

Teoricamente, il momento torcente del motore diesel è costante, nell'intervallo fra il minimo e il massimo numero di giri, se è costante la quantità di combustibile iniettata per ogni ciclo operativo del motore.

Il momento torcente, e quindi la potenza, può essere regolato controllando la posizione delle cremagliere degli iniettori e quindi la quantità di combustibile per ciclo.

Poichè $P_B = 2\pi n M_B$, se il momento M_B è costante, la potenza P_B è direttamente proporzionale al numero di giri al secondo n .

Si dimostra che esiste un legame di proporzionalità diretta fra momento torcente e pressione media effettiva del motore :

$$p_{me} = \pi h \frac{M_B}{V}$$

ove h : numero di tempi del ciclo motore
 V : cilindrata totale del motore

Impianti di propulsione navale

MOTORE DIESEL

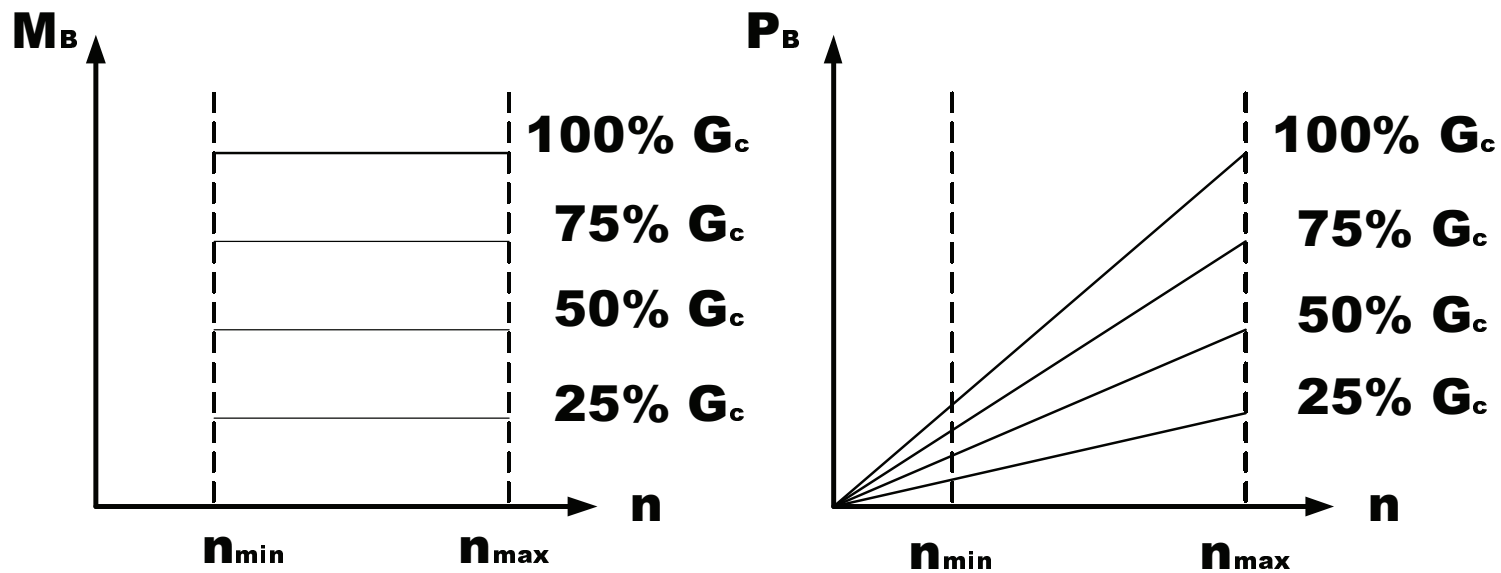
Nella pratica (vedi curve seguenti), si osserva che :

- nei motori aspirati la potenza ad un certo regime comincia a diminuire a causa della diminuzione del rendimento volumetrico del motore.
- nei motori sovralimentati, il campo di utilizzo del motore è limitato dalle prestazioni della turbosoffiante.

Lo studio dettagliato dei campi di utilizzo dei motori diesel marini a due e quattro tempi verrà svolto nella fase successiva del corso.

Impianti di propulsione navale

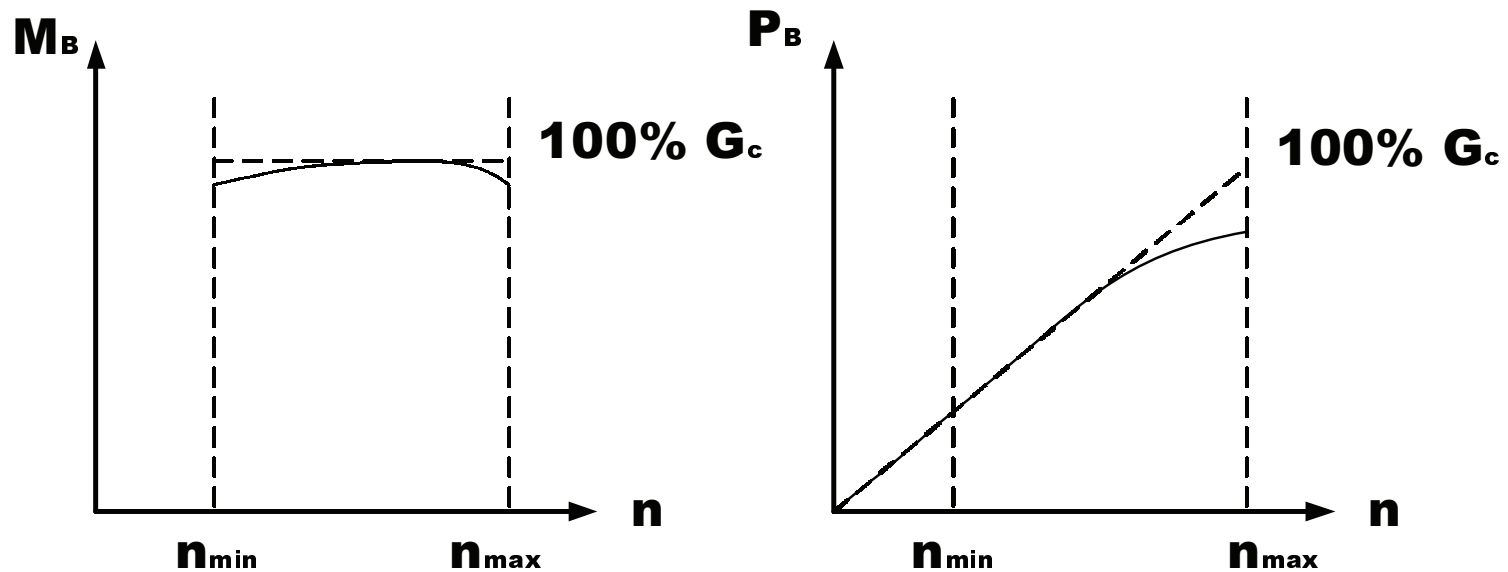
Caratteristica teorica del motore diesel aspirato



**G_c : massima quantità
di combustibile
iniettata per ciclo**

Impianti di propulsione navale

Caratteristica del motore diesel aspirato

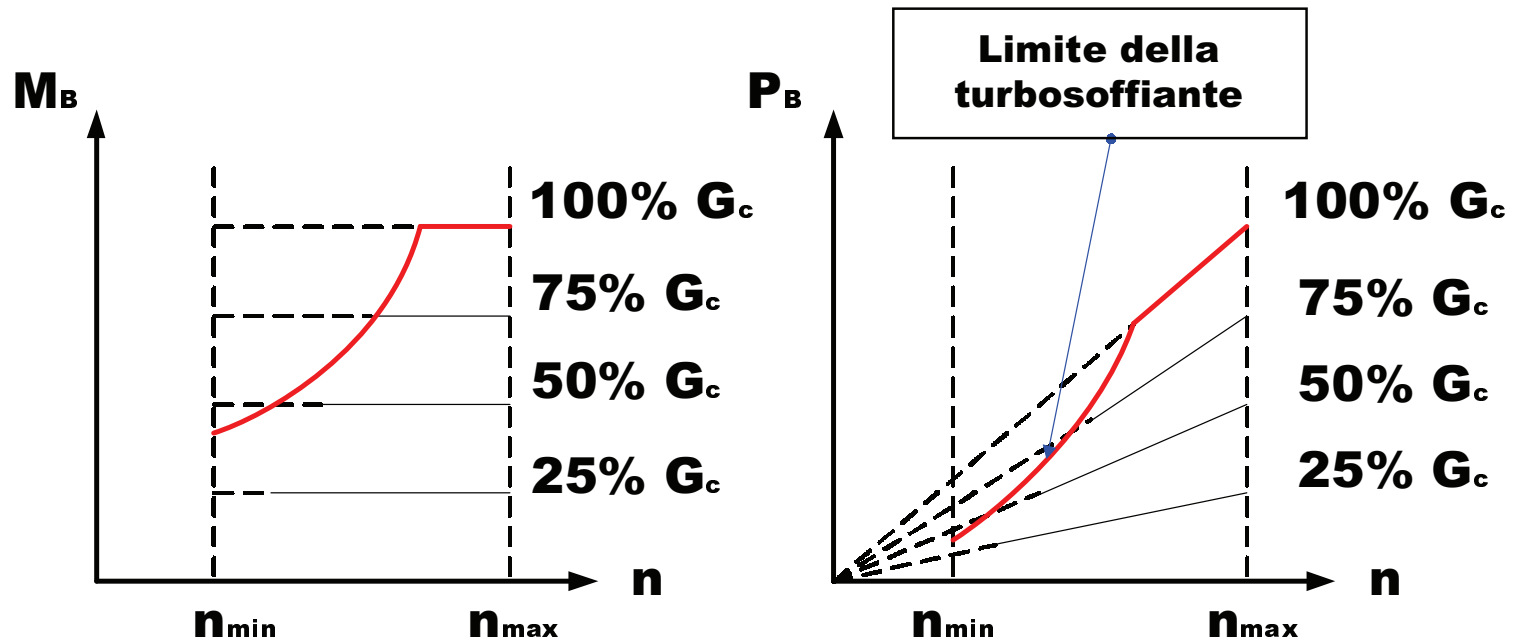


G_c : massima quantità di combustibile iniettata per ciclo

La potenza, ad un certo regime, comincia a diminuire a causa della diminuzione del rendimento volumetrico del motore

Impianti di propulsione navale

Caratteristica del motore diesel sovralimentato



**G_c : massima quantità
di combustibile
iniettata per ciclo**

Impianti di propulsione navale

TURBINA A GAS

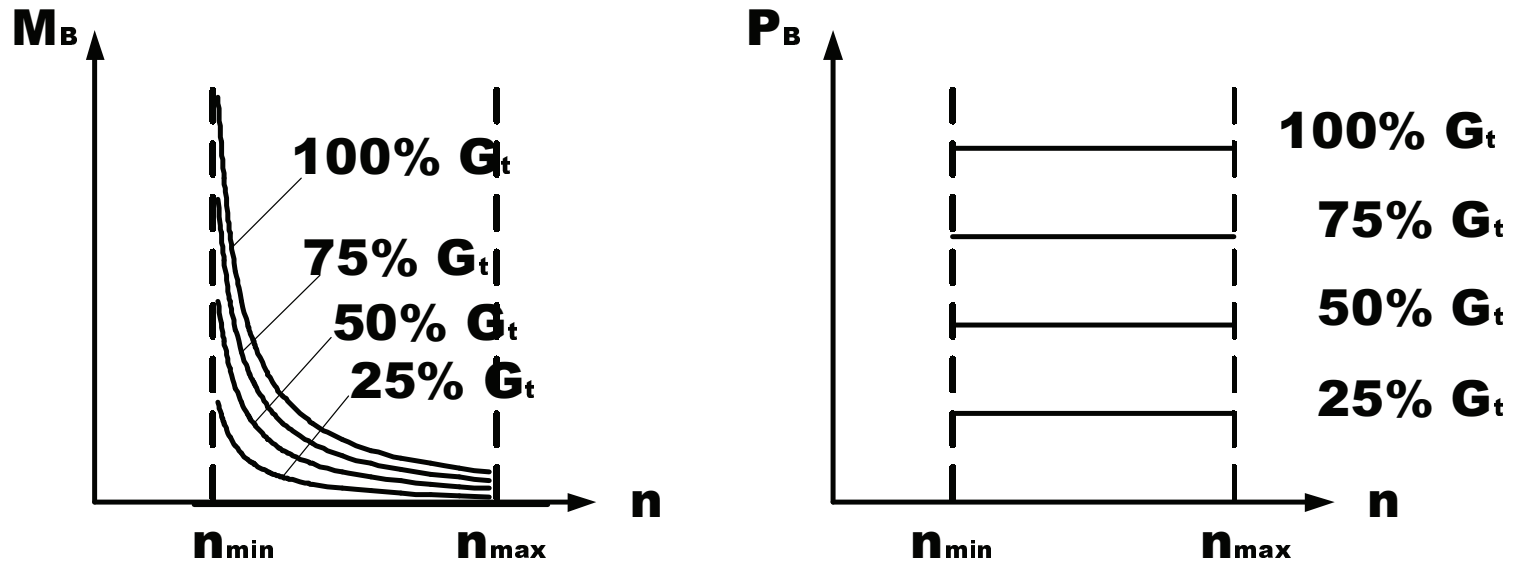
Consideriamo la turbina di potenza di una turbina a gas del tipo a due alberi. In tale tipo di macchina, la turbina di potenza è accoppiata all'utilizzatore ed è meccanicamente indipendente dal generatore di gas.

La potenza sviluppata è approssimativamente costante, nell'intervallo fra il minimo e il massimo numero di giri, se è costante la quantità di combustibile bruciata nell'unità di tempo. Tale comportamento fa sì che, mantenendo costante la quantità di combustibile, il momento torcente sia crescente al decrescere dei giri.

Ciò è dovuto al fatto che, se il compressore ruota a velocità costante, il generatore di gas sviluppa una portata di gas costante. Pertanto, anche se la velocità della macchina trascinata diminuisce, la potenza sviluppata dalla turbina di potenza rimane costante e il momento torcente aumenta.

Impianti di propulsione navale

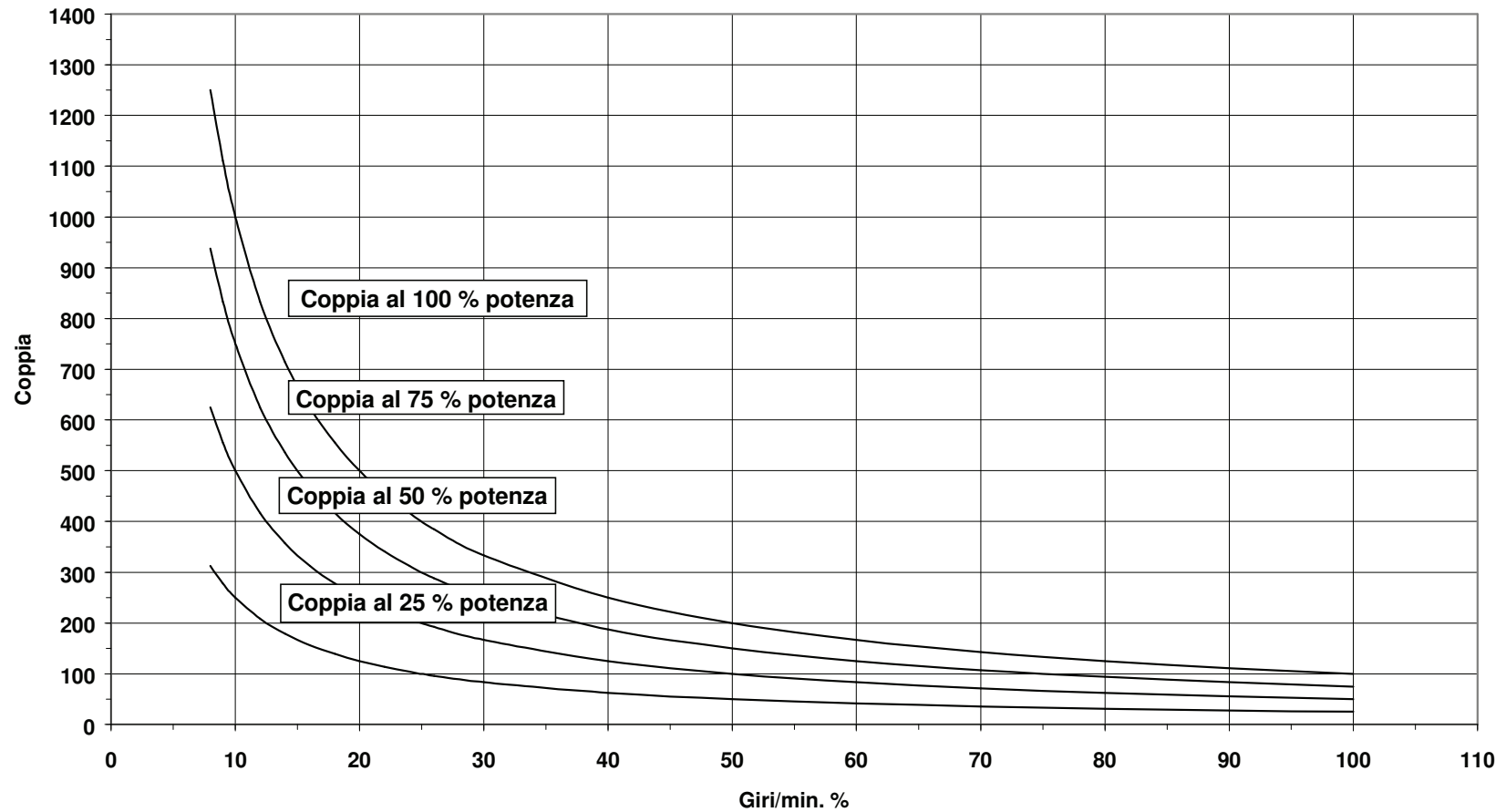
Caratteristica della turbina a gas a due alberi



G_t : massima quantità di combustibile bruciata nell'unità di tempo

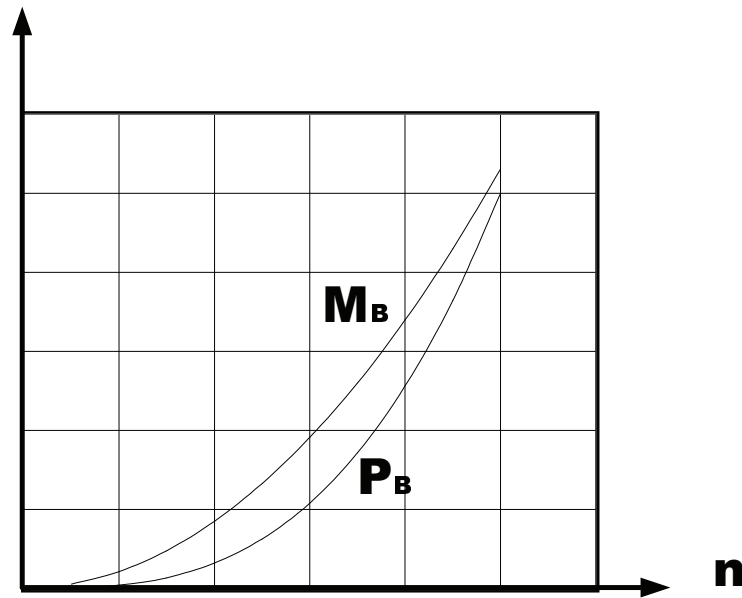
Impianti di propulsione navale

Coppia turbina a gas a due alberi



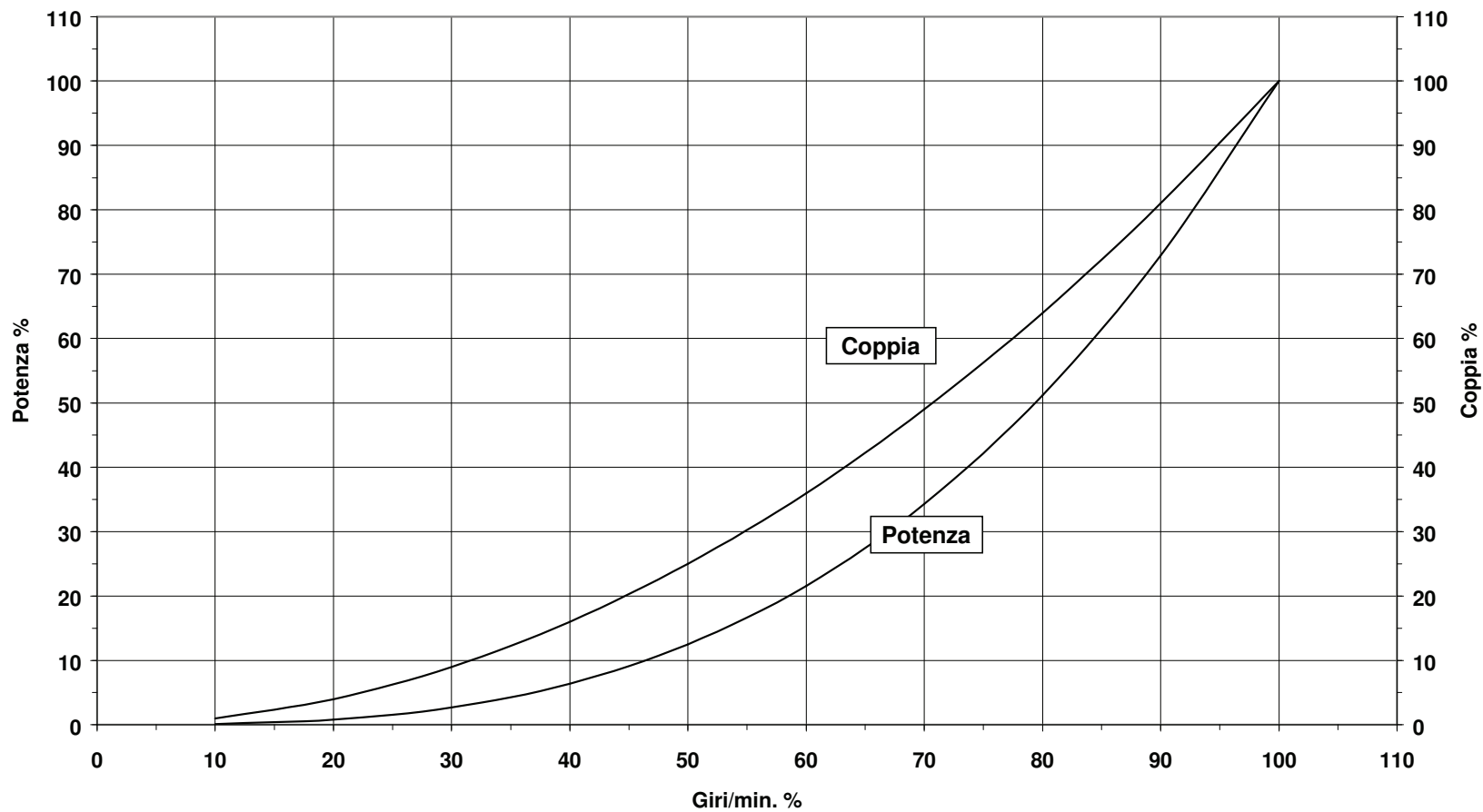
Impianti di propulsione navale

Caratteristica della turbina a gas a un albero



Impianti di propulsione navale

Potenza e coppia turbina a gas a un albero



Impianti di propulsione navale

Nella turbina a gas ad un albero, le velocità del compressore, della turbina e dell'utilizzatore sono legate fra loro. Se la velocità della macchina trascinata diminuisce, diminuisce pure la velocità del compressore. Di conseguenza diminuiscono la portata in massa dei gas, la potenza e il momento torcente.

La caratteristica della turbina a vapore è simile a quella della turbina a gas a due alberi (caratteristica a potenza costante con i giri, a parità di quantità di vapore introdotta nell'unità di tempo nella macchina).

Le figure precedenti mostrano che l'area entro la quale un motore primo può operare è ristretta e dipende dal tipo di macchina. Tale area si definisce campo operativo della macchina: essa è limitata dal massimo e dal minimo numero di giri e dalla massima portata di combustibile.

Impianti di propulsione navale

Macchina motrice e utilizzatore sono in equilibrio quando la coppia M_M sviluppata della motrice e quella M_U assorbita dell'utilizzatore sono uguali.

Quando è in equilibrio il sistema opera in condizioni stazionarie e quindi la velocità del sistema n'' (giri al secondo) è costante.

Nei transitori invece bisogna tenere conto del momento d'inerzia I delle masse rotanti:

$$M_m = M_u + 2\pi \frac{dn''}{dt} I$$

$$\text{Se } M_m > M_u \rightarrow \frac{dn''}{dt} > 0$$

il sistema accelera

$$\text{Se } M_m < M_u \rightarrow \frac{dn''}{dt} < 0$$

il sistema rallenta

Impianti di propulsione navale

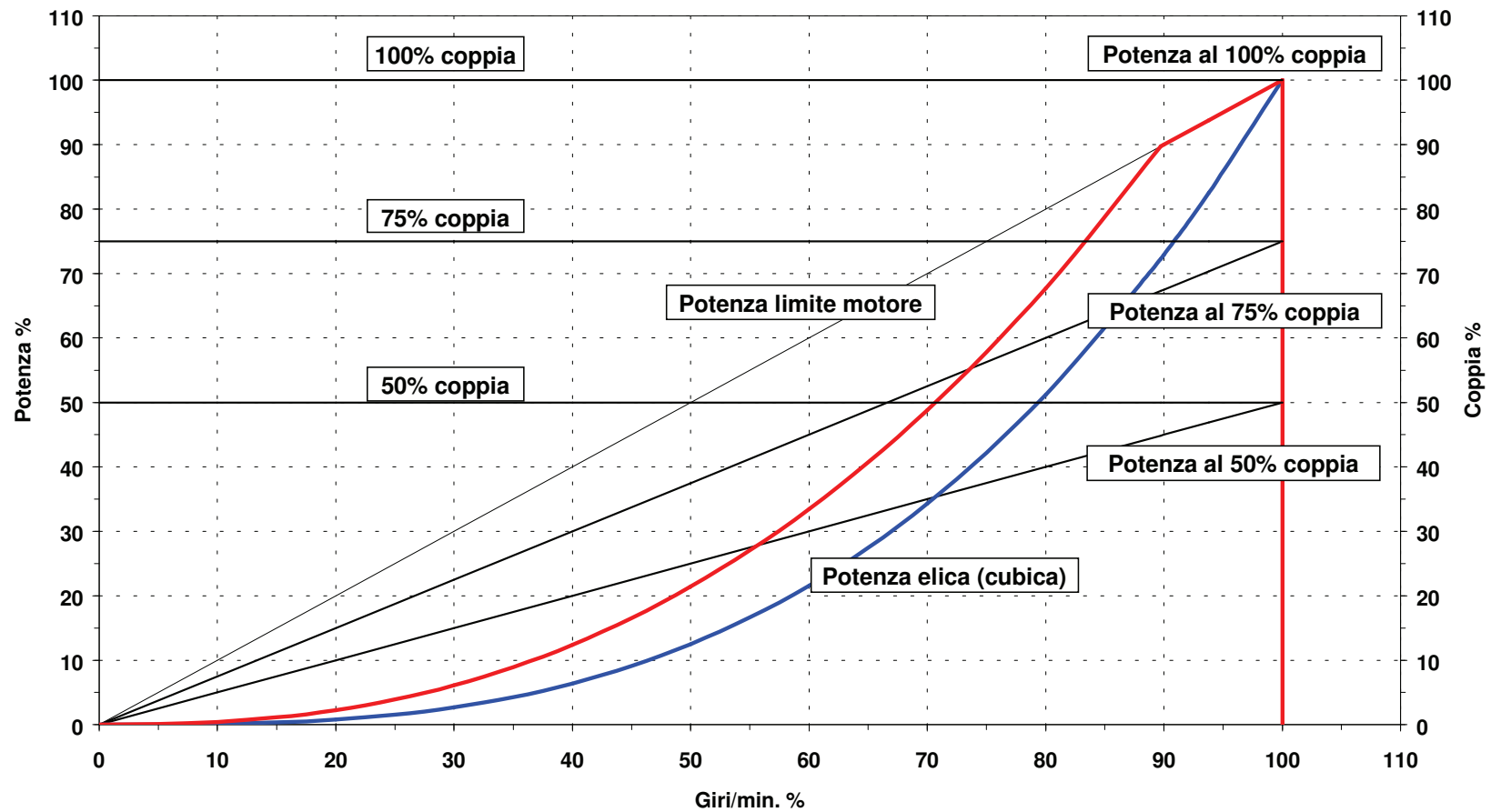
Le condizioni di equilibrio si traducono in un punto operativo del sistema motore – utilizzatore.

Vi possono essere tanti punti operativi, dipendenti sia dal motore che dall'utilizzatore. I punti devono comunque appartenere al campo operativo dal motore.

Nelle figure seguenti vengono mostrate le condizioni di equilibrio del funzionamento di alcuni sistemi motore – utilizzatore.

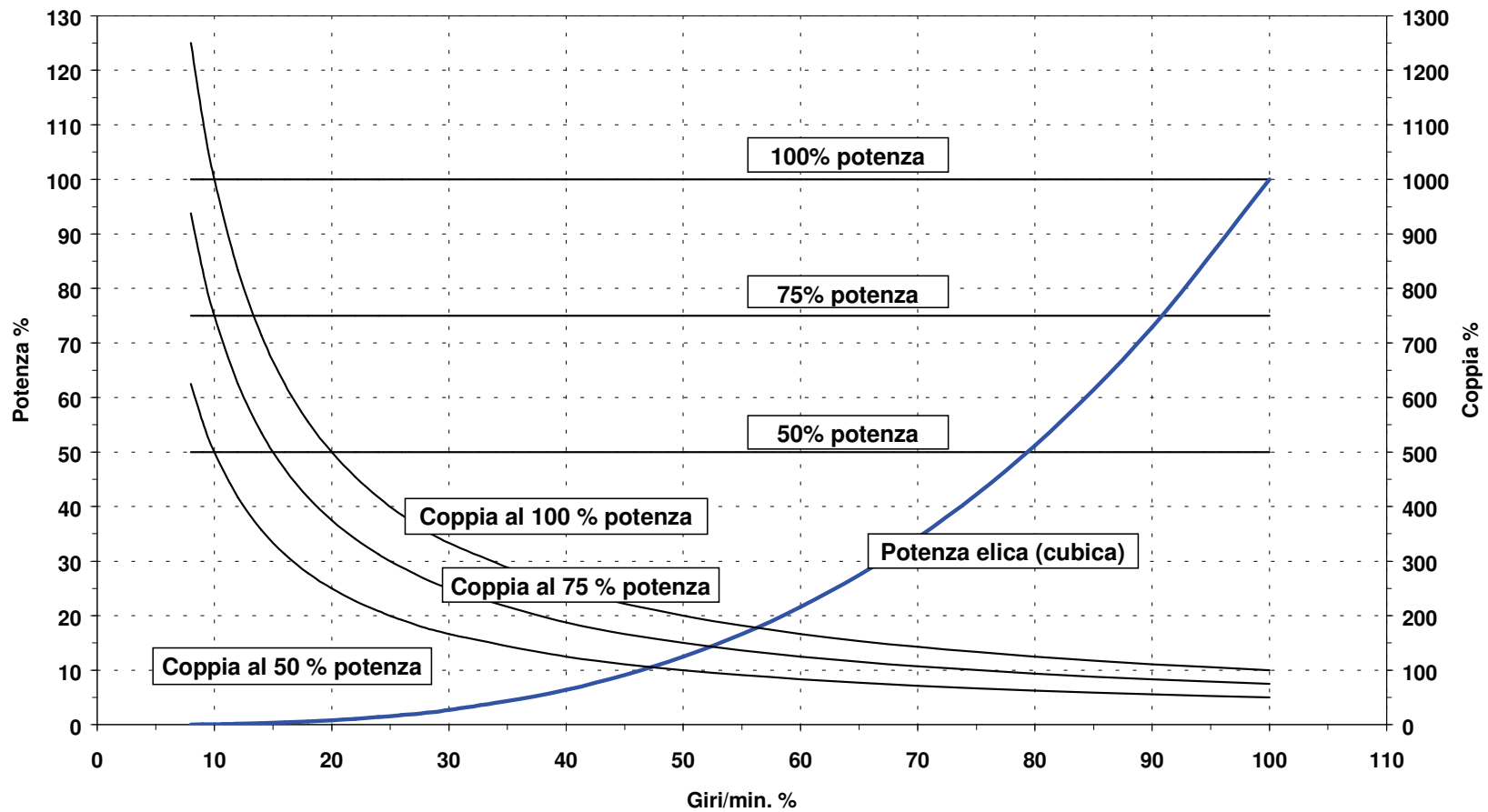
Impianti di propulsione navale

Accoppiamento elica - motore diesel



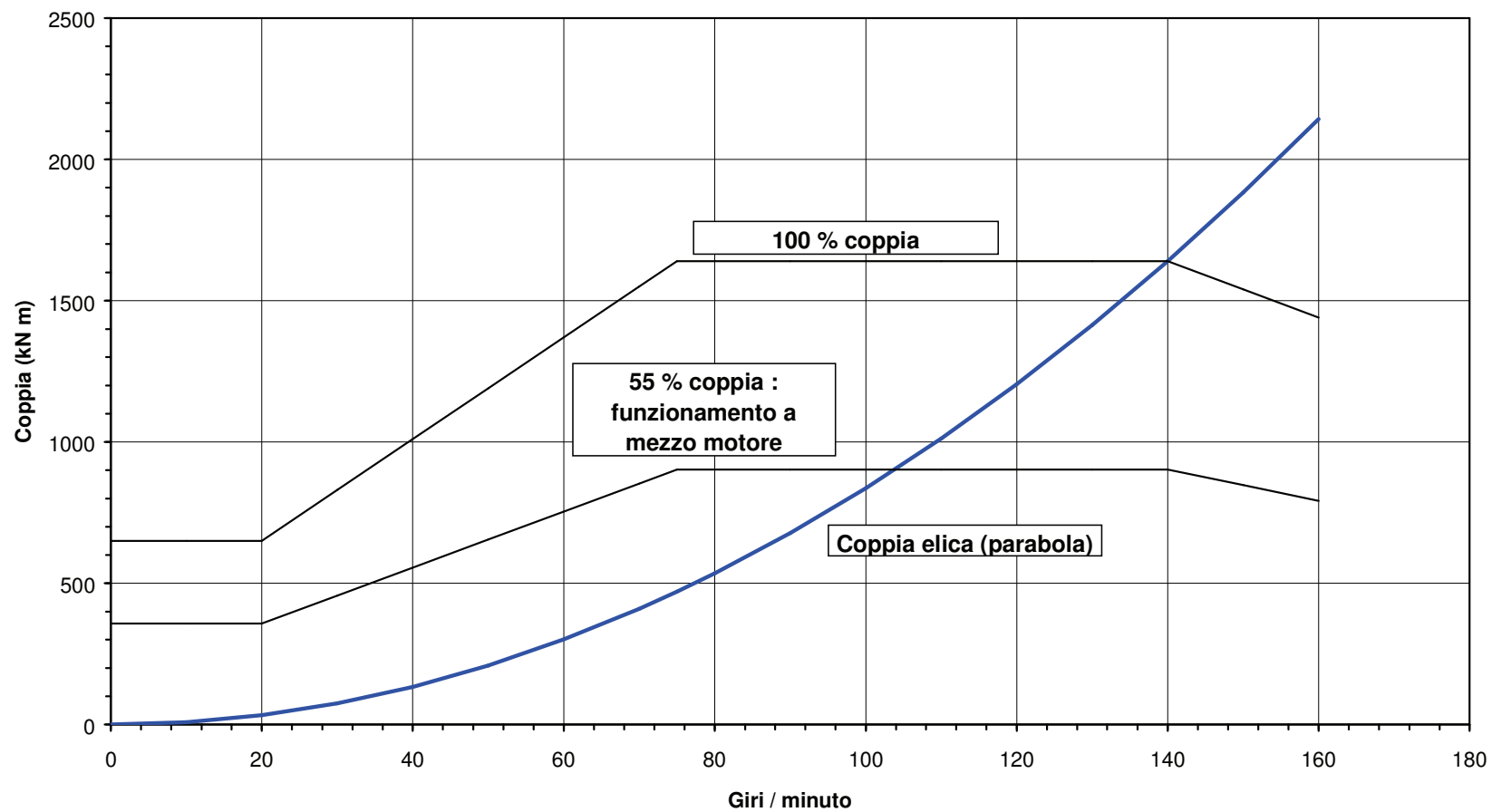
Impianti di propulsione navale

Accoppiamento elica - turbina a vapore



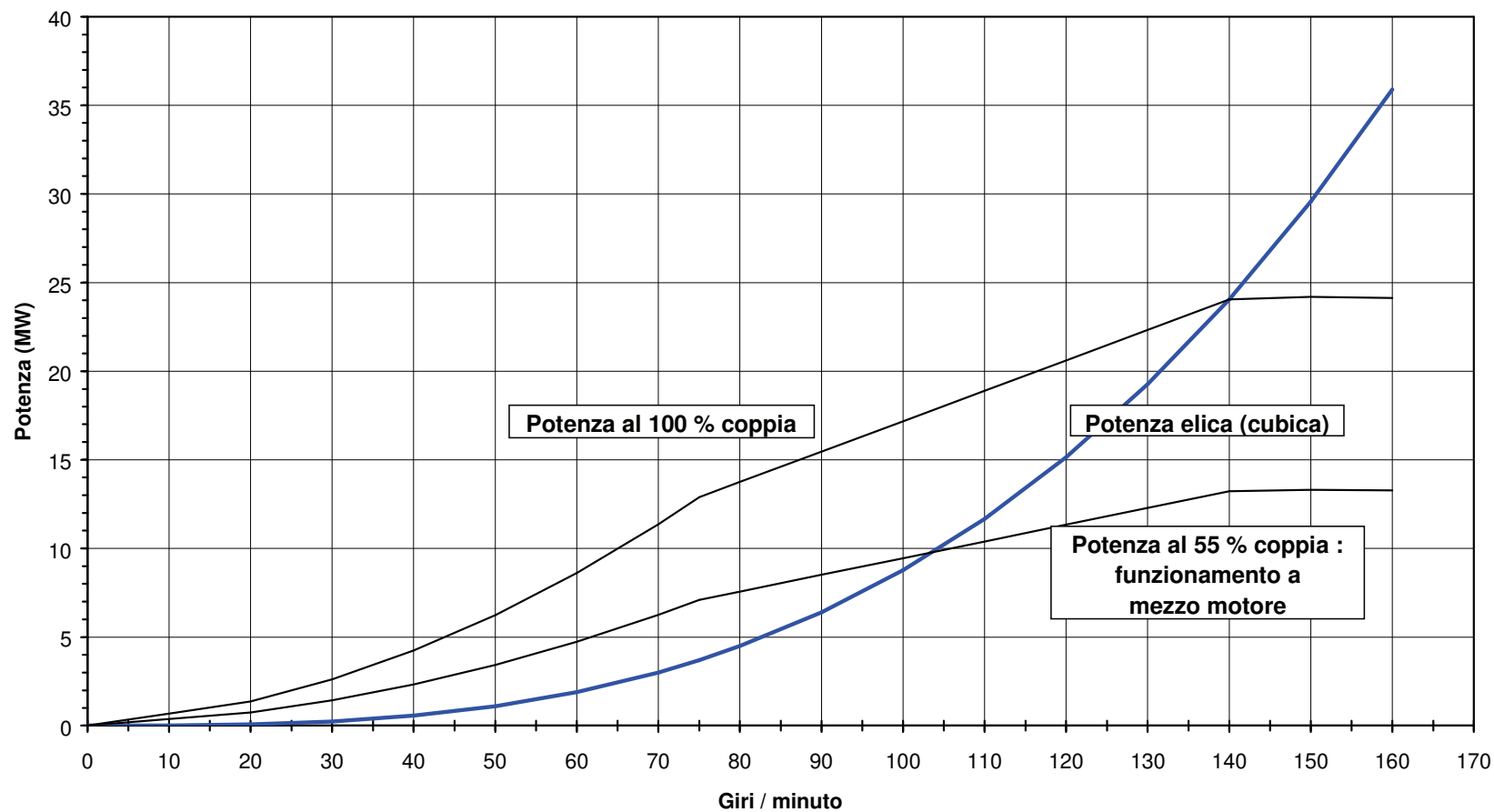
Impianti di propulsione navale

Coppia motore elettrico controllato in frequenza



Impianti di propulsione navale

Potenza motore elettrico controllato in frequenza



Impianti di propulsione navale

Due motori diesel collegati all'elica tramite riduttore

Le curve riportate nel diagramma seguente mostrano i punti operativi di un sistema propulsivo costituito da due motori diesel di uguale potenza collegati ad un'elica tramite riduttore di giri.

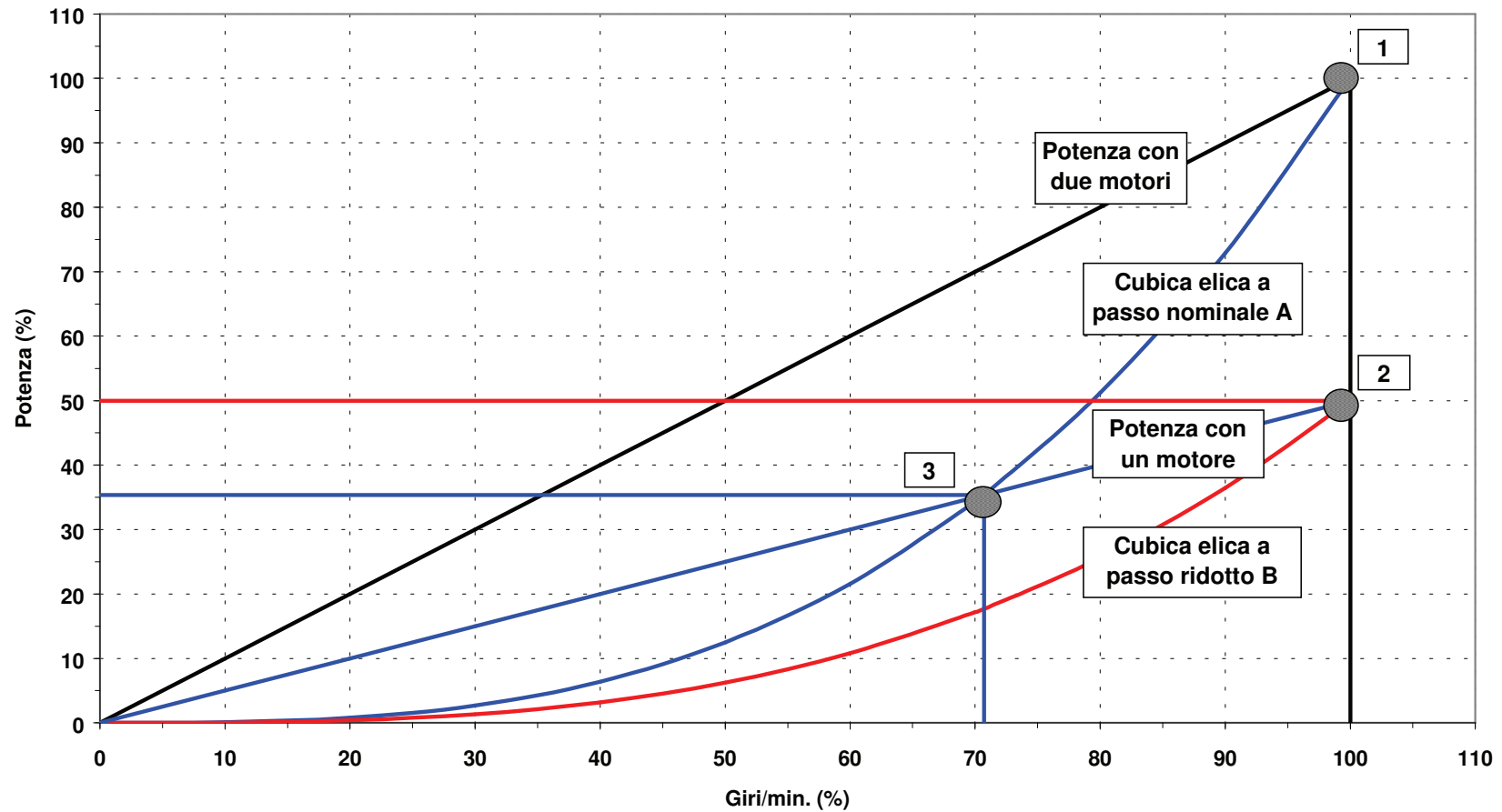
Il punto 1 è l'intersezione fra la cubica nominale dell'elica A e la potenza resa dai due motori funzionanti ciascuno al 100% della loro potenza massima continua.

Se uno dei due motori è posto fuori servizio, il punto operativo si porta in 3, corrispondente al 35.4 % della potenza totale al 70.7% dei giri : si constata che il motore rimasto in servizio non è in grado di erogare la sua potenza massima continua, corrispondente al 50% della potenza totale.

Disponendo di un'elica a pale orientabili, nel funzionamento a un motore si procede ad una riduzione del passo : la nuova cubica nominale è la curva B che consente ora al motore di sviluppare la sua potenza massima continua al 100% dei giri.

Impianti di propulsione navale

Due motori diesel collegati all'elica tramite riduttore



Impianti di propulsione navale

ESERCIZIO

Una nave da carico è dotata di un impianto propulsivo con elica singola a pale fisse mossa da un motore diesel lento a due tempi.

Il motore di propulsione aziona un alternatore asse.

L' "engine margin" richiesto per il motore di propulsione è pari all'85%.

I dati di progetto dell'impianto relativi alla condizione di navigazione normale sono :

Velocità	V	20	nodi	Dati elica (serie "B" di Wageningen)		
Resistenza totale	R_T	777.5	kN	Diametro	D	5.5 m
Fattore di scia	w	0.2		Passo / diametro	P/D	1.06
Fattore di riduzione di spinta	t	0.12		Area espansa / area disco	A_E/A_O	0.75
Rendimento rotativo relativo	η_r	0.99		Numero pale	Z	5
Numero eliche	Z_p	1				
Densità acqua di mare	ρ	1025	kg/m ³			
Rendimento linea alberi	η_s	0.9770				
Potenza alternatore asse	P_{AA}	1000	kW			

Per l'elica data, le curve dei coefficienti K_T e K_Q si possono approssimare con i polinomi :

$$K_T = 0.0794 \cdot J^3 - 0.2656 \cdot J^2 - 0.2458 \cdot J + 0.4974$$

$$K_Q = 0.0521 \cdot J^3 - 0.3220 \cdot J^2 - 0.3403 \cdot J + 0.7715$$

Impianti di propulsione navale

Oltre alla condizione di navigazione normale, analizzare le seguenti condizioni :

- 1) navigazione normale senza alternatore asse
- 2) navigazione in zavorra :
 $V = 20$ nodi ; $RT = 550$ kN ; potenza alternatore asse = 500 kW
- 3) navigazione con mare grosso e carena sporca. Assumere un “sea margin” pari al 50%

Si suppone che i fattori w , t , η_r rimangano invariati nelle tre condizioni.
Alla pagina seguente sono riportate le curve $J - K_{Ts}$ relative alle condizioni di progetto, 2) e 3).

Impianti di propulsione navale

