

- FRANCO QUARANTA -

**LA SCELTA ED IL FUNZIONAMENTO DEL
MOTORE DIESEL PER LA PROPULSIONE
NAVALE**

1 - Introduzione

Il motore diesel, nelle sue varie versioni ed allestimenti, si é progressivamente affermato come motore principale per la propulsione navale fino quasi al monopolio in questo tipo di applicazione ove ancora negli anni '70, specialmente su navi di elevate dimensioni, veniva utilizzata principalmente la turbina a vapore. I riflessi delle crisi energetiche, unitamente alla crescita tecnologica del diesel (che ne ha elevato la competitività rispetto alla turbina a vapore, in particolare, permettendone l'alimentazione con combustibili di qualità scadente [1]), hanno reso conveniente l'adozione di questo tipo di motore su larghissima parte della flotta navigante.

Oggi, con la diffusione dei mezzi veloci che sembrano costituire il futuro del trasporto di persone ed automezzi a corto e medio raggio, é ipotizzabile un consistente aumento del numero di apparati motore con turbine a gas, dalle caratteristiche particolarmente idonee a questo tipo di impiego: il diesel rimane tuttavia il motore primo adottato della maggior parte delle navi ed imbarcazioni in genere della flotta mondiale; le sue applicazioni riguardano anche la produzione della energia elettrica necessaria per i servizi di bordo.

Nei prossimi capitoli verranno fornite indicazioni circa la scelta del motore principale da installare a bordo di una nave e sulle condizioni di lavoro in cui esso potrà venirsi a trovare nonché sulle misure precauzionali da adottare per evitare i danni derivanti dal prolungato funzionamento a regimi particolarmente sfavorevoli.

La trattazione rifletterà il punto di vista dell'impiantista navale il quale deve definire le caratteristiche del motore di propulsione sulla base dei parametri di progetto della carena.

A tal proposito, si vuole ricordare che la prima fase del progetto del sistema di propulsione consiste nella determinazione della potenza necessaria per l'avanzamento della carena alla velocità prevista; ciò può avvenire o per via calcolativa (analisi statistiche, dati tratti da serie sistematiche etc.) o, più comunemente, con le *prove di rimorchio* condotte in vasca su un modello in scala della carena attraverso le quali si può prevedere il valore della resistenza al moto R che la carena incontrerà durante l'avanzamento alla velocità di progetto v . Determinato così il valore della *potenza effettiva* $P_E = R v$ nominale, si passa alla definizione delle caratteristiche dell'elica di rendimento massimo da dare alla nave; anche questa fase può essere condotta a tavolino o con le cosiddette *prove di autopropulsione* i cui risultati vengono utilizzati per determinare le caratteristiche ottimali dell'elica da mettere dietro carena nonché quelle di funzionamento tra cui la *potenza al mozzo* P_D ed il numero di giri nominale.

Dal raffronto tra i valori di P_E e P_D possono essere poi desunti quelli dei coefficienti propulsivi ed, in definitiva, il valore presumibile del rendimento propulsivo totale h_D ricordando che vale l'espressione:

$$h_D = \frac{P_E}{P_D}$$

Dalla potenza al mozzo si può risalire alla *potenza al freno* P_B (quella minima, cioè, che deve essere ceduta alla linea d'assi immediatamente a valle del motore) attraverso l'espressione:

$$P_B = \frac{P_D}{h_R h_{asse}} = \frac{P_E}{h_D h_R h_{asse}}$$

ove h_R è il rendimento meccanico del riduttore (se presente) e h_{asse} quello della linea d'assi.

Nel seguito si affronterà dunque la problematica che regola la scelta del motore principale (o dei motori principali) di propulsione di una nave considerando parametri di ingresso la potenza al mozzo P_D , il numero di giri ottimale dell'elica n , i rendimenti delle parti della catena meccanica (h_R , h_{asse}) oltre che la velocità di progetto v .

Dopo alcune note introduttive circa gli strumenti disponibili per questa operazione, verranno descritti gli orientamenti e le finalità progettuali oggi perseguiti nonché la problematica ad essi legata, con l'obiettivo di fornire un quadro, il più possibile esauriente, sullo stato dell'arte nel campo della definizione delle caratteristiche dei sistemi di propulsione.

L'assorbimento di potenza per la propulsione

I rilievi sperimentali della potenza erogata dal motore principale di una nave dislocante mostrano una dipendenza della potenza al freno dalla terza potenza del numero di giri dell'elica:

$$P_B @ k n^3$$

Questa relazione può essere spiegata ricordando che una nave dislocante (per la quale l'aliquota di sostentamento dovuta a fenomeni idrodinamici non supera il 5% del totale) incontra una resistenza al moto composta sostanzialmente da due aliquote legate all'attrito del fluido contro la carena ed all'energia spesa perché conferita all'acqua in conseguenza del moto ondoso prodotto al passaggio della carena. La resistenza d'attrito è proporzionale alla velocità d'avanzo v elevata ad un esponente un po' inferiore a 2 mentre quella d'onda dipende all'incirca dalla quarta potenza di v .

Naturalmente, più è alta la velocità della nave, maggiore risulta l'influenza della resistenza d'onda su quella totale; per valori del numero di Froude ($V/\sqrt{gL}$) non troppo elevati (come di norma per navi a dislocamento) la correlazione tra R e v risente più della componente d'attrito che di quella d'onda. Ne risulta una dipendenza della resistenza al moto all'incirca dal quadrato della velocità d'avanzo:

$$R @ k v^2$$

Estendendo tale relazione al numero di giri n dell'elica (che si può ritenere linearmente dipendente da v) e ricordando che la potenza all'elica necessaria per l'avanzamento è pari alla resistenza incontrata per la velocità di avanzo:

$$P_E = R v$$

ritenendo, inoltre, sostanzialmente costanti i rendimenti coinvolti nella trasformazione dell'energia messa a disposizione dal motore in spinta all'elica, si ricava la dipendenza di terzo grado tra P_B e n .

Da ciò deriva la denominazione di "cubica" con cui si denota la legge di assorbimento della potenza valida per navi dislocanti. Questa conclusione teorica si coniuga molto bene con la realtà sperimentale: la rappresentazione della erogazione di potenza propulsiva da

parte di un apparato motore di una nave dislocante attraverso una legge di terzo grado in funzione del numero di giri del motore approssima piuttosto bene il fenomeno reale. Ecco perché i costruttori dei motori marini destinati ad imbarcazioni dislocanti che vogliano verificare le condizioni di funzionamento del loro prodotto simulano al banco freno una legge di assorbimento della potenza come funzione di terzo grado del numero di giri.

Nel caso delle carene plananti, la legge di erogazione della potenza in pre-planata é simile a quello delle carene dislocanti per poi divenire molto più ripida fino alla "gobba" (che é relativa alla fase di inizio planata). Per velocità superiori a quelle di gobba si ha, in generale, una riduzione notevole della potenza impegnata all'aumentare della velocità di avanzo in un determinato intervallo di velocità oltre il quale la curva di potenza torna a crescere seppure con pendenza meno accentuata di quanto fosse nel primo tratto.

Un andamento così complesso non può certo essere rappresentato in modo semplice come accade per la cubica delle carene dislocanti. Invalde tuttavia l'uso di scegliere una correlazione semplificata tra la potenza propulsiva P ed il numero di giri dell'elica n , in modo da dare un riferimento per la conduzione di prove al freno e per la rappresentazione approssimata della situazione reale.

Per le carene plananti tale curva di riferimento é la "quadratica":

$$P @ k n^2$$

Va rimarcato che la cubica e la quadratica assumono un significato molto diverso nella rappresentazione della situazione propulsiva dei motori marini: la cubica, come detto, rappresenta significativamente la legge di erogazione di potenza nella quale si troverà il motore nelle condizioni operative. La quadratica, invece, media le varie pendenze assunte dal diagramma di assorbimento di potenza di una carena planante.

Una giustificazione della diminuzione di un grado dell'esponente di n sembra possibile trovare nel fenomeno di deimmersione della carena (e con essa della diminuzione della superficie bagnata) al crescere di v e quindi di n . Ciò comporterebbe una componente della dipendenza di P da n addirittura di inversa proporzionalità (più cresce n , più cresce v , più la carena emerge, minore diventa la resistenza d'attrito e con essa la potenza necessaria alla propulsione) che aggiunta alle altre ne riduce l'esponente da 3 a 2.

Quanto detto trova conferma in figura 1 che riporta gli andamenti della potenza all'elica in funzione del numero di giri del motore per una carena dislocante (a) e per una planante (b); in entrambi i casi i valori misurati a bordo (con sensori torsionometrici) sono riportati insieme a quelli della curva teorica. Per il caso a (relativo ad una imbarcazione che, con dislocamento di 40 t, per essere mossa a 9 kn richiede al motore una potenza di circa 90 kW a 1800 giri/min) sul grafico, oltre ai punti determinati sperimentalmente, è tracciata la cubica passante per il punto nominale del motore; per il caso b (corvetta veloce che a 30 kn assorbe circa 2200 kW a 2000 giri/min) vengono riportate sia la quadratica che la cubica nominale; dal raffronto tra le due curve è facile ricavare la migliore correlazione fornita, nel caso di carena planante, dalla curva quadratica.

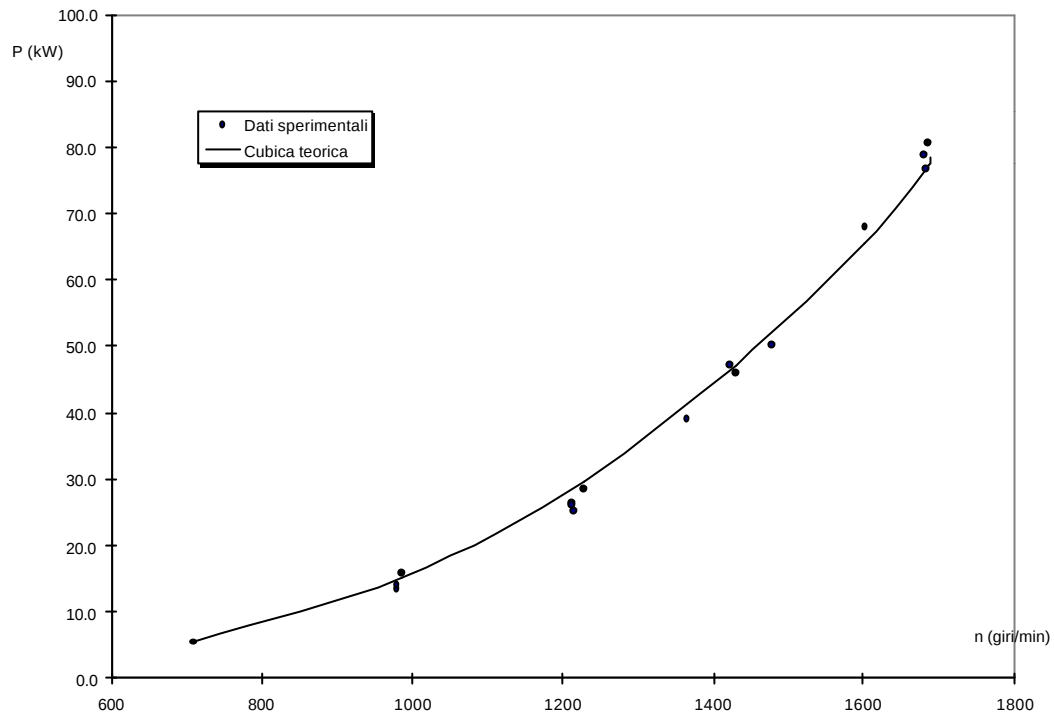


Figura 1 a - Diagramma di potenza per carena dislocante (cubica)

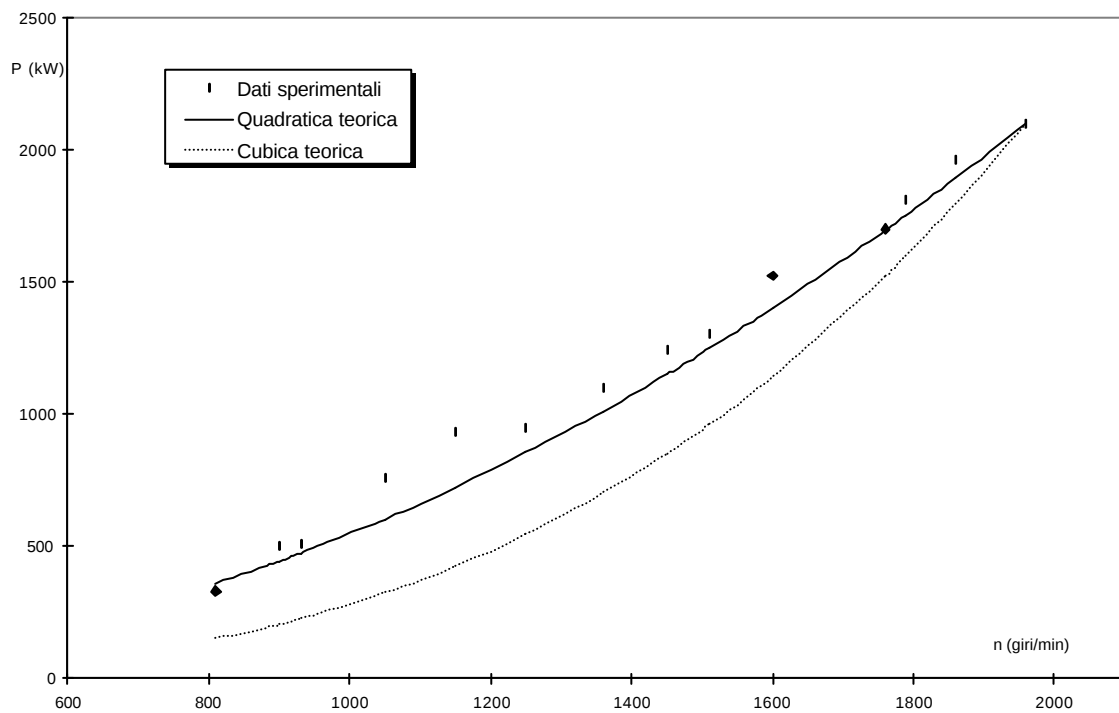


Figura 1 b - Diagramma di potenza per carena planante (quadratica)

Il diagramma di layout

Utile nella fase iniziale del progetto del sistema, il "layout diagram" indica tutti e soli i punti del piano (n, P) in cui, secondo la casa costruttrice, un determinato modello di motore può essere ottimizzato.

In altri termini, una volta determinati - in base alle considerazioni che si esporranno - i valori nominali di numero di giri e potenza del motore da adottare, si entra nel diagramma per verificare se il punto (n, P) cade nel campo "utile": in caso affermativo, la scelta può ricadere sul modello di motore cui si riferisce il "layout diagram" utilizzato. E' evidente, quindi, l'aiuto che un simile strumento fornisce nella scelta dell'apparato di propulsione di una nave.

In figura 2 è dato un esempio di diagramma di layout. In esso sia il numero di giri che la potenza sono rappresentati in percentuale del loro valore nominale e riportati in scala logaritmica; tale rappresentazione delle grandezze in gioco è particolarmente utile perché con essa i grafici delle funzioni presenti nel diagramma sono segmenti, con evidente semplificazione di costruzione e di lettura.

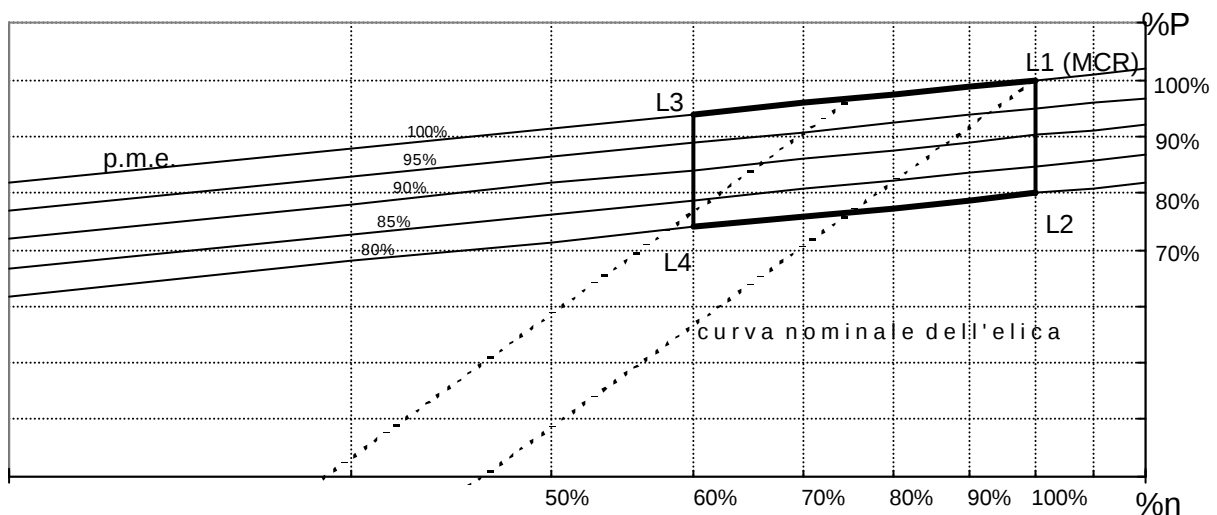


Figura 2 - Diagramma di layout

Le linee verticali (L1 - L2 e L3 - L4) corrispondono rispettivamente al numero di giri massimo e minimo che il motore può sopportare; le linee L1 - L3 e L2 - L4 sono tratti di curve a pressione media effettiva (p_{me}) costante. La linea L1 - L3 corrisponde alla pressione effettiva nominale (quella massima cioè per cui è il motore è stato progettato) mentre la linea L2 - L4 indica la pressione media effettiva al di sotto della quale si preferisce evitare il funzionamento.

Il punto indicato come L1 nel diagramma viene detto *Maximum Continuous Rating (MCR)*; è l'unico punto in cui, al numero di giri nominale, il motore è in grado di fornire, e per un tempo indeterminato, la massima potenza compatibile con la attitudine delle strutture a sopportare carichi termici e dinamici.

Per distinguere questo punto da quello scelto nel diagramma di layout come punto di funzionamento a regime e quindi di calcolo dell'elica, diremo quest'ultimo MCR specifico (o della nave) oppure, secondo una terminologia recente e molto efficace, *Contract Maximum Continuous Rating (CMCR)*. Questa denominazione è dovuta al fatto che l'armatore si aspetta dal motore, alle prove in mare, prestazioni non inferiori a quelle rappresentate dal punto CMCR.

I fattori che limitano la zona di funzionamento sono, dunque, essenzialmente numero di giri e pressione media effettiva (a proposito della quale si ricorda che il valore della p_{me} è proporzionale al momento motore erogato che è da considerarsi pertanto anch'esso fattore limitante).

Queste grandezze non devono eccedere il loro valore massimo per ovvi motivi di progetto (per contenere, cioè, le sollecitazioni meccaniche e termiche). Per quanto riguarda invece le limitazioni inferiori, va detto che il numero di giri non deve diminuire oltre un valore minimo al di sotto del quale non è possibile garantire un regolare funzionamento del motore; la pressione media effettiva è bene che non sia mai inferiore ad un valore minimo per evitare il rischio della rottura del film di lubrificante e la formazione di depositi carboniosi all'interno della camera di combustione.

I limiti inferiori sono, in ogni caso, non troppo lontani da quelli superiori anche per un altro motivo: una volta determinata la potenza da installare a bordo, non risulta conveniente la scelta di un motore che abbia un MCR molto più alto rispetto alla esigenza di potenza propulsiva e che potrebbe, quindi, essere ottimizzato per valori della potenza e del numero di giri molto più elevati. Alla maggiore spesa iniziale e di manutenzione, infatti, si aggiungerebbero gli svantaggi derivanti dall'avere a bordo un motore più grande del necessario, ossia il maggior peso ed ingombro dell'apparato motore a detrimento delle possibilità di stivaggio del carico utile da trasportare.

E' pur vero che a volte si pratica il cosiddetto "derating", ossia la scelta di un motore surdimensionato rispetto alle esigenze di potenza per ottimizzare i consumi di combustibile, ma non si arriva mai ad installare un motore ottimizzato su valori molto distanti da quelli caratteristici del suo MCR.

MC-Engine Programme

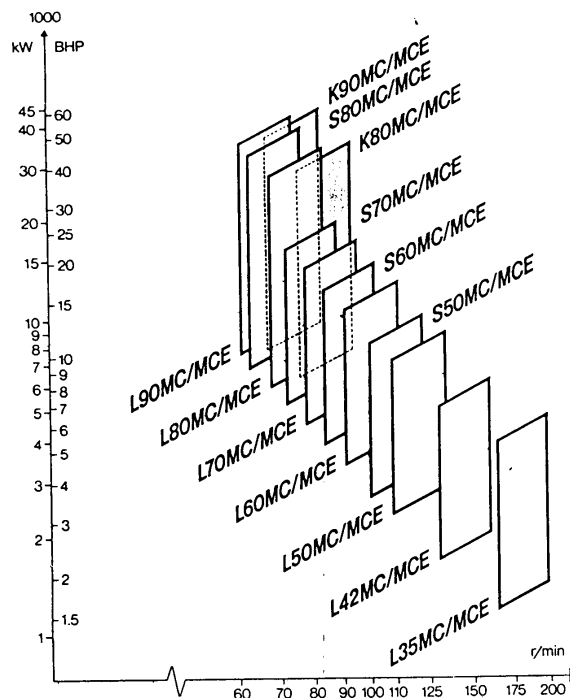


Figura 3 - Diagrammi di layout di una serie di motori

I diagrammi di layout sono, a volte, corredati di altre informazioni riguardanti il funzionamento del motore tra cui consumo specifico a carico intero e parziale, pressione sui cuscinetti del testa-croce e di banco etc.

Le linee limiti caratteristiche dei diagrammi di layout vengono indicate, caso per caso, dalle case costruttrici le quali, per propagandare efficacemente i propri prodotti, spesso diffondono "pacchetti" di diagrammi di layout comprendenti le curve limiti di più motori di una stessa serie in modo da rendere immediata l'individuazione del motore (o dei motori) su cui può cadere la scelta in funzione delle richieste di potenza previste per la propulsione della nave in allestimento (figura 3).

Il diagramma di carico

Tracciato una volta determinato il punto CMCR e quindi allestito conseguentemente il motore, il "load diagram" dà il campo in cui sarà possibile far funzionare l'apparato motore, definendone così i limiti operativi.

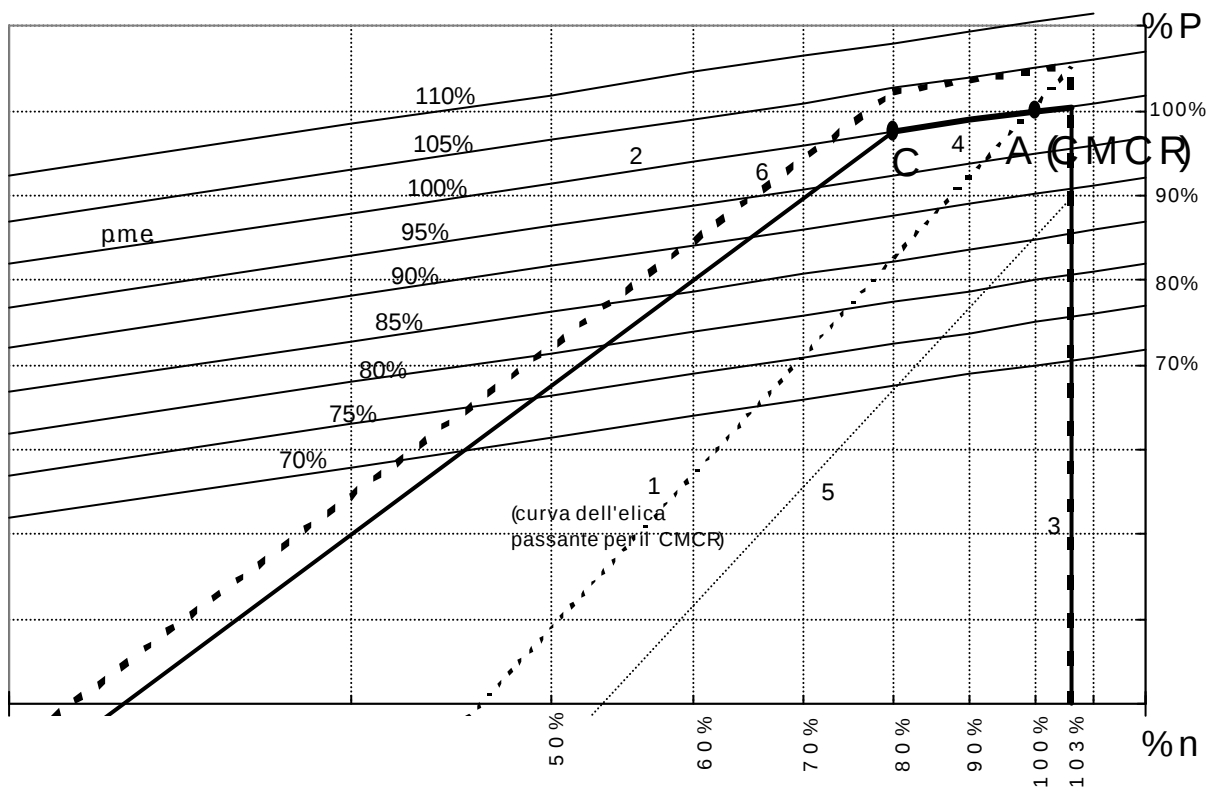


Figura 4 - Diagramma di carico

In figura 4 è riportato un esempio di diagramma di carico: come accade in generale anche per i diagrammi di layout, le coordinate n e P sono in scala logaritmica e vi sono curve di livello nel parametro p_{me} . Il punto A è il CMCR e quindi, per quanto detto, è il punto di funzionamento nominale del motore. Ad esso corrispondono il valore 100% del numero di giri e della potenza erogata. Quanto alle linee presenti nel diagramma, va osservato che, essendo gli assi in scala logaritmica, tutte le relazioni del tipo:

$$y = x^\beta$$

sono rappresentate da un tratto di retta, la cui inclinazione dipende dal valore di β .

Le linee presenti nel grafico hanno il seguente significato:

- 1 - è la curva di elica passante per il CMCR. Essa indica la potenza erogata ad ogni numero di giri del motore, da un'elica realizzata in modo da assorbire la potenza nominale al numero di giri nominale nelle seguenti condizioni di navigazione:
 - carena pulita
 - dislocamento di progetto
 - calma di mare e di vento

Questa linea viene generalmente denominata *curva di elica* (o di *assorbimento di potenza*). La sua espressione analitica è del tipo:

$$P = k n^3$$

ove il valore di k dipende dalle caratteristiche idrodinamiche della carena, da quelle dell'elica e dall'interazione tra le due.

- 2 - tale linea, così come quelle ad essa parallele, unisce i punti a pari pressione media effettiva. Essendo la p_{me} proporzionale al momento erogato dal motore ed essendo quest'ultimo legato al quadrato del numero di giri, la legge di dipendenza tra p_{me} e n è del tipo:

$$p_{me} = k n^2$$

- 3 - è verticale e passa per il punto dell'asse n caratteristico di quel valore del numero di giri che non si deve superare in condizioni normali di esercizio. In genere, tale limitazione è posta ad un valore di n di circa il 103% di quello nominale.
- 4 - è la linea che delimita superiormente il campo dei carichi sostenibili indefinitamente dal motore: essa è scomposta dal punto C in due tratti a pendenza diversa. La parte a destra di C è un tratto di una linea a pari p_{me} (fattore effettivamente limitante in questo campo del numero di giri). Il tratto a sinistra di C indica, ad ogni numero di giri, la potenza massima oltre la quale il motore funzionerebbe in precarie condizioni di alimentazione, non essendo sufficiente la portata d'aria introdotta nei cilindri a garantire una buona combustione. I motori attuali, infatti, vengono allestiti con una o più turbosoffianti che devono fornire una determinata portata d'aria in condizioni di progetto: specialmente in caso di alto rapporto di sovralimentazione, ai regimi parziali, il compressore non è in grado di fornire una portata sufficiente alla combustione, con conseguente aumento dei carichi termici e, in caso di prolungato servizio in queste condizioni, rischio di danni anche seri al motore.
- 5 - è una curva d'elica caratteristica di condizioni di navigazione diverse da quelle di progetto, se l'elica è stata ottimizzata nel punto A, oppure è una curva caratteristica di un'elica progettata per funzionare a regime in un punto diverso da A (nel caso in figura, tale che al 100% del numero di giri nominale viene assorbito circa l' 85% della potenza nominale).
- 6 - è di caratteristiche simili alla 4 ma, anziché delimitare una zona di tranquillo funzionamento del motore, indica quali sono i limiti che non si possono superare neanche in regime di sovraccarico.

In condizioni normali, il funzionamento del motore può avvenire in qualsiasi punto dell'area compresa tra le linee 3 e 4. Nei punti compresi tra le linee 4 e 6 (che delimitano una zona

di sovraccarico) il motore potrà invece funzionare per un periodo limitato di tempo secondo modalità che vengono, caso per caso, precisate dalla casa costruttrice. La posizione della linea 3, in corrispondenza di un numero di giri un po' superiore a quello massimo nominale del motore, è legata alla possibilità di far girare il motore alle prove in mare erogando una potenza prossima a quella nominale, condizione che si desidera per motivi che verranno precisati più avanti.

Accordo del motore al CMCR e posizione delle curve dell'elica

Nonostante sia possibile scegliere il punto di funzionamento CMCR in uno qualsiasi di quelli compresi nel diagramma di layout, una volta effettuata questa scelta, occorre "accordare" il motore per ottenerne le caratteristiche desiderate; questa operazione viene effettuata in modo che nelle condizioni nominali il consumo specifico risulti minimizzato.

Ciò si realizza tenendo conto del fatto che *il rendimento di un motore diesel è tanto più alto (ed il consumo specifico di combustibile tanto più basso) quanto maggiore è il rapporto p_{max} / p_{me} tra la pressione massima e quella media del ciclo*. Occorre quindi allestire il motore in modo che, nelle condizioni nominali (quando la pressione media effettiva è pari a quella di progetto) la pressione massima del ciclo sia pari a p_{max} , ossia a quella massima prevista per il tipo di motore in allestimento.

Gli organi coinvolti in questa fase di selezione sono sostanzialmente le pompe di iniezione che devono essere di taglia sufficiente a fornire la portata di combustibile necessaria a realizzare la pressione media effettiva prevista; l'anticipo di iniezione deve essere impostato in modo da raggiungere la pressione massima desiderata. Anche le turbosoffianti devono essere tali da erogare, a regime, una portata d'aria sufficiente a realizzare il rapporto di sovralimentazione di calcolo.

Si noti che la posizione delle curve di elica nei diagrammi di carico (come la 1 in figura 4) non dipende soltanto dalla geometria di quest'ultima ma anche da altri fattori relativi all'interazione fra elica e carena; conseguentemente, al variare di tali fattori, la curva dell'elica varierà posizione nel diagramma di carico.

Per evidenziare questa circostanza si pensi ad un'elica costruita in modo che, con nave a pieno carico, l'assorbimento di potenza sia rappresentato dalla legge della linea 1 (figura 5). Se supponiamo che il motore ruota alla velocità n_k , la potenza erogata sarà ovviamente P_k ed il punto di funzionamento si troverà in K . Se diminuisce l'immersione della nave (per esempio, a seguito di sbarco di merci) ed il motore continua a funzionare al numero di giri precedente, per effetto della riduzione di resistenza al moto conseguente alla diminuzione della superficie bagnata, a parità di numero di giri, l'elica assorbirà una potenza inferiore.

Il nuovo punto di funzionamento si verrà a trovare più in basso rispetto a quello precedente (per esempio in K') e pertanto non più sulla curva 1. Facendo questo ragionamento per ogni numero di giri, si vede facilmente che, nelle nuove condizioni di navigazione, tutta la curva dell'elica si è spostata verso il basso (in figura, linea 2) indicando quindi una legge secondo la quale ad ogni numero di giri viene erogata una potenza inferiore a quella che sarebbe stata assorbita nelle condizioni precedenti.

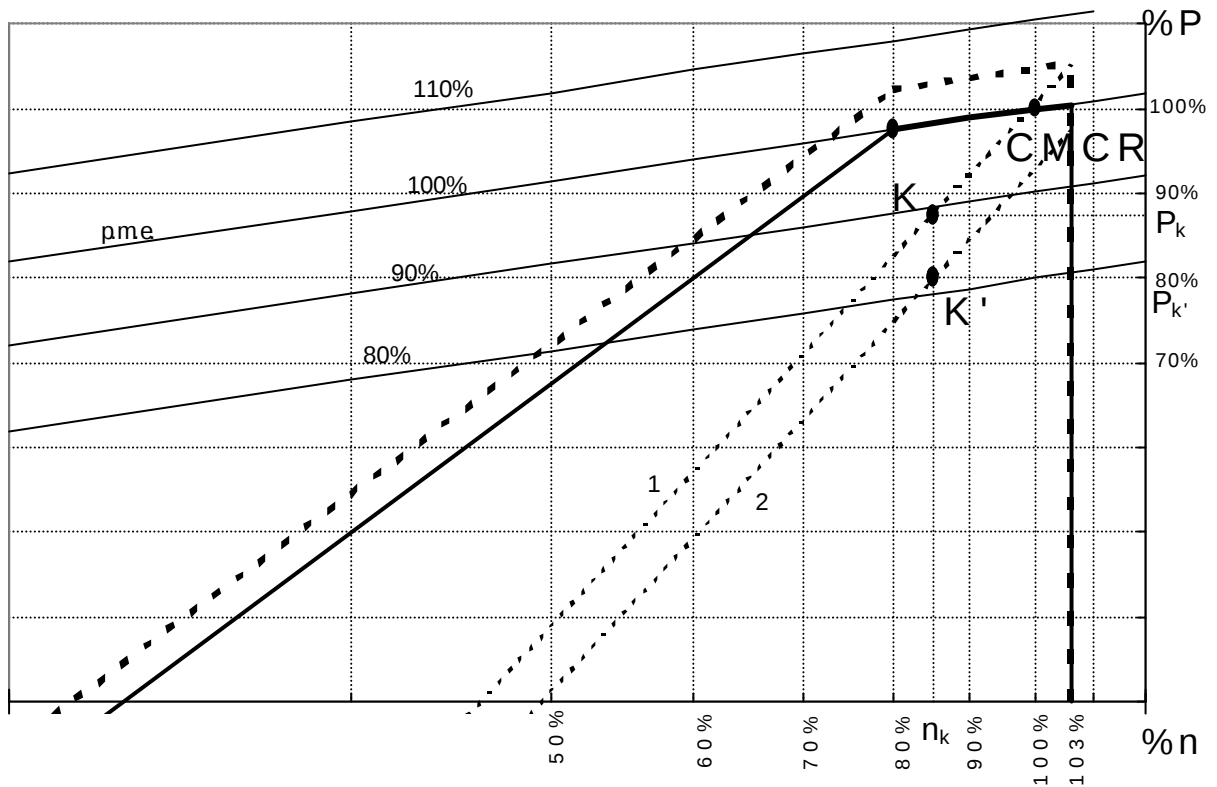


Figura 5 - Diagramma di carico

La posizione della curva di assorbimento di potenza da parte dell'elica dipende dunque, oltre che dalle caratteristiche geometriche di progetto, anche da una serie di condizioni tra le quali principalmente:

- dislocamento della nave;
- condizioni della carena;
- condizioni meteomarine in cui avviene la navigazione.

2 - Propulsione con elica a passo fisso

L'elica a passo fisso, utilizzata in passato come mezzo rivoluzionario di propulsione delle navi, trova ancora oggi larga applicazione in campo marino, nonostante il progressivo affermarsi del tipo a pale orientabili.

C'è da dire anzi che, dopo un periodo in cui sembrava che l'elica a passo variabile dovesse soppiantare quella a passo costante, in alcune situazioni propulsive risulta conveniente l'adozione di elica a passo fisso per le sue migliori caratteristiche di rendimento.

L'elica a passo fisso fornisce i vantaggi derivanti dalla semplicità costruttiva come la facilità di installazione e di manutenzione, il minor costo iniziale, nonché migliori caratteristiche di elica isolata rispetto all'elica a passo variabile la quale presenta un mozzo di dimensioni maggiori per alloggiare il meccanismo di movimento delle pale in condizioni di robustezza accettabile e lavora con rendimento inferiore. Per contro, non permette di adattare l'erogazione di potenza del motore al variare delle condizioni di esercizio e, di conseguenza, della richiesta di potenza per le cause che verranno descritte in questo capitolo.

Si tratterà peraltro esclusivamente il caso di motore destinato alla sola propulsione in quanto, in presenza di generatori - asse, l'elica a passo variabile è di più frequente adozione.

Motore primo destinato alla sola propulsione

La configurazione che si va ad analizzare è senz'altro la più tradizionale, quella cioè con cui sono state allestite in passato tutte le navi e che ancora oggi è largamente presente sulla flotta in esercizio a causa delle caratteristiche di semplicità ed affidabilità d'impianto.

Come si vedrà, non potendosi in questo caso variare il passo dell'elica, non c'è modo di accordare le condizioni di funzionamento del motore alle esigenze di assorbimento di potenza. Ciò comporta una serie di problemi che influenzano il progetto e la conduzione di tutto l'apparato di propulsione.

Il contrario avverrebbe evidentemente se la resistenza al moto invece di diminuire aumentasse. E' questo il caso che si presenta quando, per motivi di lungo termine (invecchiamento e/o deformazione della carena, crescita di formazioni vegetali ed animali attorno ad essa), oppure occasionali (condizioni meteomarine), la potenza richiesta per l'avanzamento cresce. In tal caso, se non si è previsto opportunamente il fenomeno, si può incorrere in situazioni particolarmente scomode ed antieconomiche.

Supponiamo ad esempio [2] che l'elica sia stata disegnata per il funzionamento nel punto A del diagramma di carico in figura 5. La nave potrà navigare nelle condizioni di progetto solo per le prime ore di rotta in quanto, per effetto del deterioramento della carena, la resistenza al moto prenderà ad aumentare. Se si volesse mantenere il numero di giri nominale (condizione necessaria per contenere la riduzione della velocità della nave), la potenza da erogare sarebbe certamente superiore a quella massima nominale corrispondente al punto A e quindi il punto di funzionamento del motore verrebbe a trovarsi nella zona del diagramma compresa tra le curve 4 e 6.

Ma tale zona è di sovraccarico per il motore ed il funzionamento in essa è concesso solo per periodi limitati di tempo.

Il problema del sovraccarico è molto sentito nel campo della attuale motoristica; non è infatti raro che il "service engineer" debba rilevare, in sede di intervento a seguito di guasto del motore, che l'emergenza venutasi a creare sia palesemente imputabile ad eccessivo funzionamento in condizioni di sovraccarico oppure al fatto che i previsti interventi di manutenzione non siano stati effettuati con la puntualità e lo scrupolo richiesti dal caso.

Paradossalmente, il problema dell'overload ha iniziato a farsi molto serio proprio da quando la tecnologia delle turbosoffianti ha permesso di produrre turbocompressori ad alto rendimento capaci di elevati rapporti di sovralimentazione.

La tendenza al funzionamento nelle condizioni di sovraccarico descritta deve essere quindi contrastata intervenendo in modo da riportare il motore al funzionamento nella zona "consentita" del diagramma di carico; solo così potranno essere evitate situazioni dannose per la meccanica.

Se non sono previsti dispositivi automatici di sicurezza, l'operatore dovrà limitare la erogazione di nafta in modo da evitare che il punto di funzionamento sconfini nella zona vietata costringendo in tal modo il punto stesso a percorrere la linea 4 verso sinistra.

Se è previsto un limitatore di momento, esso interverrà per evitare l'erogazione di una potenza eccessiva ottenendo lo stesso effetto. In entrambi i casi ne conseguirà una diminuzione contemporanea del numero di giri e soprattutto della potenza erogata, proprio quando le condizioni di incremento di resistenza al moto venutesi a creare ne richiederebbero l'aumento. Ci sarà, quindi, un vero e proprio abbattimento della velocità della nave, effetto da considerarsi economicamente grave ed ancor più dannoso se si pensa che, nelle condizioni descritte, interviene sin dalle prime fasi dell'esercizio.

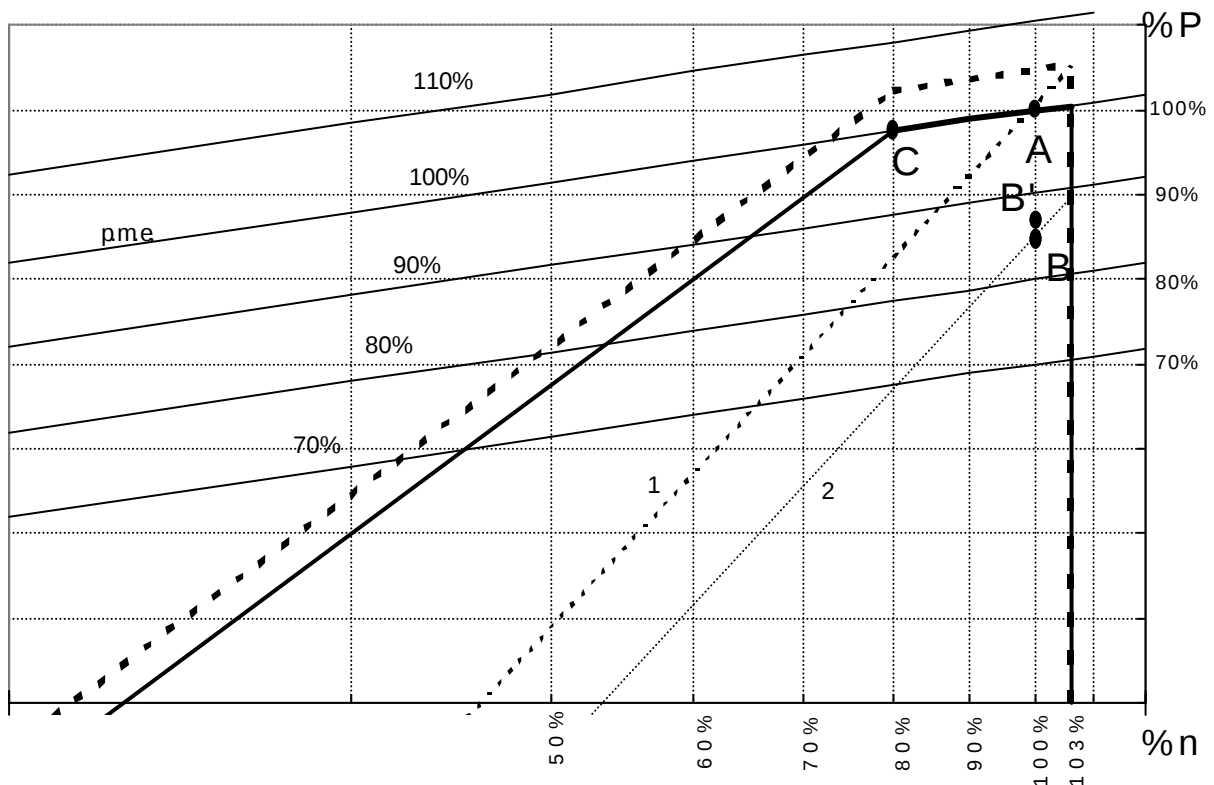


Figura 6 - Diagramma di carico

Per evitare l'insorgere di questi fenomeni si può proporzionare l'elica in modo tale che l'assorbimento di potenza sia dettato non da una legge come la 1 ma da una come la 2

(figura 6), facendo sì, in pratica, che nelle condizioni di progetto l'elica assorba al numero di giri nominale non tutta la potenza disponibile ma solo una sua aliquota. Il punto di progetto dell'elica non sarà più A ma B , caratteristico di una potenza ridotta rispetto a quella che il motore, ottimizzato per il funzionamento in A , potrebbe fornire allo stesso numero di giri.

La riserva di potenza così adottata permetterà, al deteriorarsi delle condizioni della carena, di mantenere il numero di giri nominale. Infatti all'aumentare della richiesta di potenza, il punto di funzionamento potrà stavolta muoversi in verticale rimanendo nei limiti imposti dal diagramma di carico, fino a giungere in A dove si riproporrà il problema visto nel caso precedente. L'armatore previdente ricovererà la sua nave in bacino per la pitturazione prima dell'inizio del funzionamento al punto A in modo che non si arrivi mai alle condizioni limite viste in precedenza e che non vi siano sostanziali riduzioni di velocità della nave.

Effettuato il carenaggio, il nuovo punto di funzionamento non si troverà di nuovo in B (come quando la nave era nuova) ma, per effetto di quei deterioramenti irreversibili che lo scafo subisce durante la navigazione, la potenza che la carena, pur rimessa a nuovo, richiederà sarà superiore a quella relativa a B (in figura 6 il nuovo punto di funzionamento è indicato con B').

La nave ripartirà dunque richiedendo, al numero di giri nominale (100%), una potenza $P(B')$ maggiore di quella di calcolo $P(B)$. Durante le nuove rotte il punto di funzionamento riprenderà a percorrere in salita il tratto $B' - A$ e si ripeterà la situazione vista innanzi. Inizia cioè un vero e proprio ciclo di navigazione e bacini dopo ognuno dei quali verrà persa una aliquota del margine iniziale $A - B$ di potenza per effetto dell'invecchiamento della carena.

Prevedendo un margine di potenza, la diminuzione media di velocità dovuta all'aumento della resistenza al moto sarà di gran lunga inferiore a quella del caso in cui si progetti il punto di propulsione direttamente in A ed anche se la velocità iniziale della nave risulterà più bassa, quella media che essa potrà sostenere tra due ricoveri in bacino sarà senz'altro superiore.

Tenere il punto di funzionamento più in basso di A risulta comunque conveniente, sia perché la velocità media del trasporto è più alta, sia perché il motore funziona mediamente più lontano dai limiti del diagramma di carico e, quindi, in condizioni di esercizio certamente migliori.

La scelta del punto B sul diagramma di carico dipende sostanzialmente dal margine di potenza che si vuole risparmiare in partenza per ottenere i benefici descritti e dagli intervalli che si prevede di effettuare tra due bacini consecutivi; in generale, il margine di potenza (rappresentato dal segmento $A - B$) viene scelto pari a circa il 10 ÷ 15 % della potenza al CMCR per cui l'elica, alle prove in mare, dovrebbe assorbire, al numero di giri nominale del motore, non più dell'85 ÷ 90 % della potenza massima continuativa [4].

In genere, per navi ad alto coefficiente di finezza come petroliere e bulk carriers, è preferibile scegliere un margine del 15 % mentre, per navi come cargo liners, portacontainers etc. di coefficiente di finezza normalmente inferiore a 0.7, si può ritenere sufficiente un margine del 10%.

E' chiaro altresì che il fattore di progetto che decide la collocazione del punto B alle prove in mare è il passo dell'elica (naturalmente a parità di altre condizioni tra cui in primis il diametro che sarà stato scelto al valore massimo compatibile con la geometria e la dinamica della nave).

Tanto più grande sarà il passo tanto più in alto si troverà il punto B per cui, in pratica, se l'elica fosse stata prevista per il funzionamento al punto A e poi si decidesse di prevedere un margine di potenza ed il conseguente funzionamento al punto B, occorrerebbe ridurre il passo di progetto fino ad un valore tale da far assorbire all'elica la potenza desiderata al numero di giri nominale.

Prevedere un margine di potenza "risparmiato" in partenza, ma poi restituito con il deterioramento della carena, ha un effetto positivo sul funzionamento del motore in cattive condizioni meteomarine. Se l'incremento di resistenza al moto non supera il margine di potenza compreso tra il punto di funzionamento ed il CMCR, il motore potrà continuare a funzionare al numero di giri nominale erogando una potenza maggiore a quella nominale in accordo con la richiesta derivante dalle condizioni di navigazione.

Non è raro il caso in cui il progettista di un sistema di propulsione decida di prevedere un margine di potenza da sfruttare in presenza di condizioni avverse di tempo e di mare (il cosiddetto "sea margin") ed uno per controbilanciare l'aumento di resistenza derivante dal progressivo peggioramento delle condizioni della carena ("engine margin").

Seguendo, quindi, le indicazioni date sinora, si supponga di dover effettuare la scelta di un diesel come motore primo di una nave propulsa con elica a passo fisso; immaginando di aver già definito il ciclo di funzionamento (2T o 4T), siano conosciuti dalle prove in vasca i valori dei parametri P_E , n e h_D .

Una volta determinati i valori di h_R e h_{asse} (ricavabili dalle esperienze di cantiere o dalle indicazioni dei produttori delle parti meccaniche), si determina la potenza al freno P_B che il motore deve fornire per muovere la nave nuova alla velocità di progetto v :

$$P_B = \frac{P_E}{h_D h_R h_{asse}}$$

Decisi poi i valori di engine margin e sea margin valutati in base all'applicazione da realizzare, resta individuato, come loro somma, il DP_B ossia il margine complessivo di potenza che si ritiene necessario per la sicurezza d'esercizio del motore.

Pertanto il motore da installare a bordo dovrà avere un CMCR pari a $P_B + DP_B$ al numero di giri n .

Questo valore della potenza al motore (e non quello di P_B) farà da riferimento nella scelta del motore ed è quindi con esso che si dovrà entrare nel diagramma di layout.

Discorso del tutto analogo può essere fatto nel caso che la propulsione della nave sia affidata a più di un motore.

Il valore di P_B (che è evidentemente pari alla potenza assorbita al motore per l'avanzamento alla velocità v di progetto della nave nuova in condizioni meteomarine normali) viene spesso denominato **Service Load (SL)** oppure **Service Continuous Rating (SCR)**.

Nel diagramma di carico (si veda figura 4) il limite massimo del numero di giri è posto a circa il 103% del valore nominale di n . Ciò è dovuto al fatto che, alle prove in mare, quando l'Armatore desidera vedere erogata una potenza pari al CMCR (in base alla quale ha contrattato il prezzo del motore), la nave è, in genere, in condizioni di zavorra non essendo, in quella fase, presente a bordo alcun carico pagante.

L'immersione di zavorra è assai inferiore a quella di pieno carico e, di conseguenza, la resistenza incontrata è più bassa e la potenza erogata dal motore al numero di giri nominale, che a pieno carico dovrebbe coincidere con il CMCR, risulta più bassa di questo valore.

Aumentando di qualche punto il numero di giri (ma tenendosi, beninteso, in condizioni accettabili per la meccanica del motore) la potenza erogata (che aumenta in ragione della terza potenza di n) può essere portata a valori prossimi al CMCR per permettere la constatazione del raggiungimento della potenza di contratto da parte dell'Armatore.

3 - Propulsione con elica a passo variabile

I problemi sollevati innanzi, unitamente al desiderio di realizzare propulsori sempre più flessibili alle condizioni di navigazione, hanno sostenuto lo studio di vari sistemi atti a migliorare la propulsione ed a superare i problemi descritti nel capitolo precedente.

E' nata così l'idea di costruire un tipo di elica le cui pale, ruotando attorno al proprio asse, non "costringessero" il punto di funzionamento a collocarsi in una sola ben determinata ed inevitabile posizione (in funzione delle condizioni al contorno come dislocamento, sporcamento della carena e dell'elica etc.) ma rendessero il sistema adattabile alle condizioni di navigazione.

L'elica a passo variabile, concepita inizialmente allo scopo di semplificare la reversibilità del sistema di propulsione, si è dunque presentata come il mezzo più valido per far fronte alle esigenze esposte.

Dal momento che accanto agli indubbi vantaggi che l'uso dell'elica a passo variabile comporta c'è da fare i conti anche con taluni suoi aspetti negativi, la scelta del tipo di elica da adottare su una nave è il risultato di una serie di considerazioni che, al progredire della tecnologia, va facendosi sempre più complessa e richiede l'attenta valutazione di una crescente quantità di fattori.

Nonostante già nell'800 vi fossero brevetti di eliche a pale orientabili [5], la diffusione vera e propria iniziò in parallelo con quella del motore diesel; difatti era molto allettante il pensiero di poter scavalcare il grosso problema di dover rendere un tale motore reversibile come erano le macchine a vapore, fino a quel momento protagoniste incontrastate della propulsione navale; per le navi propulse a vapore ed a vela, poi, l'elica a passo variabile presentava il vantaggio di poter essere messa in condizioni di resistenza nulla quando la propulsione avveniva solo per via eolica.

Dopo fasi alterne nella preferenza accordata alle eliche a passo fisso ed a quelle a pale orientabili (queste ultime risultarono per un certo periodo inadeguate alle crescenti potenze che il diesel forniva), l'elica a passo variabile prese a diffondersi sempre più fino ai giorni nostri. Si può stimare che una percentuale prossima al 40 ÷ 50 % del dislocamento complessivo delle navi in attività è propulso con questo tipo di elica [6]. Le residue resistenze all'applicazione dell'elica a pale orientabili su navi con grosse potenze installate a bordo sono state eliminate dagli sviluppi tecnologici che hanno messo tali eliche in condizioni di assorbire potenze dello stesso ordine di grandezza di quelle smaltite dalle eliche a passo fisso.

A fronte dei vantaggi di cui sopra, va sottolineato che l'elica a passo variabile ha mediamente un rendimento minore di quello dell'elica a passo fisso ad essa corrispondente dal punto di vista geometrico e della potenza assorbita. A tal proposito la figura 7 [6] mostra il decremento di rendimento subito in funzione del rapporto tra il diametro mozzo e quello dell'elica.

Se ne trae la conclusione che, nel rispetto delle esigenze di affidabilità, il rapporto visto sopra deve essere il più basso possibile.

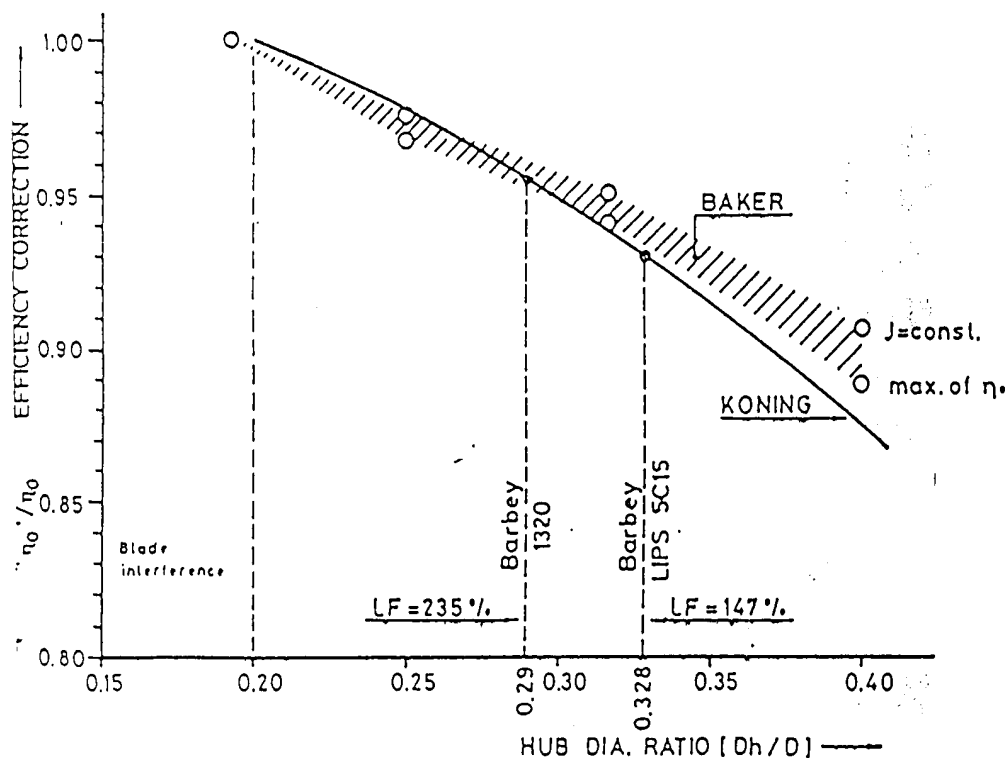


Figura 7 - Riduzione del rendimento propulsivo in funzione del rapporto tra i diametri del mozzo e dell'elica

In definitiva i motivi che spingono all'uso dell'elica a passo variabile possono essere riassunti come segue:

- possibilità di sfruttare il motore alla potenza nominale in condizioni accettabili in ogni situazione di carico;
- rotazione unidirezionale dell'elica con riflessi positivi sulla manovrabilità;
- miglioramento delle prestazioni in condizioni limite rispetto a quelle di progetto;
- notevoli vantaggi progettuali ed operativi sia per il sistema di propulsione vero e proprio sia per quanto riguarda la produzione di energia elettrica a bordo.

Con eliche a passo fisso per variare la velocità della nave non v'è altro mezzo che non la variazione del numero di giri dell'elica stessa; per ottenere l'inversione della rotazione, a meno che sulla linea d'assi non sia installato un invertitore (cosa piuttosto rara, specialmente in accoppiamento con i diesel di grande alesaggio), occorre arrestare il motore e riavviarlo nel senso opposto di rotazione.

In presenza di elica a passo variabile, viceversa, non si richiede né variazione della velocità dell'elica né reversibilità del motore principale.

Anche la possibilità di rallentare o di fermarsi del tutto è notevolmente migliore per navi allestite con eliche a pale orientabili; la figura 8 (realizzata sulla base di dati della produzione Fincantieri) mostra che le qualità di "crash stop" per navi con elica a passo variabile sono migliori di quelle per navi mosse da elica a passo fisso (in dipendenza dalla velocità iniziale della prova, in 8 a è riportato il tempo d'arresto mentre in 8 b lo spazio d'arresto). Ciò a causa del fatto che, nel primo caso, l'inversione del momento è più veloce e la potenza ottenibile a pale invertite è maggiore. Come si può notare dalla figura 8, la differenza diventa più sensibile al crescere delle dimensioni della nave.

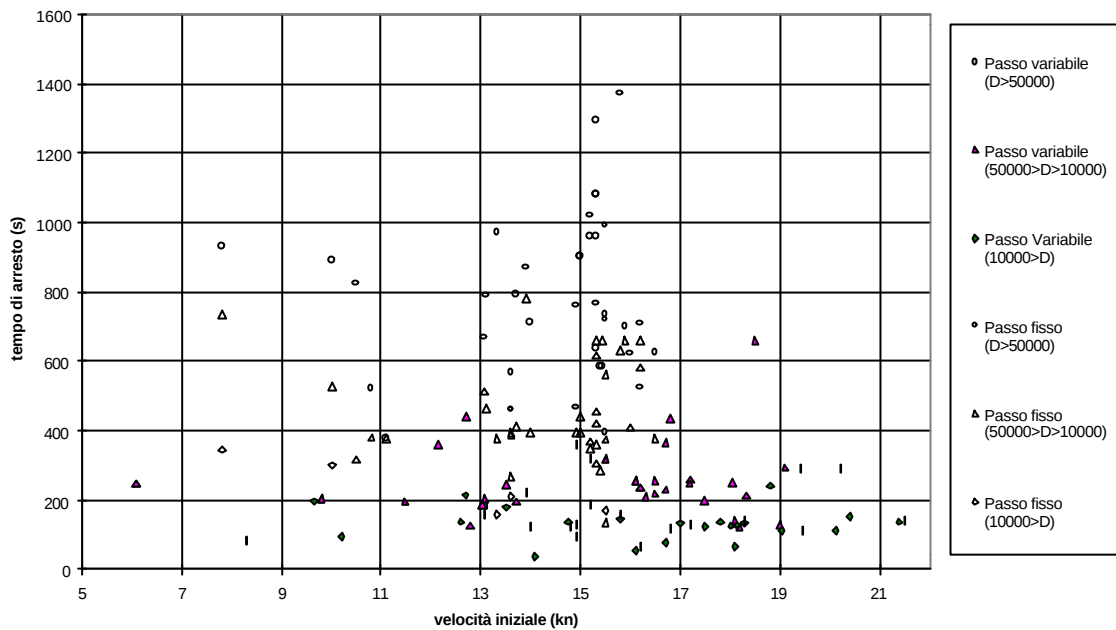


Figura 8 a - Tempo di crash stop di alcune navi in funzione della velocità iniziale

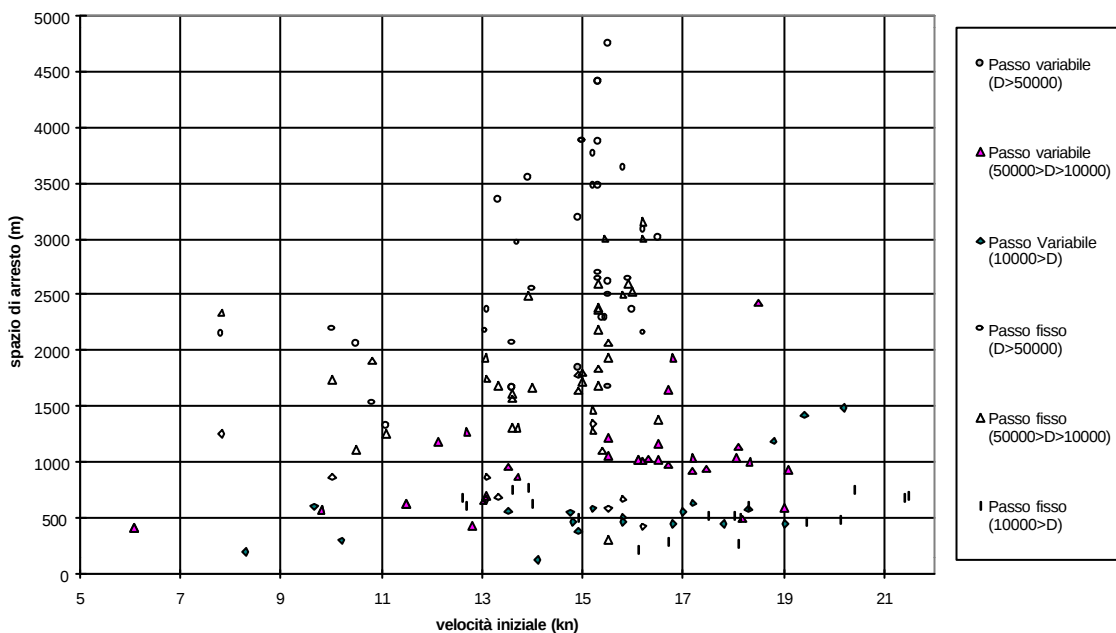


Figura 8 b - Spazio di crash stop di alcune navi in funzione della velocità iniziale

Il tempo ottimo di inversione delle pale per una elica a passo variabile dipende dal dislocamento e dalla velocità della nave. Un'inversione troppo veloce può provocare il distacco della vena fluida con conseguente cavitazione.

Segue una indicazione sui tempi di inversione dal massimo passo avanti al massimo indietro (o viceversa) per alcuni tipi di nave [6]:

Rimorchiatori di porto	10 ÷ 15 s
Ferries, navi passeggeri	10 ÷ 25 s
Petroliere, bulk carriers	40 ÷ 50 s
Cargo veloci	30 ÷ 40 s
Corvette, fregate	20 ÷ 40 s

Altro vantaggio delle eliche a passo variabile riguardo alla manovrabilità è la possibilità di muovere la nave ad ogni velocità e per qualsiasi tempo. Ciò è impossibile con eliche a pale fisse per le quali la velocità di rotazione minima consentita è piuttosto alta (40 ÷ 50% di quella nominale). Durante le soste brevi, inoltre, il motore può essere mantenuto in rotazione nella posizione di momento nullo.

Un'elica a passo fisso può utilizzare il motore primo, al numero di giri nominale, solo in un modo, quello "di progetto". In tutti gli altri casi le prestazioni nominali non sono ottenibili o per le limitazioni in termini di massimo numero di giri o per quelle derivanti dal momento massimo. Per il diesel, che è oggi impiegato nel maggior numero di costruzioni navali, con un'elica a passo variabile la possibilità di impostare il passo in modo continuo permette di utilizzare il motore al numero di giri nominale in tutte le situazioni operative. Ciò porta ad un notevole incremento del momento all'elica in condizioni diverse da quelle di progetto.

Questo vantaggio è piuttosto evidente per navi ad ampio ventaglio di condizioni operative come i rimorchiatori, le draghe, le rompighiaccio, le quali richiedono sia una alta velocità di trasferimento che un forte momento ed una sua esatta determinazione. Le eliche a passo variabile permettono, in queste navi, il miglioramento delle prestazioni e la scelta di un motore più piccolo, a parità di prestazioni ottenute, rispetto a quello che bisognerebbe installare in accoppiamento con un'elica a passo fisso di compromesso tra queste due esigenze. In tutti i tipi di nave, inoltre, le eliche a passo variabile permettono l'adattamento alle variazioni di immersione e di sporcamento della carena.

Imbarcazioni del tipo descritto si presentano come campo ottimale per l'adozione di eliche a passo variabile; infatti, oltre al propulsore vero e proprio, altri utilizzatori hanno bisogno di energia per essere mossi e, quando attivi, assorbono una parte non indifferente dell'energia messa a disposizione dal motore principale. Questa potenza non è richiesta in genere con continuità e non sempre in concomitanza con l'impegno per la propulsione.

Le soluzioni che prevedono l'uso di elica a pale orientabili permettono, in definitiva, la riduzione della potenza totale installata e del numero degli ausiliari nonché un utilizzo più conveniente del motore principale.

Motore primo destinato alla sola propulsione

In figura 9 [4] è riportato il diagramma di carico di un impianto comprendente il motore principale (che nell'esempio è un 2T di grandi dimensioni) destinato alla sola propulsione, in collegamento con un'elica a passo variabile. In esso sono riportate:

- le curve di elica: si tratta di una famiglia di curve che rappresentano l'assorbimento di potenza da parte dell'elica per un certo numero di passi; ogni curva, cioè, è relativa ad una determinata impostazione del valore del passo dell'elica ed indica l'assorbimento di potenza, ad ogni numero di giri, dell'elica fatta funzionare a quel passo. In evidenza tra esse la curva passante per il punto A che è il CMCR del motore installato a bordo (curva "FIXED PROPELLER p");
- le curve a pressione media effettiva costante: essendo la p_{me} proporzionale al momento erogato dal motore e, come è facile dimostrare, all'indice di carico LI, queste curve possono essere individuate ognuna da un valore di LI;
- la curva "torque limit" che indica i limiti del momento erogabile dal motore.

Si noti che, a differenza di quanto accade nei diagrammi di carico presentati in precedenza, in questo caso le scale delle grandezze in ascissa ed ordinata non sono logaritmiche. Ciò perché nella esposizione che segue sono coinvolte anche zone basse del diagramma nelle quali l'uso delle scale logaritmiche comporterebbe un'eccessiva dilatazione degli intervalli unitari sugli assi coordinati con la conseguenza di rendere scomoda la lettura e l'interpretazione dei fenomeni che si descrivono.

Quando il motore principale muove un'elica a pale orientabili si crea una variabile in più nella gestione della nave: per adattare l'erogazione di potenza del motore alle condizioni di navigazione o di manovra, oltre a potersi variare il numero di giri del motore, si può intervenire anche sul passo dell'elica. Dovendosi gestire, in sostanza, un sistema più complesso, si sente una maggiore esigenza di automazione. Questa viene soddisfatta da meccanismi che, intervenendo sui valori delle grandezze in gioco, mettono tutto l'impianto nelle condizioni di esercizio ritenute più idonee ad affrontare la richiesta di potenza necessaria per la propulsione.

Nei primi impianti [6] si praticava un'impostazione separata del numero di giri e del passo dell'elica, secondo delle tabelle studiate in base alle esigenze di servizio da soddisfare; successivamente, si sono resi necessari sistemi che unificassero ed automatizzassero il controllo, semplificando le operazioni nel rispetto della protezione dal sovraccarico e della disponibilità di buone condizioni operative.

Il tutto si concretizza, sostanzialmente, nella messa a punto di due sistemi: il primo consiste in un dispositivo capace di far funzionare il motore secondo una ben precisa correlazione (o "combinata") passo - giri di cui un esempio in figura 10. Il criterio di funzionamento è il seguente: si stabilisce un certo numero di accoppiate numero di giri - passo dell'elica corrispondenti alle condizioni di esercizio da realizzare e si fa in modo da attivarle semplicemente disponendo una leva (che, in genere, si trova in plancia, a disposizione del Comando) in una delle posizioni previste.

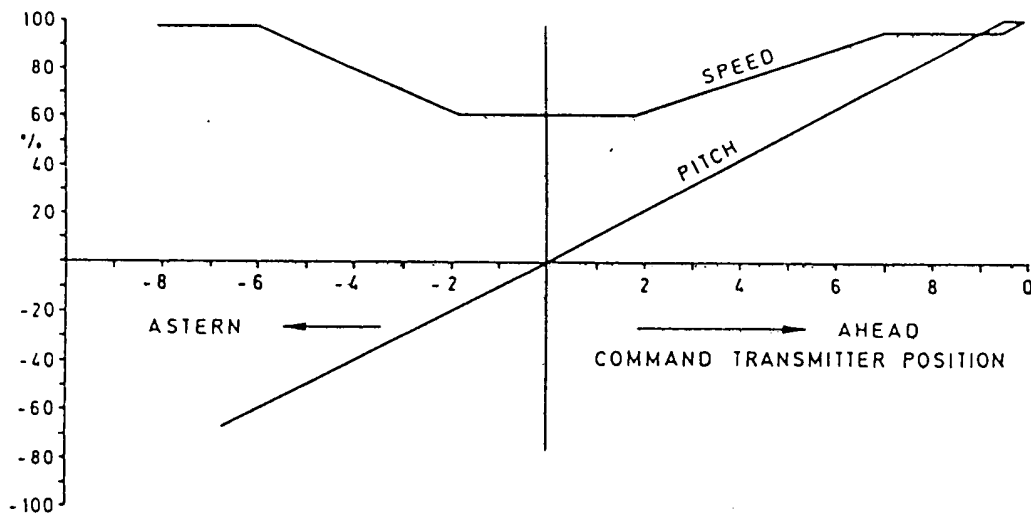


Figura 10 - Combinata passo - giri

Ad ognuna di queste posizioni della leva corrisponde una delle accoppiate passo - giri predisposte, ossia il funzionamento al numero di giri e con il passo dell'elica previsti dalla accoppiata selezionata.

Si può così unificare ed ottimizzare, nello stesso tempo, la gestione dell'intero impianto.

Completa l'insieme degli automatismi, di solito, un dispositivo che protegge il motore dai regimi di sovraccarico che possono intervenire a seguito di un comando errato di variazione del passo, di condizioni di mare grosso, etc. Attraverso sensori di momento (attuati generalmente con la lettura diretta della posizione dell'asta a cremagliera delle pompe nafta oppure di altro indicatore di carico) e di numero di giri (pick - up sul volano), questo sistema viene messo in grado di stabilire il più opportuno valore del passo dell'elica da adottare per reagire alle condizioni di sovraccarico che altrimenti si instaurerebbero.

Il funzionamento può essere di tipo continuo, attivo cioè in tutte le condizioni di carico e numero di giri per ottimizzare il funzionamento e prevenire possibili condizioni di sovraccarico, oppure del tipo "on guard" ed intervenire soltanto quando il momento erogato supera un determinato valore di soglia (che è possibile impostare con la massima libertà) riducendo il passo per poi disattivarsi (con conseguente ritorno del passo al valore precedente) quando il momento motore ritorna al valore che aveva prima dell'evento eccezionale.

I segnali in arrivo dal sistema di monitoraggio del motore sono convogliati in un armadio degli automatismi ove appositi meccanismi realizzano le funzioni descritte e producono i segnali in uscita necessari a governare l'apparato di propulsione.

Se dal diagramma di figura 10 si prendono a due a due i passi ed i numeri di giri relativi alle varie posizioni e si riportano ordinatamente nel diagramma in figura 9, si ottiene la curva di potenza con la quale si "costringe" il sistema a funzionare (linea C.P. PROPELLER). In altri termini, la variabilità del passo ha introdotto la possibilità di decidere, entro un ambito relativamente ampio, la curva di assorbimento di potenza da parte dell'elica.

E' evidente che la situazione è del tutto diversa da quella che si presentava con elica a passo fisso; la curva di assorbimento di potenza è, infatti, più lontana da quella limite ed il motore lavora, in ogni condizione di funzionamento, ad un livello di pressione media effettiva più basso. Ciò comporta evidentemente un minore stress meccanico e termico a tutto vantaggio dell'affidabilità del sistema.

Ma i veri vantaggi si apprezzano proprio lì dove l'elica a passo fisso aveva i suoi limiti: infatti con l'invecchiamento della carena, da un lato il motore può evitare il funzionamento in condizioni di overload, dall'altro non si deve sopportare la riduzione dell'erogazione della potenza massima, come avviene in quel caso, ma soltanto il calo della velocità della nave (mediamente assai inferiore, comunque, a quello che si sarebbe avuto con elica a passo fisso).

Per paragonare le due diverse situazioni, si confrontano ora le condizioni di funzionamento dello stesso motore sia nel caso di allestimento con elica a passo variabile sia con elica a passo fisso supponendo, per entrambi i casi, di aver scelto un carico di servizio pari al 88% del CMCR al 95.6% del numero di giri nominale del motore. Su questo valore del SL si sono ottimizzate le caratteristiche sia dell'elica a pale fisse che di quella a passo variabile.

Con elica a pale orientabili, al deteriorarsi della carena, si ha la solita risalita del punto A1 verso posizioni corrispondenti a potenze maggiori per effetto dell' incremento di potenza assorbita dalla nave nel suo avanzamento. Quando le condizioni di funzionamento diventano tali che il punto A1 comincia a superare la linea limite, interviene un sistema automatico (del tipo descritto in precedenza) che fa sì da tenere sempre il punto di funzionamento entro i limiti stabiliti.

Supponendo ad esempio che il punto A1 si sia portato in A1' e poi in A1'', il sistema reagirà con una diminuzione di passo (ΔH in figura 9) in modo che il nuovo punto di funzionamento coincida al massimo con A. Siamo quindi ancora entro i limiti di momento ammessi e la potenza erogata è addirittura superiore a quella che si aveva all'inizio in corrispondenza del punto A1. La velocità di avanzo della nave risulterà lievemente inferiore a quella iniziale a causa delle peggiorate condizioni di navigazione dovute all'invecchiamento della carena.

Se l'elica è invece a passo fisso, il punto di funzionamento da A1 passa, col deterioramento della carena, in A1' dopodiché i dispositivi manuali od automatici, eventualmente inseriti nell'impianto, devono fare in modo da "trattenerlo" nella zona consentita, ossia al di sotto della linea "torque limit". Il punto caratteristico del funzionamento nelle condizioni finali sarà, per esempio, B.

Tra i due casi prospettati le differenze sono evidenti: il funzionamento in B avviene, infatti, in condizioni decisamente peggiori di quello in A: la potenza in uscita dal motore è erogata ad un numero di giri inferiore, al limite delle condizioni di alimentazione accettabili e quindi sicuramente con un carico termico molto alto. Essendo diminuita, poi, di molto la potenza erogata (nel caso dell'esempio, all'85% di quella nominale) si avrà una drastica riduzione della velocità della nave, riduzione assai superiore a quella sofferta nel caso di elica a pale orientabili.

La nave funzionante con elica a passo fisso, quando il punto di funzionamento si avvicina a B, dovrà ricorrere urgentemente al bacino di carenaggio mentre la nave che monta l'elica a passo variabile potrà ancora rimanere in servizio in quanto il sistema di protezione dal sovraccarico, intervenendo sulla legge di correlazione passo - giri, manterrà il punto di funzionamento nei limiti previsti. La velocità di avanzo continuerà a diminuire ma la scelta

del momento del carenaggio risulterà meno critica di quanto avviene nel caso di elica a passo fisso.

Da quanto detto si evince che tra i due casi prospettati c'è una notevole differenza in termini di flessibilità d'impiego del sistema; con la propulsione assicurata da elica a pale orientabili, potendosi determinare la curva di assorbimento della potenza (compatibilmente con i passi disponibili e con lo stato di pulizia della carena), vi è notevole libertà di scelta: per ottenere una maggiore o minore erogazione di potenza non è necessario variare il numero di giri del motore ma si può variare il valore del passo a seconda dell'effetto che si desidera ottenere.

Teoricamente, dalla consolle di comando in plancia è possibile selezionare uno qualunque dei punti di funzionamento nell'area "consentita", quella contornata dalle linee limite. Ciò significa che la stessa legge passo - giri può essere scelta in vari modi, a seconda delle specifiche esigenze di propulsione. Se la nave è equipaggiata con motore ad alto grado di sovralimentazione, con i sistemi descritti si pone rimedio alle difficoltà di funzionamento che sorgono ai bassi carichi: infatti, approfittando della possibilità di giostrare tra numero di giri e passo, si possono realizzare le condizioni di carico desiderate tenendo sempre il motore in un campo di funzionamento accettabile dal punto di vista delle sollecitazioni meccaniche.

Naturalmente anche per propulsione con elica a passo variabile è bene prevedere un margine di potenza (comprensivo di engine e sea margin); in questo caso, tuttavia, la situazione che si viene a creare con l'incremento di resistenza al moto dovuto al deterioramento della carena è meno critica per effetto della maggiore elasticità del sistema che può reagire agli aumenti di richiesta di potenza con la variazione del passo e, quindi, con lo spostamento della posizione della curva di elica.

Motore primo destinato a propulsione e produzione di energia elettrica

L'alternatore asse, come ogni generatore di corrente, ha bisogno, per poter produrre energia elettrica a frequenza costante, di girare a velocità angolare costante; questa esigenza contrasta evidentemente con le modalità di gestione del motore principale il quale deve poter funzionare al numero di giri più consoni alle esigenze di navigazione o di manovra. La contraddizione messa in luce può essere risolta soltanto con l'adozione di elica a passo variabile.

In figura 11 si riporta un diagramma di carico qualitativo per un motore accoppiato ad un generatore asse ed a un'elica a passo variabile; in esso sono riportate alcune linee che indicano l'assorbimento di potenza a vari passi dell'elica in condizioni di mare calmo ed assenza di vento (curve a , b , c) ed in condizioni meteomarine peggiorate (curve a' , b' , c'). E' altresì indicato il punto CMCR (A) nonché le curve limite di funzionamento ammissibile del motore.

Supponendo che si sia deciso di sfruttare il motore a non più dell'85% del suo CMCR al numero di giri nominale e che il 9.5% della potenza disponibile sia destinato a produrre energia elettrica con l'alternatore asse, la situazione del sistema di propulsione per navigazione a regime in acque calme è descritta dalla colonnina 1.

La legge di passo che corrisponde alle scelte effettuate è la b; nelle condizioni previste rimane un discreto sea margin (circa il 5.5%) che permetterà di fronteggiare senza problemi eventuali accrescimenti occasionali della richiesta di potenza per la propulsione.

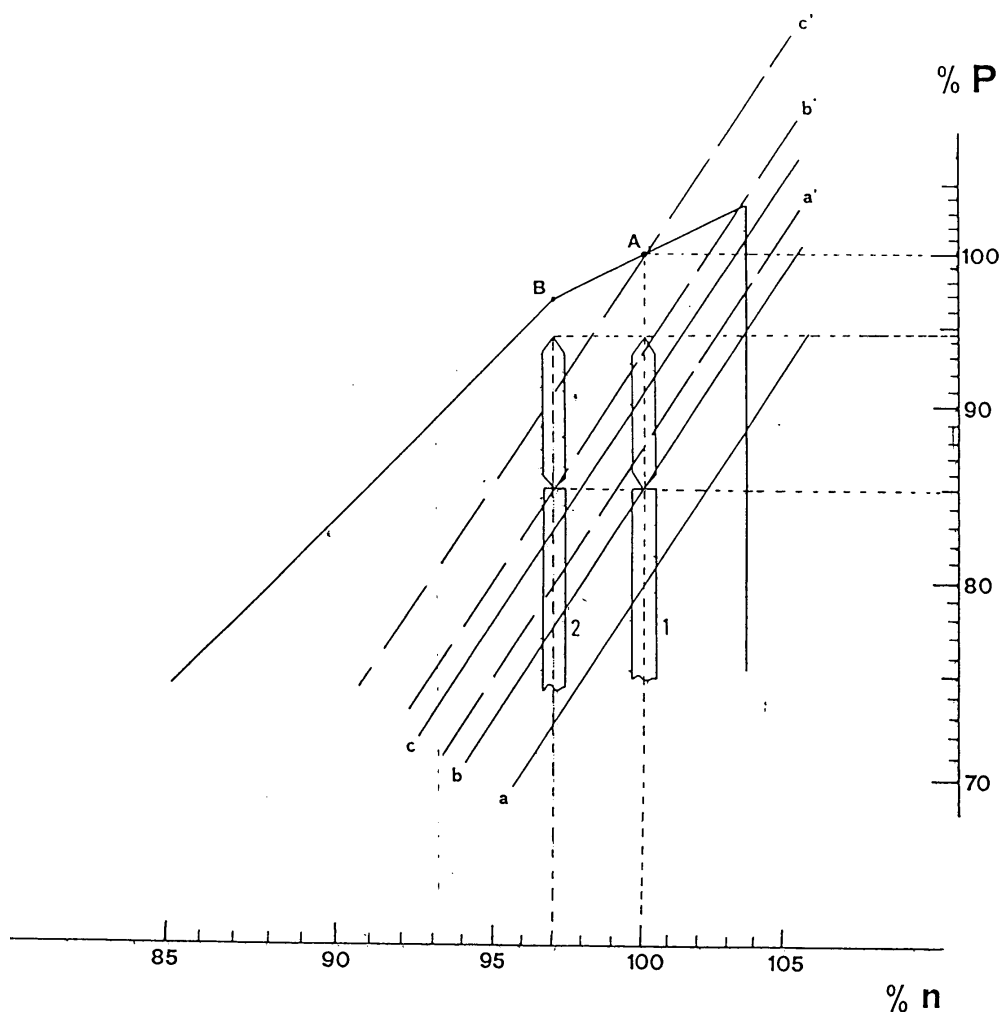


Figura 11 - Diagramma di carico con motore, generatore asse ed elica a passo variabile

Supponendo che, per un motivo qualsiasi (carena sporca, mare alto, vento forte etc.), la resistenza al moto aumenti in modo che le linee a , b , c si portino rispettivamente in a' , b' , c' , la richiesta di potenza aumenta di circa il 10% e, volendo mantenere le stesse condizioni di passo e numero di giri, occorrerebbe aumentare l'erogazione di potenza del motore.

Se non si vuole che il motore funzioni ad una potenza superiore a quella prevista, le difficoltà intervenute possono essere contrastate in vari modi; ricordando innanzitutto che il motore è collegato ad un generatore che richiede un numero di giri costante e pari al 100% di quello nominale, può essere desiderabile mantenere inalterato il numero di giri. In tal caso risulta utile l'aver installato un'elica a passo variabile: infatti, basterà scegliere un passo ridotto in modo che la legge di assorbimento di potenza torni ad essere quella indicata dalla linea iniziale (b). In queste condizioni la velocità della nave si riduce ma non cambiano né numero di giri né potenza erogata ed il sea margin rimane al valore precedente.

Se invece si può tollerare una riduzione del numero di giri di qualche percento (ad esempio perché è installato a bordo un sistema come il con-speed che permette di mantenere costante la velocità angolare all'asse dell'alternatore entro determinati limiti di variazione del numero di giri del motore principale), si può scegliere la soluzione propulsiva indicata dalla colonnina 2: lasciando inalterato il passo, si riduce il numero di

giri fino ad accordare la disponibilità di potenza propulsiva con la legge di assorbimento dell'elica (b' nella nuova situazione).

In tal modo, con una modesta riduzione del numero di giri (nell'esempio, del 3% circa) si è ricreato l'equilibrio rotto dal peggioramento delle condizioni di navigazione, mantenendo inalterata la erogazione di potenza per la propulsione e per la produzione di energia elettrica. Il sea margin risulta ridotto al 2.5% circa.

Tra le due situazioni estreme considerate, ne sono pensabili altre che vedrebbero variare sia il passo che il numero di giri ed il punto di funzionamento collocarsi in posizione intermedia tra i due relativi alle precedenti soluzioni.

Si ha dunque a disposizione una serie di possibilità in termini di impostazione del passo e del numero di giri per fronteggiare le diverse situazioni che possono presentarsi; in genere, per coadiuvare il Comando nella gestione della propulsione della nave, si predispongono delle combinate passo - giri (di cui un esempio in figura 10) che permettono di realizzare la curva di assorbimento ritenuta più conveniente per le condizioni di navigazione da affrontare, tenendo anche conto dell'eventuale impegno di potenza per l'alternatore.

L'uso dell'elica a pale orientabili ha un riflesso positivo anche sul comportamento del motore al deteriorarsi delle condizioni della carena. Quando aumenta la resistenza al moto, infatti, si può ridurre progressivamente il passo in modo da mantenere (come nell'esempio in figura 11) inalterata la potenza erogata (sia l'aliquota necessaria alla propulsione, sia quella destinata a produzione di energia elettrica) e la velocità di rotazione del motore.

Anche questo compito può essere automatizzato con l'installazione di un dispositivo che riduce il passo all'aumentare della resistenza al moto oppure corregge, in modo continuo, la legge passo - giri (quando sia previsto il relativo dispositivo). Si può tenere così, in ogni condizione di funzionamento, la curva di assorbimento della potenza nel campo consentito per il motore principale.

4 - Il problema dei bassi carichi nei motori diesel ad alto grado di sovralimentazione

Nella scelta del motore diesel da installare a bordo di una nave occorre tenere conto, oltre che delle specifiche progettuali indicate, anche di altre circostanze che, in esercizio, possono dar luogo a malfunzionamenti.

In particolare, i motori della recente generazione sono tutti sovralimentati ed interrefrigerati; al crescere del livello di sovralimentazione si presenta un fenomeno alquanto negativo per il funzionamento del motore: ai carichi parziali ed a basse velocità si riscontra un aumento della temperatura dei vari organi (e soprattutto alle valvole di scarico, da sempre punto debole dei motori che le adottano) in grado di comprometterne il buon funzionamento.

Questa fenomenologia, sconosciuta ai motori aspirati o a basso livello di sovralimentazione, è dovuta al difetto di alimentazione d'aria per la combustione che si poteva riscontrare al diminuire del carico. Tale difetto d'aria può determinare un aumento delle temperature di combustione ed è in grado di influenzare il carico termico al motore.

Per una trattazione esauriente del fenomeno si veda [7]; si riportano qui le sole conclusioni di quello studio. L'applicazione del motore diesel più soggetta ai rischi derivanti dalle operazioni a "part load" è senza dubbio quella marina; infatti, essendo la propulsione navale legata alle condizioni di erogazione della potenza in cubica, può accadere che il motore si trovi a funzionare a velocità minori di quella nominale e carichi fortemente ridotti.

Il fenomeno in esame ha peraltro effetti tanto più rilevanti quanto più alto è il grado di sovralimentazione del motore. C'è inoltre da rimarcare la netta differenza di comportamento tra diesel 2T e 4T. Mentre il primo, infatti, non sembra avere troppi problemi nel funzionamento a "part load", il secondo lavora in condizioni di gran lunga peggiori se il carico scende al di sotto di un certo valore, da ritenersi critico per il motore.

Ciò è dovuto al fatto che il motore 2T non vede cambiare significativamente, al variare del numero di giri, la portata d'aria all'aspirazione in quanto l'alimentazione, in quel caso, è realizzata attraverso le luci di lavaggio i cui tempi di scoprimento sono sostanzialmente indipendenti dalla velocità del motore.

Nel 4T, invece, è molto più sensibile l' "effetto pompa" ossia la dipendenza della portata d'aria all'aspirazione dalla velocità del motore; ciò perché i tempi di apertura e chiusura delle valvole (che regolano tale portata) variano proprio con il numero di giri.

Si può dire che l'esigenza di contrastare i danni derivanti dal funzionamento ai carichi parziali ha grossa influenza sulla definizione dell'apparato di propulsione di una nave in funzione del tipo di motore primo da installare a bordo. Quando, infatti, la scelta ricade sul 4T, più soggetto ai danni derivanti dal prolungato funzionamento in condizioni di "overload" ai bassi carichi, si preferisce in genere adottare un'elica a passo variabile; essa, infatti, alleggerendo il passo ove le condizioni di navigazione lo richiedano, consente di tenere sempre il motore in condizioni di funzionamento favorevoli.

Se l'apparato motore è invece costituito da un diesel 2T si può adottare con maggiore serenità l'elica a passo fisso non essendoci, in tal caso, particolare esigenza di tutelare il motore dagli effetti di eventuali operazioni ai carichi parziali.

Ricordando che tutte le grandezze che compaiono nella trattazione con pedice "o" sono riferite alle condizioni nominali di funzionamento del motore (in corrispondenza, cioè, del 100% di n e di P), si indicano con:

- P	potenza (come frazione di quella nominale)
- M	momento motore
- p_{me}	pressione media effettiva
- p_s	pressione di sovralimentazione assoluta
- p_n	pressione di sovralimentazione effettiva
- p_{amb}	pressione ambiente
- a	rapporto aria - combustibile
- X	grado di sovralimentazione

per il diesel 4T si suppongono valide le seguenti ipotesi:

- il rapporto aria/combustibile a è proporzionale al parametro p_s/p_{me}
- la pressione effettiva di sovralimentazione prodotta dalla turbosoffiante viene assunta proporzionale al carico ed alla velocità del motore ossia si ritiene valida la relazione:

$$p_s/p_{no} \gg P n$$

- Nella valutazione del grado di sovralimentazione, in prima approssimazione, si ritengono trascurabili le perdite di carico.

Per il motore 2T si assumono le medesime condizioni, eccetto quella che lega tra loro la pressione effettiva di sovralimentazione ed il carico; le risultanze sperimentali, per il caso in questione, indicano piuttosto l'espressione:

$$p_s/p_{no} \gg P$$

Attraverso opportuni calcoli si ottengono le seguenti relazioni:

per i 4T

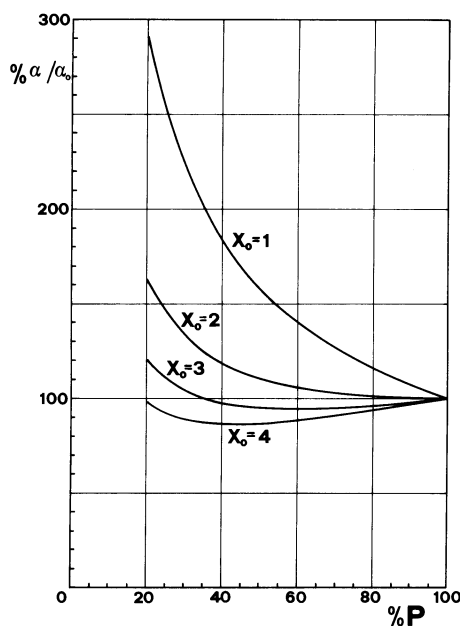
$$\frac{a}{a_0} = \frac{1 + (X_0 - 1) P^{4/3}}{X_0 P^{2/3}}$$

per i 2T

$$\frac{a}{a_0} = \frac{1 + (X_0 - 1)P}{X_0 P^{2/3}}$$

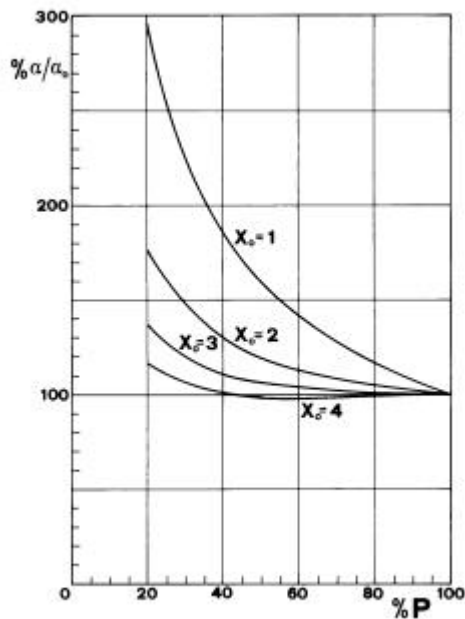
Sulla base di queste due espressioni sono costruiti i grafici nelle figure 12 e 13 i quali contengono, nel piano P , a/a_0 (con la potenza espressa in percentuale del suo valore nominale) le curve di livello ad X_0 costante, rispettivamente per motori 4T e 2T. Da essi si possono ricavare le seguenti considerazioni:

Motore 4T (fig 12)



- per $X_0 = 1$ (motore aspirato) il valore del rapporto a/a_0 cresce al decrescere della frazione di potenza; ciò è in accordo con l'osservazione precedentemente evidenziata: il 4T aspirato non ha problemi nel funzionamento ai carichi parziali.
- All'aumentare del grado di sovralimentazione le curve si abbassano; da un certo valore di X_0 compreso tra 2 e 3, le curve $a/a_0 = f(P)$ cominciano a presentare un tratto di valori inferiori a 100. Ciò significa che, da quel valore del grado di sovralimentazione in poi, si ha un intervallo di erogazione della potenza in cui $a/a_0 < 1$; in queste condizioni, essendo la pressione di sovralimentazione diminuita più della p_{ne} sviluppata nel cilindro, non è possibile sostenere il corretto eccesso d'aria e quindi il funzionamento del motore avviene in condizioni di precaria alimentazione.
- Il "buco d'aria" diventa più esteso, in termini di intervallo di potenze coinvolto nel fenomeno, al crescere di X_0 , il che significa che *il problema dei carichi parziali è tanto più sentito quanto più è alto il grado di sovralimentazione.*

Motore 2T (fig 13)



- L'andamento delle curve è molto più favorevole e presenta potenziali difetti di alimentazione d'aria per valori di X_0 molto più alti di quelli relativi al caso del 4T.
- I discostamenti dei valori di α/α_0 minori di 100 da quelli nominali sono inoltre molto modesti e non tali da generare grosse carenze d'alimentazione, come invece avviene nel 4T.

Va sottolineato che le risultanze di sperimentazioni effettuate sui motori in questione sono in sostanziale accordo con le indicazioni derivanti dall'elaborazione analitica.

Il funzionamento dei motori diesel ad alto grado di sovralimentazione per la propulsione navale ai carichi parziali è da ritenersi critico; ciò vuol dire che, nella scelta del diesel da installare a bordo, occorre prevedere l'adozione di sistemi che ne permettano il funzionamento in condizioni di carico termico e meccanico sopportabili dalle strutture del motore in modo da evitare ad esse danni o

malfunzionamenti; in [7] vengono esaminati alcuni di tali dispositivi.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] - Landri G., Paciolla A., Quaranta F.; "Combustibili e lubrificanti per motori diesel marini: problematiche, normative, sperimentazioni"; La Termotecnica, Napoli, 1989

- [2] - Grøne Ö.; "Advanced Man - B&W Engine Development"; M.A.N. - B & W Diesel A/S publication n° 851220

- [3] - Sheet L67GFCA; M.A.N - B & W publications

- [4] - Bassi A.; "La riparazione dei motori marini dal punto di vista del costruttore - Considerazioni sulle possibilità di ottimizzare le prestazioni di un motore diesel per la propulsione navale"; La Marina Italiana, luglio - agosto 1976

- [5] - Fiorentino A., Giancristofaro M., Tufolo L.; "L'elica a pale orientabili e la sua interazione con il motore principale"; Atti conferenza ATENA; Napoli, marzo 1986

- [6] - Schanz F.; "Controllable Pitch Propellers"; V WEGEMT, 1981, Paper E2

- [7] - Franca T., Quaranta F.: "Il problema dei bassi carichi nei motori diesel ad alto grado di sovralimentazione per la propulsione navale"

*STAMPATO NEL MESE DI APRILE 1993 A CURA DELL'AUTORE CON I MEZZI DEL
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA NAVALE DELL'UNIVERSITA' "FEDERICO II" DI
NAPOLI*

La scelta ed il funzionamento del motore diesel per la propulsione navale