

# Volume 3

## La propulsione navale

---

### 1. Classificazione delle navi

Una classificazione delle tipologie di navi più comuni, escluse quelle ad uso militare, è contenuta nello schema sottostante.

Servizio merci	Servizio passeggeri
<ul style="list-style-type: none"><li>• <i>Bulk carriers</i> (prodotti sfusi)</li><li>• <i>Portacontainers</i></li><li>• <i>Navi cisterna</i> (petroliere, metaniere, chemical tankers, ...)</li><li>• <i>Navi speciali</i> (rimorchiatori, navi da ricerca, pescherecci d'altura, navi per posare cavi e tubazioni o per dragare i fondali di porti e canali, ...)</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• <i>Navi transoceaniche</i> (liner)</li><li>• <i>Navi da crociera</i> (cruise ship)</li><li>• <i>Traghetti</i> (ferries) e <i>traghetti veloci</i> (fast ferries)</li></ul>

Le **navi portacontainer** sono adibite al trasporto di merci raccolte in casse metalliche di dimensioni unificate, dette *container*.

Le dimensioni standard del container sono le seguenti:

- larghezza di 8 piedi = 2,44 m
- altezza di 8 piedi e 6 pollici = 2,59 m
- lunghezza 10, 20, 30, 40 piedi.

I più usati sono i container da 20 piedi (6,10 m).

Con la sigla **TEU** (*Twenty foot Equivalent Unit*) si indica il container da 20 piedi, che può contenere fino ad un massimo di 24 t di merce; mediamente il peso lordo è attorno a 12 t.

In TEU viene solitamente espressa la capacità di carico di una nave portacontainer.

La **stazza** di una nave rappresenta la somma dei volumi degli spazi interni di una nave ermeticamente chiusi all'acqua; l'unità di misura tradizionale era la tonnellata di stazza, che equivale ad un volume di 100 piedi cubi (2,832 metri cubi). A seguito dell'entrata in vigore della Convenzione Internazionale sulla Stazzatura delle Navi la stazza resta un indice di capacità commerciale della nave, ma è diventata una misura convenzionale derivante da due formule:

- **stazza lorda** (*GT - gross tonnage*), riferita a tutti i volumi interni della nave, compresi gli spazi della sala macchine, dei serbatoi di carburante e quelli occupati dall'equipaggio;
- **stazza netta** (*NT - net tonnage*), riferita agli spazi interni della nave utilizzabili per scopi commerciali.

#### Ro/Ro e Lo/Lo

##### ***Navi Roll on – Roll off (Ro/Ro)***

*Per il trasporto di veicoli, rimorchi, carrelli movimentabili con rampe di accesso/discesa.*

##### ***Navi Lift on – Lift off (Lo/Lo)***

*I mezzi gommati vengono caricati e scaricati mediante sollevamento con gru.*

Il **dislocamento** di una nave è il peso dell'acqua spostata, coincidente per il principio di Archimede con il peso della nave stessa. È misurato in tonnellate (1000 kg), negli USA in long ton (circa 1016 kg). Per il passaggio da peso a volume si considera per l'acqua di mare un peso specifico di circa 1025 kg/m<sup>3</sup>. Dislocamento è il peso della nave e del suo contenuto; il **dislocamento a vuoto** (*lightweight*) misura il peso della nave senza carburante, carico, passeggeri, equipaggio, né provviste a bordo. La differenza è la portata lorda (*deadweight*), quindi la capacità di carico in sicurezza della nave.

## Propulsione ad elica

Ogni corpo in moto in un fluido è soggetto ad una forza che si oppone al moto, ossia ad una resistenza all'avanzamento per superare la quale occorre produrre una forza che lo mantenga in moto. Questa forza propulsiva si chiama **spinta**; i dispositivi capaci di produrla sono detti *propulsori*.

Nei primi decenni del XIX secolo i *propulsori ad elica* sostituirono rapidamente le ruote a pale; seguì una progressiva evoluzione con soluzioni idrodinamiche e costruttive via via più complesse e nel 1880 fu costruita la prima elica con aspetto molto simile a quello attuale.

Le eliche sono divenute il propulsore marino per eccellenza, affiancate oggi, per velocità molto elevate, dal *propulsore a getto* (*idrogetto*).

Per la determinazione della spinta necessaria a mantenere una determinata velocità di avanzamento  $V$  è necessario valutare la resistenza complessiva che la nave incontra nel moto relativo rispetto al fluido in cui è immersa. Tale resistenza è data dalla somma di due componenti:

- resistenza dovuta all'**attrito** tra l'acqua e lo scafo della nave e attriti dovuti ai **vortici** che si creano nel fluido. Risulta sostanzialmente proporzionale alla superficie della carena della nave, al suo stato di manutenzione e al quadrato della velocità;
- resistenza d'onda**, determinata dalle onde che si formano a prua e a poppa durante l'avanzamento. Si distinguono le *onde divergenti*, che formano angoli di circa 40° rispetto al piano di simmetria della nave, dalle *onde trasversali*, dirette da prua verso poppa e con direzione quasi perpendicolare all'avanzamento.

Di difficile determinazione con il calcolo, le resistenze possono essere rilevate sperimentalmente attraverso prove su modelli; si riscontra che:

- le resistenze di attrito e dovute ai vortici sono circa proporzionali alla superficie della carena e al quadrato della velocità; sono influenzate dallo stato della carena stessa;
- le resistenze d'onda, più rilevante per le onde divergenti, risulta circa proporzionale al dislocamento della nave e alla quarta potenza della velocità.

Determinata la resistenza totale  $R_t$ , si calcola la **potenza effettiva** necessaria per garantire l'avanzamento della nave alla velocità  $V$ , tenendo conto che la spinta  $S$  è pari alla resistenza totale:

$$N_{ef} = S \cdot V$$

Considerando come propulsore un'elica, essa dovrà fornire una **potenza di spinta** superiore alla potenza effettiva necessaria, tenendo conto del **rendimento di carena**, legato all'interazione tra elica e carena della nave e alla scia generata:

$$N_{sp} = N_{ef} \eta_{car}$$

Si definisce **rendimento dell'elica dietro carena** il rapporto tra la potenza di spinta e la potenza asse, misurabile all'uscita dal cuscinetto reggispinta:

$$\eta_{el} = N_{sp} / N_{asse}$$

Senza affrontare le teorie che descrivono il funzionamento del propulsore ad elica, si può sinteticamente considerare che la spinta è data da:

$$S = Q_a \cdot \Delta V$$

$Q_a$  è la portata di acqua che attraversa l'elica

$\Delta V = V_f - V_o$  è la variazione di velocità dovuta al propulsore.

Il rendimento di propulsione dell'elica è tanto maggiore quanto più grande è il rapporto  $V_f/V_o$  e quanto più piccola è la differenza ( $V_f - V_o$ ); inoltre influisce il profilo e l'orientamento delle pale.

La **potenza asse** è quella fornita dal motore, depurata dalle perdite meccaniche della trasmissione (ingranaggi riduttori, perni della linea d'asse, reggispinta):

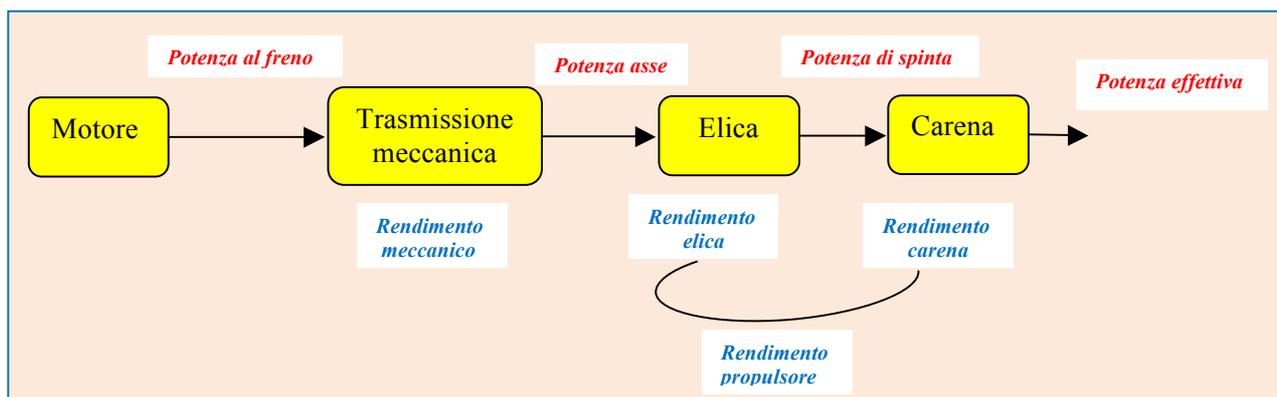
$$N_{asse} = N_{mot} \cdot \eta_m$$

Si definisce **rendimento propulsivo** il rapporto tra la potenza effettiva e la potenza asse:

$$\eta_p = \eta_{car} \cdot \eta_{el} = \eta_{eff} N_{asse}$$

Nello schema a blocchi sono riassunti i passaggi di potenza dal motore allo scafo della nave con i relativi rendimenti; lo schema indica la successione logica dei passaggi di energia e non la collocazione fisica dei componenti.

### Schema a blocchi: potenze e rendimenti



## Propulsione ad idrogetto

Nella propulsione a idrogetto (*waterjet*) l'acqua viene prelevata tramite una presa dinamica ed espulsa a velocità maggiore di quella di entrata, attraverso un ugello; la variazione della quantità di moto della portata fluida è pari alla spinta ad essa fornita:

$$F = Q \cdot \Delta V$$

Per reazione, una spinta uguale e contraria è esercitata sulla nave.

L'energia necessaria, sotto forma di pressione e di velocità, è conferita alla portata di acqua da una pompa, generalmente assiale, azionata da una turbina a gas o da un motore Diesel. La presa dinamica è realizzata tramite un'apertura nella carena della nave.

La propulsione a getto si è diffusa soprattutto nel settore dei traghetti di maggiori dimensioni per il trasporto di auto e passeggeri a velocità molto elevate (oltre 30 nodi), impegnando potenze di alcune decine di MW.

I suoi vantaggi più rilevanti sono:

- alta manovrabilità ottenuta grazie alla possibilità di orientare il getto; anche la marcia indietro si ottiene con facilità invertendo la spinta con l'uso di un deflettore;
- rispetto alla soluzione ad elica, l'idrogetto è meno rumoroso e riduce fortemente le vibrazioni, aumentando il comfort per i passeggeri;

- l'assenza di riduttori, di meccanismi per l'inversione della marcia e di una lunga linea d'asse consente di ridurre il peso e i costi di costruzione.

## Impianti motore per le navi

La potenza necessaria a garantire il funzionamento complessivo di una nave comprende:

- la potenza motrice fornita al propulsore
- la potenza richiesta dagli apparati di bordo (generazione e distribuzione di energia elettrica, sistema di navigazione, telecomunicazioni, condizionamento, ecc.).

La distribuzione percentuale delle due voci è variabile in relazione al tipo di nave, ma la potenza motrice è quasi sempre preponderante; le apparecchiature e le installazioni di bordo assorbono comunque una quota significativa nel caso delle navi da crociera e delle navi ro-ro/pax (traghetti per auto e passeggeri).

I sistemi per azionare la propulsione delle navi sono classificabili come segue:

- turbina a vapore
- motore Diesel
- turbina a gas
- motore elettrico
- sistemi combinati.

### Turbina a vapore

La *turbina a vapore* fu utilizzata per la prima volta nel 1894 da Charles Parsons sulla nave *Turbinia* e subì successivi e rilevanti sviluppi.

Molto spesso la turbina navale è a doppio corpo, alta pressione AP e bassa pressione BP, con disposizione contrapposta (*cross compound*); solitamente la turbina di AP ha una frequenza elevata (6000 – 7000 giri/min), che è invece dimezzata in quella a bassa pressione per evitare di dover ricorrere a rapporti di riduzione troppo elevati nella trasmissione di potenza all'elica, il cui regime si aggira sui 100 giri/min.

La turbina è multistadio e porta in testa una ruota Curtis ad azione a gradini di velocità, che rende possibile la regolazione per parzializzazione e consente di ridurre in modo consistente il salto entalpico contenendo il numero degli stadi successivi; seguono gli stadi a reazione, con rendimento più elevato.

La turbina a vapore ha avuto un ruolo importante nelle navi che, per le dimensioni e per la velocità richiesta, necessitavano di potenze elevate un tempo irraggiungibili con un motore Diesel; così ha accompagnato il grande sviluppo negli anni '60 e '70 del XX secolo delle superpetroliere, metaniere e delle portascontaineers.

Tra gli inconvenienti della turbina a vapore si possono citare i seguenti:

- presenta una velocità di rotazione assai elevata, che impone l'inserimento di ingranaggi per una doppia o tripla riduzione, di notevole peso e ingombro;
- non è reversibile, per cui si impone l'installazione di una seconda turbina con verso di rotazione opposto (turbina di marcia indietro);
- il rendimento è più basso di quello del motore Diesel nonostante i miglioramenti del ciclo termodinamico con il doppio surriscaldamento e la rigenerazione.

Dopo la crisi petroliferi del 1974 le turbine a vapore subirono in campo navale un forte calo, in concomitanza con la crescita delle potenze e dei rendimenti ottenuti dai motori Diesel lenti a due tempi; fa eccezione il settore delle navi petroliere e metaniere.

Una ripresa della turbina a vapore si è verificata più recentemente con l'estensione al campo navale degli impianti combinati gas-vapore.

#### I combustibili

Idrocarburi derivati dalla distillazione del greggio.

MDO (*Marine Diesel Oil*): dalla distillazione intermedia.  
Per Diesel a 4 tempi veloci.

HFO (*Heavy Fuel Oil*): residui pesanti della distillazione.  
Per Diesel a 2 tempi e per impianti a vapore.

BOG (*Boil Off Gas*): vapori derivanti dal metano liquido trasportato sulle metaniere.  
Per impianti a vapore.

MGO (*Marine Gas Oil*) distillato leggero a basso tenore di zolfo.  
Per impianti a turbogas.

## Motore Diesel

Montato per la prima volta su battelli fluviali all'inizio del 1900 nella versione a 4 tempi, il *motore diesel* è di gran lunga la macchina motrice più utilizzata in campo navale (oltre il 90% della potenza su navi mercantili); il motore è stato interessato nel corso del XX secolo da una continua e rilevante evoluzione tecnologica.

La versione a 2 tempi fu utilizzata in campo navale pochi anni dopo con innovative soluzioni nella disposizione delle luci di lavaggio e di scarico, passaggio dal lavaggio unidirezionale al più efficace lavaggio trasversale.

Negli anni '50 del XX secolo venne introdotta nei motori a 2 tempi la sovralimentazione con turbosoffiante che consentì di elevare la potenza in modo rilevante grazie ad un aumento della  $p_{me}$ : nel corso di un secolo la  $p_{me}$  è passata da 0,4 - 0,5 MPa a 1,7 - 1,8 MPa.

I cilindri hanno raggiunto dimensioni notevoli con alesaggio prossimo ad 1 m.

Dopo la crisi energetica del 1973, che triplicò il prezzo del greggio, il motore Diesel, grazie al suo maggior rendimento e alle accresciute potenze, ha allargato il suo campo di impiego rubando ulteriormente spazio alla turbina a vapore; nel corso del XX secolo il consumo specifico è sceso da 200 - 220 g/kWh a 170 - 180 g/kWh grazie al miglioramento della combustione e della sovralimentazione; la potenza erogata ha raggiunto e superato i 90 MW.

L'ultima significativa evoluzione tecnologica in ordine di tempo è stata l'introduzione del controllo elettronico del motore, che consente di ridurre il consumo specifico a regime ridotto e le emissioni inquinanti, soprattutto degli ossidi di azoto ( $NO_x$ ).

Tra i vantaggi del Diesel si possono sottolineare i seguenti:

- è reversibile e quindi può garantire anche la marcia indietro;
- è affidabile e ha costi di manutenzione contenuti;
- occupa relativamente poco spazio;
- copre un intervallo di potenze molto ampio;
- ha un consumo specifico decisamente inferiore a quello delle turbine a vapore e a gas.

In base alla velocità di rotazione si distinguono motori:

	n (giri/min)	
Veloci	1000 - 2000	4 tempi
Semiveloci	300 - 800	generalmente a 4 tempi
Lenti	60 - 180	2 tempi

I motori veloci e la maggior parte di quelli semiveloci richiedono la presenza di un riduttore ad ingranaggi per la trasmissione della potenza all'elica; i motori lenti invece possono essere accoppiati direttamente al propulsore, raggiungendo un elevato rendimento totale del sistema propulsivo.

## Turbina a gas

La *turbina a gas* è stato, tra i motori termici, l'ultimo nel tempo ad entrare nel campo dell'utilizzo navale a partire dagli anni '50 del XX secolo; un ruolo di preminenza è stato assunto dall'impianto a turbogas nella marina militare mentre nella marina mercantile le applicazioni restano limitate. Fu soprattutto la crisi del 1973-1974 e il conseguente brusco aumento dei prezzi del greggio a penalizzare questo tipo di impianto a causa del suo rendimento, non competitivo con quello delle turbine a vapore e soprattutto del motore Diesel.

Il **rendimento dell'impianto a turbogas** dipende in modo decisivo da:

- **temperatura massima  $T_3$**  del ciclo termodinamico (ciclo Brayton-Joule), condizionata dalla disponibilità di materiali in

Solo verso la fine del secolo scorso si segnalò una ripresa di utilizzo grazie ai progressi tecnologici capaci di garantire una diminuzione del consumo specifico di combustibile.

Il vantaggio della turbina a gas consiste nella possibilità:

- di sviluppare potenze elevate con pesi ed ingombri assai ridotti, grazie alla compattezza dell'impianto e al numero ridotto di ausiliari: rispetto all'impianto a vapore manca il condensatore e la camera di combustione è più compatta del generatore;
- di offrire rapidità di avviamento (pochi minuti per raggiungere la potenza massima) e di variazione di potenza;
- di emettere minori scarichi inquinanti dovendo utilizzare distillati più leggeri a basso contenuto di zolfo e con forti eccessi d'aria, che riducono la formazione di  $\text{NO}_x$ .

Lo svantaggio fondamentale consistono nel costo notevole soprattutto a causa del suo rendimento.

L'elemento sfavorevole non ha un peso decisivo negli impieghi militari, in cui invece è determinante disporre di potenze rilevanti e rapidità di avviamento e regolazione; faccio eccezione le grandi portaerei che necessitano di un impianto a vapore sia per gli ordini di potenza motrice richiesta (200 – 300 MW) sia per la necessità di disporre a bordo di grandi quantitativi di vapore.

Nel campo delle turbine a gas si differenziano due tipologie:

- di derivazione industriale (*heavy duty*), più pesanti, con pressioni di esercizio più basse (circa 1 MPa);
- di derivazione aeronautica, opportunamente modificate, meno ingombranti, più veloci e funzionanti con una pressione massima più elevata (2 - 3 MPa); l'utilizzo di queste turbine è nettamente prevalente.

## Motore elettrico

La difficoltà di realizzare riduttori con elevati rapporti di riduzione indussero nel passato a sviluppare impianti di propulsione turboelettrica, in cui l'impianto a vapore produce energia elettrica usata per azionare un motore elettrico, cui è collegata l'elica; una soluzione analoga è stata poi praticata anche con motori Diesel. La propulsione elettrica consiste dunque nell'utilizzare il motore principale della nave per azionare un generatore elettrico la cui corrente alimenta un motore elettrico che aziona il propulsore navale.

Nonostante il costo della soluzione con motore elettrico, essa presenta alcuni vantaggi, riassumibili in:

- maggior manovrabilità, con la possibilità di erogare una coppia elevata a basso numero di giri, e facilità nella inversione di marcia, ottenibile agendo solo sul motore elettrico;
- libertà nella collocazione del motore termico, non più legato alla vicinanza con l'elica;
- copertura con l'impianto motore anche delle esigenze di energia elettrica per i servizi di bordo, con un risparmio nel dimensionamento e nella gestione;

I primi impianti furono realizzati utilizzando la corrente continua, che oggi persiste solo per impianti particolari per l'elasticità di regolazione di questi motori. La propulsione in corrente alternata prese il sopravvento per i vantaggi dell'alternatore sulla dinamo e con i progressi dell'elettronica si è passati dall'uso motore asincrono al motore sincro per potenze oltre i 10 MW.

Nei primi anni '90 la Asea Brown Boveri (ABB) e la Kvaerner Masa Yards (KMY) produssero insieme un nuovo sistema di propulsione elettrica denominato **AZIPOD** (*Azimuthing podded drive*), in cui un contenitore a forma di ogiva, posizionato in acqua sotto lo scafo, racchiude un motore elettrico a corrente alternata ed un corto albero che aziona un'elica; essa è collocata su una o sull'altra delle due estremità dell'ogiva mentre in alcune applicazioni sono previste due eliche da parti opposte. Mediante una ralla girevole il sistema può ruotare rapidamente di  $360^\circ$  intorno al proprio asse verticale.

In figura una soluzione con doppia ogiva.



Rispetto alla soluzione convenzionale con il motore elettrico installato a bordo il sistema AZIPOD offre numerosi vantaggi:

- disponibilità dello spazio a bordo altrimenti occupato dal motore elettrico con maggior libertà nel disegno della carena;
- grandissima manovrabilità anche a bassa velocità quando il timone non è efficace, con la possibilità di ricollocare l'elica nella direzione voluta nell'arco di secondi, riducendo decisamente anche i raggi di manovra;

- massima facilità di controllo della nave nella marcia indietro e forte riduzione del tempo e dello spazio di arresto;
- l'eliminazione del timone migliora l'efficienza idrodinamica e riduce il consumo di combustibile a parità di velocità della nave.

Tra gli inconvenienti va indicata la non facile accessibilità per la manutenzione e un costo maggiore di circa il 10% rispetto alla propulsione elettrica tradizionale.

Ideato per favorire la navigazione nelle acque ghiacciate del Mar Baltico, l'AZIPOD è ora ampiamente impiegato nel settore delle *cruise ship* (navi da crociera) e dei traghetti per il trasporto di passeggeri, ma anche nei *tankers* per il trasporto di materiali.

## Sistemi combinati

L'esigenza di combinare soluzioni diverse per azionare una nave deriva soprattutto dall'esigenza di far fronte, nel corso del funzionamento, a necessità molto variabili, con la piena potenza impegnata solo per periodi relativamente brevi, mentre l'andatura di crociera richiede alla nave solo una quota della potenza totale.

Le soluzioni combinate utilizzano quindi un *impianto base*, tale da garantire buon rendimento e lunga durata, associato ad un *impianto di spinta* utilizzato nelle fasi di andatura a tutta forza.

Esiste una grande varietà di soluzioni, contraddistinte da sigle; ad esempio:

- COSAG (*combined steam and gas*), con impianto base a vapore e turbine a gas per la spinta
- CODAD (*combined diesel and diesel*), con tre o quattro motori Diesel che azionano due eliche
- CODOG (*combined diesel or gas*), con i due motori che funzionano in alternativa, essendo quello diesel il motore base;
- CODAG (*combined diesel and gas*), analogo al precedente, ma con la turbina a gas che affianca il Diesel per l'andatura a tutta forza;
- COGOG (*combined gas or gas*), è analogo al CODOG, ma in questo caso si tratta di due motori a turbogas;
- COGAG (*combined gas and gas*), con i due turbogas che producono potenza separate o insieme a seconda del regime di marcia. È la soluzione che garantisce il minor peso dell'impianto motore.