

Capitolo 1

Potenza delle navi

Una delle voci più importanti nella progettazione delle navi è la domanda di potenza. Quando siano state scelte le caratteristiche geometriche della carena, occorre determinare la quantità di potenza motore che consenta alla nave di rispettare i requisiti operativi e contrattuali in termini di velocità. La conoscenza della potenza necessaria consente ai progettisti di scegliere sistema propulsivo, di determinare il volume delle casse per i combustibili e di affinare la stima del centro di gravità della nave. Il sistema propulsivo consiste di vari elementi, tra i quali i primari sono il motore principale ed il propulsore.

1.1 Propulsori navali

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; lo studio idrodinamico dei dispositivi capaci di produrla (*propulsori*) dà luogo a quella branca della teoria della nave detta *propulsione*.

Numerose sono state le soluzioni tecniche e tecnologiche volte a sviluppare meccanismi propulsivi per navi ed imbarcazioni. Le più antiche sono i remi e le vele. Fino ai primi anni del XIX secolo il vento fu la forza più utilizzata per muovere le navi di superficie; la velocità delle navi dipendeva fondamentalmente dal vento. Inoltre, poiché le navi erano costruite in legno, le limitazioni strutturali spinsero i costruttori a ritenere assolutamente primari i requisiti strutturali, mentre gli aspetti idrodinamici erano considerati marginalmente. Nel frattempo, si sviluppava la propulsione a getto che ebbe origine nel 1661, quando Toogood e Hayes svilupparono un sistema impulsivo basato su una specie di bomba che evacuava acqua a poppavia, utilizzando la forza di reazione come spinta del veicolo marino.

Alla fine del XVIII secolo l'apparizione della macchina a vapore come fonte di potenza motrice diede luogo allo sviluppo di propulsori che esercitavano l'azione di spinta mediante un movimento rotatorio. Così, per molti anni le *ruote a pale*, sistemate lateralmente sulle fiancate o sulle poppe delle navi, furono il mezzo propulsivo più in voga. Il rendimento di questi propulsori era ragionevolmente elevato, ma una serie di inconvenienti, come la loro bassa velocità di rotazione, le loro scadenti prestazioni in mare mosso, e le differenti altezze di sistemazione

da predisporre per diverse immersioni della nave, diedero luogo al loro progressivo abbandono dopo mezzo secolo di esistenza. Comunque, con l'avvento della propulsione a vapore gli ingegneri navali compresero che la velocità di una nave non era più dipendente in assoluto dal vento.

Nella seconda metà del XIX secolo iniziarono le ricerche volte a sviluppare i metodi analitici e sperimentali per la determinazione della potenza necessaria a fare avanzare una nave alla velocità desiderata. Prove al vero e nelle prime vasche navali fecero capire che la potenza richiesta per fare avanzare la nave attraverso l'acqua era legata direttamente all'entità della resistenza che una nave deve superare per raggiungere la velocità richiesta.

Nei primi decenni del XIX secolo cominciarono ad apparire *propulsori ad elica*, che sostituirono rapidamente le ruote a pale come modo primario della propulsione navale. L'aspetto delle prime eliche, compresa quella di Ressel, provata e brevettata a Trieste nel 1812, e la cui unica pala riproduceva il contorno di una superficie elicoidale, ricorda assai poco quelle delle eliche attuali. L'idea di Ressel fu ripresa nel 1836 dall'inglese Smith il quale, sulla base di esperienze dirette, comprese i vantaggi derivanti dalla riduzione della superficie dell'elicoide. I vantaggi dell'elica rispetto alla ruota a pale si rivelarono molteplici: era poco sensibile alle differenze di immersione della nave purchè il suo diametro fosse scelto adeguatamente; la sua sistemazione a poppa la proteggeva dai danni causati dal mare e/o da collisioni; il suo ingombro era minore, in quanto non aumentava la larghezza effettiva della nave; poteva ruotare a velocità medio-basse garantendo un buon rendimento e permettendo l'utilizzo di macchine marine più leggere e meno ingombranti; era poco sensibile all'azione del mare mosso; consentiva una migliore governabilità della nave.

Seguendo una lenta evoluzione, sempre dovuta ad un adeguamento a soluzioni idrodinamiche e strutturali sempre più complesse, il propulsore ad elica fu accettato universalmente dopo la metà del XIX secolo. Nel 1880 Thornycroft fu il primo a costruire un'elica il cui aspetto è del tutto simile a quello delle eliche attuali. Le eliche divennero, e sono ancora oggi, il propulsore marino più comune. Ancora oggi, a parte il *propulsore a getto* (idrogetto) adatto per velocità molto elevate, non esistono alternative praticabili.

Nell'arco di oltre un secolo sono state sviluppate e costruite eliche di varia tipologia, tra le quali hanno avuto grande importanza le eliche intubate. Sulla base di alcune applicazioni si comprese come fosse vantaggioso fare funzionare l'elica all'interno di un mantello, in quanto quest'ultimo poteva fornire una spinta addizionale senza ulteriore somministrazione di energia. Pescherecci, rimorchiatori e, in generale, navi che richiedono spinte elevate a basse velocità (navi offshore, supply vessels) sono le navi più indicate per l'applicazione delle eliche intubate.

1.2 Macchine marine

La potenza necessaria a garantire il funzionamento dell'insieme delle installazioni sulle navi comprende fondamentalmente la potenza motrice fornita al propulsore e la potenza richiesta dai diversi apparati di bordo (impianto di generazione e distribuzione di energia elettrica, impianto di condizionamento, telecomunicazioni, sistema di navigazione, ecc.). La potenza

motrice è quasi sempre preponderante (tranne che in certe navi offshore), mentre le apparecchiature e le installazioni diverse dal propulsore richiedono complessivamente soltanto una quota parte della potenza totale, che può essere comunque significativa come nel caso delle navi da crociera e delle navi ro-ro/pax. Benché la loro trattazione riguardi altre branche dell'ingegneria, qui viene dato un breve sommario dei diversi tipi di macchine marine storicamente impiegati per azionare i sistemi propulsivi delle navi. Qui viene considerato solamente il caso della propulsione meccanica, nel cui ambito le macchine marine sono identificabili come macchine trasformatrici.

La *macchina alternativa* fu il pioniere della propulsione meccanica. Le caratteristiche positive di questa macchina consistevano nell'elevata flessibilità in qualunque condizione di carico, la facilità di invertire il verso di rotazione, il numero di giri relativamente basso e perfettamente compatibile con quelli tipici dell'elica navale. Le sue limitazioni principali derivavano dal peso e dall'ingombro assai elevati, da una bassa potenza unitaria per cilindro e, soprattutto, da un elevato consumo specifico di combustibile. La macchina alternativa, che era utilizzata da almeno il 50% del tonnellaggio della flotta mercantile mondiale ancora alla fine degli anni '40, è oggi del tutto scomparsa.

La *turbina a vapore* fu utilizzata per la prima volta nel 1894 da Parsons sulla nave Turbinia, un cacciatorpediniere famoso per la sua velocità. Essa produce un movimento di rotazione diretto (senza necessità di convertire il modo di moto come accadeva nella macchina alternativa), e può raggiungere elevati valori di potenza con un consumo specifico economicamente accettabile. Presenta comunque alcuni pesanti inconvenienti: non è reversibile e presenta una velocità di rotazione assai elevata. Questi limiti impongono la sistemazione di un riduttore, con conseguenti perdite di energia, nonché l'installazione di un'altra turbina con verso di rotazione opposto (turbina di marcia indietro). Quando si richiedono grandi potenze, come spesso accade nelle grandi navi militari, possono essere sistemate contemporaneamente una turbina principale ed una turbina di crociera, garantendo un rendimento propulsivo totale elevato anche a regimi di velocità assai differenti.

Il *motore diesel* (motore a combustione interna con ciclo termodinamico diesel) è senza dubbio la macchina marina attualmente più utilizzata. È reversibile, occupa relativamente poco spazio, ed oggi è prodotta per un vasto intervallo di potenze. Ha un consumo specifico assai inferiore a quello della turbina a vapore, ma è alquanto più pesante. In base alla velocità di rotazione, si possono distinguere motori diesel veloci ($1000 < \text{RPM} < 2000$), semiveloci ($300 < \text{RPM} < 800$, generalmente a 4 tempi) e lenti ($60 < \text{RPM} < 180$, quasi universalmente a 2 tempi). I motori veloci e la maggior parte di quelli semiveloci vanno accoppiati ad un riduttore ad ingranaggi per potere utilizzare eliche che ruotino a giri non troppo elevati. I motori lenti possono essere accoppiati direttamente al propulsore, con un rendimento totale assai elevato del sistema propulsivo. Piccoli motori ancora più veloci ($2000 < \text{RPM} < 2400$) sono spesso utilizzati sulle piccole imbarcazioni.

Infine, va menzionata la *turbina a gas* che può produrre grandi potenze con pesi ed ingombri assai ridotti; è caratterizzata da un numero ridotto di ausiliari, nonché da rapidità di avviamento e di variazione di andatura. Gli svantaggi fondamentali consistono nel costo notevole,

nell'elevato consumo specifico di combustibile, in un basso rendimento, e nella necessità di installare riduttori. Il suo utilizzo è diffuso soprattutto nelle navi militari per le quali il consumo di combustibile non è considerato un fattore primario, mentre lo sono il peso e l'ingombro. La sua prima applicazione sperimentale su navi mercantili risale al 1956, mentre la sua diffusione commerciale data a partire dal 1970/71 su navi ro-ro e navi portacontainers. Oggi trovano applicazione su navi veloci (traghetti) non convenzionali, spesso accoppiate ad idrogetti, nelle quali è difficile conciliare per l'apparato motore le esigenze di grande potenza e piccolo peso. Esistono molte realizzazioni di impianti misti, nei quali la turbina a gas è utilizzata per le velocità di punta, mentre i diesel veloci o medio-veloci vengono adoperati per le andature di crociera.

1.3 Trasmissione della potenza

Nello studio della propulsione navale si utilizzano ripetutamente i termini *potenza* e *rendimento*, che sono fattori essenziali nel progetto idrodinamico della nave e nella sua valutazione economica, specie per quanto riguarda i costi operativi. Essi sono legati alle relazioni idrodinamiche che si instaurano tra la spinta sviluppata T , il momento torcente Q assorbito dal propulsore, e le componenti di velocità del flusso. Il termine *potenza dell'apparato propulsivo* designa la potenza massima che può essere sviluppata sulla linea d'asse.

Dal punto di vista dell'efficienza, la qualità del sistema propulsivo, inteso come sistema elica-motore, è esprimibile attraverso il concetto di *rendimento propulsivo totale*, definito come

$$\eta_{OA} = \frac{P_E}{P_{\text{eng}}}$$

dove P_E è la cosiddetta potenza effettiva della nave, mentre P_{eng} è, per la maggior parte delle navi, la potenza dell'apparato motore, che converte energia termica in energia rotazionale. Per alcune navi, il cui numero va crescendo negli anni, il motore principale può essere un grande motore elettrico. La velocità all'uscita del motore principale è spesso molto elevata (parecchie migliaia di giri al minuto per una turbina a gas alla massima potenza), e comunque, tranne che nelle grandi navi lente, superiore alla velocità di rotazione dell'elica, per cui deve essere opportunamente ridotta.

Purtroppo, la potenza dell'apparato motore viene definita in maniera differente in base al tipo di macchina marina utilizzata. Il concetto di rendimento propulsivo totale perde quindi gran parte della sua applicabilità come indice di efficienza dal punto di vista ingegneristico. I rendimenti propulsivi sono espressi in funzione delle caratteristiche del propulsore dietro carena.

1.3.1 Turbine

Nel caso della turbina la potenza dell'apparato motore viene espressa come *potenza asse*

$$P_S = 2\pi n \cdot M \tag{1.1}$$

dove M è il momento torcente trasferito alla linea d'asse dell'apparato motore ed n è la velocità unitaria di rotazione. Le perdite meccaniche dovute al riduttore, alla linea d'asse ed al reggispinta sono conglobate in P_S , in quanto le case produttrici forniscono sempre un pacchetto completo del sistema.

1.3.2 Motori diesel

Per le macchine marine a combustione interna si utilizza il concetto di *potenza indicata*

$$P_I = p_{mi} \cdot V \cdot Z \cdot n \quad (1.2)$$

dove p_{mi} = pressione media indicata nel cilindro, rilevabile dal diagramma di pressione nel cilindro;
 V = cilindrata unitaria, che dipende dall'alesaggio del cilindro e dalla corsa del pistone;
 Z = numero di cilindri;
 n = numero di cicli utili al secondo.

All'uscita del motore si ha la *potenza al freno* definita come

$$P_B = 2\pi n \cdot Q_{eng} \quad (1.3)$$

dove Q_{eng} è il momento torcente misurato al freno, ossia sulla flangia di accoppiamento all'uscita del motore, durante le prove al banco, ed n è la velocità unitaria di rotazione.

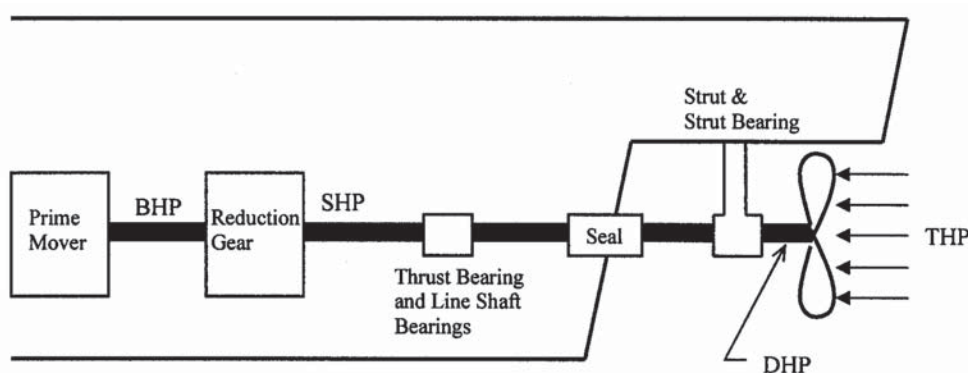


Figura 1.1. Treno di trasmissione delle potenze

Il legame tra potenza indicata e potenza al freno è dato da

$$P_B = P_I \cdot \eta_M$$

dove η_M è il *rendimento meccanico* del motore, che include le perdite per attrito nei cilindri, nelle teste e nei piedi di biella, nelle guide delle manovelle, nonché la quantità di potenza assorbita dagli ausiliari trascinati direttamente dal motore stesso.

Torna utile richiamare il processo di trasmissione della potenza motore fino all'elica che opera in acqua dietro la carena. La Figura 1.1 mostra uno schema semplificato della catena di trasmissione delle potenze.

Potenza asse

La potenza misurata sul reggispinta è la *potenza asse*, trasmessa all'elica attraverso la linea d'assi; essa è legata alla potenza al freno dalla relazione

$$P_S = P_B \cdot \eta_S \quad (1.4)$$

dove η_S è il rendimento meccanico del riduttore (se installato) e di parte della linea d'assi, che include le perdite negli ingranaggi del riduttore, nei cuscinetti di appoggio della linea d'assi e nel reggispinta.

Potenza sviluppata

La *potenza sviluppata* all'elica P_D , ossia quella trasmessa direttamente dalla linea d'assi al mozzo dell'elica, è leggermente inferiore a quella misurata dal torsionmetro a causa delle perdite che si hanno sul cuscinetto reggispinta e sui cuscinetti della linea d'asse posizionati tra questo ed il torsionmetro. Tali perdite ammontano di solito al 2-3%. Non è misurabile esattamente, in quanto presupporrebbe un torsionmetro all'esterno dello scafo. Viene espressa come

$$P_D = 2\pi n \cdot Q \quad (1.5)$$

dove Q è il momento torcente assorbito dall'elica.

Il cuscinetto reggispinta assorbe la spinta assiale dell'elica prodotta dalla rotazione dell'asse dell'elica e trasmette la forza lineare della spinta alla nave. I cuscinetti della linea d'assi sono usati per sostenere il peso della linea d'assi stessa tra il riduttore (o il motore) e lo stern tube che, insieme alla guarnizione di tenuta, non consente all'acqua del mare di penetrare. Le perdite nella linea di trasmissione sono dovute soprattutto all'attrito e si manifestano nel riscaldamento dei vari cuscinetti.

Potenza di spinta

Se P_D esprime la potenza spesa, la *potenza di spinta* P_T esprime il lavoro utile prodotto dall'elica nel generare la spinta T . In altri termini, la potenza di spinta è il lavoro prodotto da un'elica che avanza nel fluido ad una velocità di traslazione V_A , detta *velocità di avanzo*, la quale è la velocità assiale media effettiva, che congloba le velocità indotte assiali, con la quale il fluido affluisce all'elica. Viene formulata come

$$P_T = T \cdot V_A \quad (1.6)$$

L'elica è il componente meno efficiente nella catena di trasmissione della potenza.

Potenza effettiva

Tutte le potenze definite finora (P_B, P_S, P_D, P_T) possono essere misurate fisicamente in qualche punto della nave, anche se non sono di alcuna utilità nella fase iniziale del progetto della carena di una nave. La potenza motore al freno e la potenza asse sono quantità che sono definite ed acquistate dal produttore del motore. Parimenti, l'entità della spinta che un'elica può produrre è il risultato di analisi e di calcoli che presuppongono la determinazione di quanta resistenza la spinta dell'elica deve superare. Allo scopo è stato introdotto il concetto di *potenza effettiva*, definibile come la potenza richiesta per muovere la nave ad una voluta velocità in assenza dell'azione dell'elica. Tale concetto è quello utilizzato nello studio della resistenza al moto, determinabile per via empirico-statistica, numerica o sperimentale su modelli. Conoscendo la resistenza totale, la potenza effettiva necessaria per rimorchiare la nave alla velocità V è determinata mediante l'equazione

$$P_E = R_T \cdot V \quad (1.7)$$

dove R_T è la resistenza totale all'avanzamento.

1.4 Catena dei rendimenti

Una volta determinata la potenza effettiva, occorre correlarla alle potenze prodotte dalla catena di trasmissione descritta in precedenza. Si può costruire così la *catena dei rendimenti*. La Figura 1.2 mostra un diagramma a blocchi delle varie componenti della catena dei rendimenti, associate al treno di trasmissione delle potenze, che può facilitare l'organizzazione della determinazione della potenza al freno o della potenza asse.

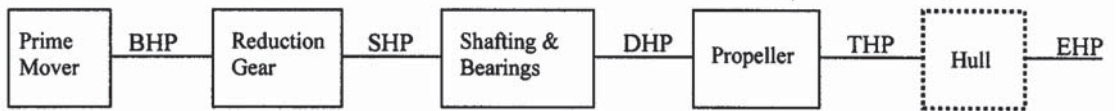


Figura 1.2. Diagramma a blocchi della catena di trasmissione delle potenze

Rendimento di carena

Si definisce *rendimento di carena* η_H il rapporto tra la potenza richiesta per rimorchiare la nave e la potenza prodotta dall'elica, come

$$\eta_H = \frac{P_E}{P_T} = \frac{R_T/T}{V_A/V} = \frac{1-t}{1-w} \quad (1.8)$$

dove t = fattore di deduzione di spinta

w = frazione di scia media assiale