



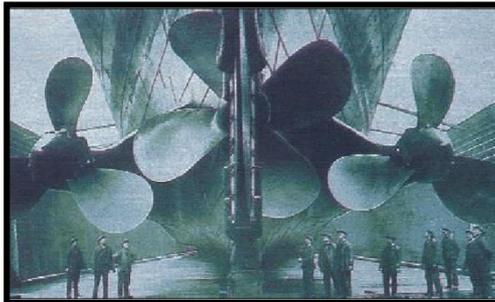
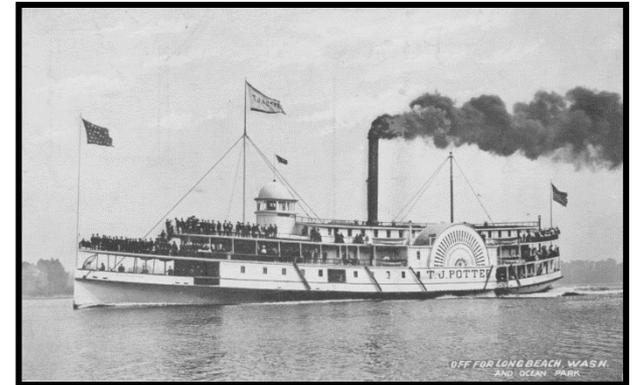
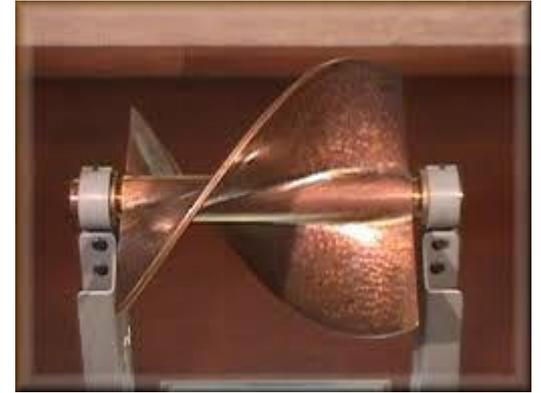
UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI DI TRIESTE

Propulsori navali

Prof. Paolo Frandoli

A.A. 2022 - 2023

Cenni storici



Propulsori navali

- Eliche convenzionali per navi dislocanti
 - Eliche a pale fisse (FPP, Fixed Pitch Propellers)
 - Eliche a pale orientabili (CPP, Controllable Pitch Propellers)
 - Eliche intubate
- Propulsori e spintori direzionali
 - Azimutali, configurazione «L drive» e «Z drive»
 - Azipod
 - Spintori trasversali
 - Cicloidali
- Eliche non convenzionali per navi semidislocanti e imbarcazioni veloci
- Idrogetti (scafi plananti, sopra 30-35 kn)



Eliche a pale fisse

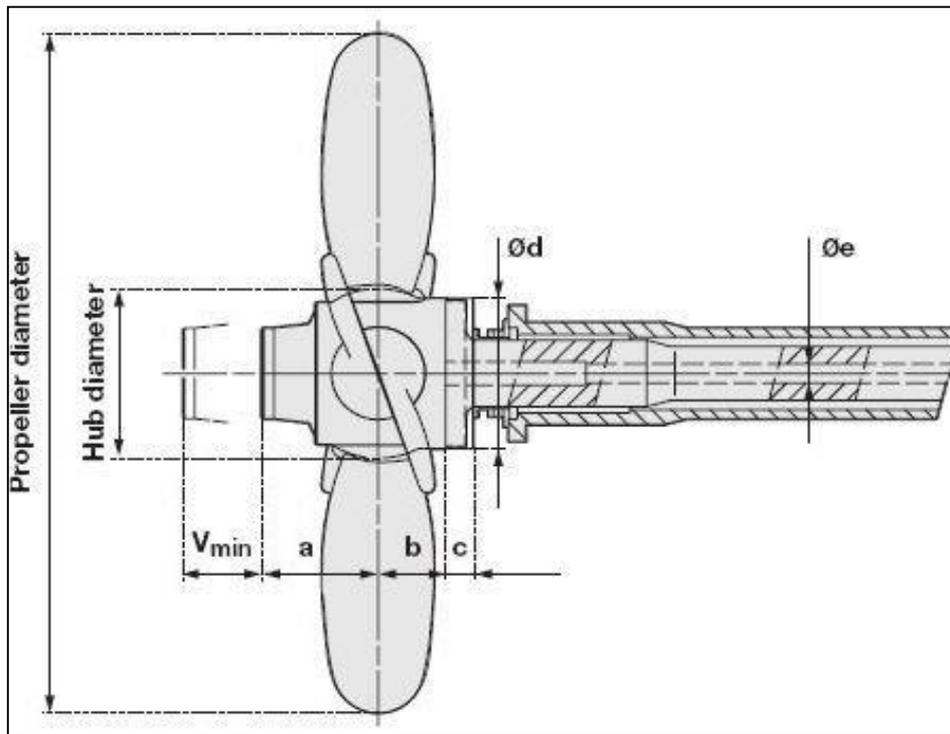
Accoppiabili solamente a motori reversibili per garantire la retromarcia

- Eliche monoblocco (FP, Fixed Pitch propellers): ottenute dalla fusione in un unico blocco delle pale e del mozzo e calettate direttamente sull'albero portaelica. Solitamente hanno 4 o 5 pale, 6 generalmente sulle navi da crociera, 7 per particolari impieghi militari. E' necessario disporre di un'elica di rispetto
- Eliche a pale riportate: le pale sono imbullonate sul mozzo che in questo caso è cavo
 - Vantaggio: minor peso, maggiore facilità di trasporto e montaggio, necessità di una sola pala di rispetto
 - Svantaggio: maggior costo, mozzo di diametro maggiore con conseguente minor rendimento
- Adjustable Blade Pitch Propellers (ABP): come eliche a pale riportate, ma con in più la possibilità di modificare il posizionamento delle pale sul mozzo entro limiti ristretti



Eliche a pale orientabili

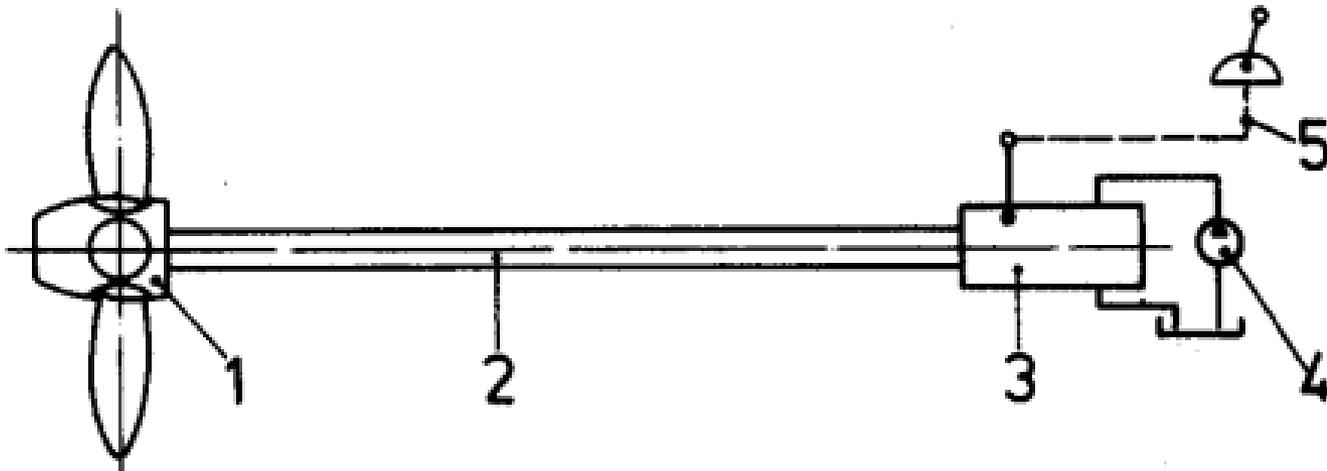
Le pale possono ruotare dalla posizione di massimo passo in marcia avanti a quella di marcia indietro tramite una serie di meccanismi posti all'interno del mozzo e movimentati idraulicamente da una centralina posta nel locale apparato motore a valle del motore di propulsione o del riduttore, quando presente



Eliche a pale orientabili

L'elica non è un oggetto a sé stante, ma fa parte di un sistema che solitamente è prodotto da un unico fornitore:

1. Pale (di cui una di rispetto) e mozzo
2. Linea d'alberi. L'albero è cavo per potervi installare le tubazioni del sistema idraulico
3. Riduttore
4. Centralina idraulica per il comando del passo
5. Sistema di controllo della propulsione



Eliche a pale orientabili

Consentono un'elevata flessibilità di funzionamento e l'accoppiamento con motori non reversibili.

Principali campi di utilizzo:

- Sistemazione con più motori sullo stesso asse
- Elevata richiesta di manovrabilità (accelerazione, arresto rapido)
- Funzionamento a giri fissi (presenza di alternatore asse)
- Profilo operativo con velocità di servizio multiple
- Navigazione a bassa velocità

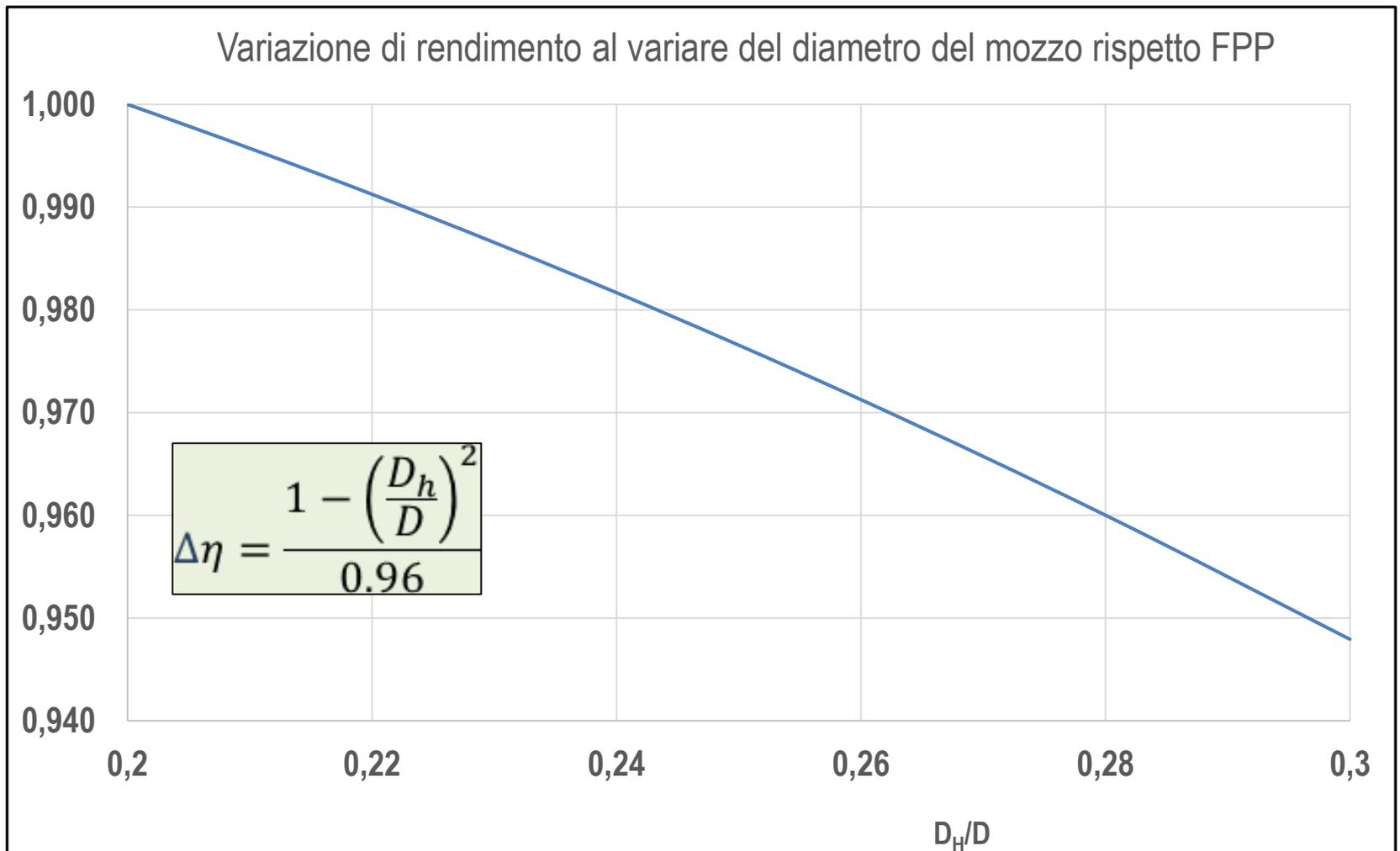


Eliche a pale orientabili

- Vantaggi
 - Necessità di una sola pala di rispetto
 - Elevata flessibilità: allo stesso numero di giri sviluppa spinte diverse variando il passo
 - Consente l'adozione di motori non reversibili (Diesel 4 tempi semi veloci)
- Svantaggi
 - Costo superiore e maggiore complessità rispetto a FPP
 - Manutenzione più onerosa rispetto a FPP
 - Limitazione dell'area delle pale per evitare la mutua interferenza nel passaggio da marcia AV a marcia AD
 - Limitazione nel numero delle pale (solitamente max. 5)
 - Diametro del mozzo più alto rispetto FPP e conseguente diminuzione di rendimento ($D_h/D = 0,23 \div 0,28$)

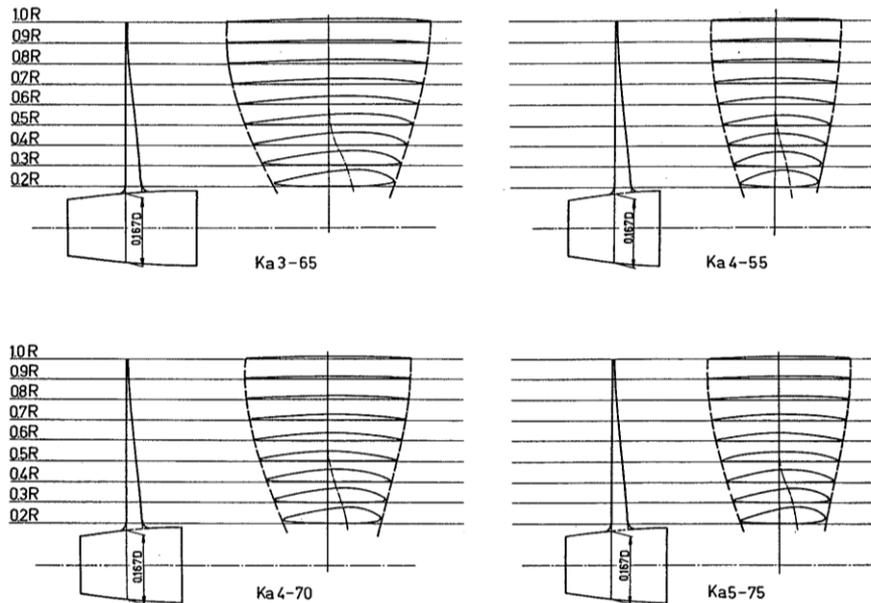


Eliche a pale orientabili

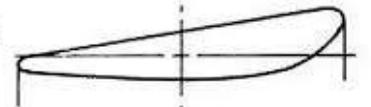


Eliche intubate

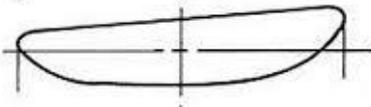
E' un sistema integrato costituito da un'elica ed un mantello il quale contribuisce alla generazione della spinta



Nozzle No. 19A



Nozzle No. 37



Eliche intubate

La sezione meridiana del mantello è costituita da un profilo portante la cui lunghezza di corda varia tra circa un raggio (soluzione più frequente) ed un diametro dell'elica a seconda del carico idrodinamico. Si distinguono due tipi di mantelli:

- Mantelli acceleranti: il profilo è convergente dall'ingresso all'uscita, accelera il flusso nel piano del disco elica generando una parte della spinta totale. Sono i più utilizzati in campo navale
- Mantelli deceleranti: il profilo è divergente, il flusso decelera aumentando la pressione statica sull'elica. Sono utilizzati in casi particolari in cui sia necessario diminuire la cavitazione. Comporta una riduzione del rendimento dell'elica

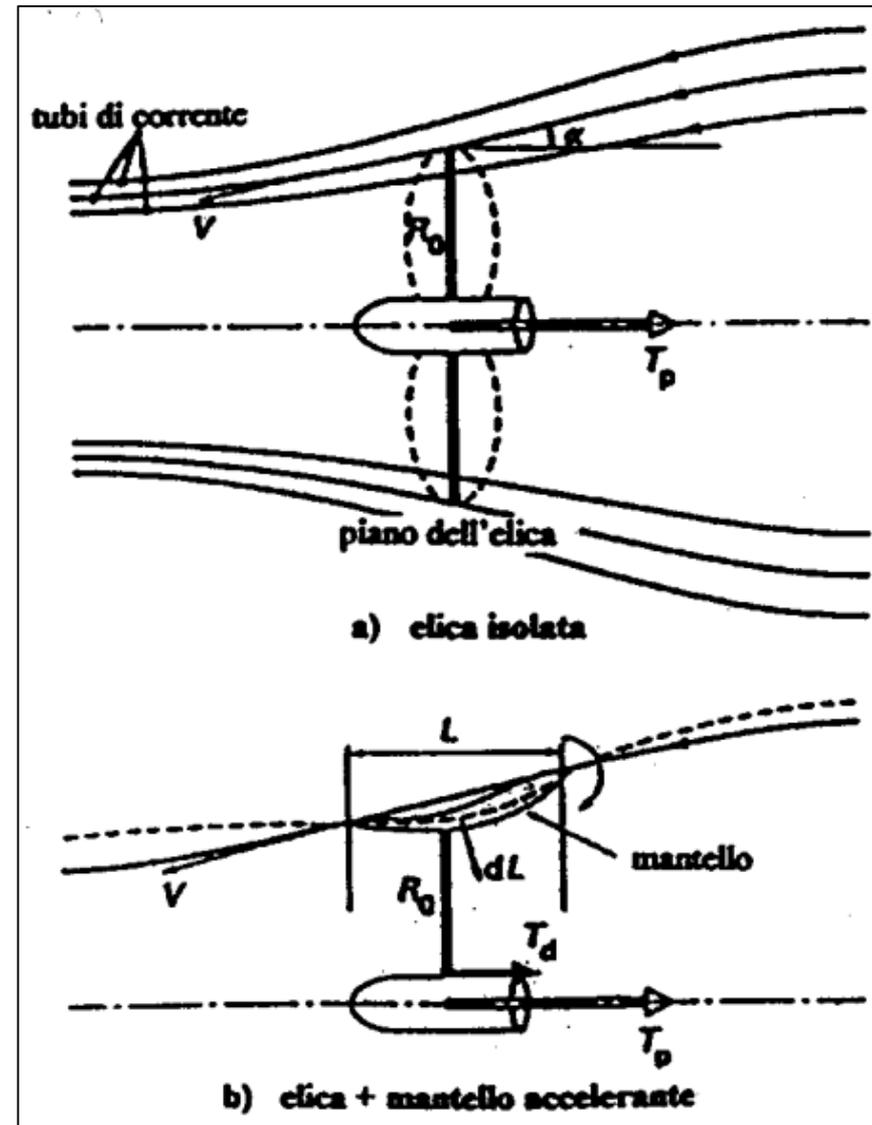


Eliche intubate

Con il mantello accelerante la spinta totale è data dall'elica e dal mantello:

$$T_{totale} = T_{propeller} + T_{duct}$$

- Le forze agenti sul mantello dipendono dalla contrazione del scia dietro l'elica
- Si deve considerare l'influenza mutua tra elica e mantello
- Forze di portanza generano spinta aggiuntiva



Eliche intubate

Il vantaggio principale è la spinta aggiuntiva fornita dal mantello alle basse velocità ed alti carichi (circa 50% della spinta totale)

Applicazioni: rimorchiatori, pescherecci, cacciamine

Ulteriori vantaggi rispetto all'elica libera:

- diametro dell'elica intubata inferiore del 5% ÷ 10%
- maggiore capacità di tiro a punto fisso (bollard pull)
- migliore afflusso dell'acqua all'elica con omogeneizzazione della scia
- ridotta non-stazionarietà della spinta e del momento torcente
- minori livelli di rumore e vibrazioni generati dall'elica
- protezione delle pale in acque ristrette e/o limitate



Propulsori Direzionali

Consentono di sviluppare attivamente un momento direzionale ruotando il vettore della spinta con una rotazione del propulsore

- Propulsori e spintori azimutali, configurazione «L drive» e «Z drive»
- Pump-Jets
- Azipod
- Spintori trasversali
- Propulsori cicloidal



Propulsori azimutali

- Campi di utilizzo
 - Tutti i casi dove è richiesta un'elevata capacità manovriera
 - Industria offshore per posizionamento dinamico (DP)
 - Navi posatubi e posacavi con tracciatura dinamica (DT)
 - Supply vessels
 - Rimorchiatori
- Generalmente si utilizzano eliche intubate (impiego prevalente a basse velocità)



Propulsori azimutali

Caratteristiche idrodinamiche

Spinta effettiva e manovrabilità: conoscere tutte le forze esercitate sulla nave dallo spintore (non solo la spinta dell'elica) anche in flusso obliquo. E' influenzata da:

- angolo di drift
- interazione carena – propulsore
- Interazione tra i propulsori
- condizioni meteo-marine e moti nave
- basso fondale
- comportamento dinamico non stazionario

Densità massima di spinta: spinta per unità di area del disco elica

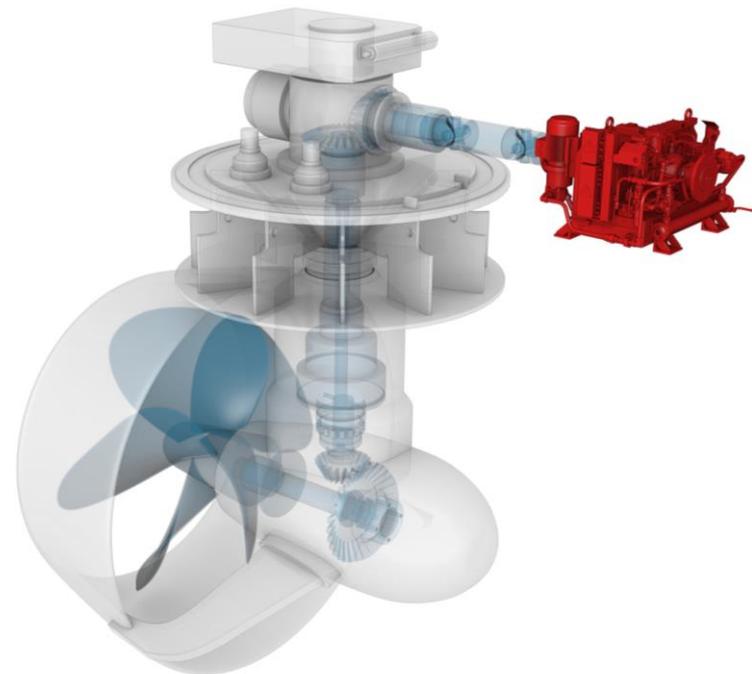
- Tendenza a massimizzare la densità di spinta in DP
- Il rendimento decresce con l'aumentare della densità di spinta
- Dimensioni minime limitate da cavitazione, vibrazioni, erosione e vincoli meccanici



Propulsori con trasmissione a Z (Z-drive)

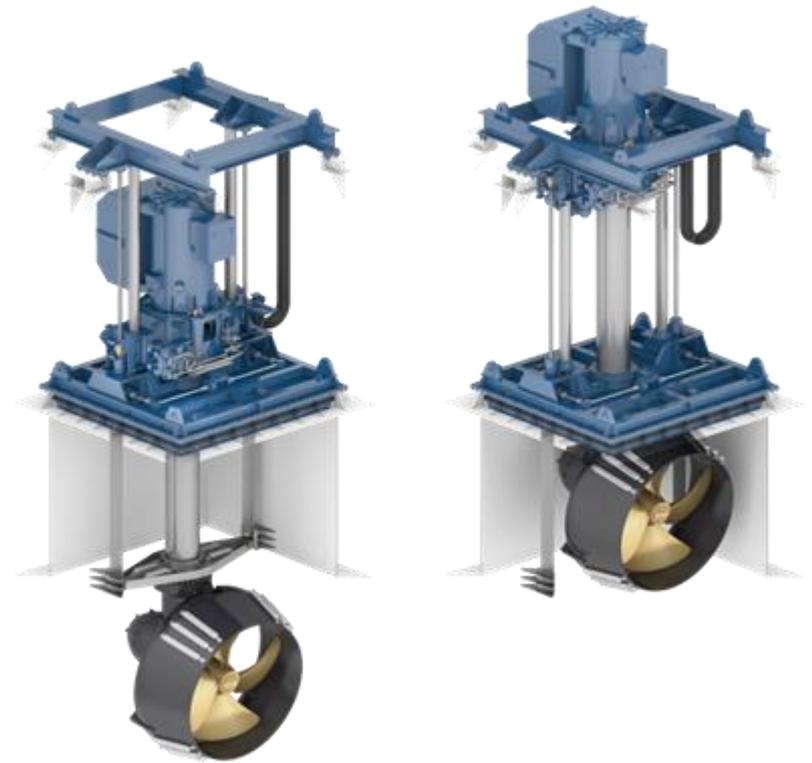
Configurazione albero motore: *orizzontale all'uscita del motore, verticale attraverso lo scafo, di nuovo orizzontale verso il mozzo dell'elica*

- **Uso:** navi speciali che richiedono eccezionali qualità di manovrabilità
- Non richiedono linea d'assi lunga
- Ridotta resistenza per appendici
- Ridotti livelli di rumore e vibrazioni
- Motore diesel o elettrico
- Sia FPP che CPP libere o intubate
- Costo iniziale e operativo maggiore



Propulsori con trasmissione a L (L-drive)

- Motore elettrico verticale
- Configurazioni: trattore o spintore



Spintori Azimutali

Utilizzo per posizionamento dinamico di piattaforme da perforazione, navi gru, FPSO, oceanografiche, posatubi e posacavi.

Progettati per sviluppare la spinta su 360° a velocità nulla. Solitamente adottano eliche intubate.

- Spintori montati sul fondo
- Spintori retrattili: installati in un contenitore cilindrico dal quale possono fuoriuscire
- Spintori removibili: possono essere montati e rimossi a nave galleggiante



Spintori Azimutali



Spintori Azimutali

Principali aspetti progettuali

- Velocità di progetto nulla (nave ferma)
- Elevato tiro a punto fisso
- Normalmente adottano elica intubate
- Conoscere le forze generate sull'unità da flusso obliquo
- Posizionare gli spintori per evitare mutue interferenze
- Intervallo di potenza: 500 ÷ 7000 kW
- Diametro massimo: ~ 5,5 m
- Rapporto spinta-potenza a velocità d'avanzo nulla: T/P_D
Coefficiente di merito per valutare la prestazione della macchina

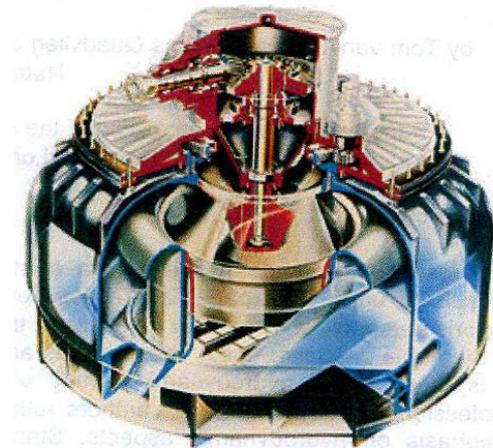


Pump-jets

Spintori che integrano, presa a mare pompa e mantelli di uscita in un'unica unità rotante

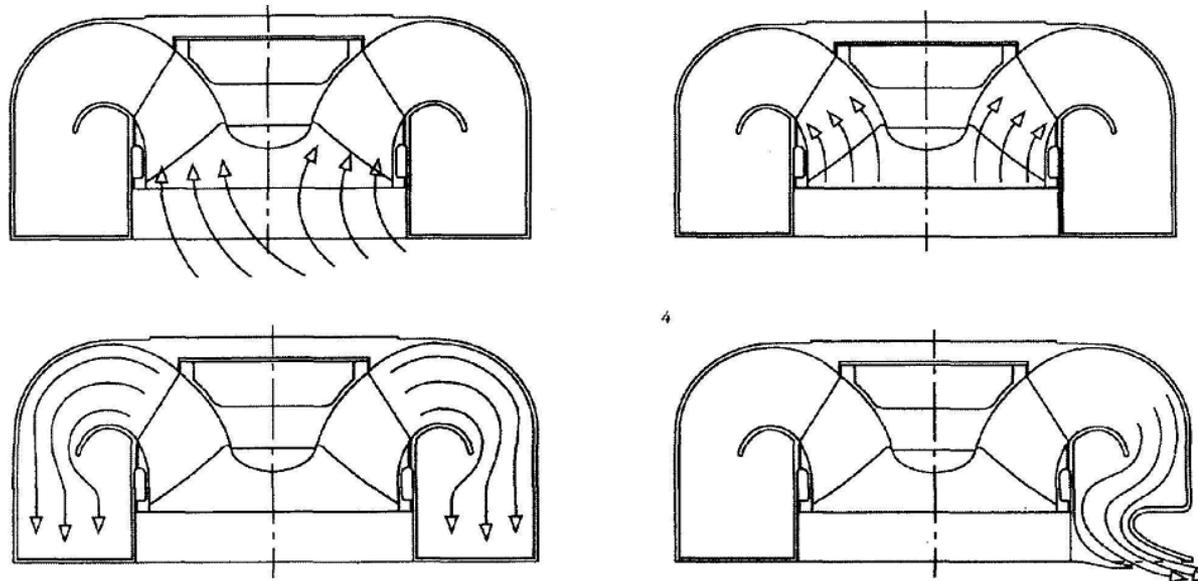
- compattezza con risparmio di spazio
- installazione sul fondo della carena
- minimo rischio di danneggiamento qualora la nave tocchi il fondo
- bassi livelli di rumore e di vibrazioni
- motori diesel, motori elettrici o motori idraulici
- Intervallo di potenza: 50 ÷ 3500 kW

Uso: imbarcazioni operanti in acque basse con necessità di ottime capacità di manovra



Pump-jets

1. Una girante drena l'acqua nel pump-jet
2. L'acqua è spinta nel diffusore dalla girante
3. L'energia aumenta per la crescente pressione statica
4. L'acqua è espulsa a velocità molto elevata attraverso i mantelli di uscita (angolo circa 15 deg)

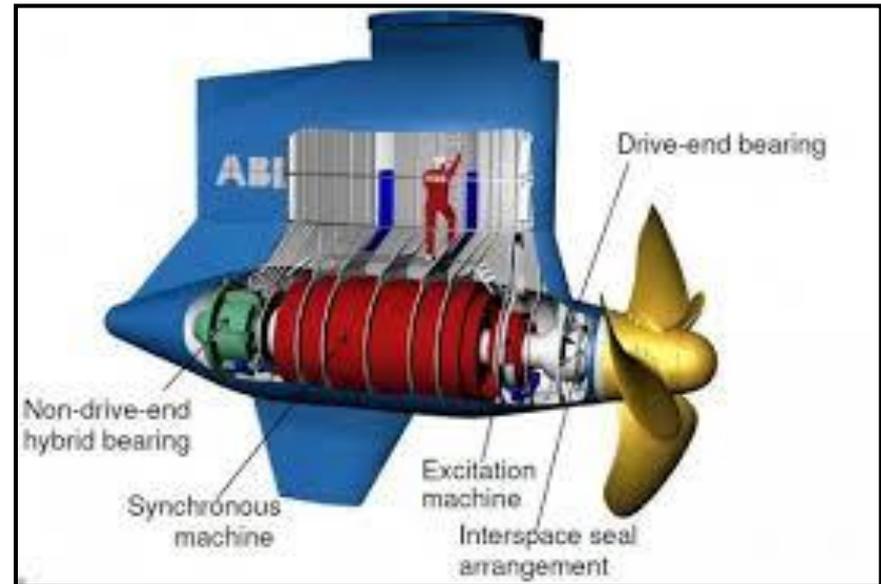


Azipod

(Azimuthing Podded Drive)

Propulsore a gondola (podded propulsor): l'elica è installata su una gondola (pod), che contiene il motore elettrico (fino 30.000 kW) connesso direttamente all'elica

- Traente (elica a prora della gondola)
- Spingente (elica a poppa della gondola)
- Tandem (2 eliche, una a prora ed una a poppa della gondola)



Azipod

Applicazioni

- Navi da crociera bielica
- Navi ro-ro/pax bielica veloci
- Rompighiaccio
- Supply vessels, tankers e bulk carriers, sia monoelica che bielica



Azipod

Vantaggi

- Unisce le funzioni di propulsore, timone, elica di manovra
- Eccellente manovrabilità in acque ristrette ed a bassa velocità
- Eliminazione della linea d'asse e dei bracci portaelica con conseguente minore resistenza
- Risparmi di spazio nelle sistemazioni dei piani generali e dell'apparato motore
- Flusso omogeneo al disco elica con riduzione dei livelli delle forze pulsanti e delle vibrazioni indotte
- Possibilità di andature economiche a basse velocità
- Tempo di crash-stop e distanza di fermata inferiori di circa il 40% rispetto a bielica tradizionali



Azipod

Svantaggi

- Elevati costi iniziali
- Necessità del sistema di propulsione diesel-elettrico
- Limitazioni nella potenza installabile
- I motori elettrici sono difficilmente accessibili
- A velocità elevate i benefici sulla manovrabilità sono marginali



Azipod

Aspetti progettuali

- L'asse dell'elica deve seguire le forme di poppa per avere la stessa direzione delle linee di corrente ed evitare componenti tangenziali della scia
- Orientare correttamente il propulsore nel piano verticale utilizzando prove sperimentali o calcoli CFD. E' generalmente inclinato di qualche grado verso prora
- Condurre prove sperimentali su modello vincolato per ricavare i seguenti dati da inserire nel sistema di controllo dei propulsori e delle eventuali eliche di manovra (tunnel thrusters)
 - Posizioni azimutali che possano creare mutua interferenza tra i propulsori
 - Forze e momenti agenti sulla nave in corrispondenza agli angoli azimutali più rappresentativi dal punto di vista operativo



Azipod

Aspetti progettuali

- Configurazione spintore preferibile alle basse velocità
- Configurazione trattore preferibile alle alte velocità
- Limitare per quanto possibile le dimensioni del motore elettrico per minimizzare l'interazione tra elica e gondola
- Evitare la manovra di crash-stop con rotazione del pod di 180° per non indurre eccessive sollecitazioni sulle pale. Possono superare del 50% quelle relative alla manovra tradizionale



Propulsore Tandem

(Schottel-Siemens)

Il propulsore Schöttel-Siemens Pod (**SSP**), è caratterizzato da due eliche a tre pale, che ruotano nello stesso verso poste una davanti ed una dietro la gondola



- Range di potenza: 5÷20 MW
- Risparmi del 10% rispetto a sistemi diesel-elettrici con spintori
- Presenta un motore elettrico sincrono a magneti permanenti ad alta densità di potenza e basso numero di giri
- Il motore è di circa 2% più efficiente degli altri motori elettrici (non richiede eccitazione elettrica né ventilazione)
- Maggiore compattezza e minore peso minore del motore consentono di ridurre diametro della gondola al 35-40% rispetto al diametro delle eliche.

Propulsore Tandem

(Schottel-Siemens)

Vantaggi

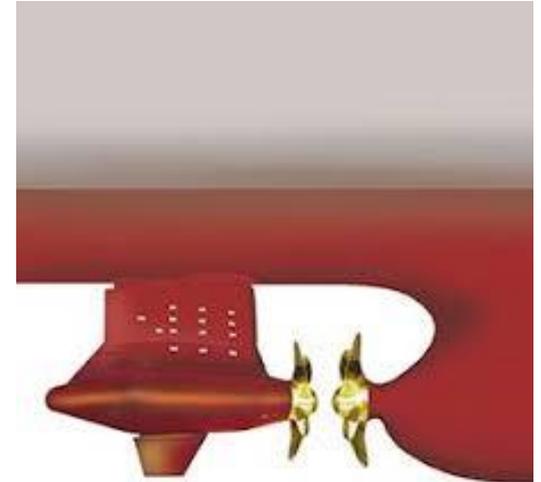
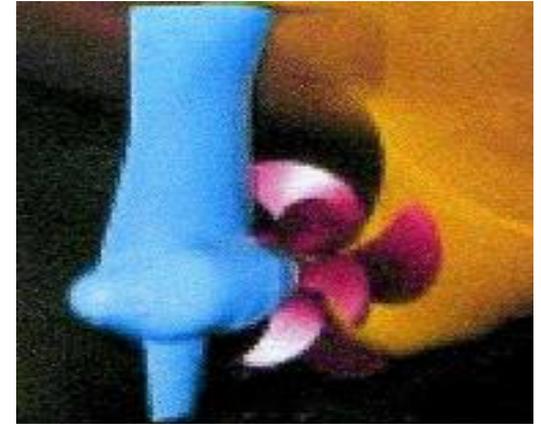
- Minore carico sulle pale con migliore comportamento cavitativo
- Le perdite rotazionali possono essere ridotte sistemando adeguatamente uno statore davanti o dietro le eliche
- Le alette laterali incrementano il rendimento totale



Sistema CRP-Azipod

È uno pseudo-sistema ad eliche controrotanti ottenuto combinando un'elica convenzionale con un Azipod installato dietro la stessa e con l'elica controrotante. L'**elica prodiera** è mossa da una linea d'assi convenzionale.

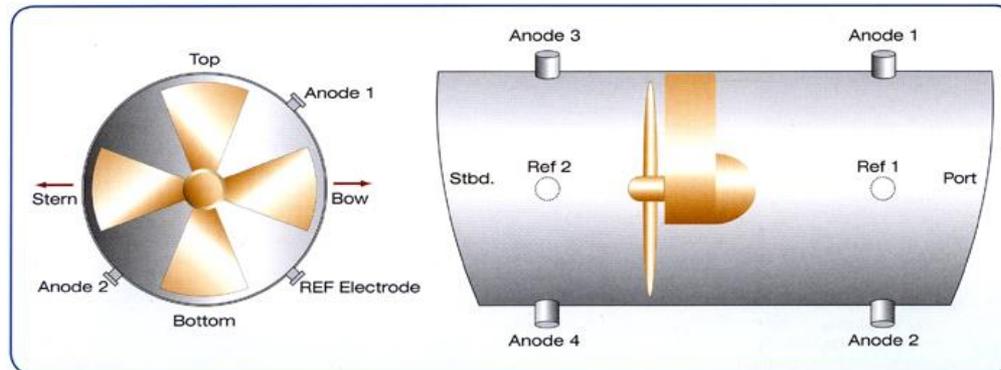
- L'**elica poppiera**, che ruota in verso opposto a quella prodiera, è allineata a questa che lavora come un'elica trattore.
- Il sistema CRP-Azipod permette di arrivare ad incrementi fino al 10% del rendimento quasi-propulsivo.



Spintori trasversali

(tunnel thrusters)

Propulsori con l'elica situata in tubi trasversali alle estremità di prora e poppa, con l'asse ortogonale al piano diametrale della nave per generare una spinta laterale necessaria a manovrare in acque ristrette a bassa velocità (crabbing)



Spintori trasversali

(tunnel thrusters)

- Inseriti in un mantello
- Alimentazione con motori elettrici
- Lunghezza raccomandata mantello: $1.5 D \leq L \leq 2.2 D$
- Elica a pale fisse oppure orientabili, posta possibilmente a metà del mantello
- Spinta reversibile



Spintori trasversali

(tunnel thrusters)

Fanno parte del sistema di manovra in acque ristrette

- Bow thrusters
- Stern thrusters
- Eliche di propulsione convenzionali in abbinamento ai timoni
- Propulsori azimutali poppieri
- Prestazioni richieste dal sistema:
 - Station keeping: mantenere la posizione con vento di $25 \div 30$ nodi
 - Motion: spostamento trasversale senza rotazione e con velocità trasversale di $0.25 \div 0.30$ m/s

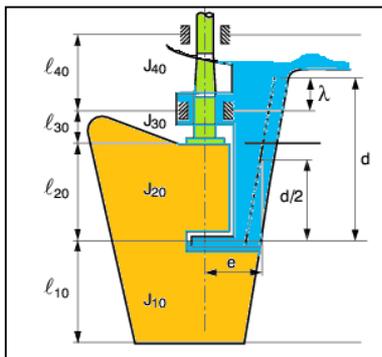


Spintori trasversali

(tunnel thrusters)

Aspetti progettuali

- Numero e potenza dipende da configurazione propulsiva
 - Eliche a pale fisse e timoni semicompensati (horn rudders): si utilizza lo stesso numero di thrusters sia a poppa che prora, assegnando a quelli poppieri una potenza inferiore di circa il 20%
 - Eliche a pale fisse e timoni sospesi compensati (spade rudders): il numero dei thrusters poppieri può essere ridotto di un'unità rispetto a quelli prodieri
 - Eliche a pale orientabili e timoni con flap, oppure propulsori azimutali (POD): si installano solamente thrusters prodieri



Spintori trasversali

(tunnel thrusters)

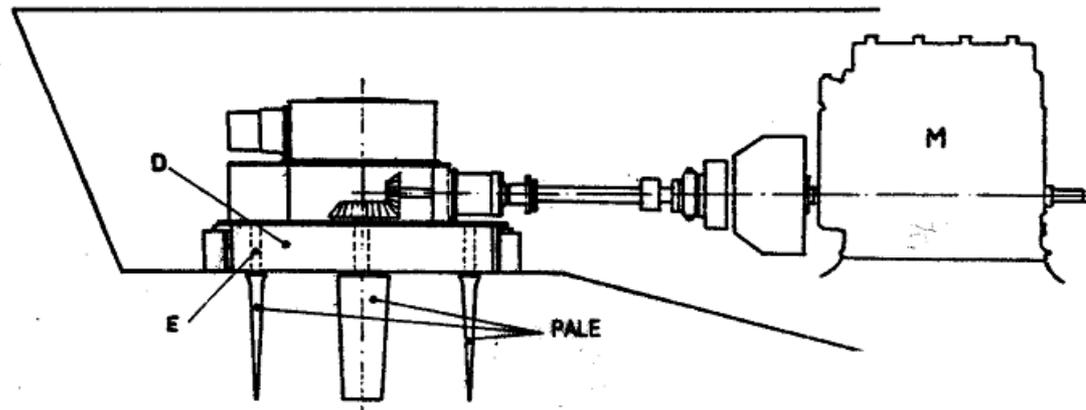
Aspetti progettuali

- Stabilire la forza del vento da controbilanciare:
 - Prove alla galleria del vento
 - Forza trasversale: $F_Y = C_Y * \rho_a / 2 * A_s * V_w^2$ -- $C_Y = 1,1 \div 1,2$ -- $\rho_a = 1,22 \text{ kg/m}^3$
- Spinta specifica: $120 \div 150 \text{ N/kW}$
- Non efficace con velocità nave maggiore di 5 nodi
- Immersione minima del centro del thruster: un diametro del foro
- Distanza del centro del thruster da LC: compresa tra $0.7 D$ e 1 diametro
- Distanza tra due thrusters: 2 diametri, con un minimo di 1.5 diametri
- Raccordare il tubo e la carena con uno smusso a 45° (evitare lo spigolo vivo)
- Raccomandazioni per limitare l'incremento resistenza della carena
 - Orientare i thruster secondo le linee di flusso
 - Grigliatura montata a paro con il fasciame e perpendicolare alle linee di flusso
 - Incremento di resistenza: $1\% \div 2\%$



Propulsori Cicloidali

- Costituito da un rotore (D) messo in rotazione dal motore (M) che trascina nel suo movimento 4-6 pale verticali, fissate al disco mediante perni (E), ed i cui assi sono paralleli a quello di rotazione del disco.
- L'inclinazione delle pale è regolata da un meccanismo interno che le fa oscillare in funzione dell'angolo per generare spinta
- Portanza delle pale regolata velocemente in modulo e direzione
- Il meccanismo: dispositivo eccentrico, o a camme, che fa in modo che durante la rotazione le normali alle pale passino per un punto detto polo (Propulsore Voith Schneider, il più diffuso)



Propulsori Cicloidali

Applicazioni

- navi con requisiti di sicurezza particolarmente stringenti
- navi che devono garantire un elevato grado di manovrabilità
- naviglio minore operante in acque limitate (lagune, canali, estuari, ecc.) e per trasporto su rotte brevi

Sistemazione

- a poppa su un fondo quasi piano
- a prua ed a poppa, in modo da muovere la nave in senso trasversale



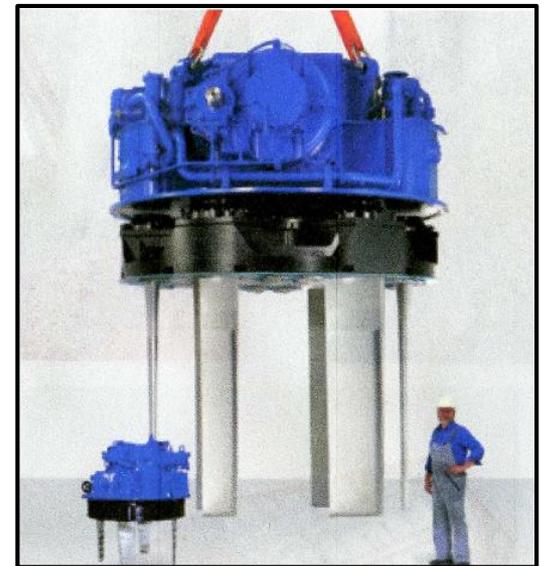
Propulsori Cicloidali

Vantaggi

- operano a numeri di giri relativamente bassi.
- rendono inutile la presenza del timone
- forniscono alla nave notevoli qualità manovriere superiori a quelle di qualsiasi altro organo di governo.
- Robusto e affidabile

Svantaggi

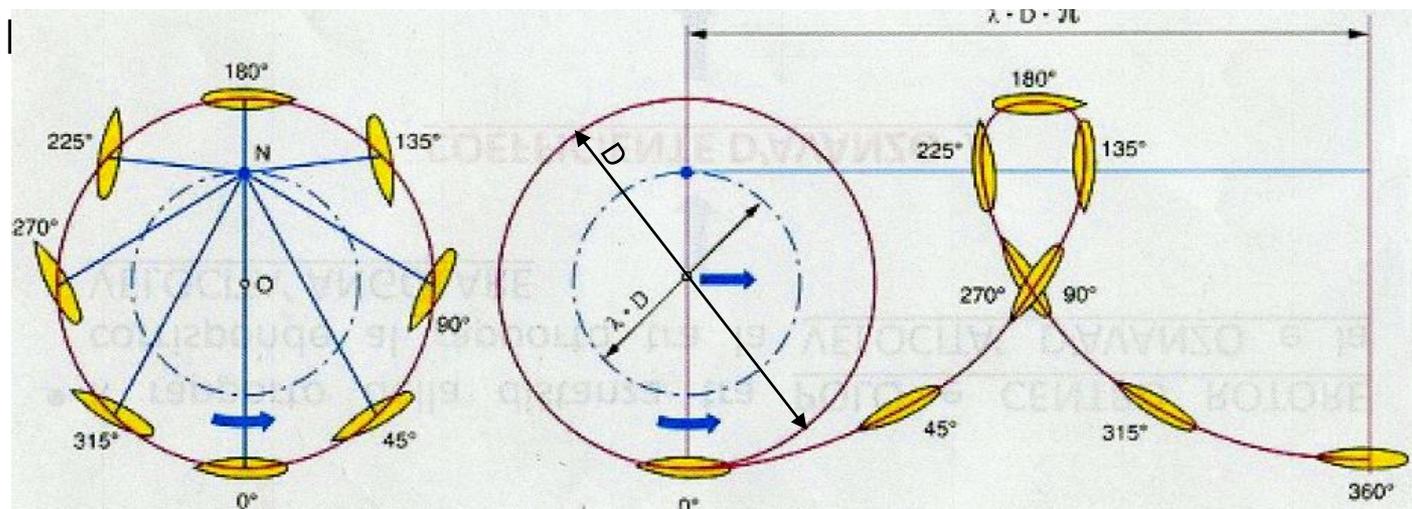
- Complicazione meccanica
- Peso
- Costo
- Vulnerabilità
- Basso rendimento



Propulsore Voith Schneider

Propulsore Voith Schneider

- O: centro del rotore
- N: polo, per il quale passa la normale alle pale durante la rotazione. Può essere spostato in diverse posizioni. È il centro di un sistema di manovellismi che regola l'orientamento delle pale in funzione della sua posizione
- Pale verticali
 - Calettate sul telaio del rotore
 - L'orientamento è regolato con una rotazione attorno al proprio asse dal sistema di manovellismi
 - Oscillano attorno al proprio asse durante la rotazione del disco
 - I



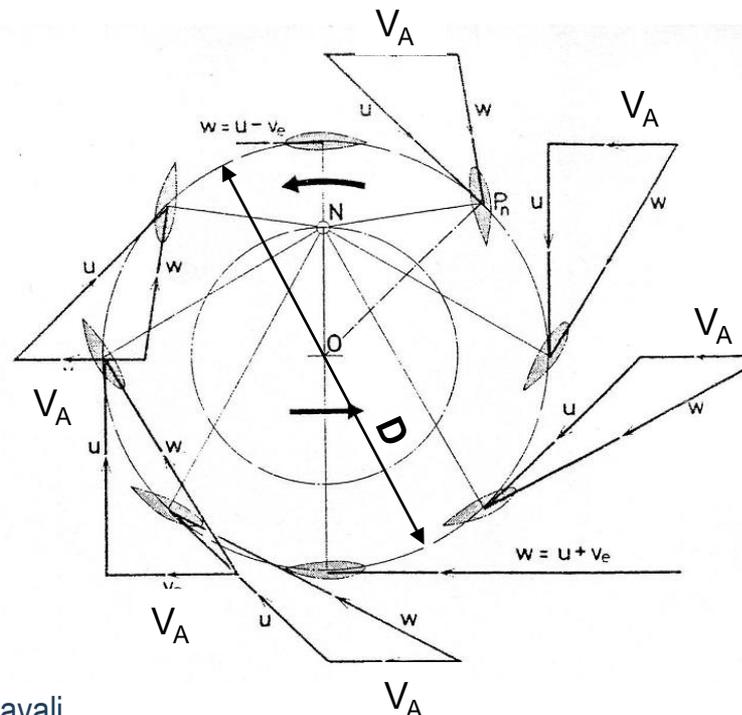
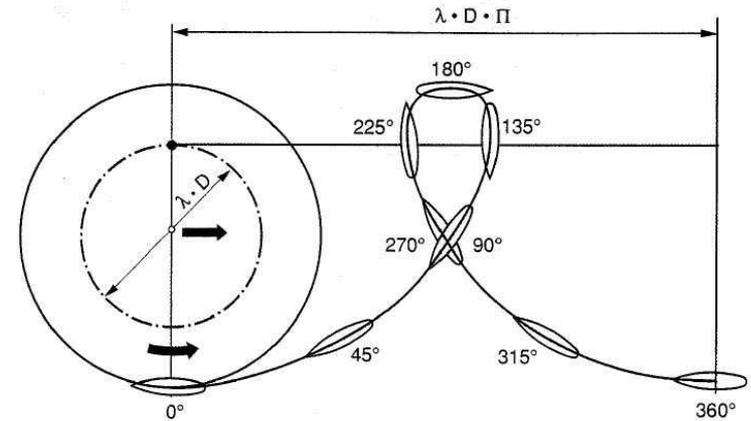
Cap. 2 Propulsori navali

Prof. Paolo Frandoli



Propulsore Voith Schneider

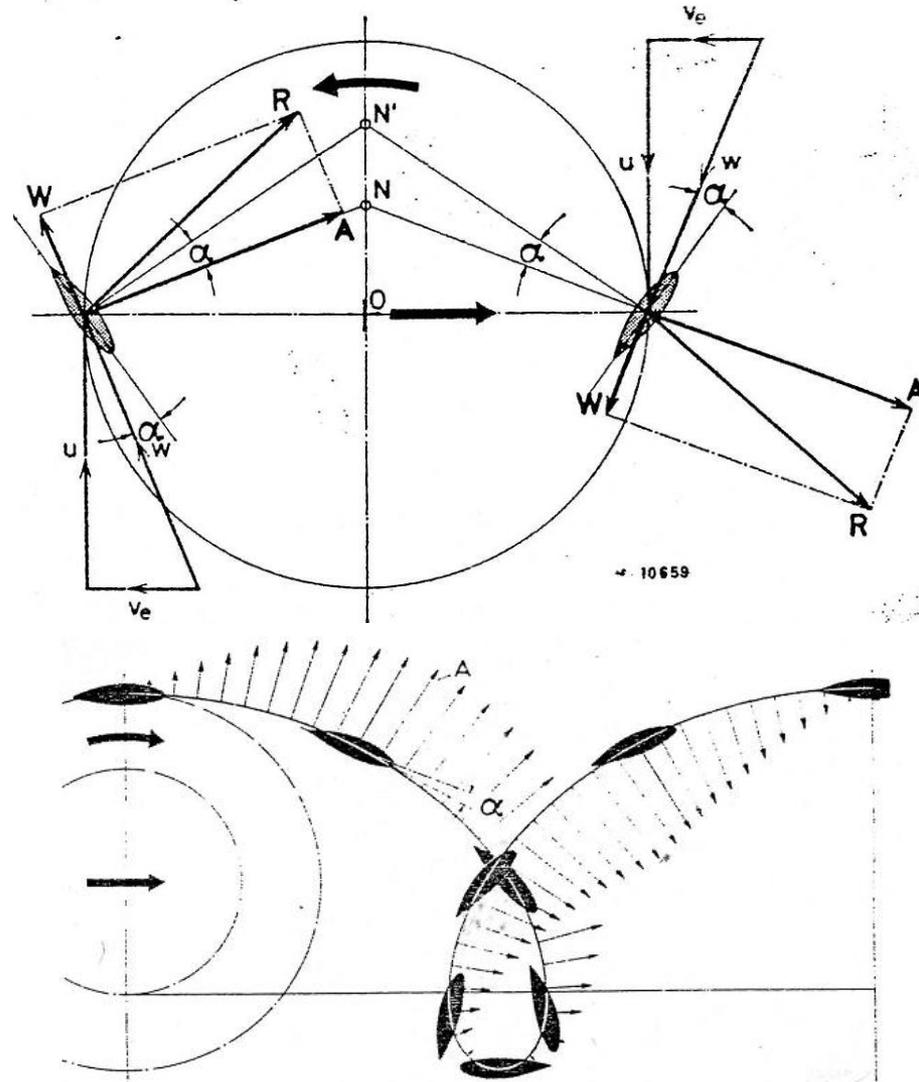
- V_A : velocità d'avanzo
- U : velocità circonferenziale (πnD)
- W : velocità risultante sulla pala
- λ : coefficiente d'avanzo (V_A/U)
- $\lambda\pi D$: avanzamento durante una rotazione completa



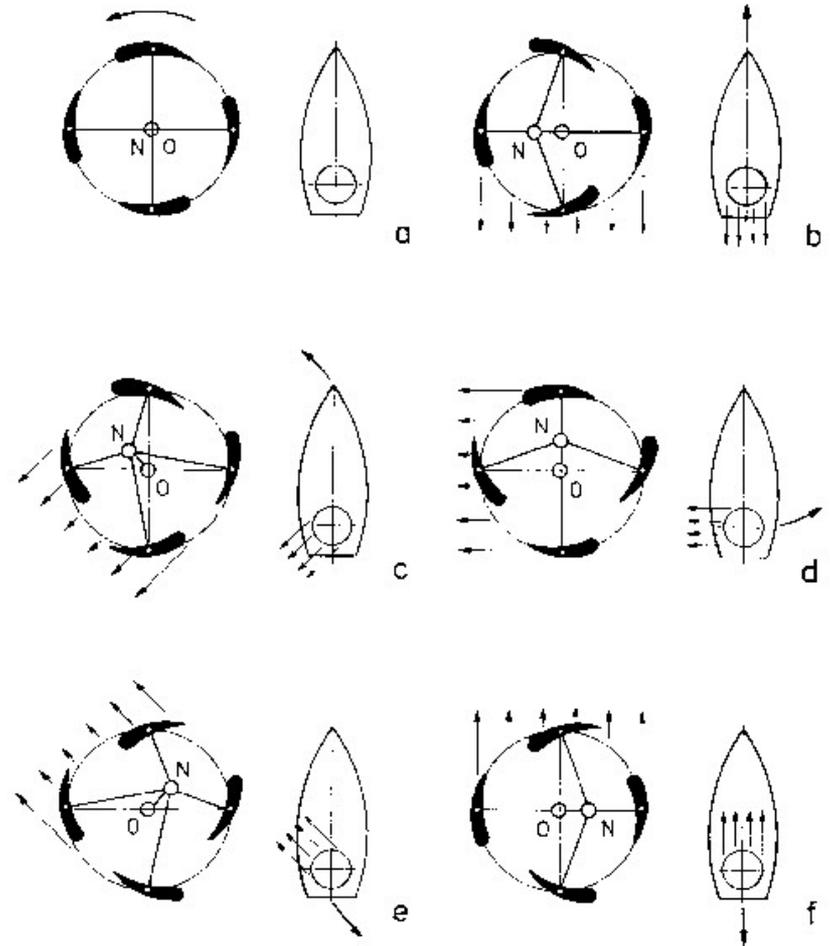
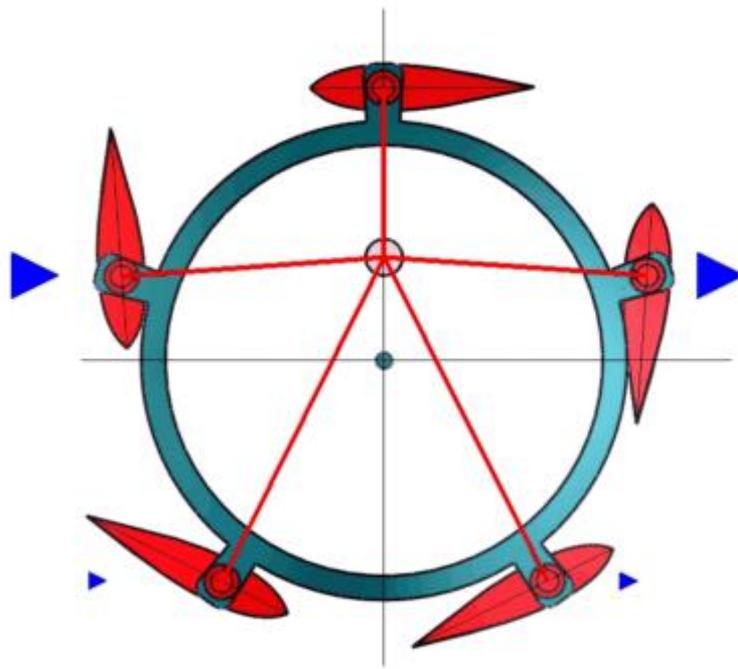
Propulsore Voith Schneider

- Spinta generata spostando il polo in un qualsiasi punto del disco
- Lo spostamento del polo varia intensità e direzione della spinta
- La spinta è funzione della lunghezza del segmento $\overline{ON'}$
- La spinta è ortogonale al segmento $\overline{ON'}$
- Eccentricità:

$$e = \frac{\overline{ON'}}{R}$$

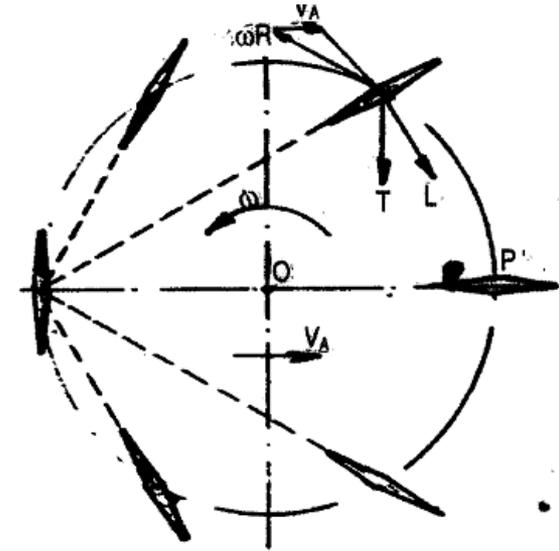
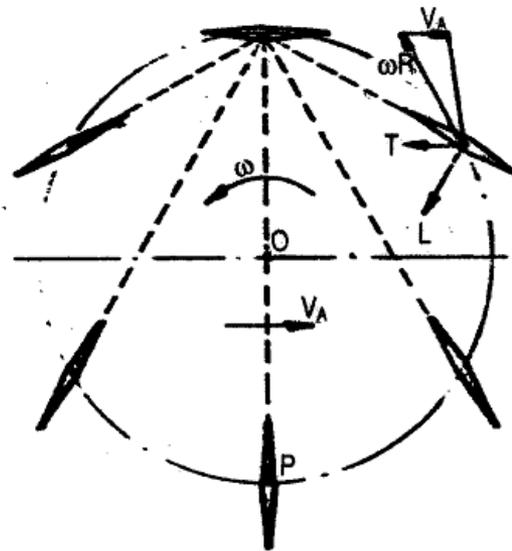
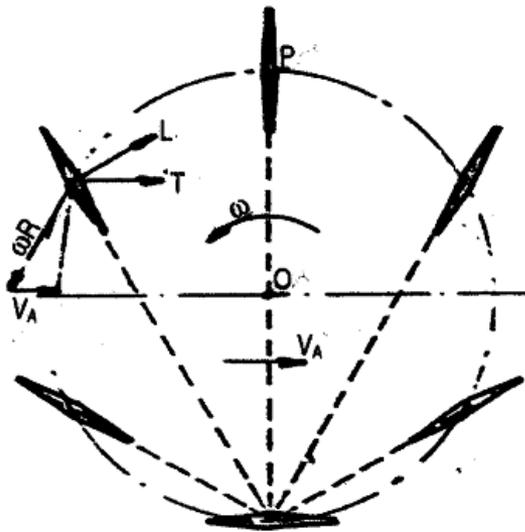


Propulsore Voith Schneider



Propulsori Kirsten-Boeing

$$(\omega R = V_A, e = 1)$$



Propulsori Cicloidali

- Non sono disponibili metodi analitici per calcolare le prestazioni dei propulsori elicoidali
- L'approccio sperimentale è l'unica soluzione possibile, in quanto consente di ottenere il diagramma di funzionamento
- Per la progettazione iniziale sono disponibili i risultati di serie sistematiche

Serie	A_E/A_0	Z	l/D	c/D	forma di pala	profilo di pala
DTMB	1.060	6	0.50	0.177	rettangolare	incurvato
MARIN	1.080	6	0.60	0.180	rettangolare	simmetrico
Kirsten-Boeing	1.050	4	0.46	0.262	rettangolare	curvatura a 'S'
Taniguchi	0.975	6	0.60	0.162	ellittica	simmetrico

