



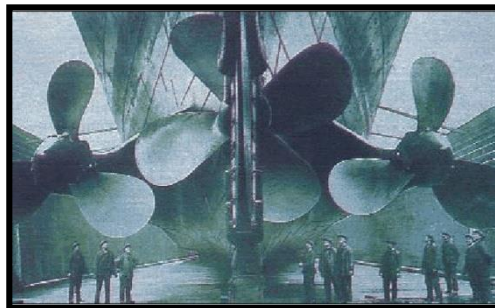
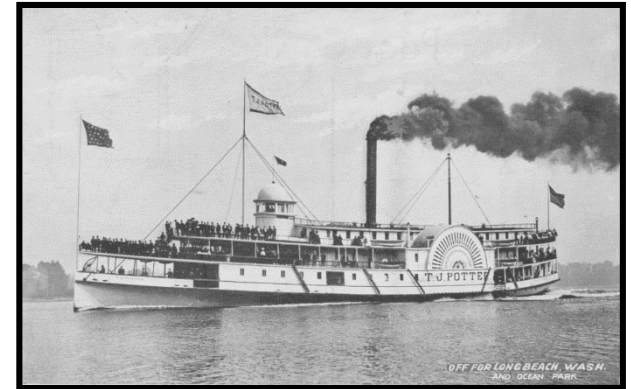
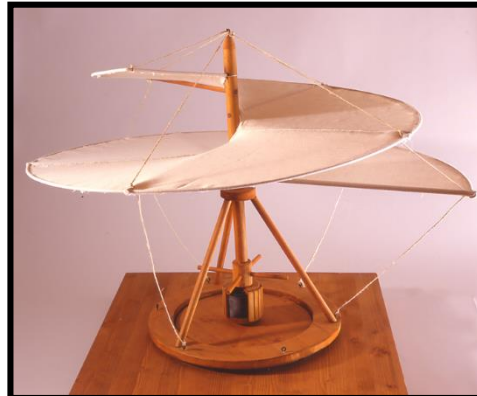
UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI DI TRIESTE

# 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

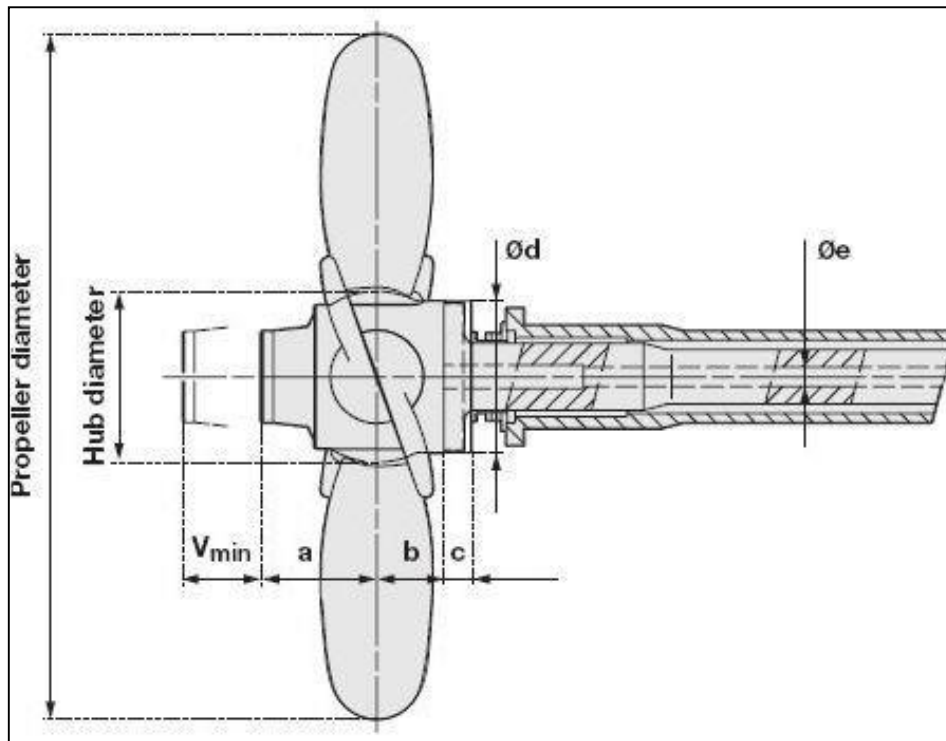
Accoppiabili solamente a motori reversibili per garantire la retromarcia

- 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

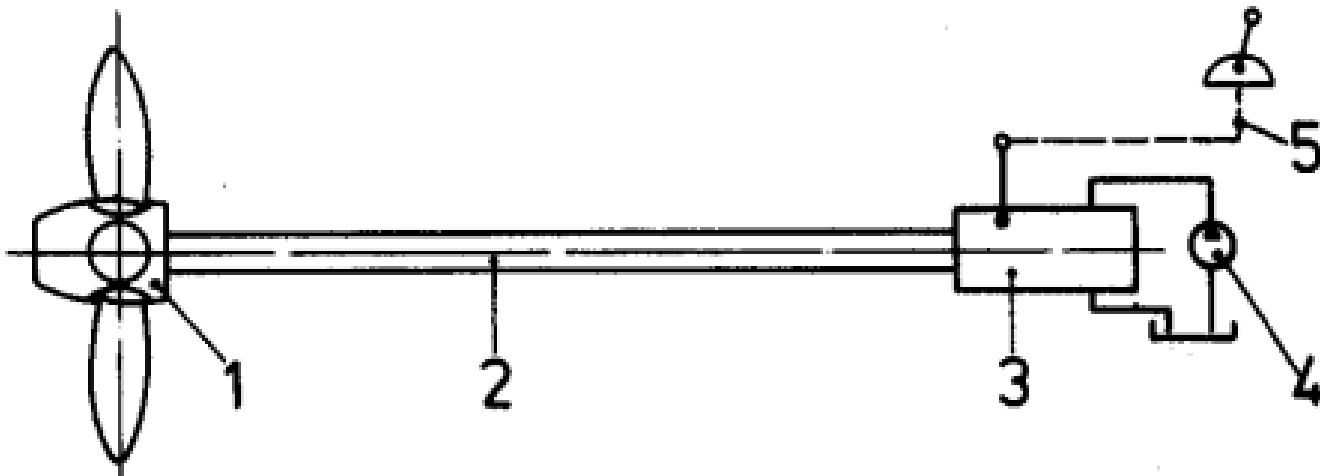
Le pale possono ruotare dalla posizione di massimo passo in marcia avanti a quella di marcia indietro tramite una serie di meccanismi posti all'interno del mozzo e movimentati idraulicamente da una centralina posta nel locale apparato motore a valle del motore di propulsione o del riduttore, quando presente



# 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



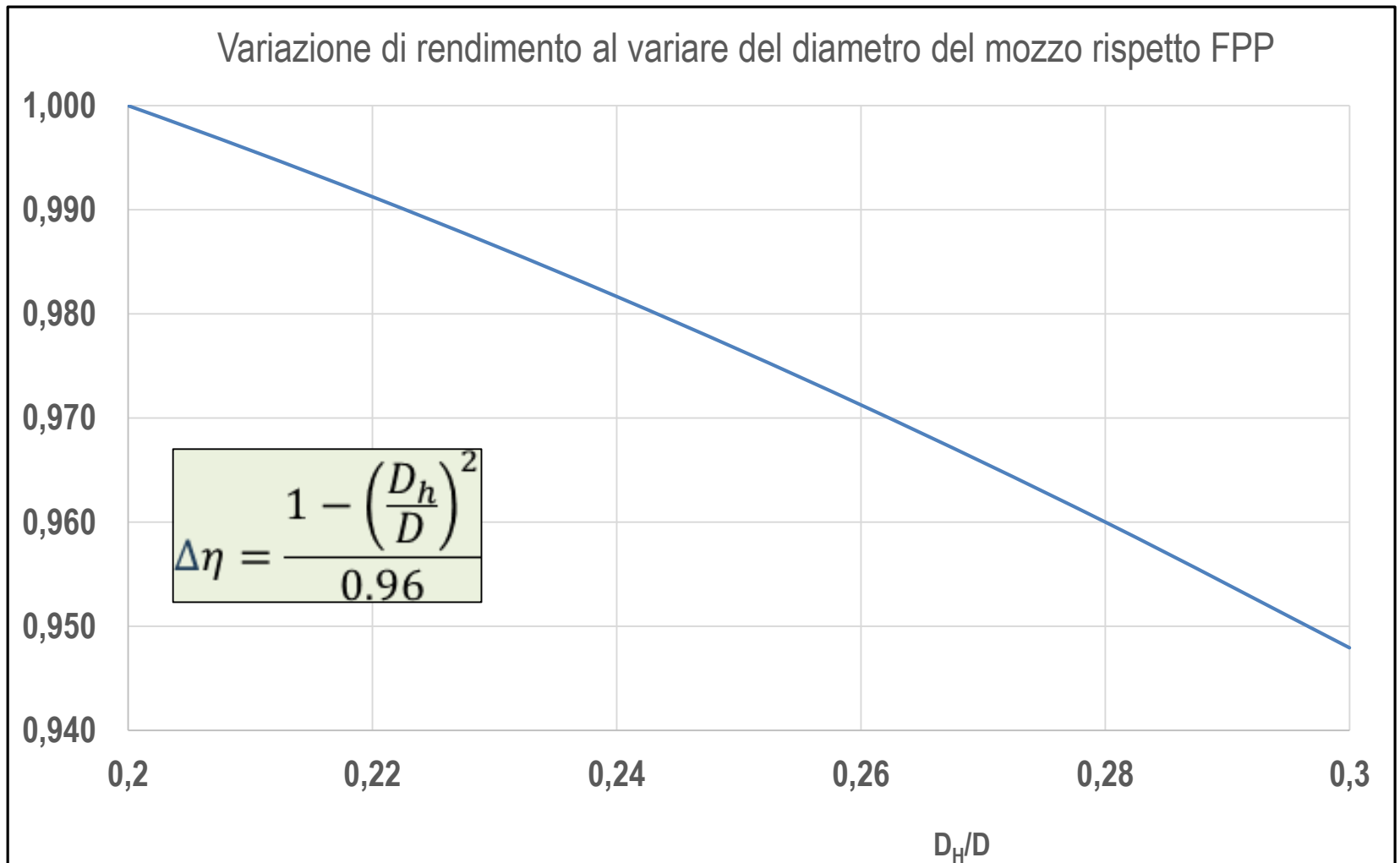
# Eliche a pale orientabili

- 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 ( $D_h/D = 0,23 \div 0,28$ )



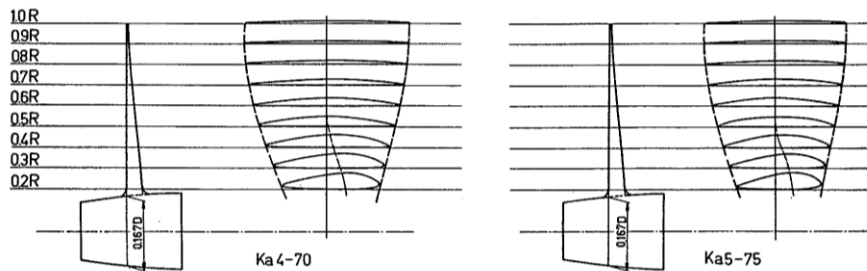
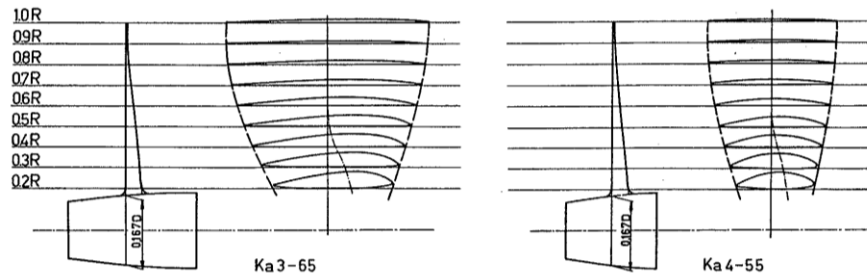


# Eliche a pale orientabili

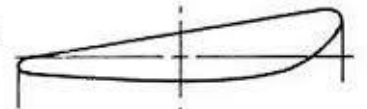


# Eliche intubate

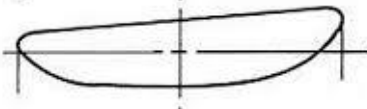
E' un sistema integrato costituito da un'elica ed un mantello il quale contribuisce alla generazione della spinta



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

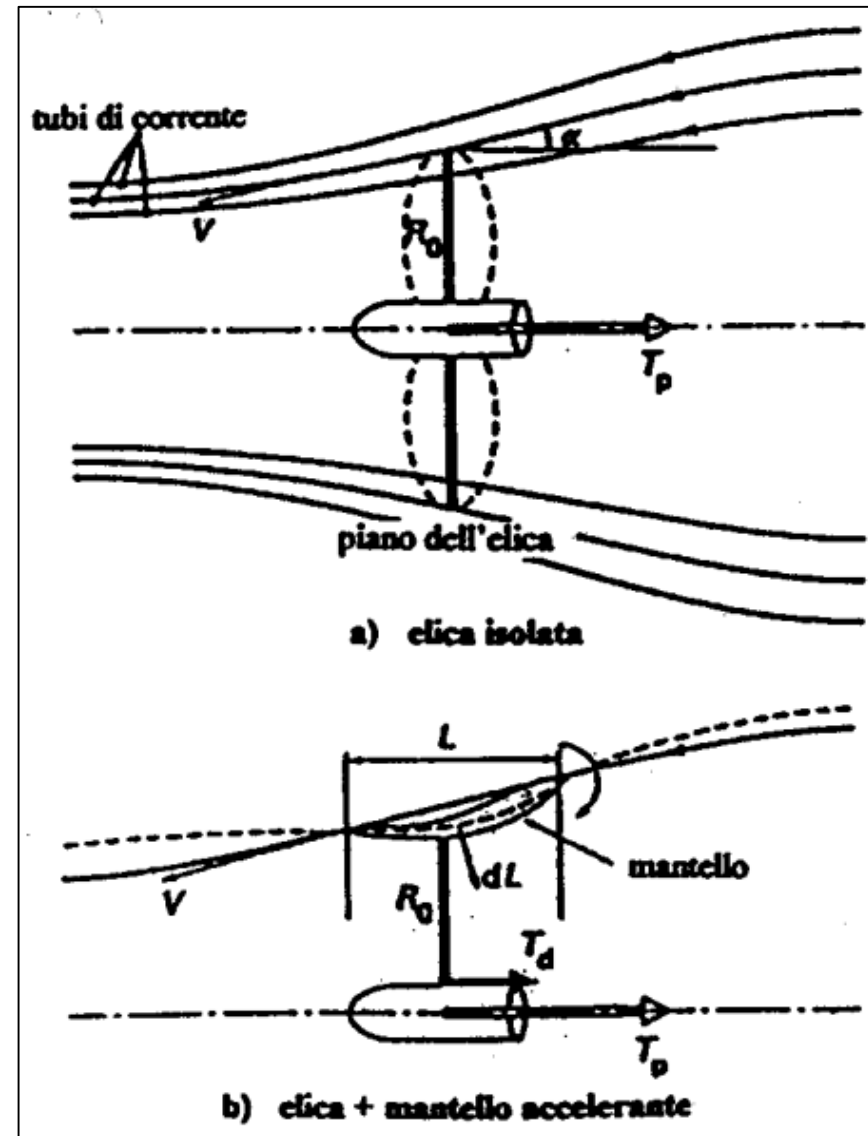


# Eliche intubate

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

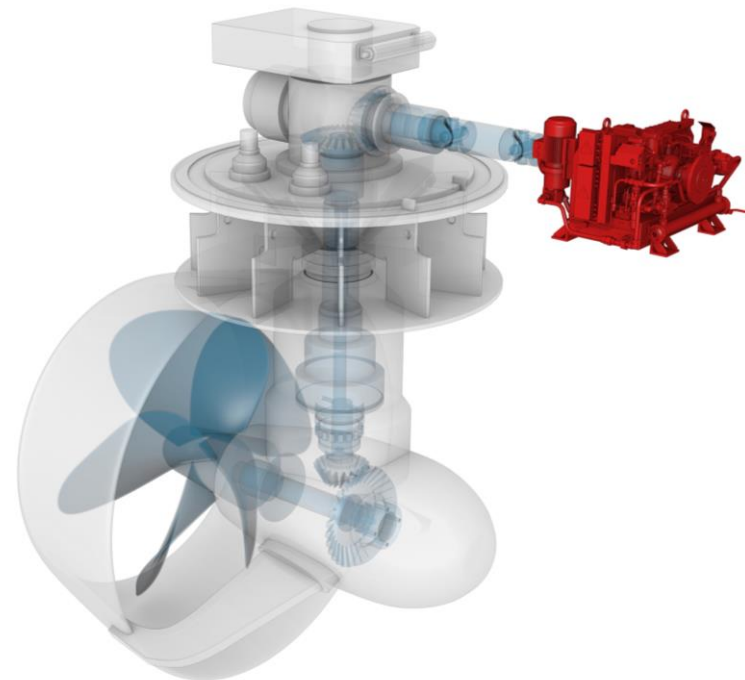




# Propulsori con trasmissione a Z (Z-drive)

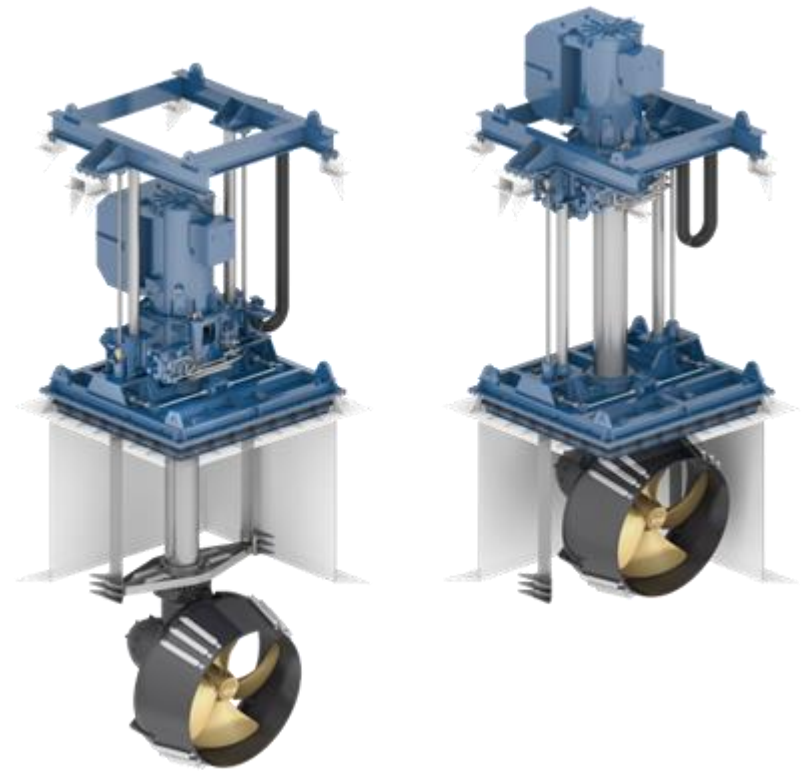
**Configurazione albero motore:** *orizzontale all'uscita del motore, verticale attraverso lo scafo, di nuovo orizzontale verso il mozzo dell'elica*

- **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

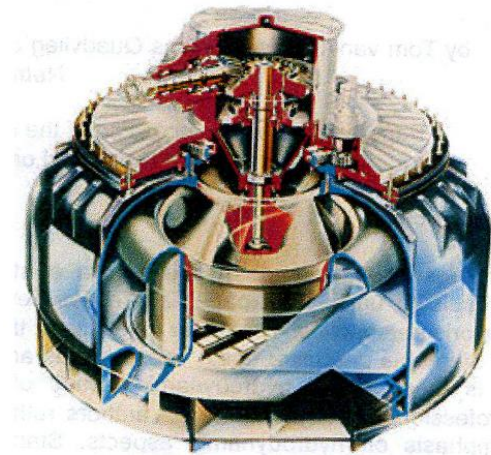


# Pump-jets

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

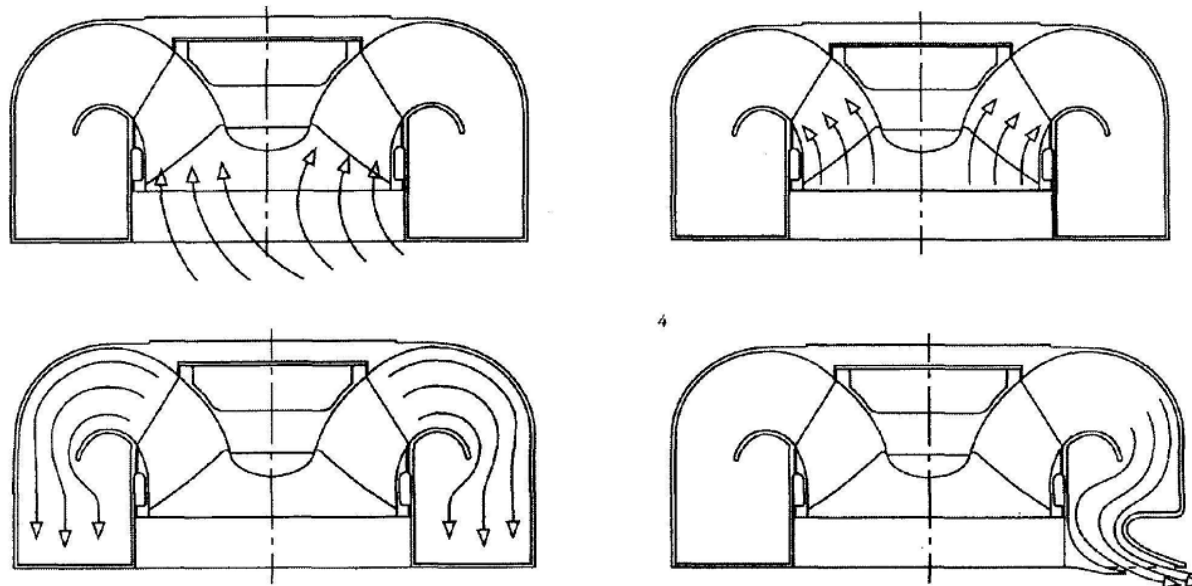
- compattezza con risparmio di spazio
- installazione sul fondo della carena
- minimo rischio di danneggiamento qualora la nave tocchi il fondo
- bassi livelli di rumore e di vibrazioni
- motori diesel, motori elettrici o motori idraulici
- Intervallo di potenza: 50 ÷ 3500 kW

**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)

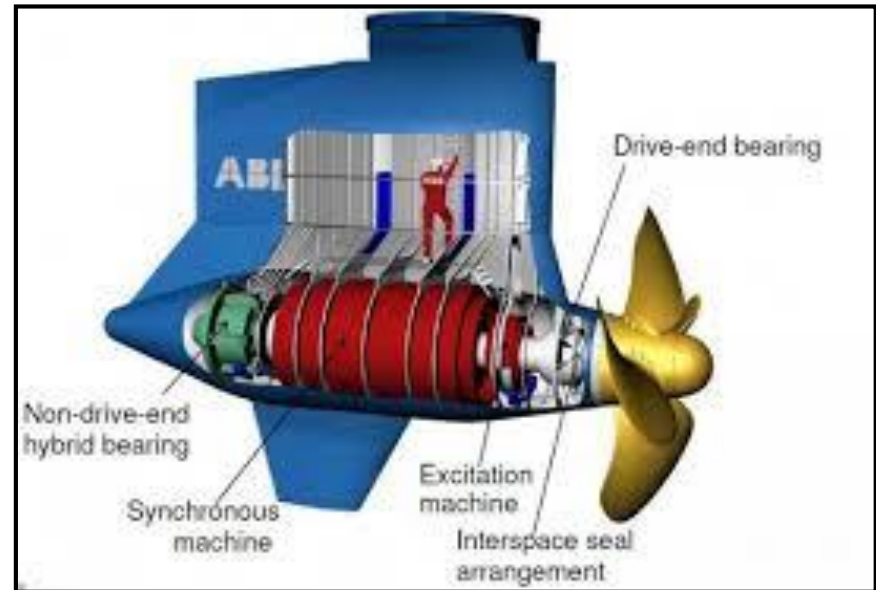


# Azipod

## (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  $180^\circ$  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

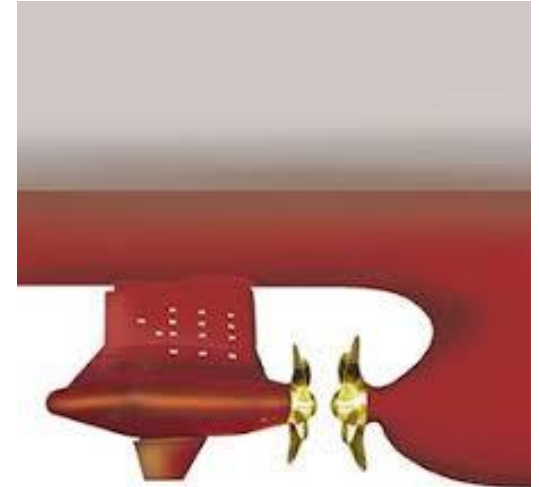
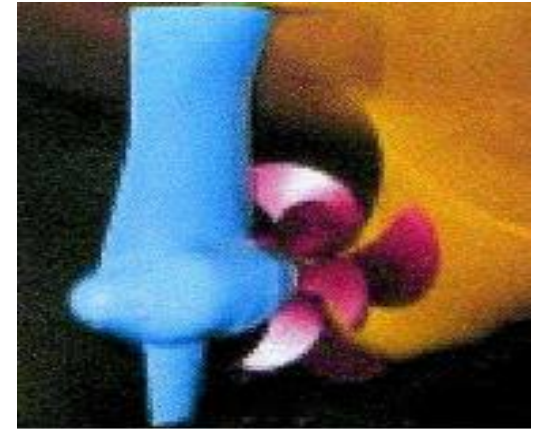
- Minore carico sulle pale con migliore comportamento cavitativo
- Le perdite rotazionali possono essere ridotte sistemando adeguatamente uno statore davanti o dietro le eliche
- Le alette laterali incrementano il rendimento totale



# 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.

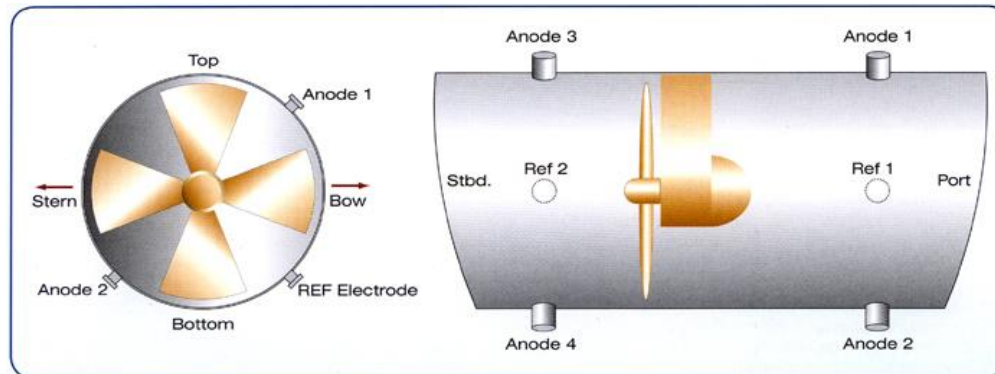




# Spintori trasversali

(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

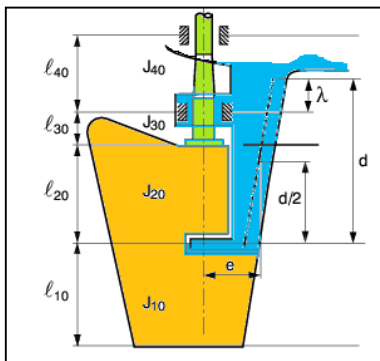


# Spintori trasversali

(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)

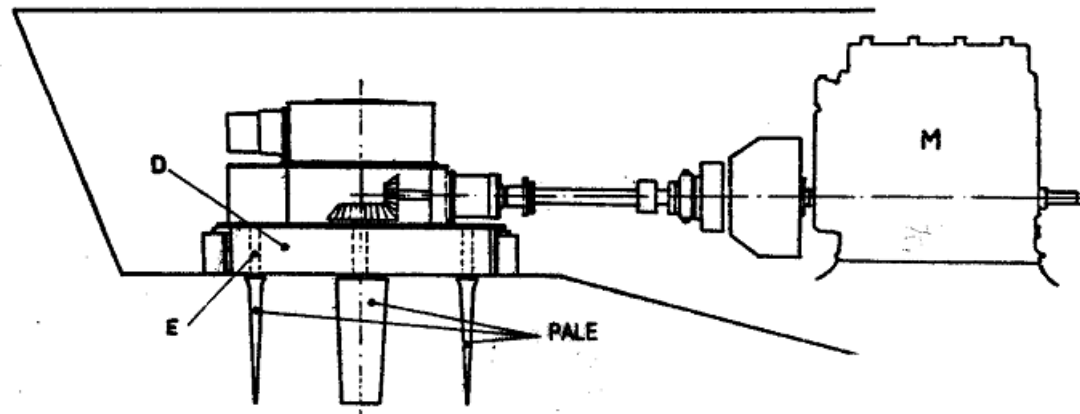
## Aspetti progettuali

- 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  $45^\circ$  (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



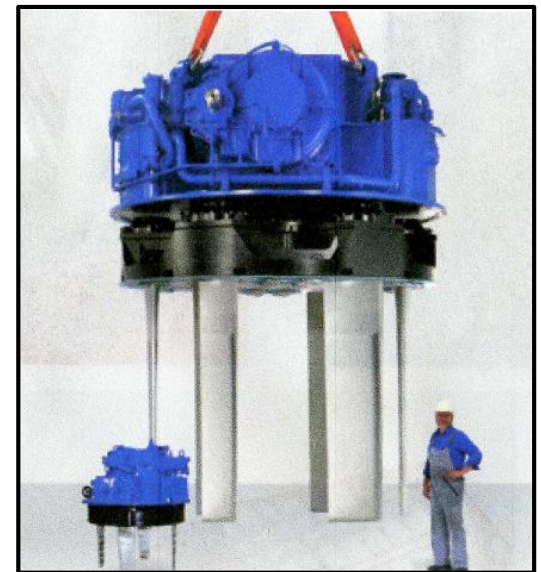
# Propulsori Cicloidali

## 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

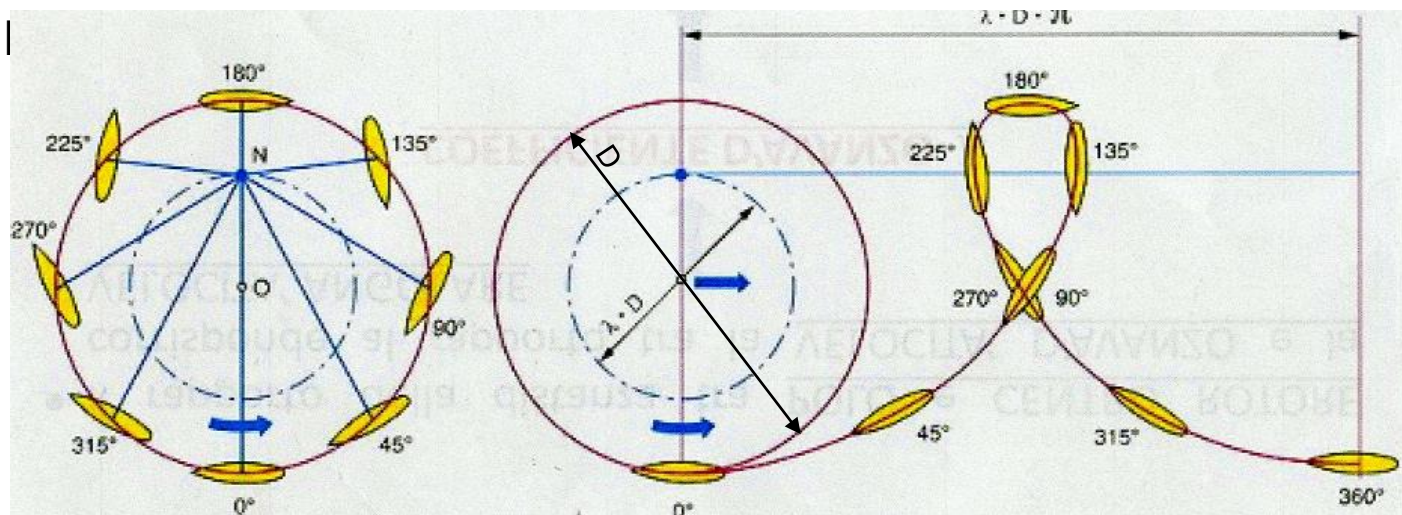


Propulsore Voith Schneider



# 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



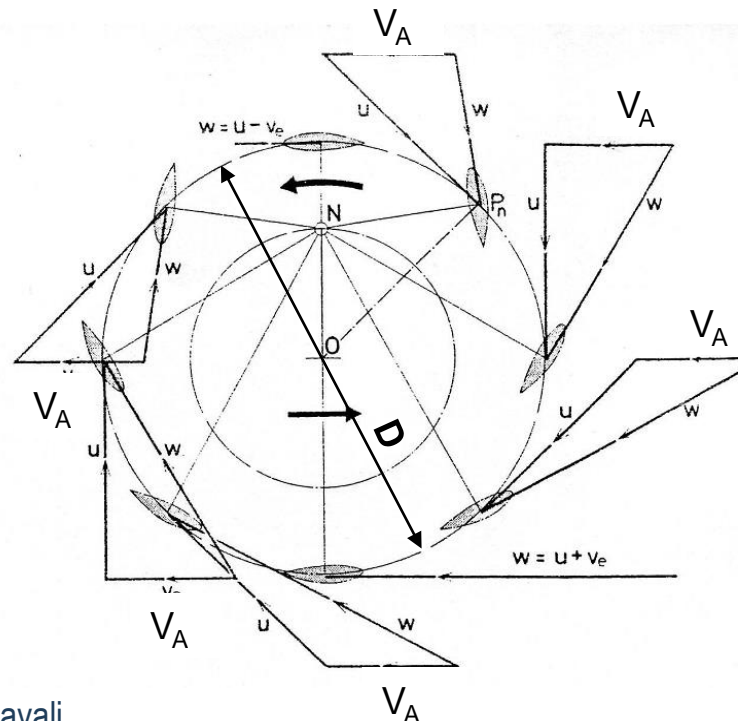
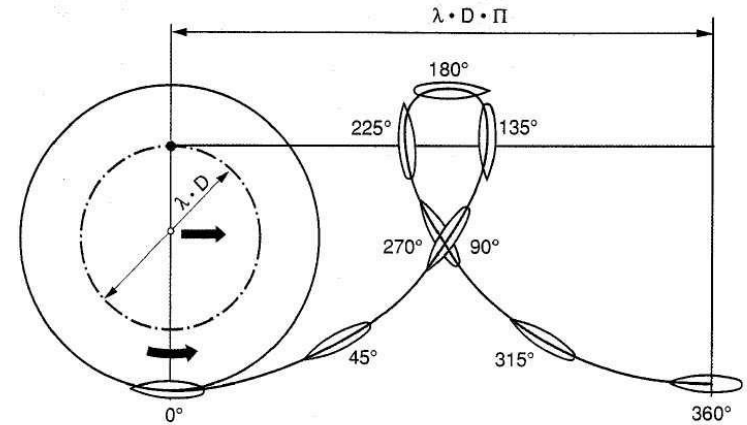
Cap. 2 Propulsori navali

Prof. Paolo Frandoli



# Propulsore Voith Schneider

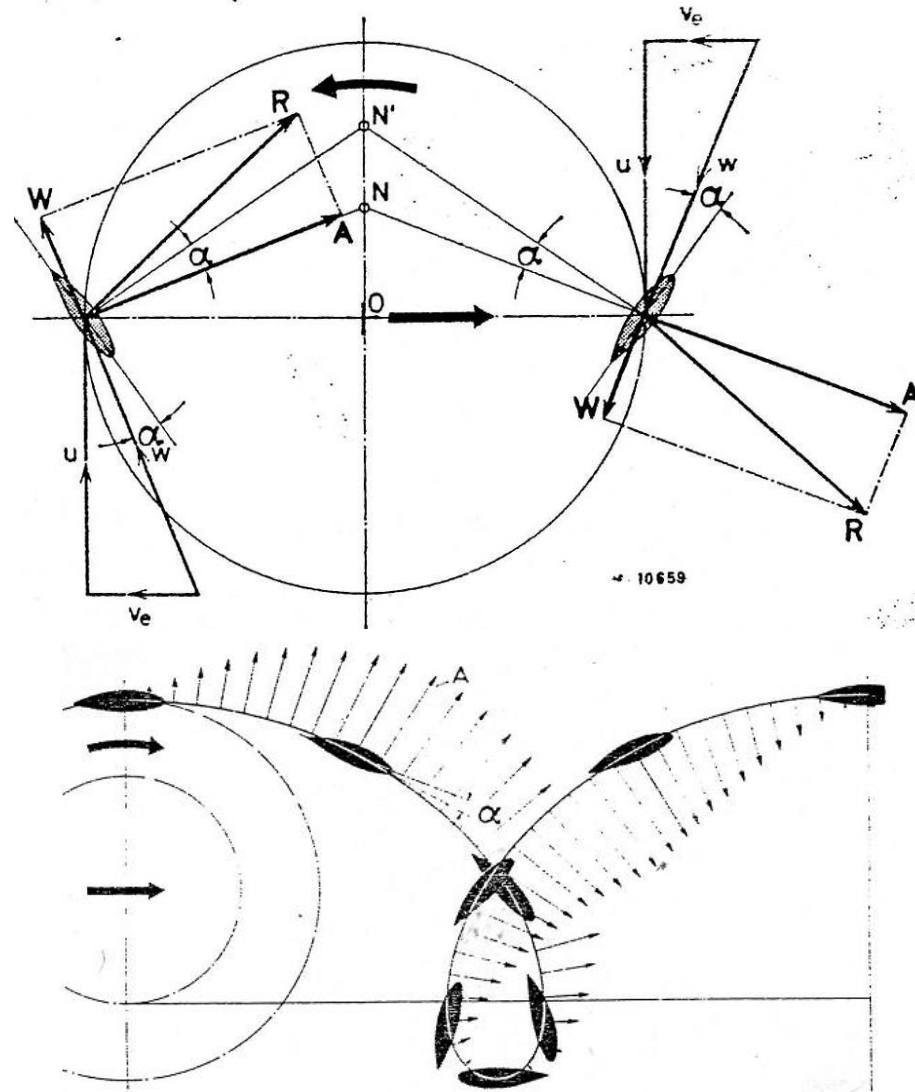
- $V_A$ : velocità d'avanzo
- $U$ : velocità circonferenziale ( $\pi nD$ )
- $W$ : velocità risultante sulla pala
- $\lambda$ : coefficiente d'avanzo ( $V_A/U$ )
- $\lambda\pi D$ : avanzamento durante una rotazione completa



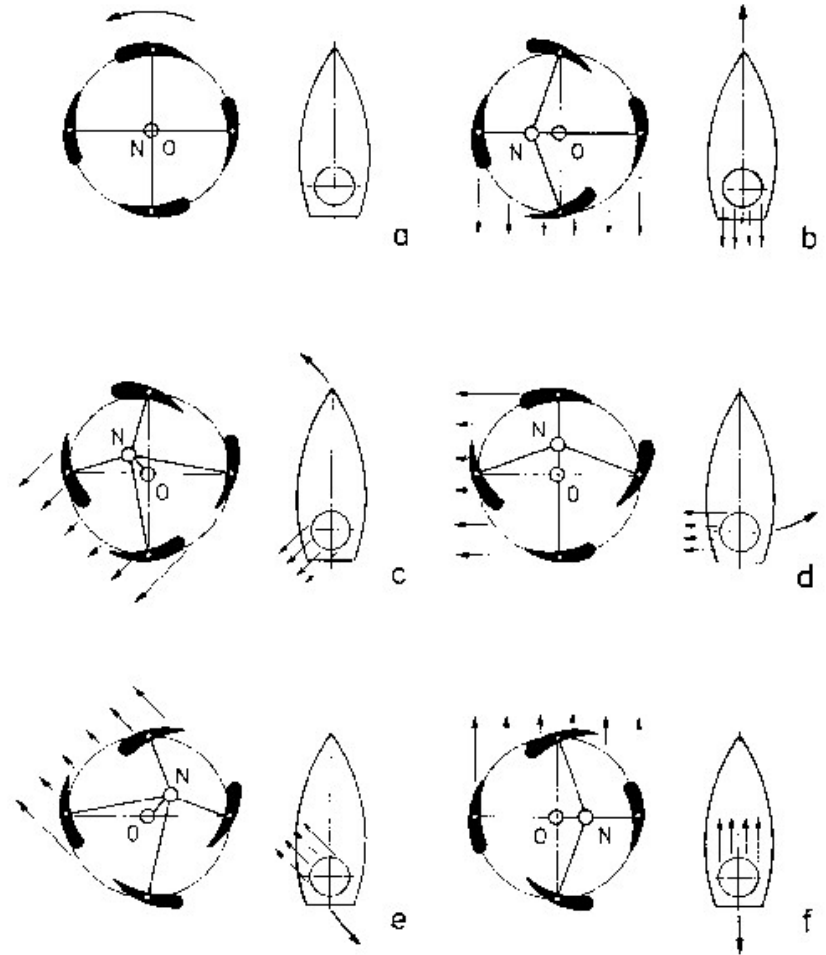
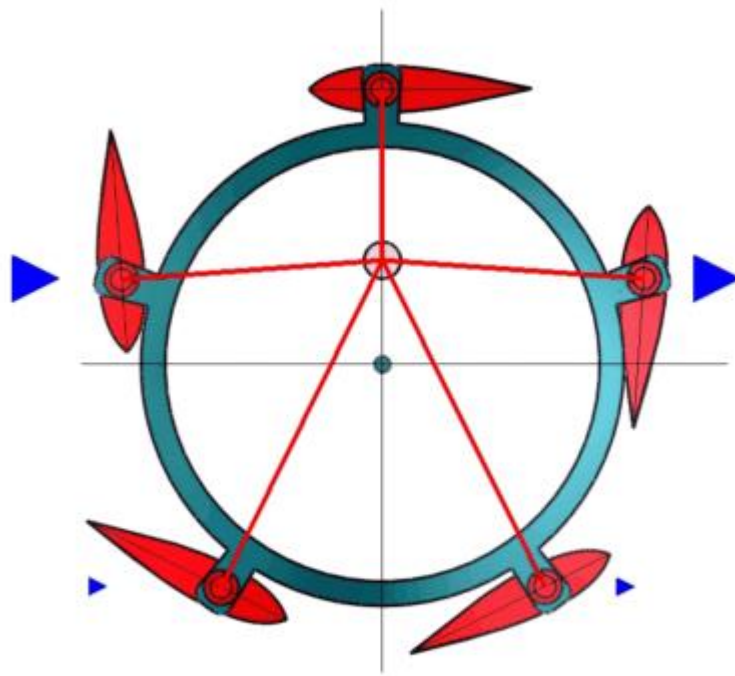
# Propulsore Voith Schneider

- 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:

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

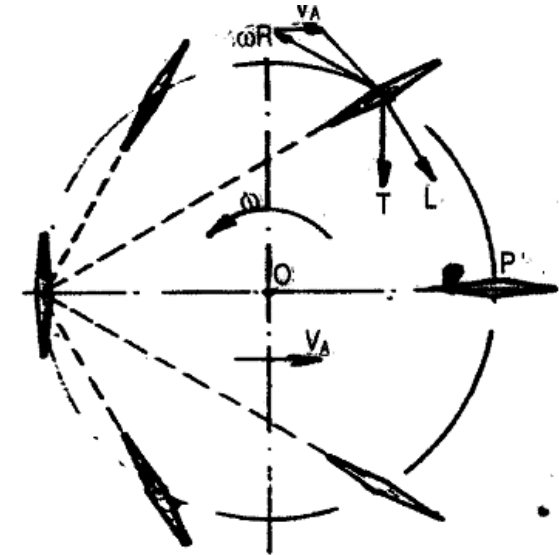
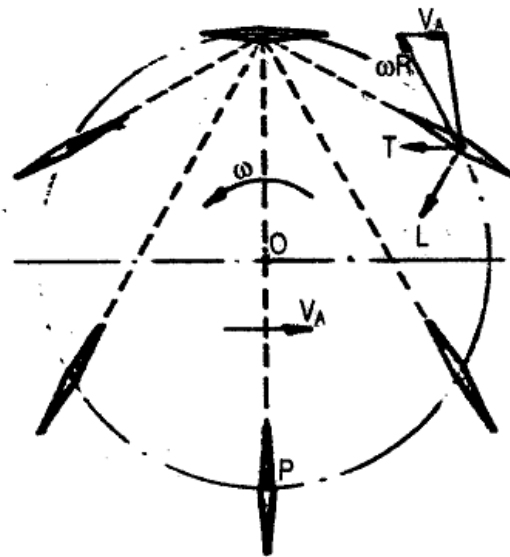
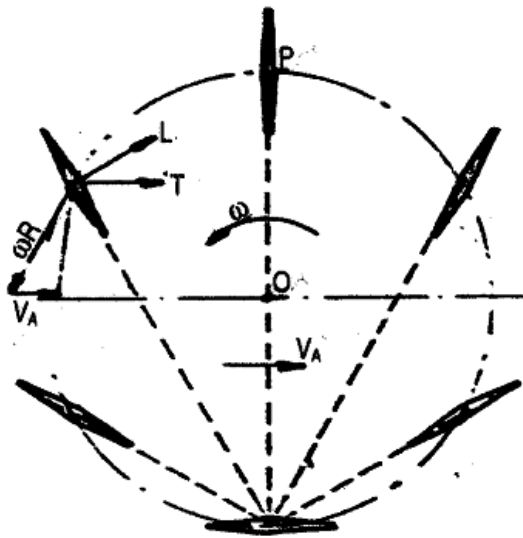


# Propulsore Voith Schneider



# 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      |

