



Departamento de Engenharia Naval e Oceânica
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo



PNV 2300 – Introdução à Engenharia Naval

Motores e Propulsores
Integração Casco – Hélice – Motor

Motores, Propulsores e Integração

INTRODUÇÃO

PROPULSORES

MOTORES

INTEGRAÇÃO CASCO-HÉLICE-MOTOR

Motores, Propulsores e Integração



INTRODUÇÃO

PROPULSORES

MOTORES

INTEGRAÇÃO CASCO-HÉLICE-MOTOR

Instalação Propulsora

- O navio, para operar na velocidade desejada, deve vencer a resistência da água. Isso ocorre através da geração interna de potência mecânica, que é convertida em empuxo. A realização desse processo é feita pela **instalação propulsora**, que é composta pelos seguintes elementos:
- **Propulsor:** elemento que gera o empuxo.
- **Máquina principal:** elemento que gera energia.
- **Sistema de transmissão:** realiza a integração entre o propulsor e a máquina principal.

Motores, Propulsores e Integração

INTRODUÇÃO



PROPULSORES

MOTORES

INTEGRAÇÃO CASCO-HÉLICE-MOTOR



[0YrvJoCmc](#) - fazendo propulsores de pequenos barcos

[v48f5D6kBY](#) - fazendo o molde de madeira de um grande propulsor

[v04UDenJ6Q](#) – atividades Wartsila

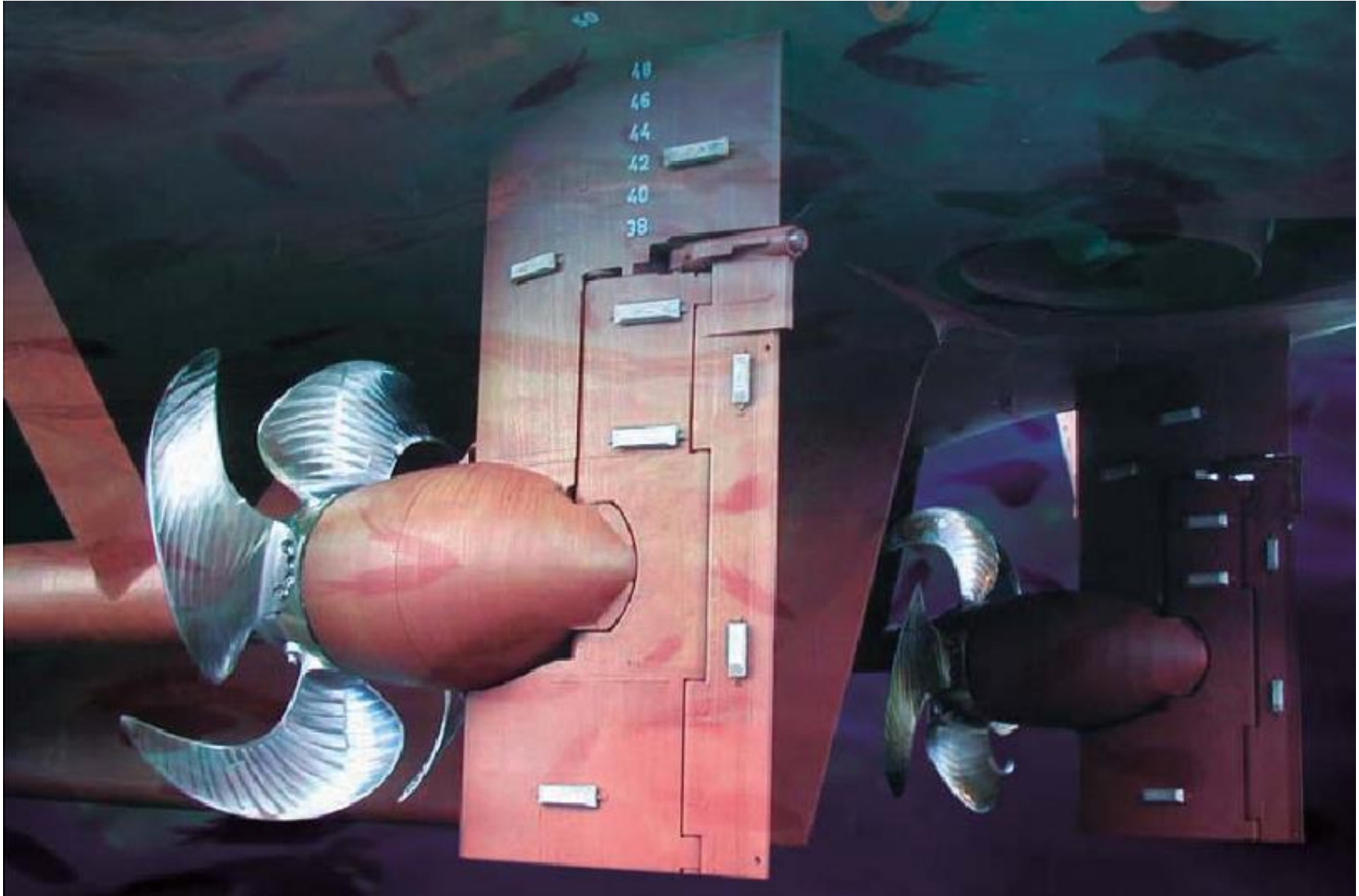




Um pouco sobre a força de sustentação

<https://www.youtube.com/watch?v=5O-j0w-h7v0>

Os propulsores são feitos de elementos que de alguma forma empurram a água, e a sua reação movimenta a embarcação



A escolha do tipo de propulsor depende do perfil de operação do navio: se for mercante, o mais importante é a eficiência durante as viagens; se for um rebocador, o importante é o empuxo a baixas velocidades e a manobrabilidade

Diâmetro do hélice	diâmetro do círculo concêntrico ao eixo.
Bordas de ataque	Borda onde o hélice corta a água
Bordas de fuga	Borda onde a água deixa a pá
face	face que empurra a água. zona de alta pressão
dorso	Face de baixa pressão
passo	Deslocamento longitudinal quando o hélice completa uma rotação em torno do seu eixo

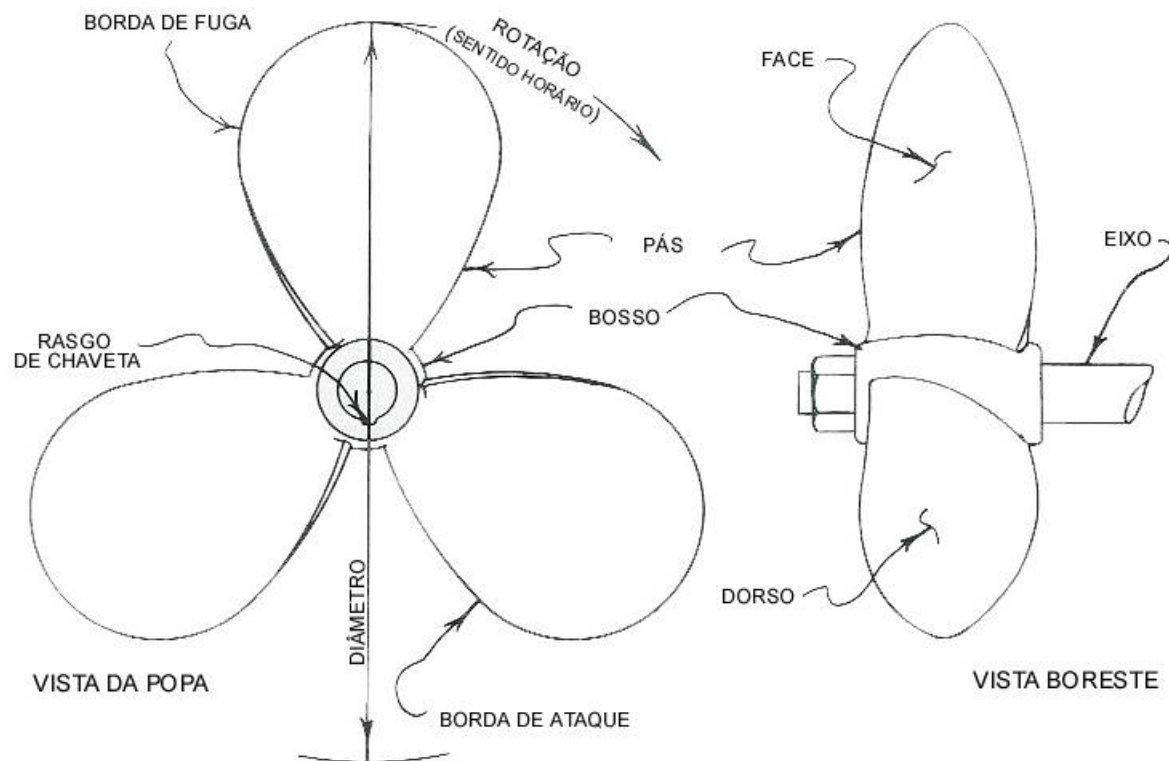
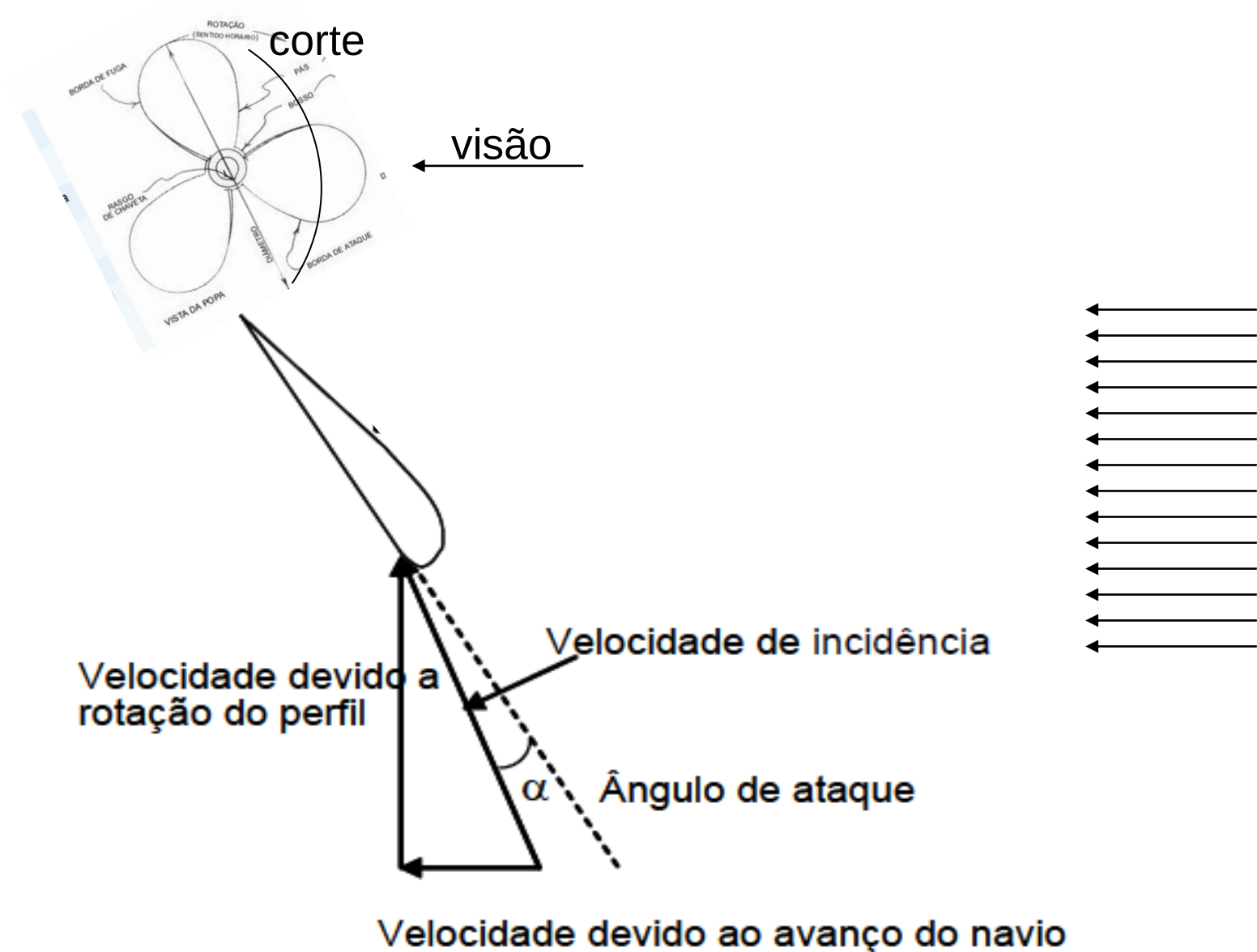


Diagrama esquemático das velocidades e forças sobre uma seção de propulsor em hélice



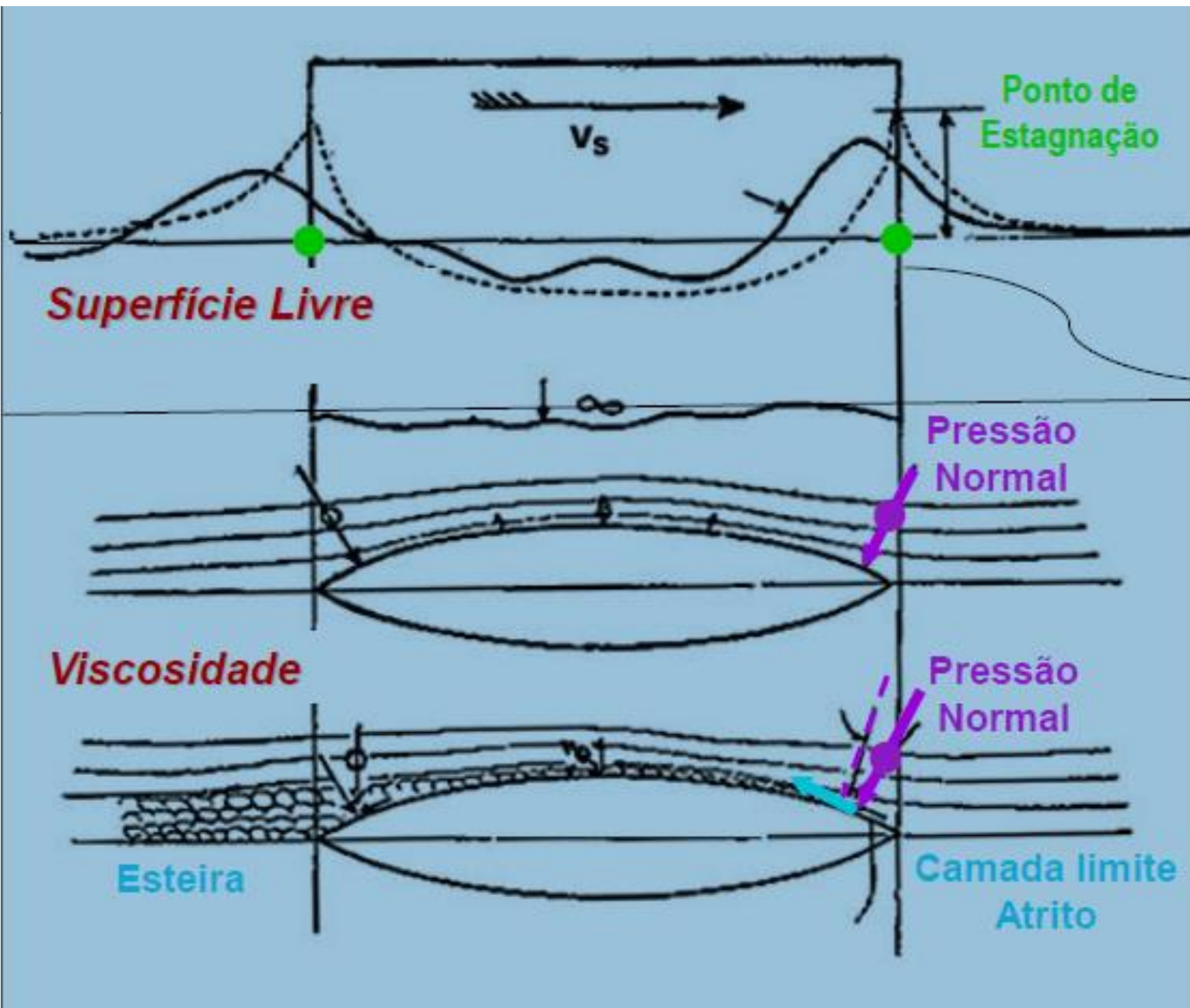
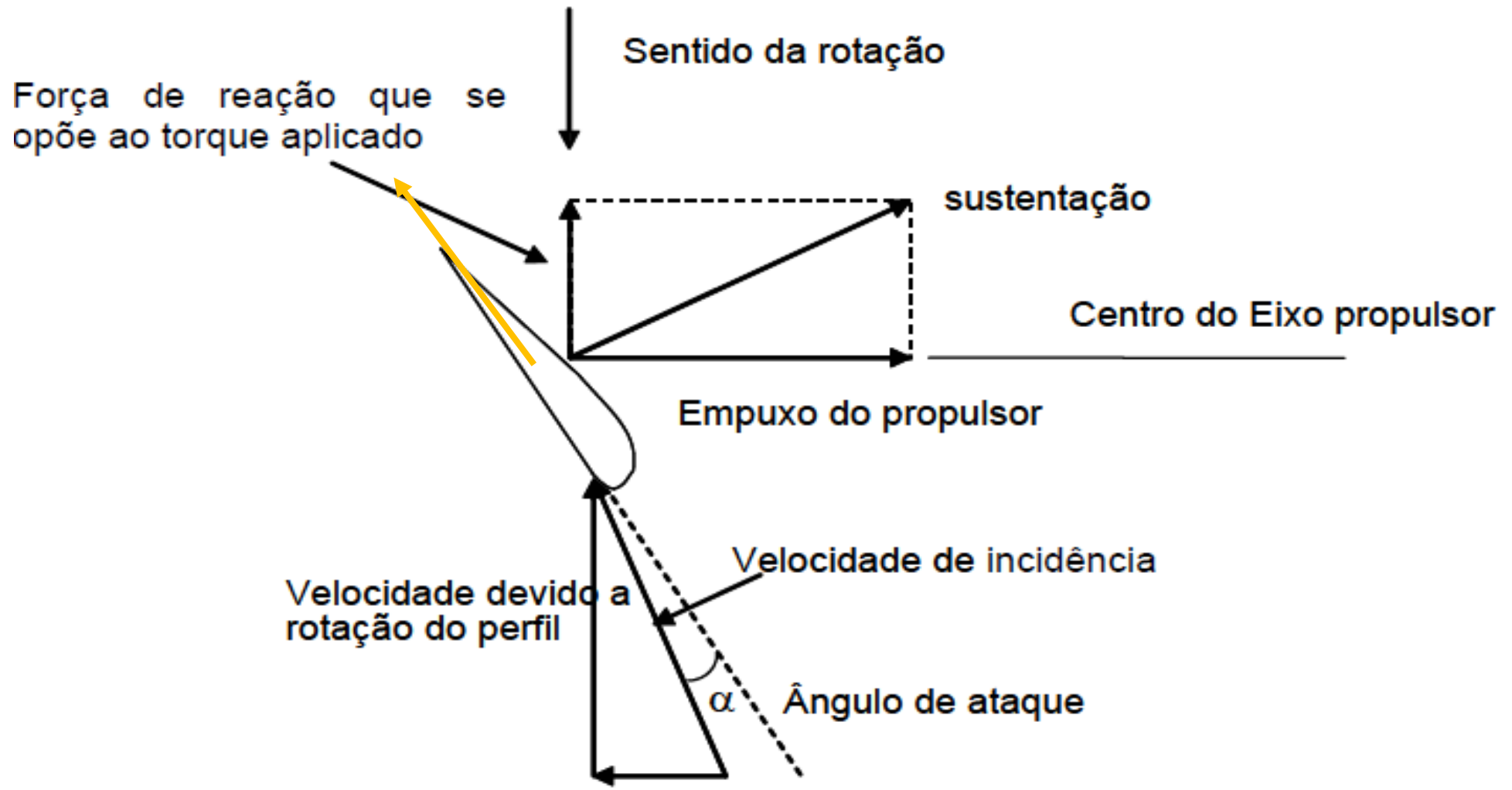


Diagrama esquemático das velocidades e forças sobre uma seção de propulsor em hélice

<https://www.youtube.com/watch?v=0bP2MH3Lqvl>



<https://www.youtube.com/watch?v=sB3rnfwnH30> – olhar cuidadoso para propulsores em diferentes ângulos de velocidade

<https://www.youtube.com/watch?v=rN5etmsr4YI> – ilustração do propulsor do navio variando ângulo de ataque

Diagrama esquemático das velocidades e forças sobre uma seção de

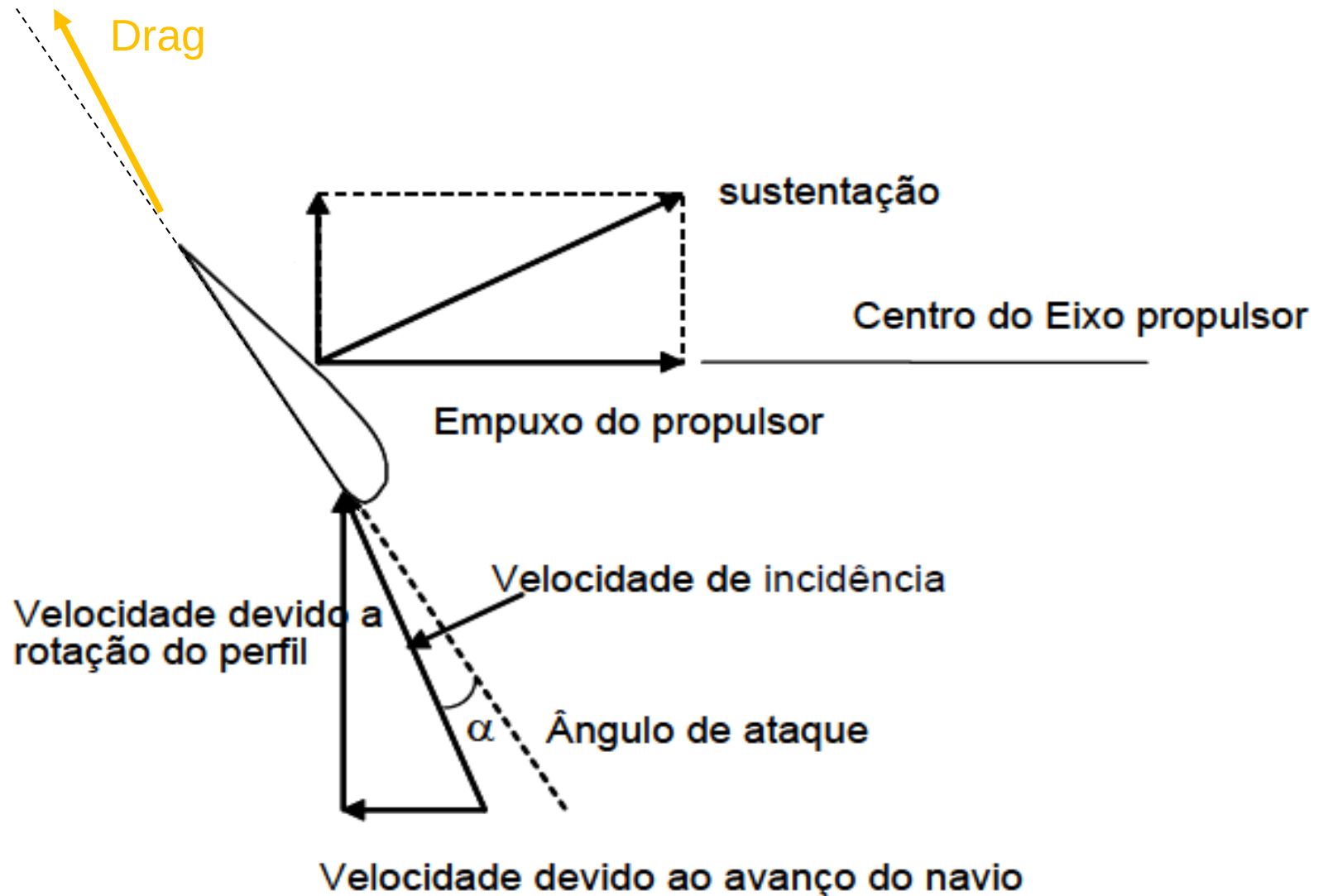
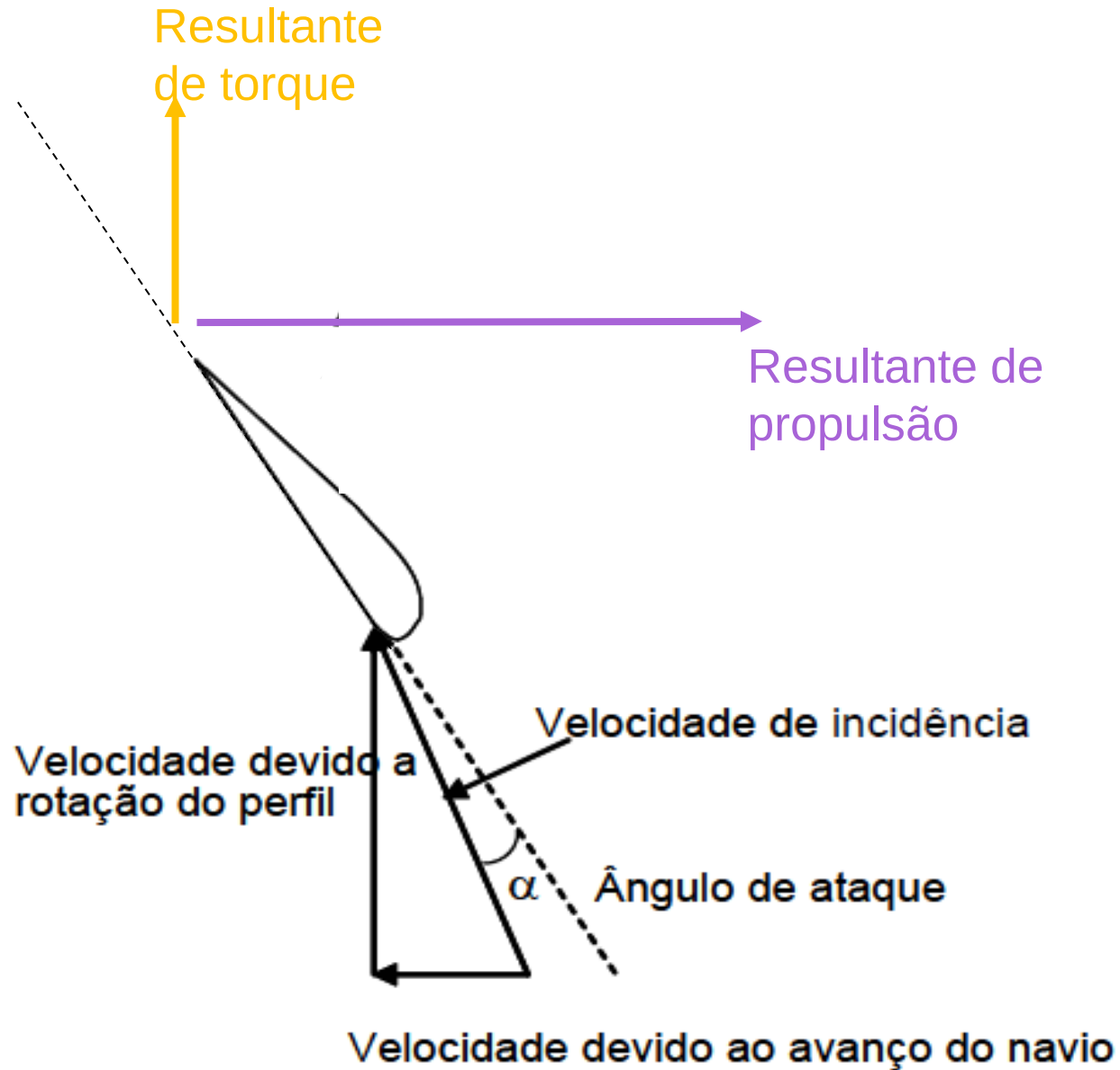


Diagrama esquemático das velocidades e forças resultantes



Geometria do Hélice

- **Diâmetro:**

- É o diâmetro do círculo que envolve o hélice. É a definição geométrica mais importante do propulsor e deve-se tentar projetar o hélice com o maior diâmetro possível, respeitando os limites da popa, para tentar obter a maior eficiência possível;

- **Passo:**

- O passo do hélice é o deslocamento linear do propulsor após uma revolução em torno do seu eixo. Como o passo não é necessariamente igual para todos os raios e para haver uniformidade na caracterização do passo entre os diversos fabricantes, convencionou-se adotar o passo do hélice (P) medido a 70% do raio do hélice e, geralmente, este valor é dividido pelo diâmetro do próprio hélice (D), definindo-se assim a razão passo diâmetro P/D . O intervalo do valor da razão passo diâmetro é, normalmente, entre 0,5 e 2,5;

Geometria do Hélice

- **Número de Pás:**

- A maioria dos hélices possuem entre 2 a 7 pás. Este número depende, dentre os fatores, do empuxo requerido, do diâmetro permissível e do nível de vibração;

- **Área do Disco do Hélice:**

- É a área do círculo cujo diâmetro é o do hélice. O símbolo a ser adotado para esta área será A_0 ;

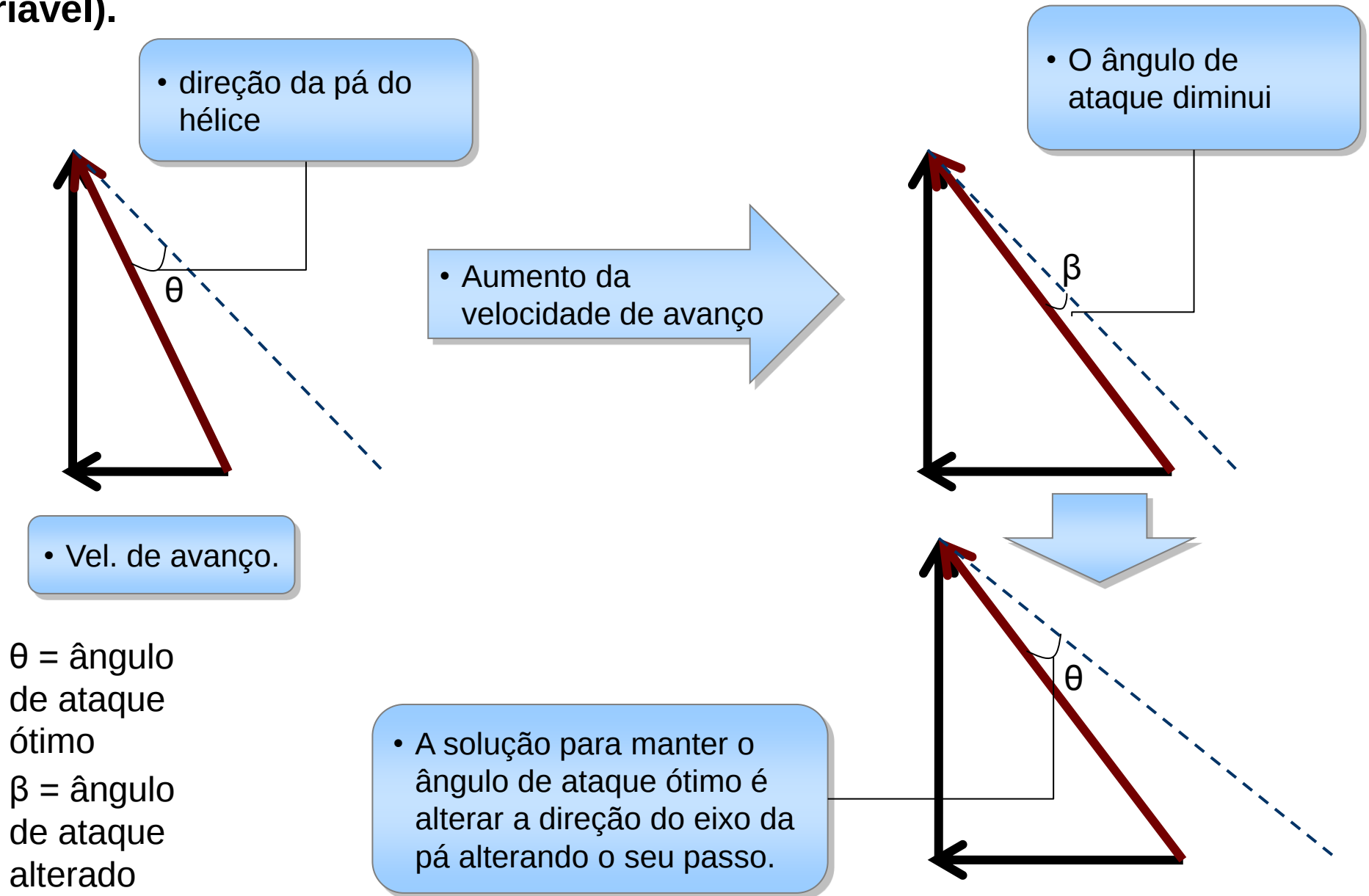
- **Área Expandida:**

- É a soma da área expandida de cada pá do hélice. O símbolo a ser adotado para esta área será A_E ;

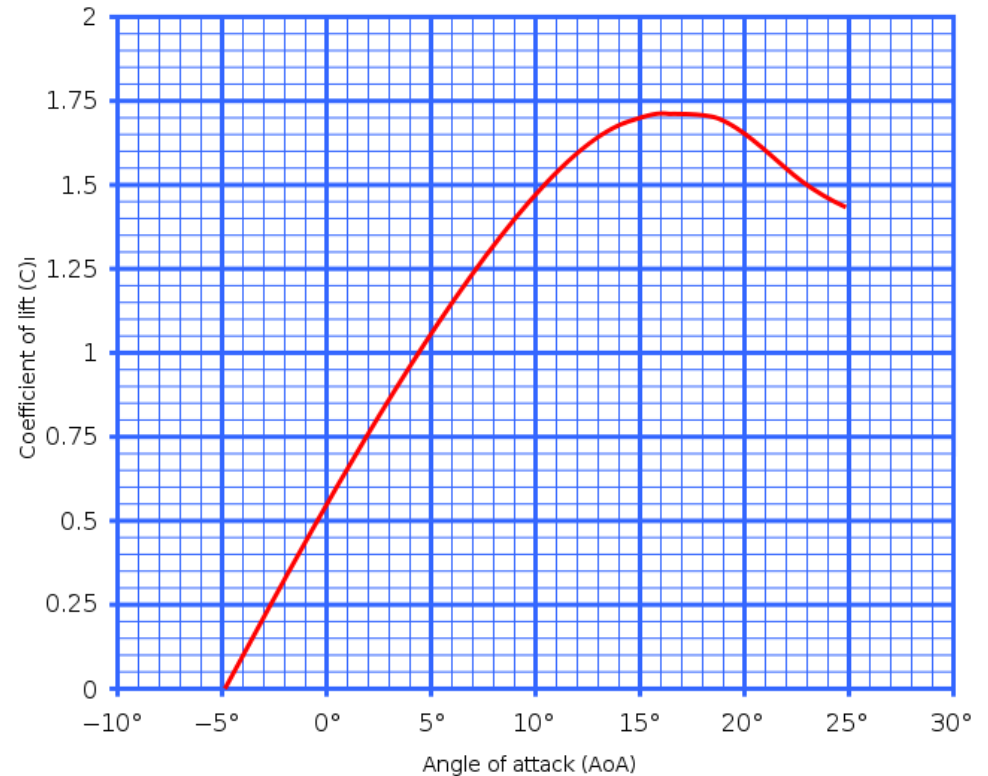
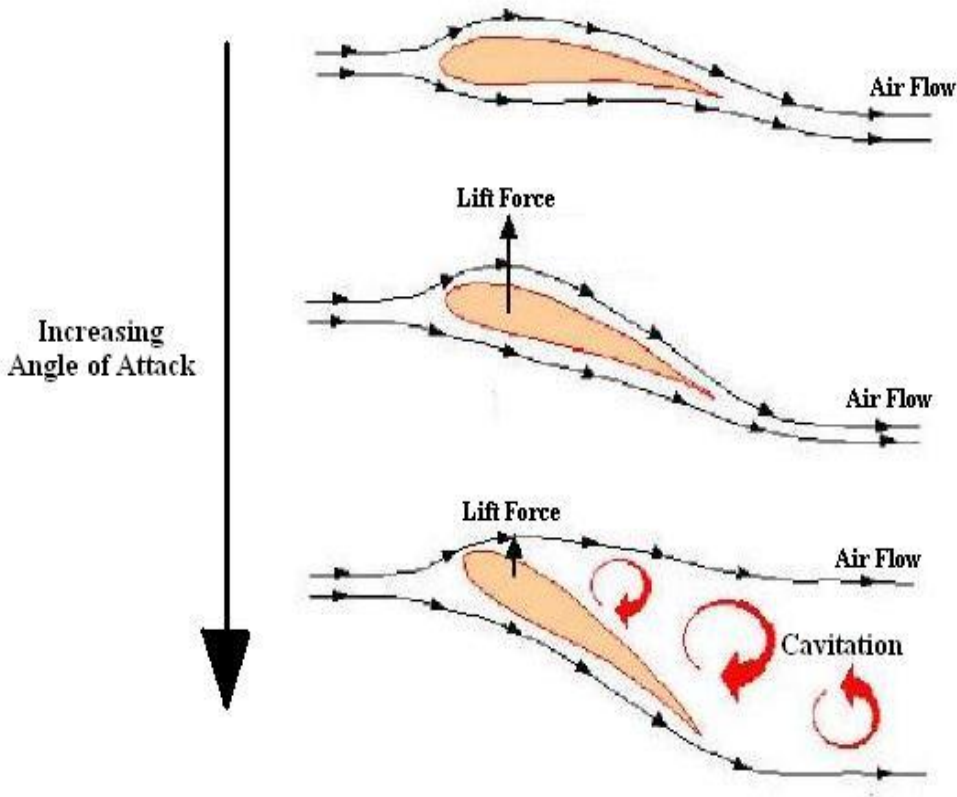
- **Razão de Áreas:**

- Muitas vezes se utiliza a razão entre essas duas áreas, isto é, $\frac{A_E}{A_0}$; para caracterizar o hélice.

A alteração da velocidade de avanço altera o ângulo de ataque, o que é compensado pela variação do passo do hélice (quando o hélice é de passo variável).

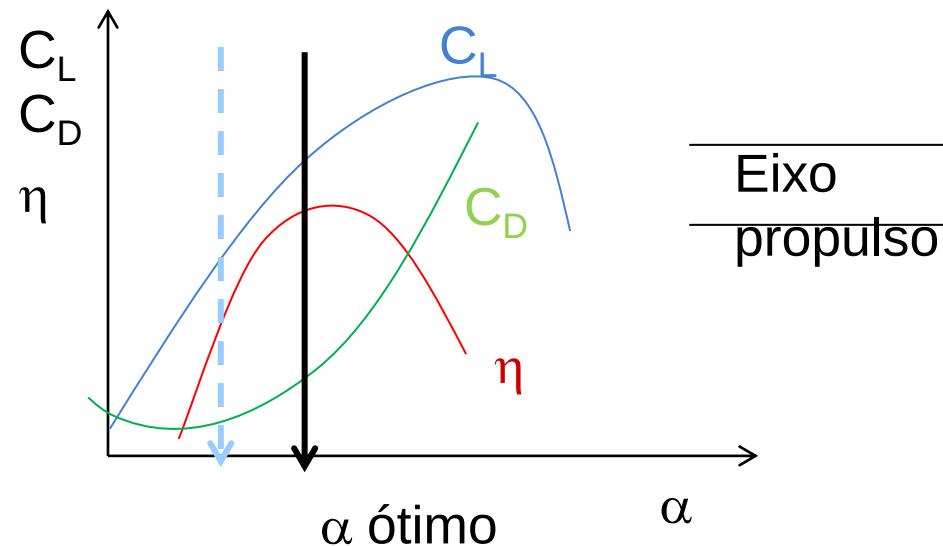
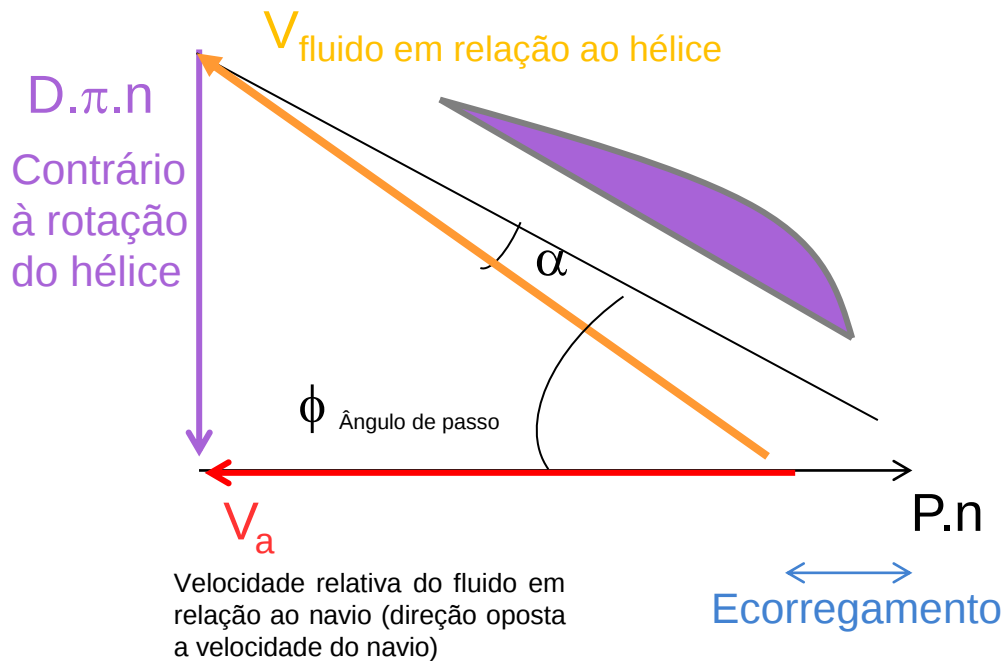


O gráfico do ângulo de ataque mostra que a partir de um certo valor, a força de sustentação começa a decair.



- O aumento da velocidade provoca um aumento no ângulo de ataque.
- O ângulo de ataque crítico é aquele no qual a força de sustentação é máxima.

Com uma rotação, a ponta do hélice viaja $D \cdot \pi()$. Nessa revolução, o hélice andou um passo adiante. Como é preciso ter um ângulo de ataque, o navio necessariamente anda um pouco menos do que o passo do propulsor e essa diferença chama-se **escorregamento**



- Considerando o comportamento dos coeficientes de lift e drag, existe uma relação ótima entre os dois, com a maior relação lift/drag. Isso acontece em ângulos de ataque em torno de 4 graus

São utilizados diversos tipos de hélices, cada uma com uma característica específica para um tipo de operação predominante

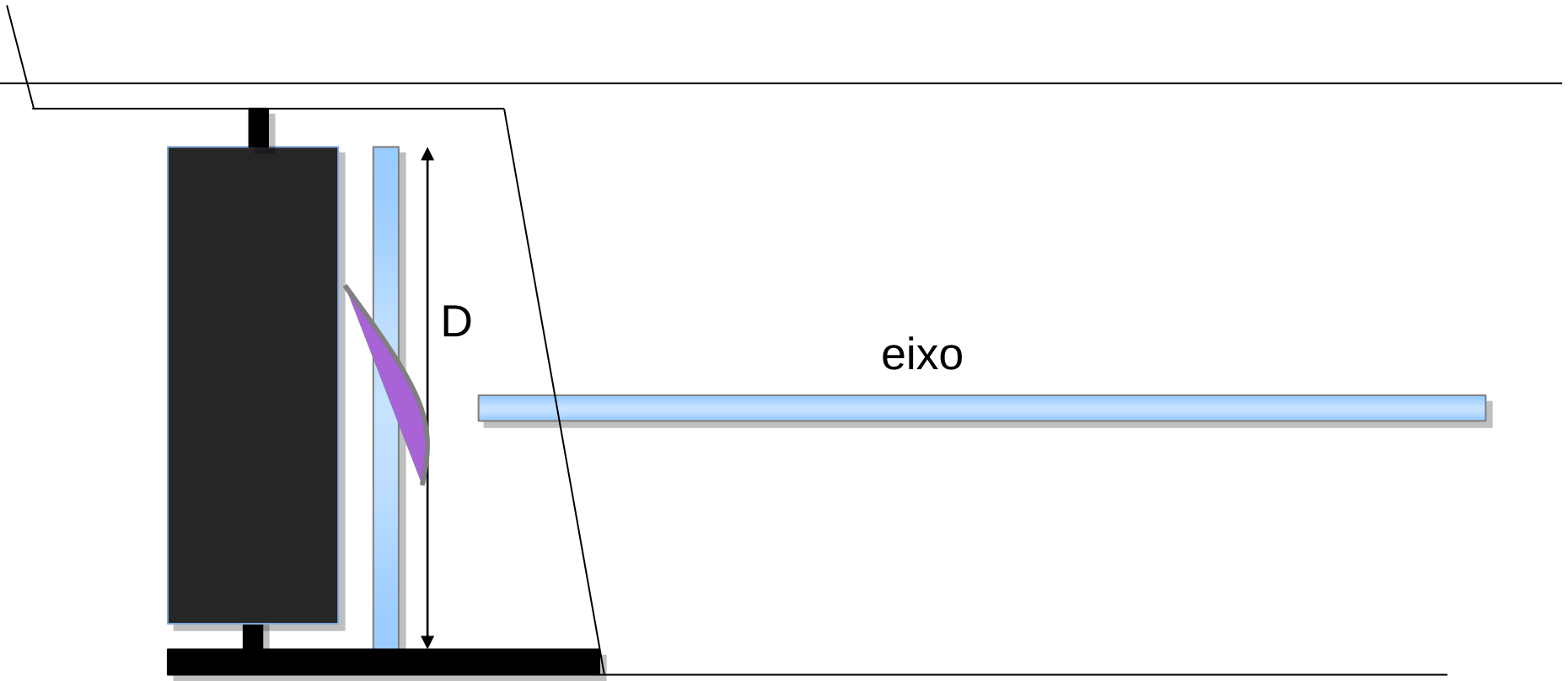
Tipos de hélices

Hélice de passo fixo é o elemento propulsor mais simples.

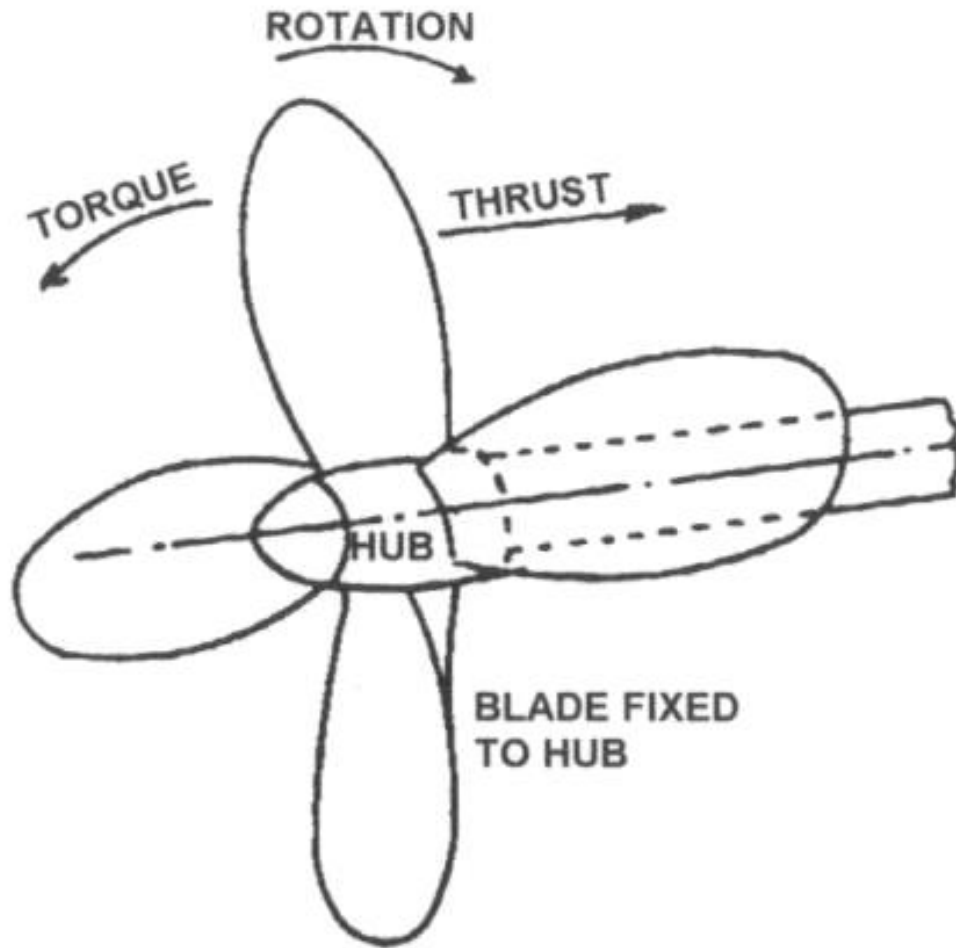
1. Mais empregado atualmente (devido a simplicidade, custo de aquisição e manutenção).
2. Passo fixo: única forma de alterar o empuxo é através da rotação → compromete a eficiência.
3. Utilizado quando há um modo de operação predominante.

- É utilizado principalmente em navios comerciais que operam na maior parte de sua vida em velocidade de cruzeiro.

O diâmetro do propulsor é usualmente escolhido como o máximo que a geometria permite, o que dá maior eficiência e resulta em menores velocidades de rotação do eixo. O desenho tenta ilustrar o disco do hélice posicionado entre o casco e o leme. Usualmente $D=80\%.H$



Esquema de um hélice de passo fixo:



Obs: para reverter o sentido do empuxo é necessário alterar o sentido da rotação do hélice

Já o hélice de passo controlável é próprio para variar a velocidade de operação da embarcação

Lista de pontos relevantes ou premissas

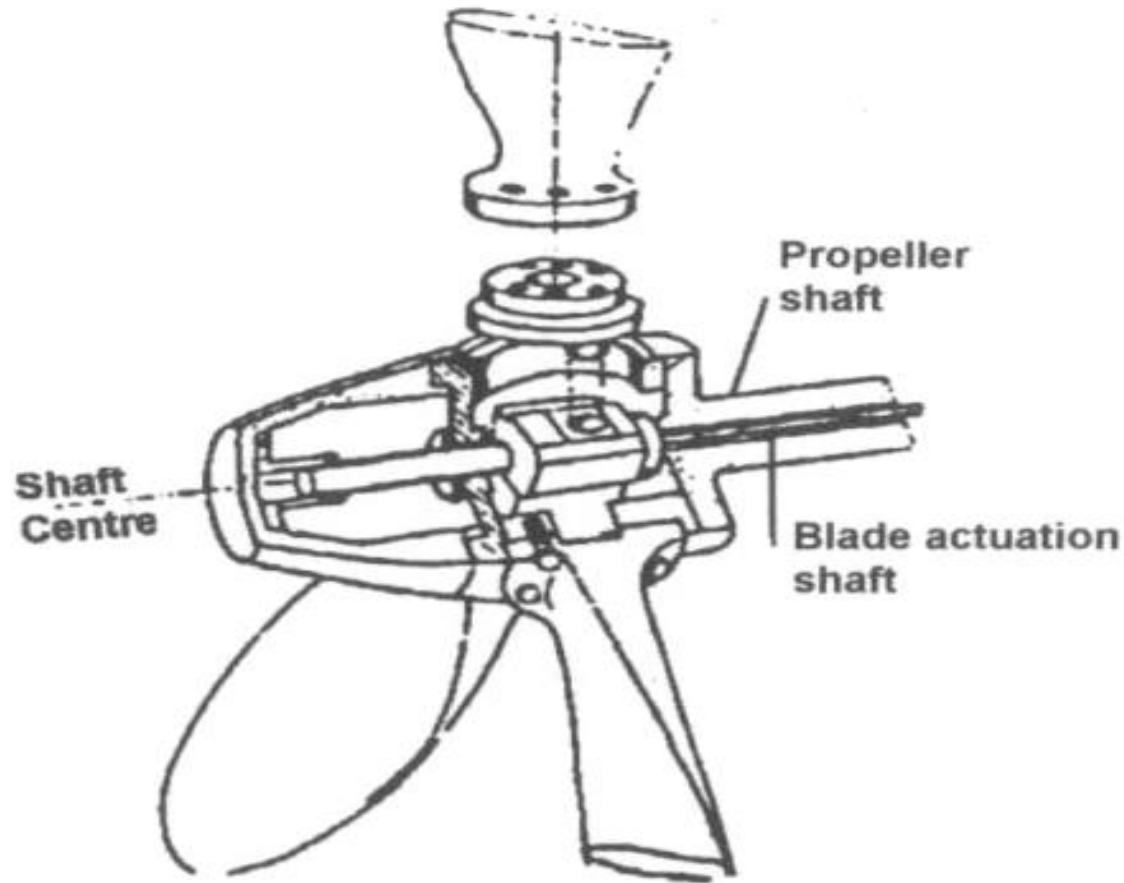
1. O empuxo é obtido alterando-se o passo e/ou a rotação do hélice.
2. Vantagens: menor arrasto dependendo da velocidade utilizada, poder mover o navio para trás (revertendo o passo), e poder recolher o propulsor quando não está sendo utilizado (o que diminui a resistência da água).
3. É utilizado quando:
 - Necessita-se alta manobrabilidade.
 - O motor não permite reversão da rotação.
 - Há duas velocidades distintas de operação.
 - Necessita-se de empuxos diferentes.

- Este tipo de propulsor é utilizado em balsas, dragas, navios de cruzeiro, rebocadores e navios de carga que não contam com rebocadores.
- <https://www.youtube.com/watch?v=0bP2MH3Lqvl> – muito interessante e com ilustrações simples

- <https://www.youtube.com/watch?v=0QqQ1j1vBgw>

Esquema de um hélice de passo controlável:

- No interior são instalados mecanismos hidráulicos que permitem girar cada pá individualmente para se obter o passo desejado, independente da rotação do motor



Contra rotating propellers



Fig 3 Podded CRP propulsion is used in Hamanatsu, built at MHI.

Hélices em dutos aumentam marginalmente a eficiência da propulsão

Lista de pontos relevantes ou premissas

1. O objetivo é aumentar o empuxo total quando o hélice está carregado.
2. O empuxo é obtido pelo hélice e pela sustentação gerada no duto.
3. Passo fixo ou controlável

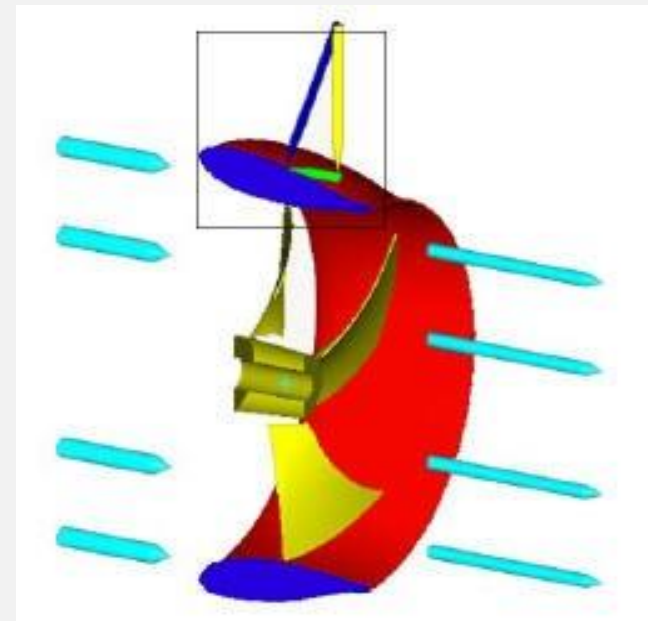
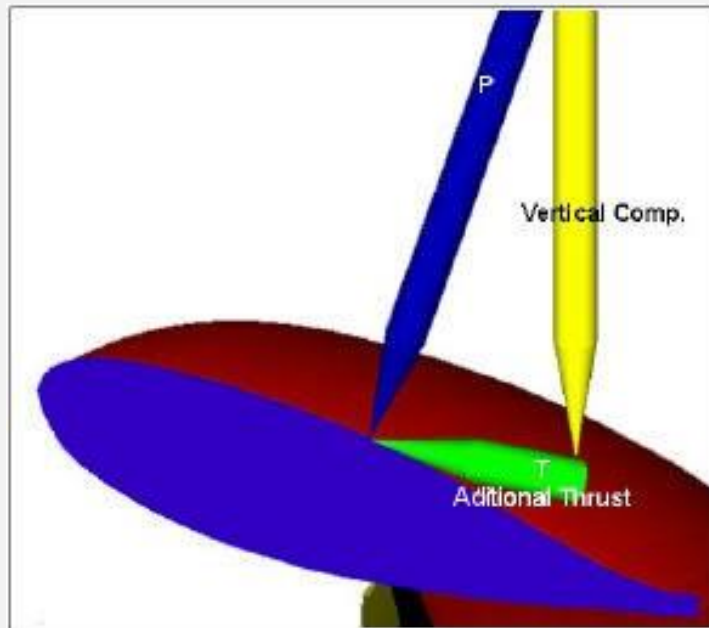


hélice em duto

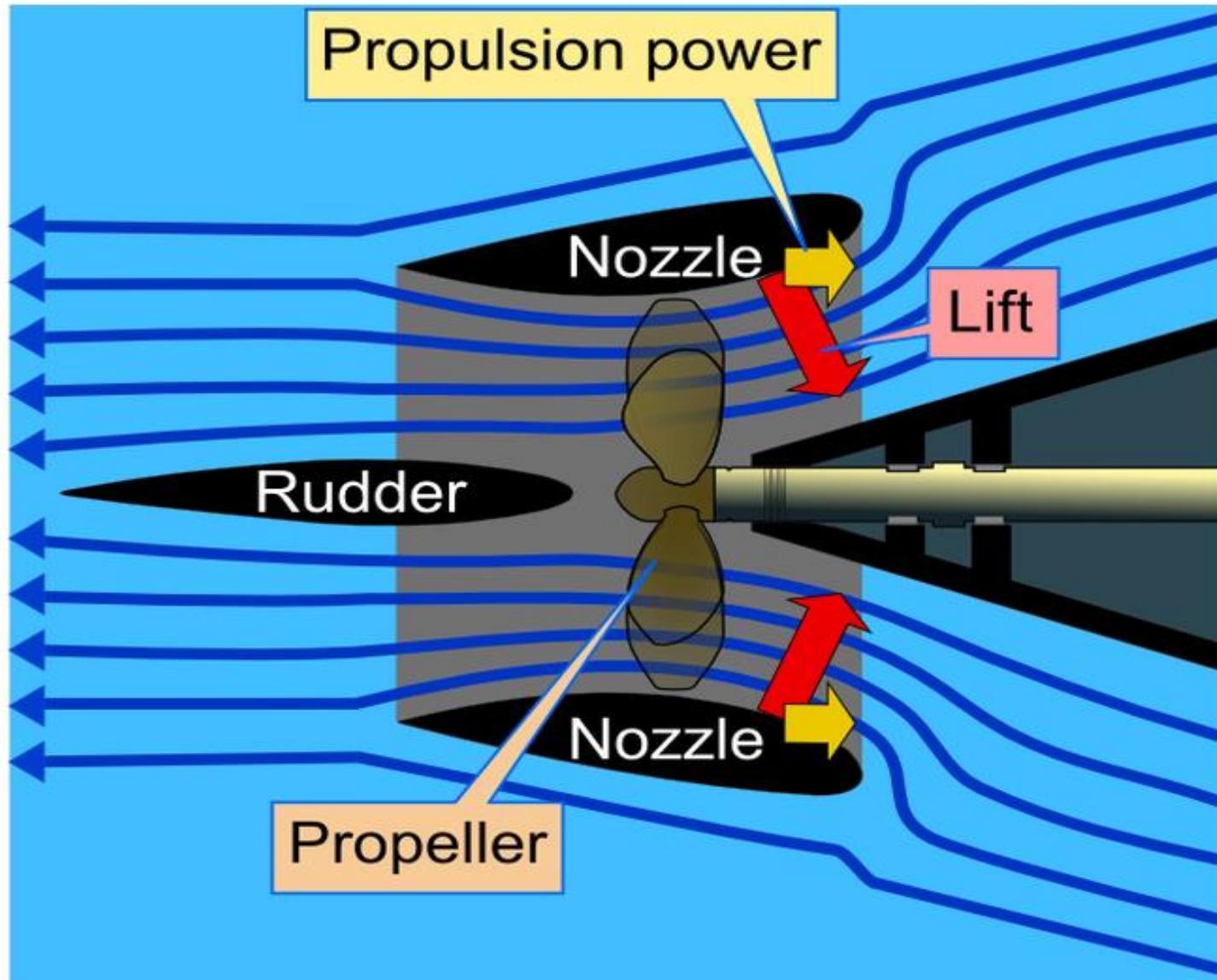
- Alguns exemplos de embarcações que utilizam esse sistema: navios rebocadores e navios pesqueiros quando arrastam sua rede.

Esquema de um hélice em dutos:

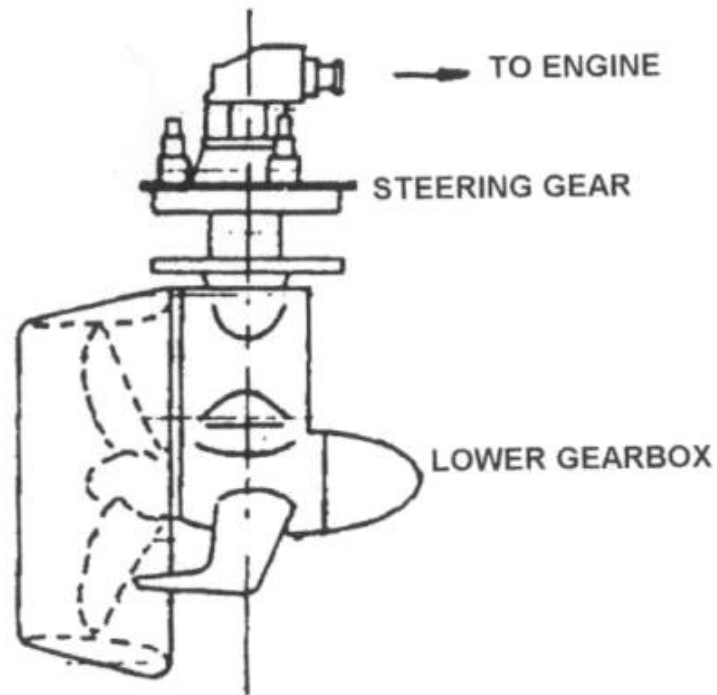
- Dinâmica do propulsor:
 - Como a seção transversal do duto na entrada da passagem da água é maior do que a seção onde se encontra a hélice, o fluxo de água sofre uma aceleração (lembrando que a densidade é constante).
 - Esse aumento da velocidade é acompanhado de uma diminuição da pressão (equação de Bernoulli) na parte interna do duto, que fica menor do que a pressão na parte externa.
 - essa diferença de pressões nas paredes do duto corresponde ao vetor em azul (P) na figura, e sua componente horizontal em verde (T) corresponde ao aumento do empuxo.



A partir de uma certa velocidade, o arrasto se torna maior do que o aumento do empuxo, o que inviabiliza o uso desse propulsor.



Esquema de um hélice azimuthal:



Obs: o acionamento é efetuado através de uma transmissão em L.

O hélice azimuthal confere alta manobrabilidade à embarcação

Lista de pontos relevantes ou premissas

1. O hélice é montado em um eixo que pode girar 360°.
2. As pás podem ou não ser controláveis e pode ou não haver dutos.
3. grande diferença em relação a outros propulsores: Pode ser instalado em qualquer lugar do navio.
4. Uma vantagem é que ele aumenta a manobrabilidade e dispensa o leme.

- Este tipo de propulsor é bastante empregado em rebocadores e plataformas que utilizam sistema de posicionamento dinâmico (necessitam de alta manobrabilidade).

O propulsor tipo POD é uma variação do hélice azimutal.

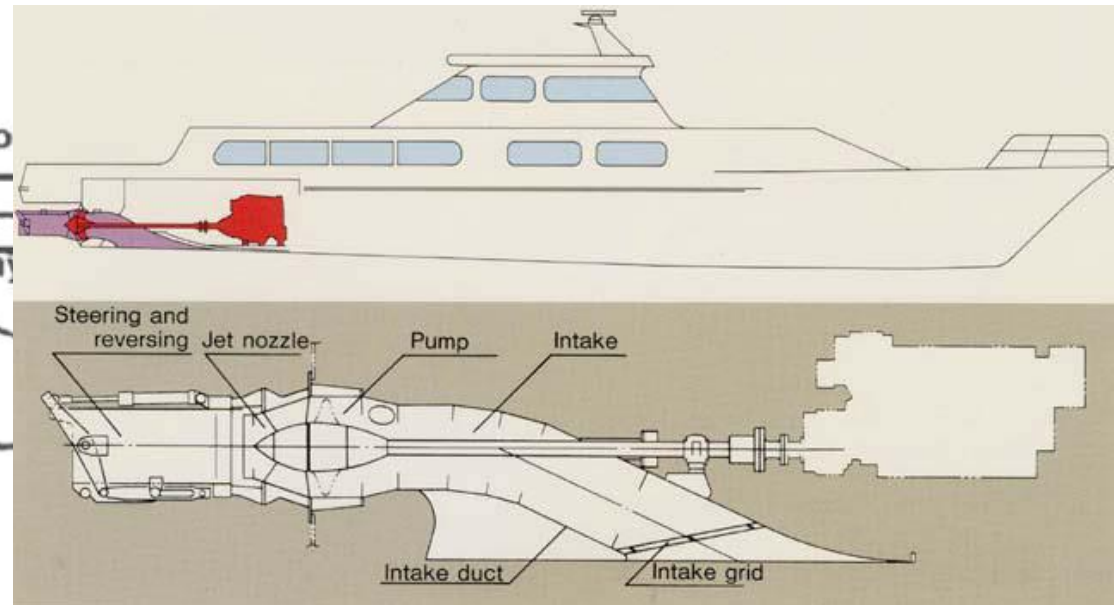
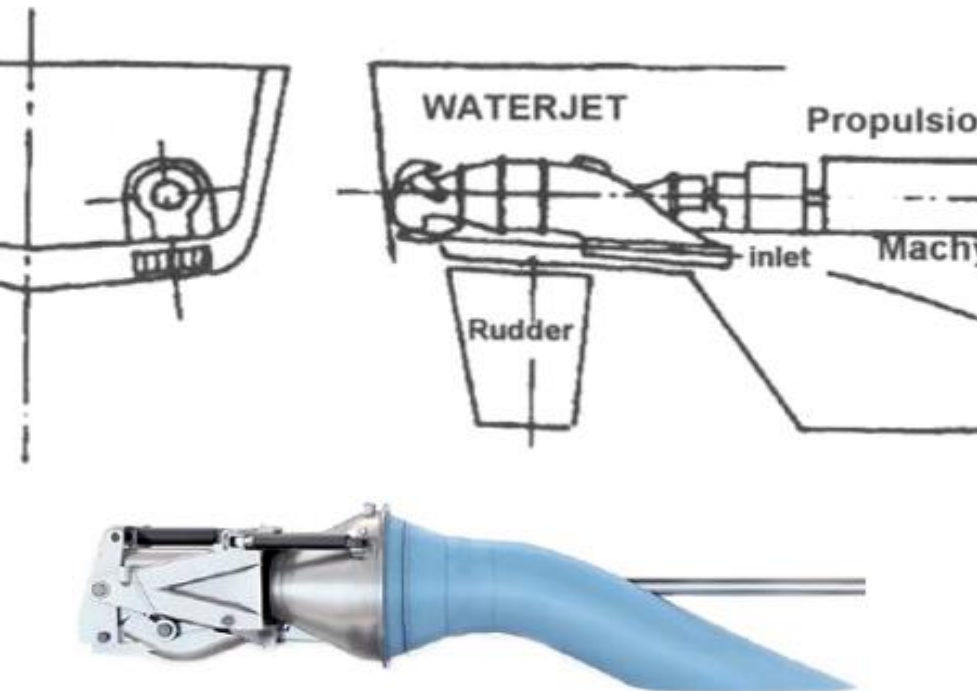
Lista de pontos relevantes ou premissas

1. Similar ao azimutal, mas com um motor elétrico colocado sob a água diretamente no eixo do propulsor ou uma transmissão em Z.
2. Usado em navios quebra-gelo e de passageiros.
3. Passo fixo
4. Eliminação do leme e melhora da manobrabilidade.
5. A eficiência é menor que ao hélice convencional e sua instalação é mais cara.



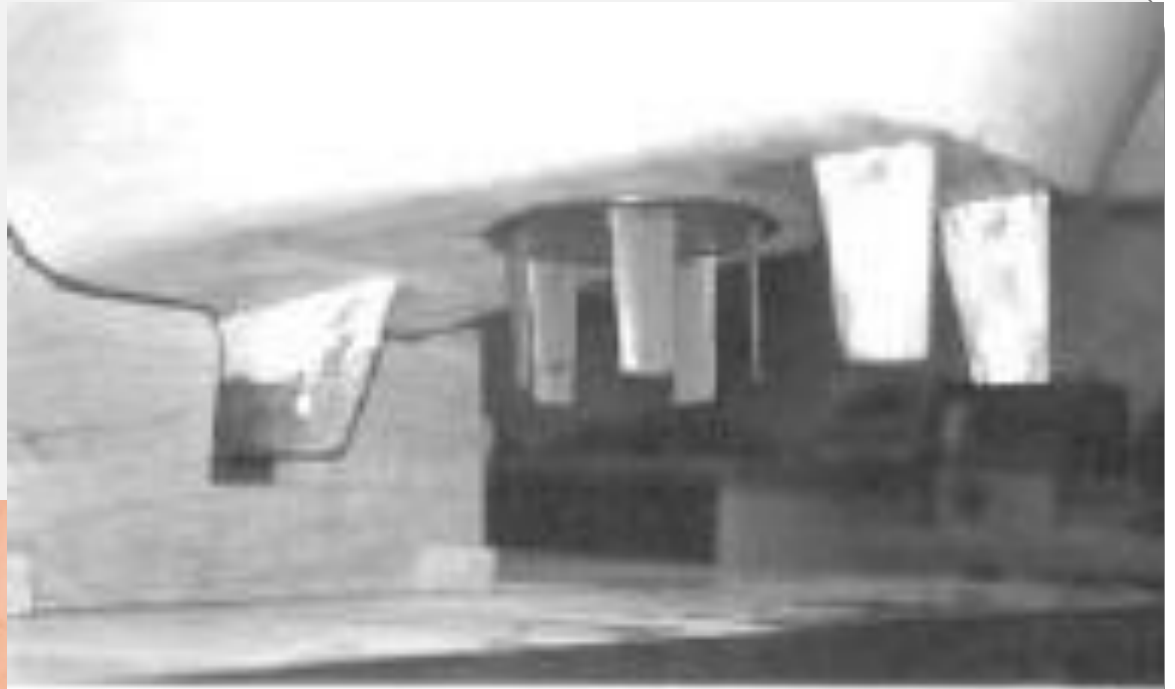
Jato-bomba

- Variação da quantidade de movimento para geração de empuxo; Uma bomba de fluido confinado é um bocal convergente que aumenta a velocidade de saída da água; Dispensa o leme.
- Pequenas embarcações com restrição de calado e embarcações maiores de alta velocidade;
- <http://www.youtube.com/watch?v=qg14dKSBYm8&feature=related>



<https://www.youtube.com/watch?v=N3WwQKZ05Uk>

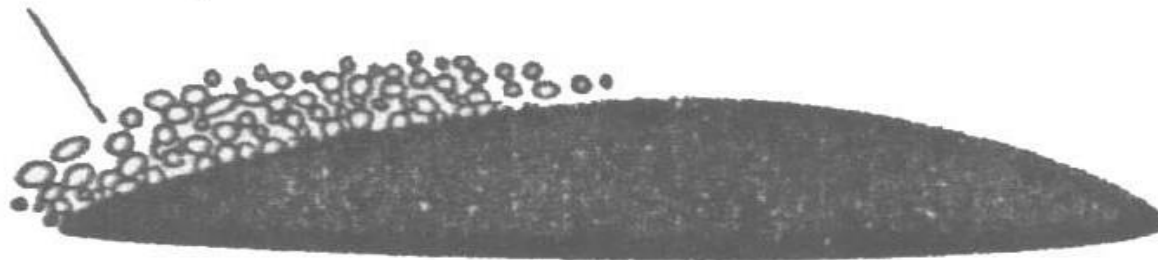
<http://www.youtube.com/watch?v=GZaPmnJKC0A&feature=related>



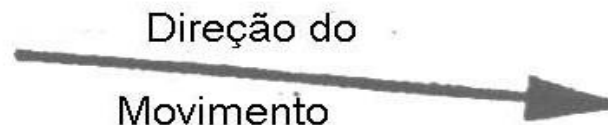
Cavitação

- A cavitação é a formação de bolhas de vapor que ocorre quando a pressão da água atinge a pressão de saturação correspondente à temperatura do fluido em torno do hélice;
- Este fenômeno é indesejável, pois além de provocar a erosão da pá, diminui a eficiência do propulsor, e provoca ruídos e vibrações.

Bolhas de cavitação colapsando
e erodindo a pá



Pá convencional



- <http://www.youtube.com/watch?v=Ffh8Ms6HrLI>
- <https://www.youtube.com/watch?v=N3WwOKZ05Uk>

Motores, Propulsores e Integração

INTRODUÇÃO

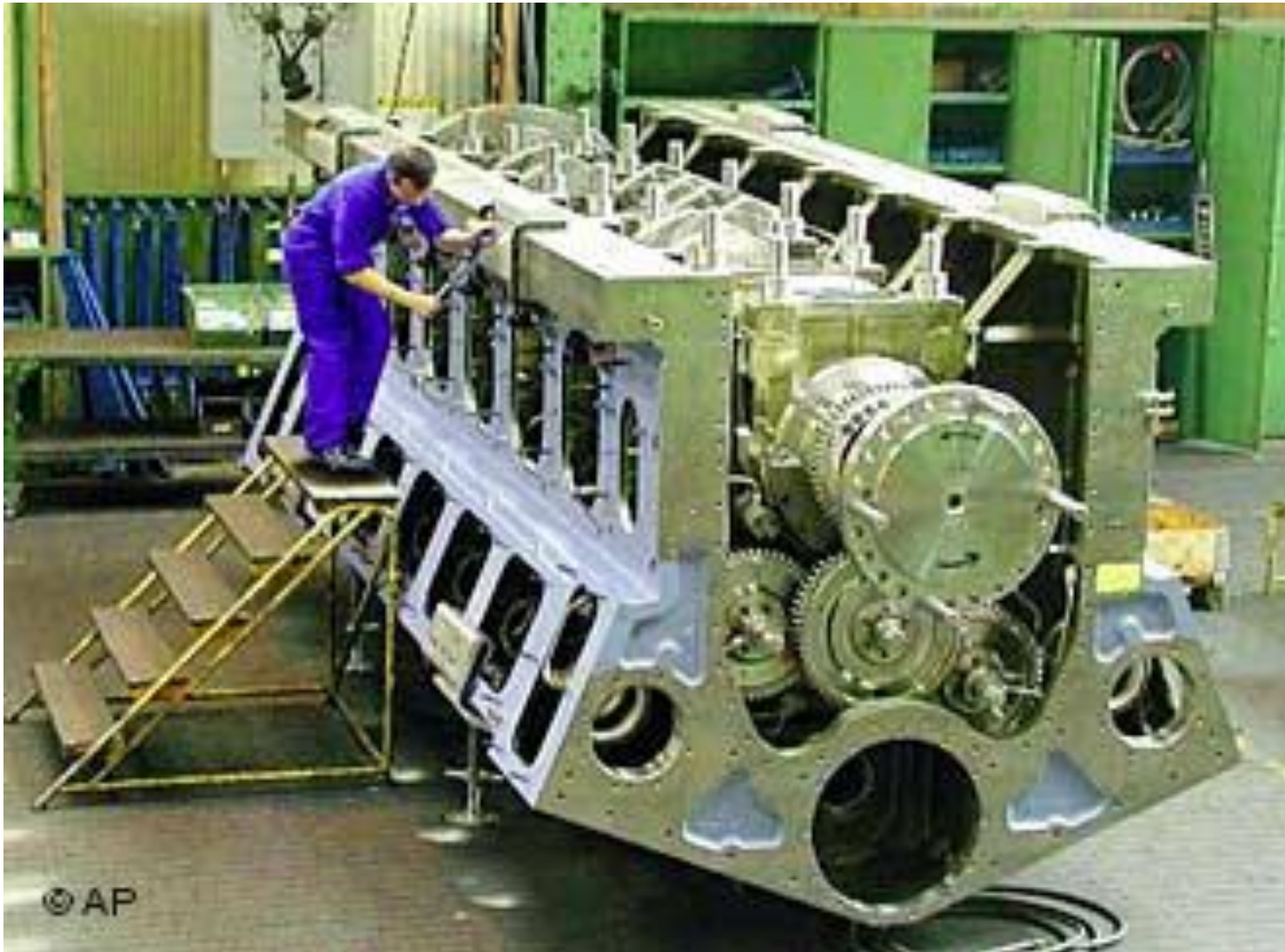
PROPULSORES



MOTORES

INTEGRAÇÃO CASCO-HÉLICE-MOTOR

Motores (Máquina principal) são os elementos responsáveis pela geração de energia para mover o propulsor



Vídeo: Inside a motor MAN

O motor diesel gera energia através da combustão do diesel, o que provoca o movimento do pistão

Definição e processos que ocorrem no motor

- Motor alternativo de combustão interna (o fluido de trabalho é o próprio gás de combustão)
- Processos que ocorrem no motor diesel:
 - a) processo 1-2: compressão isentrópica do gás;
 - b) processo 2-3 fornecimento de calor a pressão constante;
 - c) processo 3-4: expansão isentrópica do gás;
 - d) processo 4-1: resfriamento do gás a volume constante.

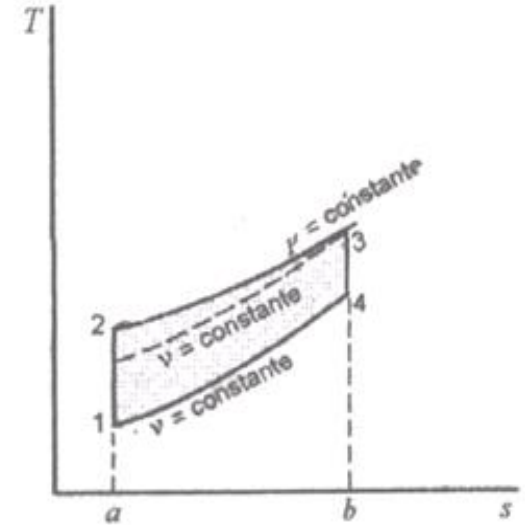


Gráfico temperatura x entropia

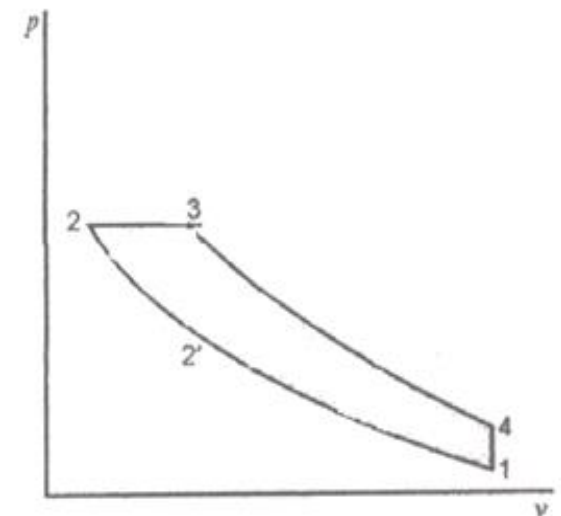
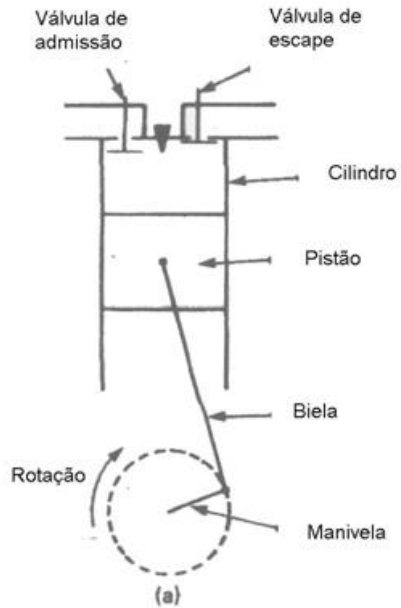


Gráfico pressão x volume

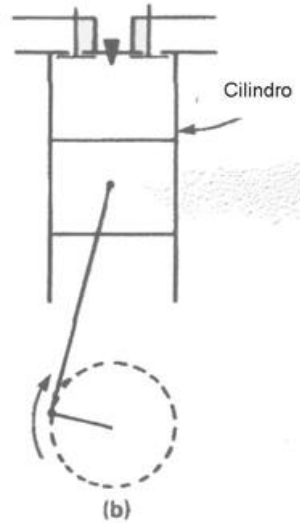
O motor de 4 tempos é um dos tipos de motor diesel

- Completa um ciclo termodinâmico em 4 deslocamentos do pistão ou duas rotações do eixo de manivela.
- São utilizados em motores de média e alta rotação.
- A ignição se dá pela compressão do combustível.
- Fases do ciclo:
 - a) Admissão do ar.
 - b) Compressão do ar.
 - c) Combustão e expansão.
 - d) Descarga dos gases da combustão.
- <http://www.youtube.com/watch?v=Lz62QU0UceQ> – peças internas de um motor 4 tempos animado
- https://www.youtube.com/watch?v=I_mZkMf4YGs – motor de veículo sofisticado
- <http://www.youtube.com/watch?v=FRO5bzBtQeQ&feature=related> motor dois tempos
- <https://www.marineinsight.com/main-engine/why-2-stroke-engines-are-used-more-commonly-than-4-stroke-on-ships/> motor 2 tempos marítimo
- <http://www.youtube.com/watch?v=3EHqRtlCoNY&feature=related> (som ruim)
- http://www.youtube.com/watch?v=7_pL3g6EIPQ&NR=1&feature=fvwp

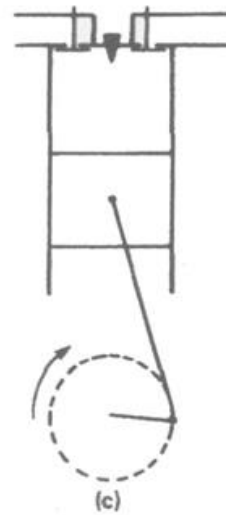
Esquema de operação de um motor de 4 tempos:



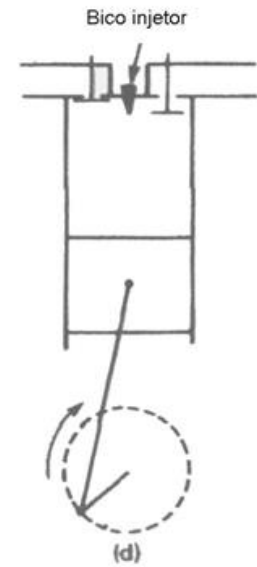
a) Admissão do ar



b) Compressão do ar

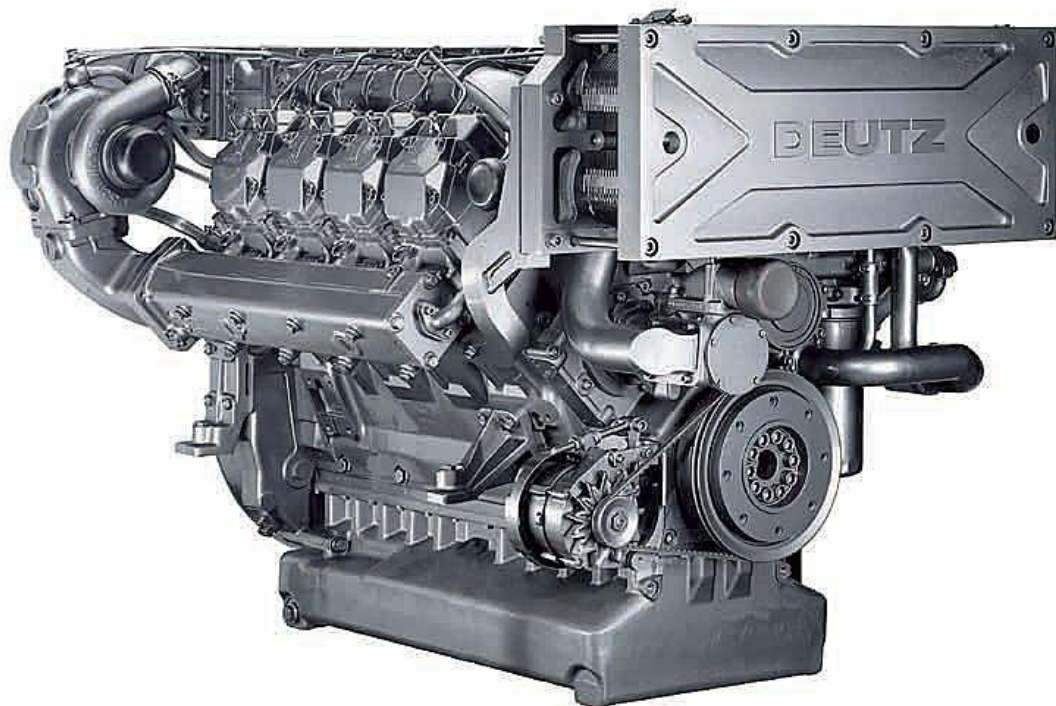


c) Combustão e expansão

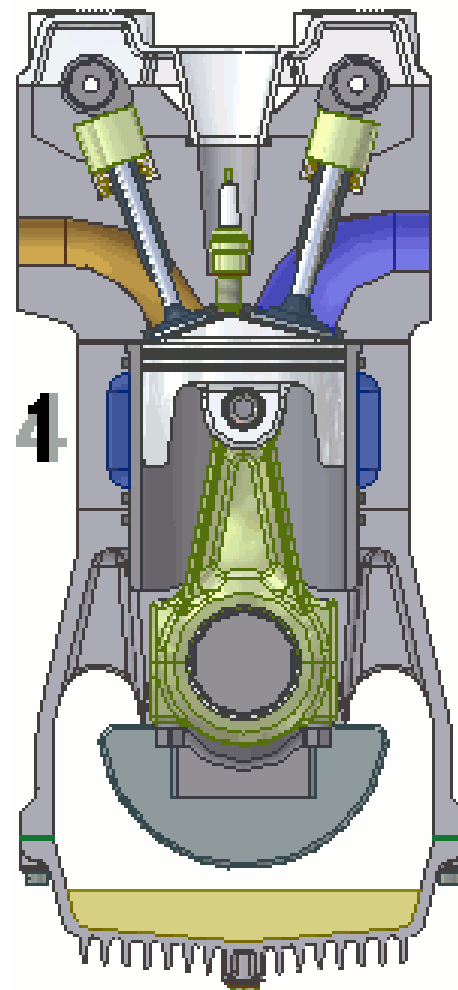


d) Descarga dos gases

Motor de 4 tempos:



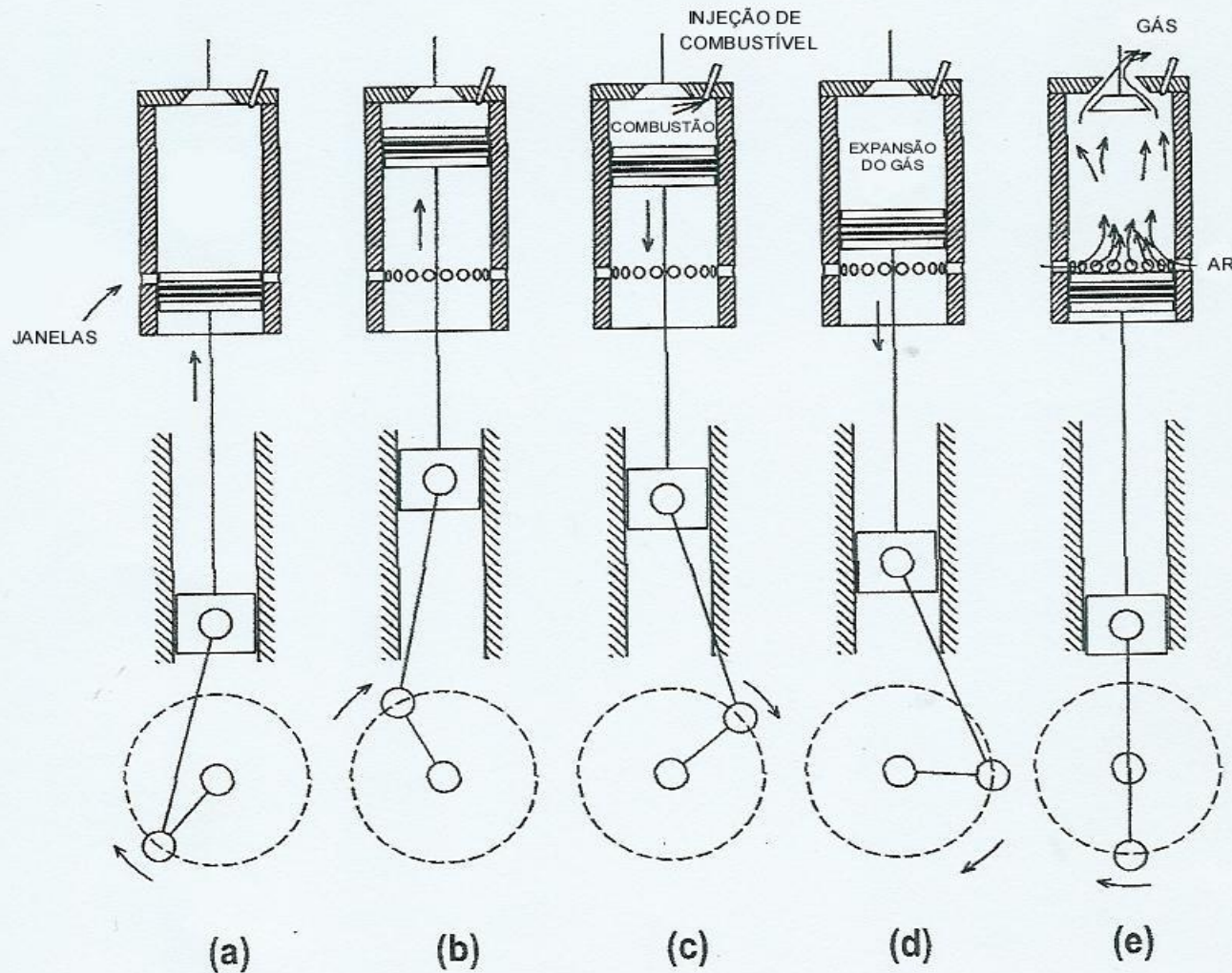
Exemplo de motor diesel marítimo de 4 tempos
(Motor 1015M)



motor de 2 tempos

- Completa o ciclo termodinâmico em 2 cursos do pistão ou uma rotação do eixo de manivela
- Este tipo de ciclo é usado em motores de baixa rotação e potência elevada.
- Atualmente, todos os motores diesel marítimo de 2 tempos utilizam o turbo - compressor para comprimir o ar de admissão (também pode ser usado no de 4 tempos).
- Fases do ciclo:
 - a) Compressão.
 - b) Combustão.
 - c) Expansão.
 - d) Descarga e admissão do ar.

Esquema de operação de um motor de 2 tempos:



a) início da compressão

b) final da compressão

c) combustão

d) expansão

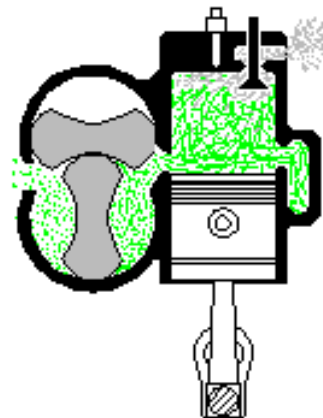
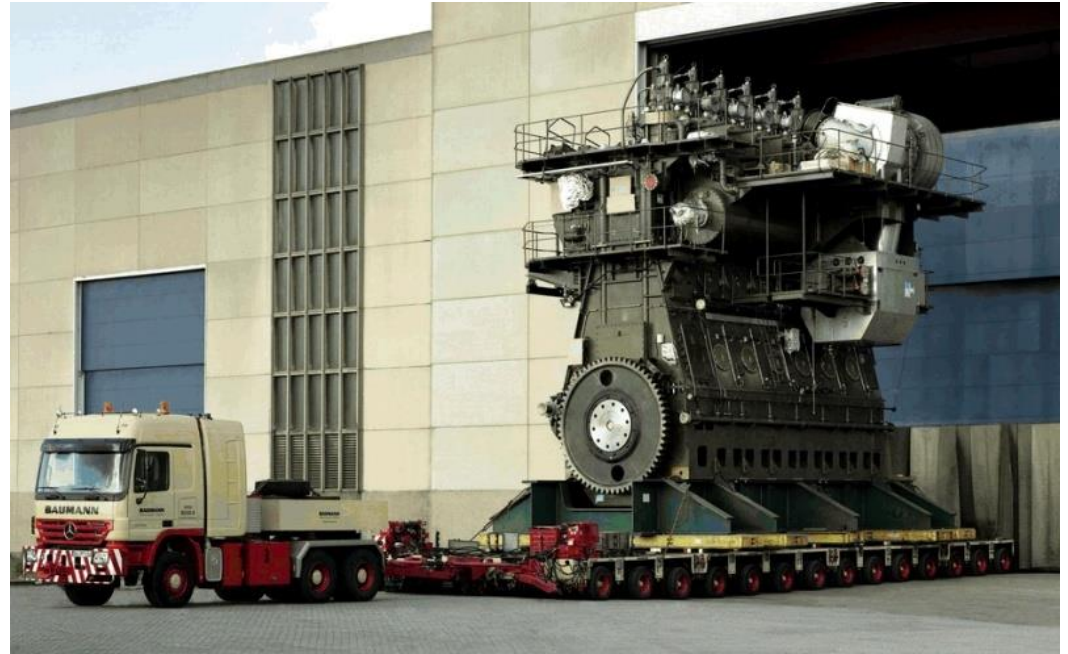
e) descarga dos gases e
admissão de ar

Motor de 2 tempos:

Wartsila-Sulzer RTA96-C
turbocharged two-stroke diesel engine



Wartsila-Sulzer RTA96-C turbocharged two-
stroke diesel engine

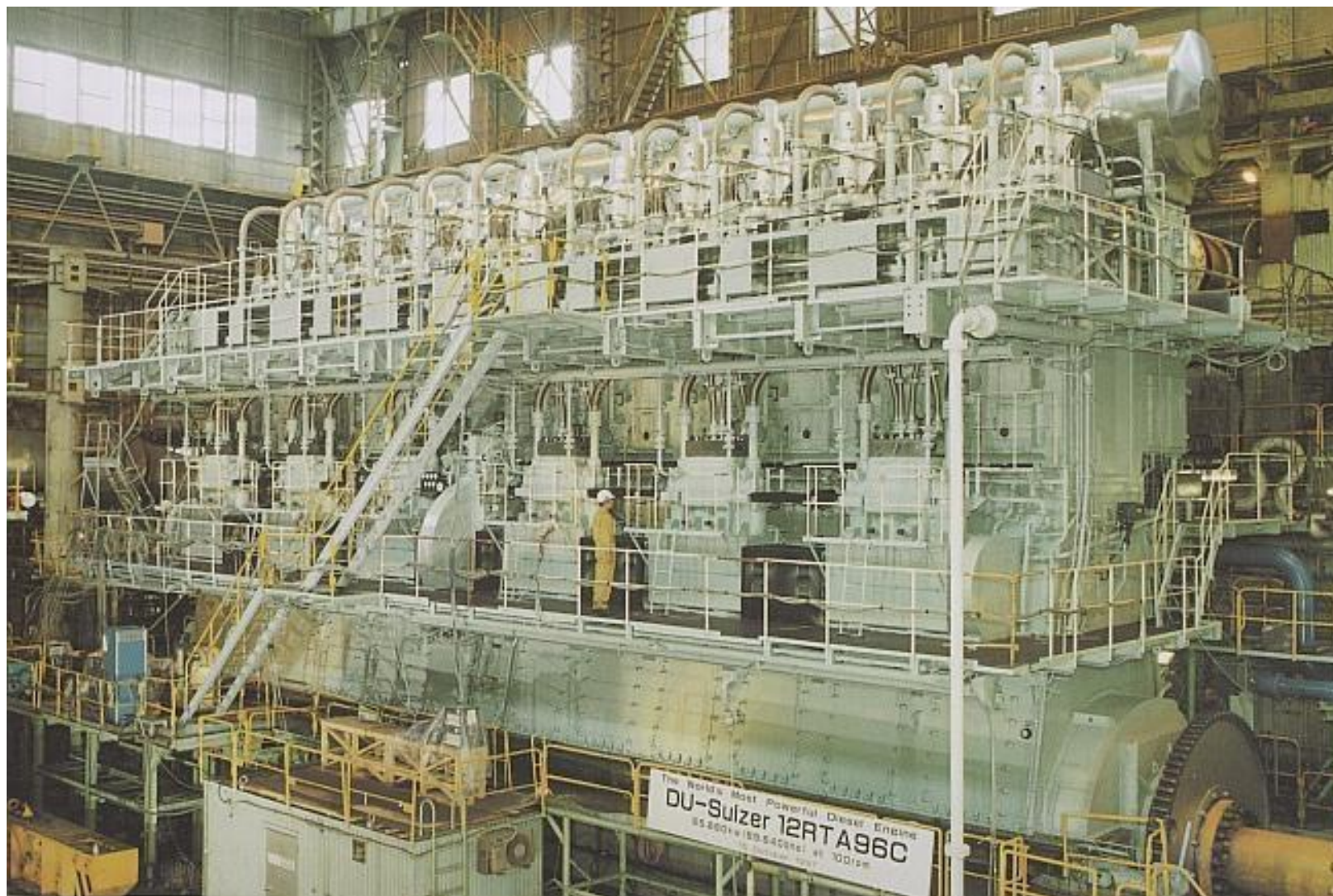


Faixas de rotação do motor, as quais estão diretamente ligadas à potência desenvolvida.

a) Baixa rotação (de 60 a 150 rpm):

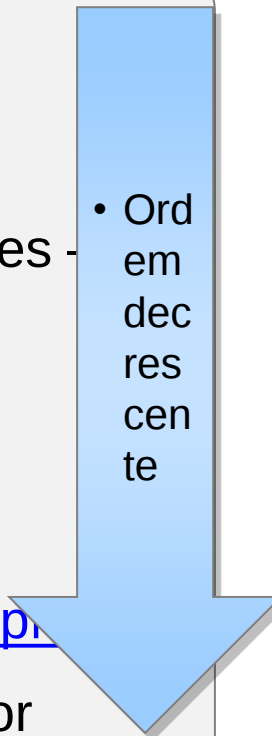
- motor de 2 tempos.
- mais utilizado em navios mercantes de grande porte.
- faixa de potência de 2500 a 82000 kW.
- como sua rotação é baixa, o motor tem que ser grande e pesado.
- consome óleo com alta viscosidade (bunker C), que tem o menor preço do mercado.
- motor com menor consumo específico de combustível.
- permite a reversão da rotação.

Exemplo de um motor de baixa rotação



Maior motor construído até o momento (81700 kW a 102 rpm)

- <https://www.youtube.com/watch?v=SIXTp77-8MY>
- Motor de navio Discovery – show - indisponível
- https://www.youtube.com/watch?v=cguw_CWKE00
- Mostra cada equipamento da praça de máquinas apresentando nomes legais mas longo 23min
- <https://www.youtube.com/watch?v=4M9T2n4r3Fw>
- Operação de abastecimento de bunker em um porto
- https://www.youtube.com/watch?v=wSBAQ7E6T_8
- Tour Praça de máquinas <https://www.youtube.com/watch?v=Jfqggbf2Avp>
- <https://www.youtube.com/watch?v=kiaYL9sp8Eo> – antigo motor à vapor
- <https://www.youtube.com/watch?v=d7dm0MkeT7w> – eficiência e gases estufa
- <https://www.youtube.com/watch?v=w4uMX5mWAF4> – fabricação e montagem de motores diesel



- Ordem decrescente

Faixas de rotação do motor

b) Média rotação (de 450 a 800 rpm):

- normalmente empregados na geração de energia elétrica do navio
- pode ser conectado direto ao hélice em embarcações de pequeno porte; nos de grande porte, normalmente, utiliza-se um redutor.
- pode ser empregado nos sistemas diesel-elétrico.
- o motor deste tipo com maior potência é de 23450 kW.

Faixas de rotação do motor

c) alta rotação (de 1000 a 3000 rpm):

- em navios comerciais, são utilizados em embarcações pequenas e nos navios com instalações diesel-elétrica.
- utilizado em embarcações militares, pois se exige alta potência em um espaço reduzido.
- potência máxima encontrada deste motor é de 7400kW.
- desvantagem: consome somente óleo Diesel (menor viscosidade) com preço bem maior do que o Bunker C.

Como obter mais potência de um motor?

- **Aumentar a cilindrada** - mais deslocamento volumétrico significa mais potência porque permite queimar mais combustível durante cada rotação do motor. É possível aumentar a cilindrada usando cilindros maiores ou acrescentando mais cilindros ou por meio de maior curso dos pistões;
- **Elevar a taxa de compressão** - taxas de compressão mais altas produzem mais potência, até certo ponto. Entretanto, quanto mais se comprime a mistura ar-combustível, maior a possibilidade de que parte da mistura na câmara detone;
- **Colocar mais ar em cada cilindro** - é possível empurrar mais ar (e portanto mais combustível) para um cilindro de determinado tamanho (do mesmo modo que se faria aumentando o tamanho do cilindro). Os turbocompressores e compressores pressurizam o ar que entra para que seja fornecido efetivamente mais ar aos cilindros;

Como obter mais potência de um motor?

- **Resfriar o ar na admissão** - comprimir o ar aumenta sua temperatura, mas é melhor ter o ar mais frio possível no cilindro (quanto mais quente o ar, menos denso ele se torna, menos oxigênio por volume);
- **Facilitar a entrada de ar** - à medida que o pistão se move no seu curso de admissão, a resistência do ar pode “roubar” potência do motor. A resistência do ar pode ser fortemente diminuída colocando uma válvula maior ou, preferencialmente por questão de peso, mais passagens de ar;
- **Diminuir o peso dos componentes** - componentes leves ajudam o motor a ter um desempenho melhor. Cada vez que um pistão muda de direção ele perde energia. Quanto mais leve o pistão, menos energia ele dissipa. Essa é também a razão de se usar duas válvulas menores em vez de apenas uma grande;

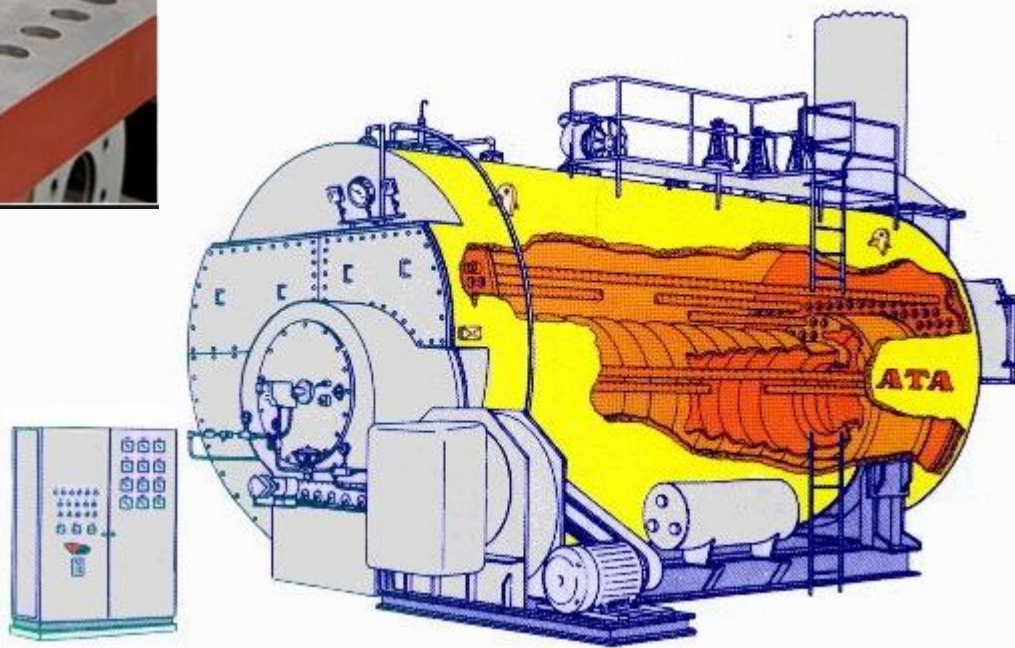
A turbina a gás é um tipo de máquina principal que confere elevada potência para a embarcação



Turbina a gás da MGB 2009

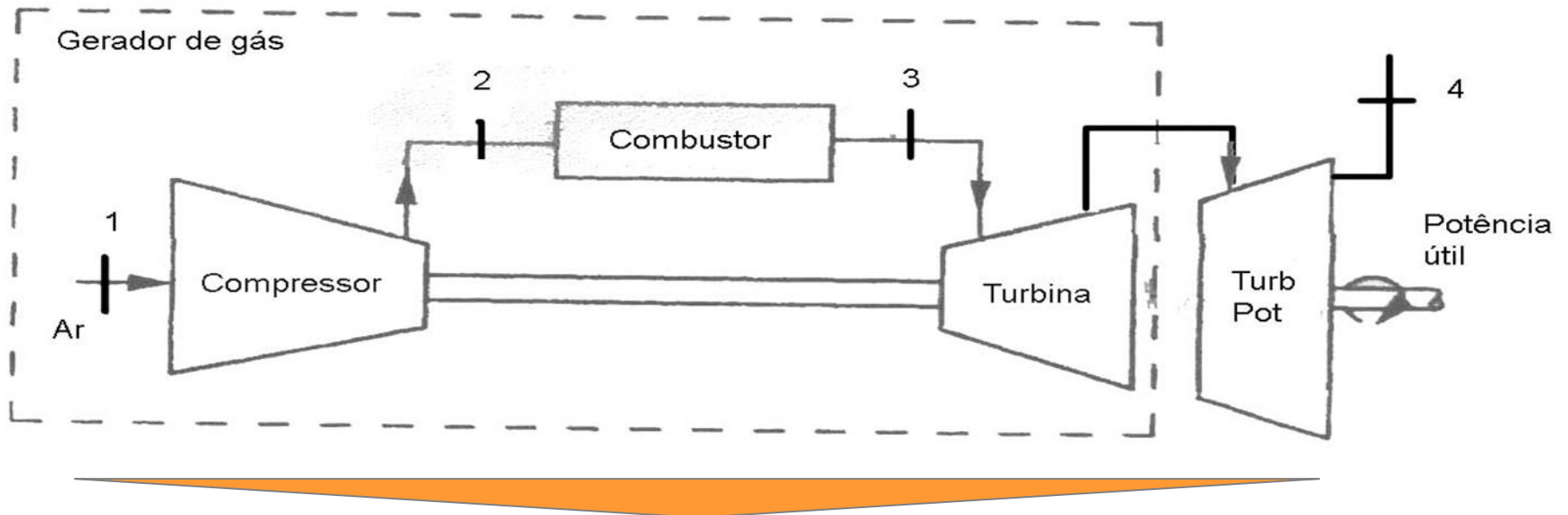
Turbina a vapor





Turbina a gás ou querosene : esquema de funcionamento

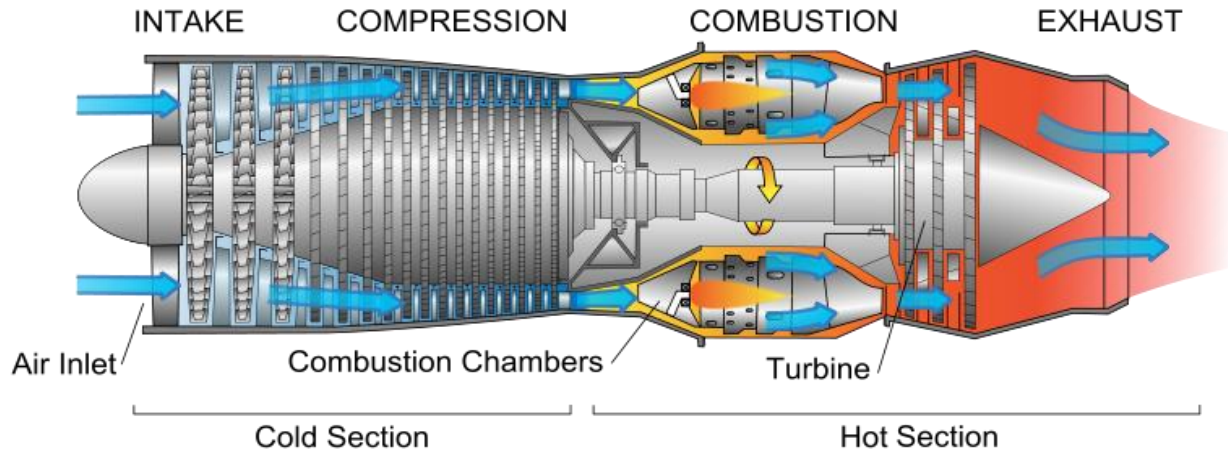
ARRANJO DOS COMPONENTES DA TURBINA A GÁS



- O ciclo é realizado por um compressor, um combustor e uma turbina, conforme o arranjo da figura acima.
- O processo ocorre em 2 etapas, uma que aciona o compressor e outra que aciona a carga (turbina de 2 eixos).
- A rotação da turbina de potência (a que aciona a carga) é da ordem de 3600 rpm. É necessário utilizar engrenagem redutora.

Turbina a gás ou querosene

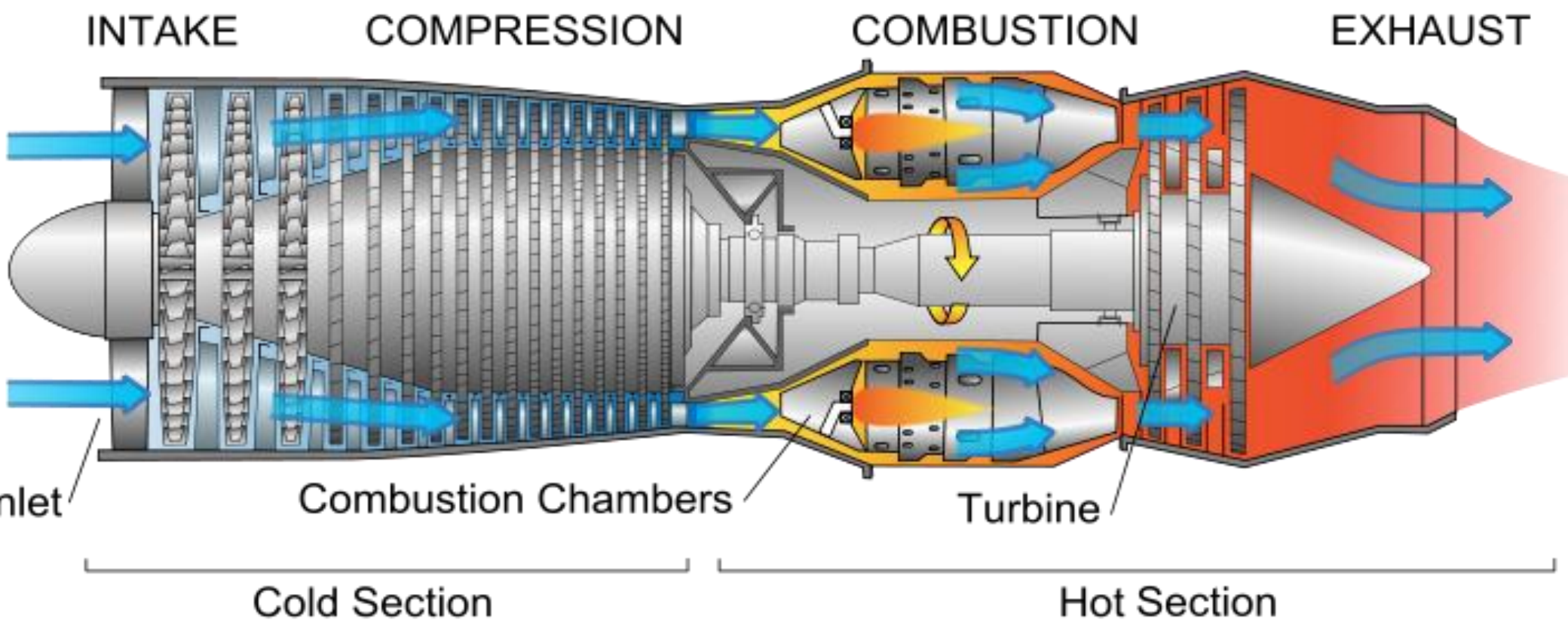
Representação do caminho do ar no interior da turbina



Dados para suporte à argumentação

Principal vantagem	Principal desvantagem
Relação potência/peso e potência/volume	Excessivo consumo de combustível quando comparado com motores diesel de baixa rotação.

- Muito utilizada em embarcações militares onde se exige alta potência em espaço reduzido para a praça de máquinas.
- A turbina a gás não permite a reversão da rotação obrigando com isto a utilização de hélice de passo controlável.

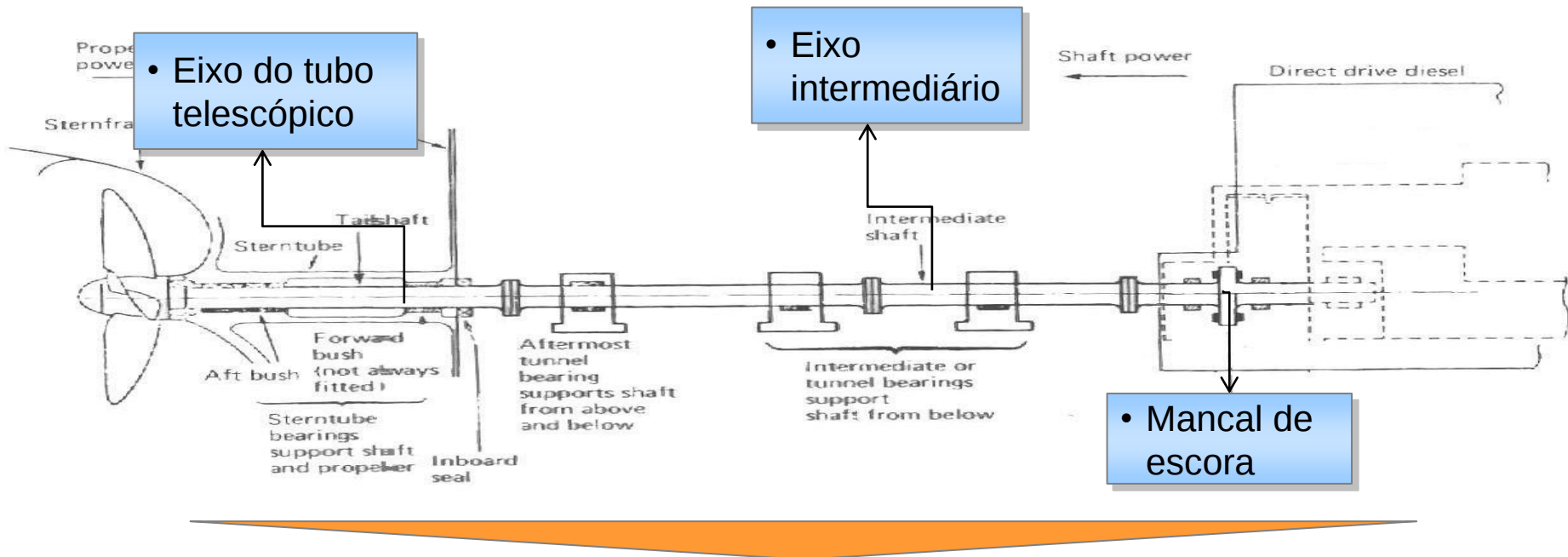


Dependendo da máquina principal, escolhemos uma forma de transmissão de potência para garantir um melhor rendimento do propulsor

- Os meios mais comuns para transmissão de potência são:
 - a) Conexão direta.
 - b) Conexão com engrenagem redutora.
 - c) Transmissão elétrica.

a) Conexão direta

Gráfico para suporte à argumentação



- A potência do motor é transmitida diretamente ao propulsor através de um eixo.
- É o meio de transmissão mais comum desde que não haja necessidade de redução da rotação
- O empuxo neste caso é transmitido ao casco do navio através de um mancal de escora que está acoplado no eixo de saída do motor.

b) Conexão com engrenagem redutora

Lista de pontos relevantes ou premissas

- A engrenagem redutora é utilizada quando se utilizam motores Diesel de média ou alta rotação ou ainda turbina a gás.
- É utilizada em instalações combinadas para que dois ou mais motores acionem um único eixo.



Engrenagem redutora.

- Algumas engrenagens permitem a reversão da rotação o que pode evitar a utilização de hélice de passo controlável.

c) Transmissão elétrica

Lista de pontos relevantes ou premissas

- A energia é transmitida através de cabos o que confere alta flexibilidade de arranjo a esse tipo de transmissão.
- É aproveitado para fornecer energia elétrica para o navio.
- Os hélices são acionados por motores elétricos (CC ou CA).

- A propulsão elétrica é recomendada quando:
- há uma demanda grande de energia elétrica que não seja para a propulsão.
- Há inúmeros propulsores ao longo do navio, que demandam potências elevadas.
- Utiliza-se propulsores POD que obrigatoriamente necessitam de energia elétrica.
- Há necessidade de torque alto ou resposta rápida da rotação do hélice .

Como escolher a instalação propulsora?

FATOR	OBSERVAÇÃO
1.Potência requerida	Define o tipo de maq. principal
2.Peso	Mais importante para embarcações rápidas como as militares
3.Espaço	O espaço ocupado deve ser sempre o menor possível.
4.Custo inicial e custo de operação	O projeto deve ser o mais viável economicamente. O principal item é o óleo combustível
5.Demanda de energia e aquecimento	Se a demanda de energia elétrica é elevada, convém usar um sistema de propulsão elétrico.
6.Confiabilidade e manutenabilidade	Facilidade de manutenção influi na escolha do sistema.
7.Requisito do navio para manobrabilidade e/ou operação em baixa velocidade	Esse requisito dita o tipo de propulsão utilizada.

Exemplos de instalações propulsoras mais comuns encontrados na propulsão marítima:

- O mais encontrado atualmente: hélice de passo fixo + eixo propulsor + motor diesel de baixa rotação;
- Navios um pouco mais sofisticados: hélice de passo controlável + eixo vazado + motor diesel de baixa rotação;
- Rebocadores: hélice azimutal com acionamento por motor diesel ou motor elétrico;
- Navios de alta manobrabilidade: hélice tipo POD com geração de energia elétrica a partir de motor Diesel e/ou turbina a gás.

Os sistemas de máquina combinado permitem que se forneça diferentes potências ao propulsor por mais de uma fonte de combustível.

- CODAD (Combination Diesel And Diesel) **VER**
 - dois motores Diesel são acoplados a uma engrenagem redutora e o acionamento pode ser realizado por um ou dois motores concomitantemente
- CODAG (Combination Diesel And Gás Turbine) **VER**
 - motor Diesel e Turbina a Gás são acoplados a uma mesma engrenagem redutora e cada um deles pode operar individualmente ou concomitantemente.
- COGAG (Combination Gás Turbine And Gás Turbine) **VER**
 - duas turbinas são acopladas a uma engrenagem redutora e elas podem operar individualmente ou concomitantemente.

Back up

- Os próximo slides não foram apresentados no curso em 2021 e não serão cobrados em prova

Motores, Propulsores e Integração

INTRODUÇÃO

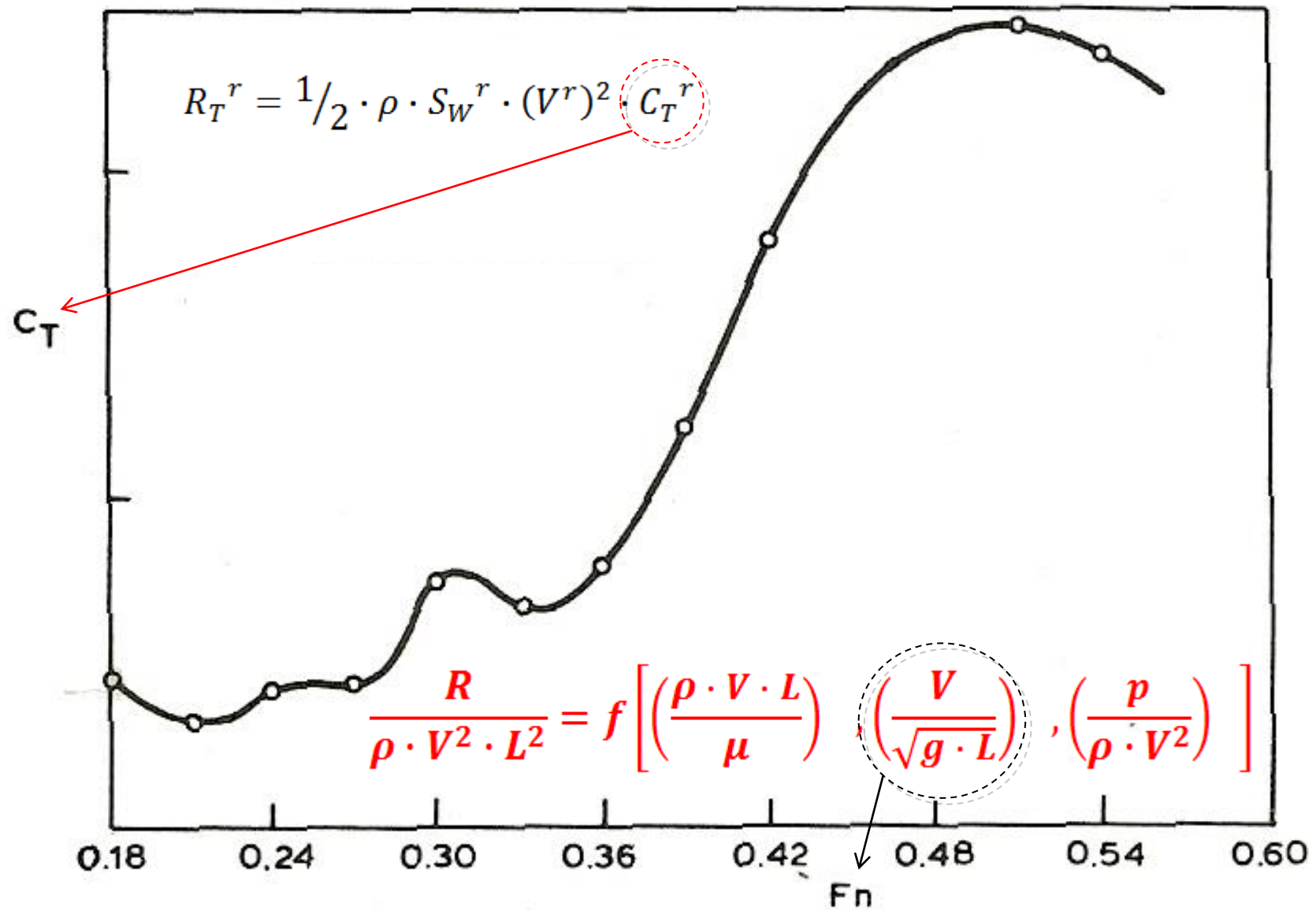
PROPULSORES

MOTORES



INTEGRAÇÃO CASCO-HÉLICE-MOTOR

Curva de Resistência Típica: Dados do casco

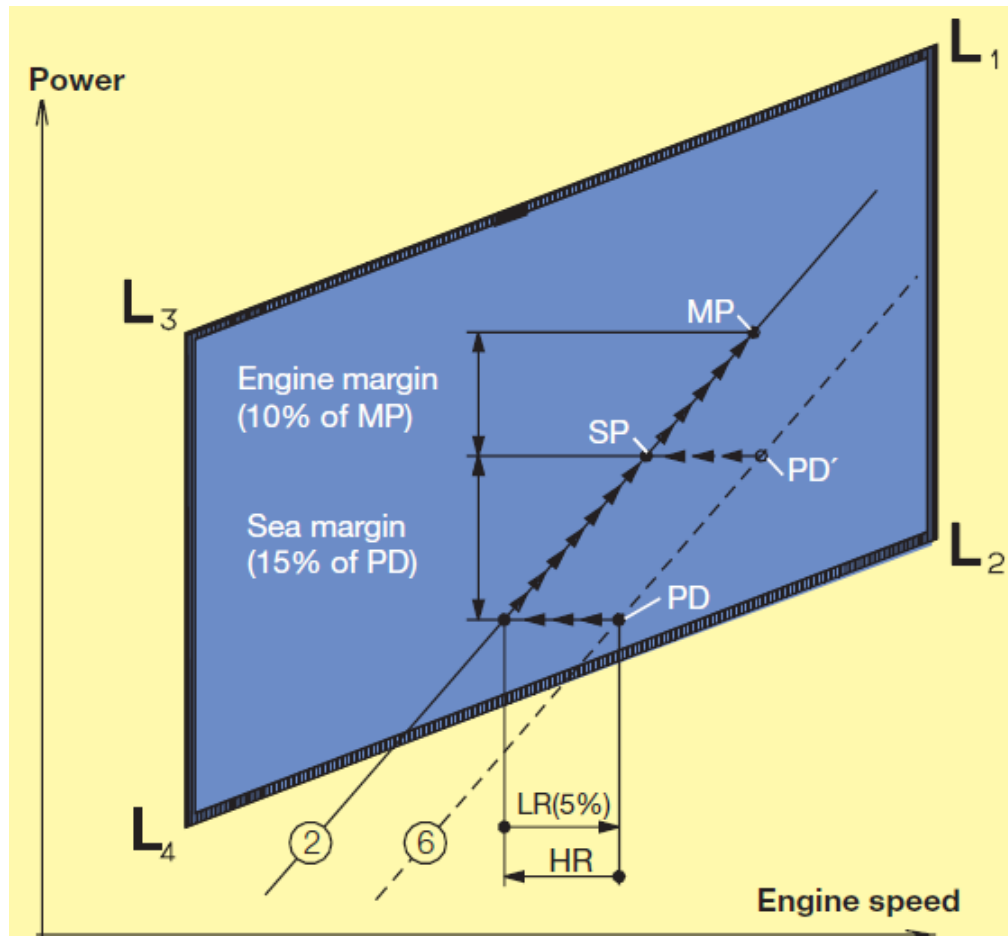


A Resistência total ao avanço é utilizada para determinação da potência total requerida a ser fornecida pelo motor

$$EHP = R_T \cdot V$$

(effective horse power)

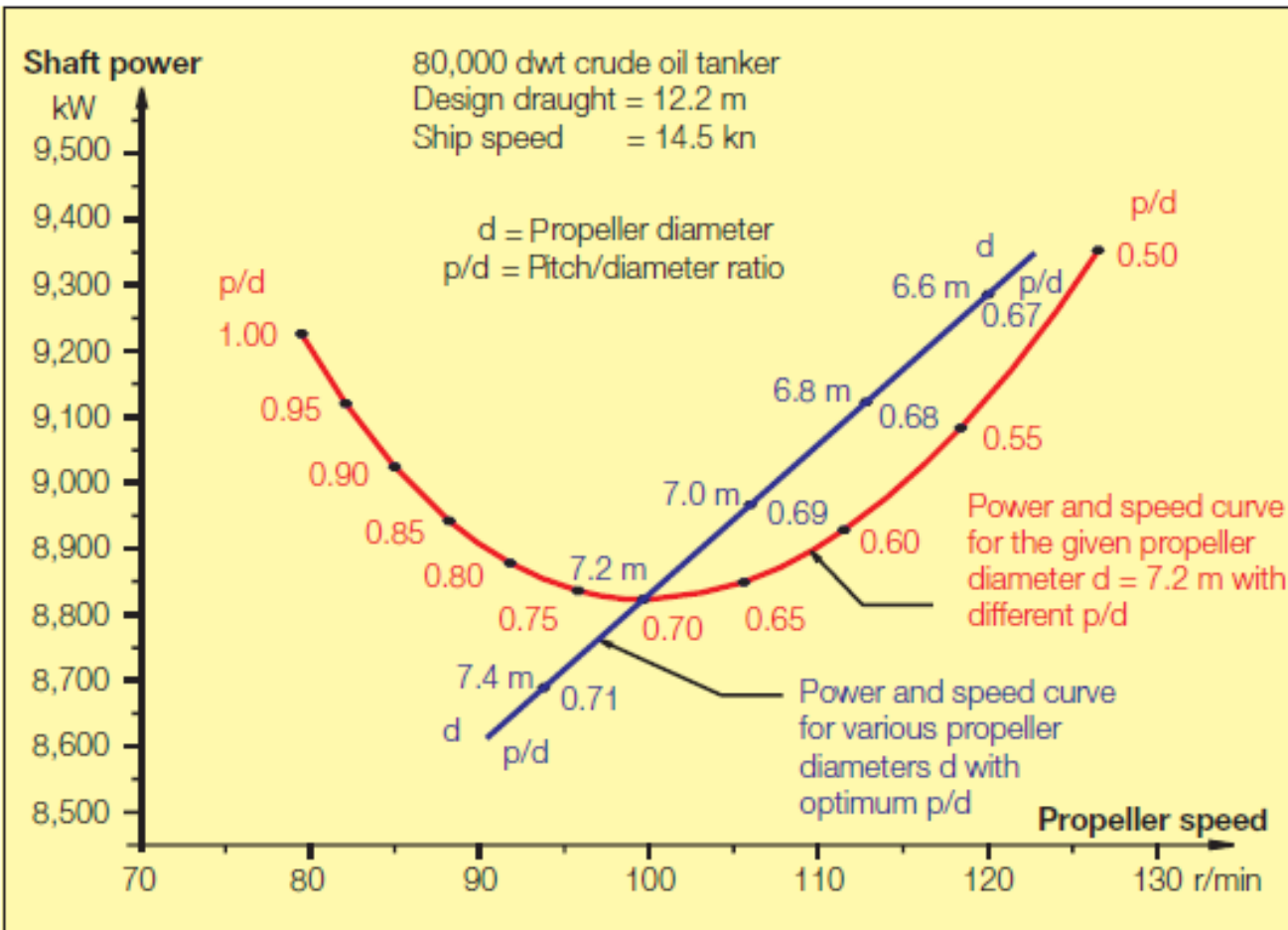
Potência necessária para rebocar o navio (sem apêndices) a uma dada velocidade de avanço.



- L₁: MCR nominal do motor;
- MCR (maximum continuous rating) é definida como a potência capaz de ser continuamente gerada por um motor;
- Propulsor projetado para 90% MCR;
- Operação do navio: 75%-77% MCR;
- L₁ – L₃ e L₂ – L₄: linhas de pressão efetiva média constante;
- L₁ – L₂ e L₃ – L₄: linhas de velocidade do motor constante;

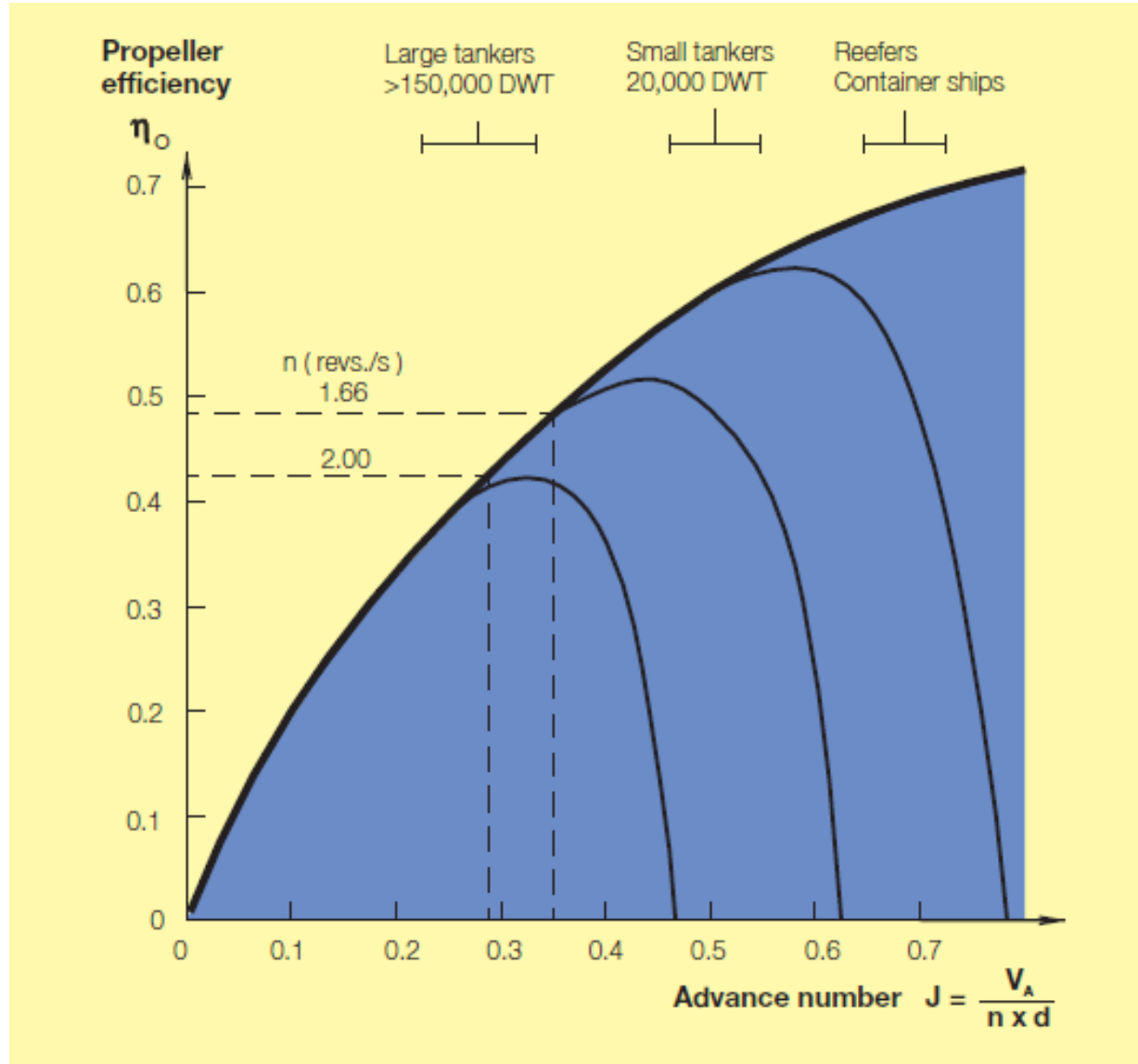
Exemplo: petroleiro de 80.000 dwt, velocidade de 14,5 nós e calado de 12,2m

Potência no eixo



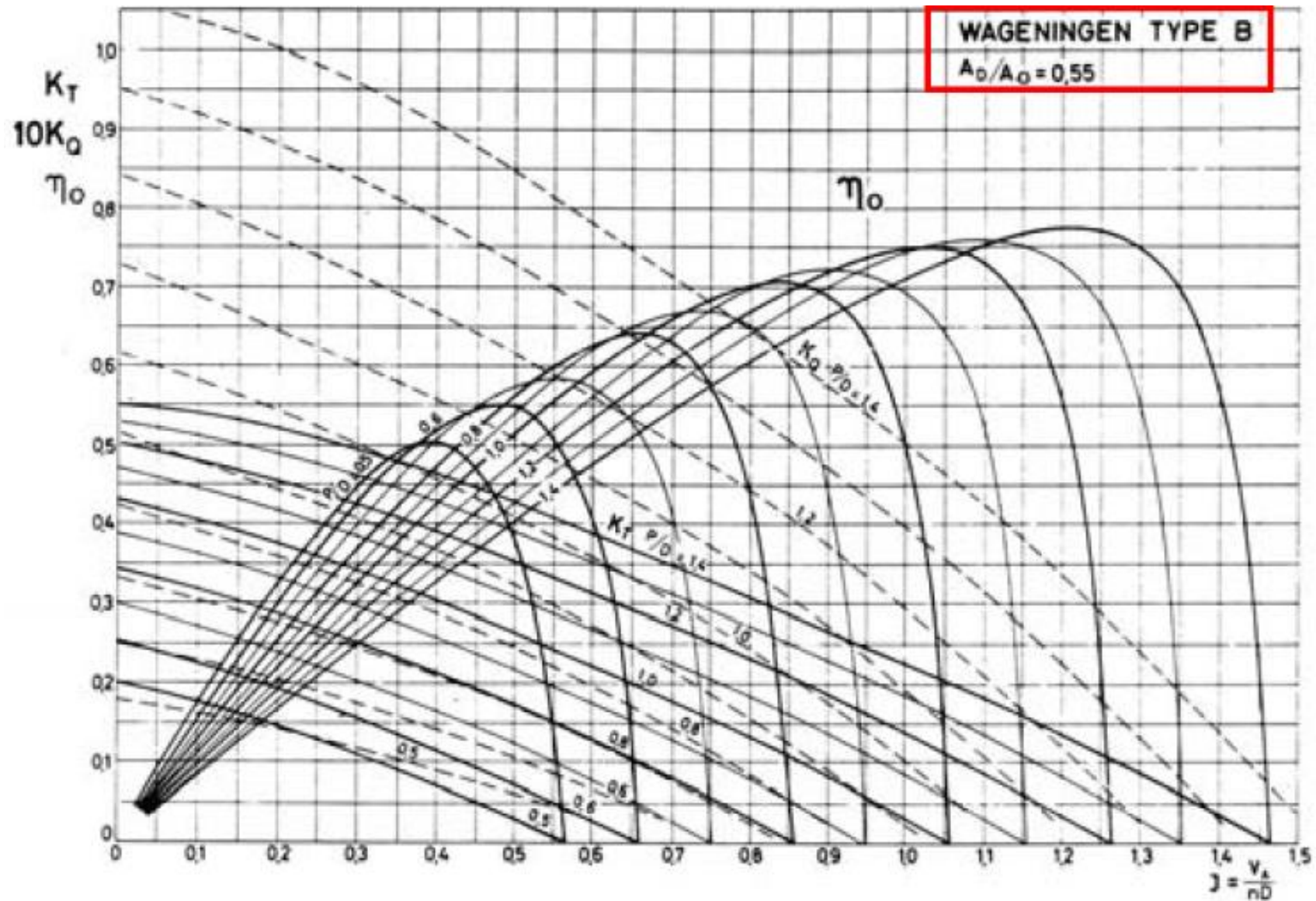
- Curva vermelha: vários P/D, $d = 7,2$ m;
- Curva azul: vários d , com P/D ótimo;
- Propulsor de 7,4m: diminuição da velocidade ótima do propulsor;
- Curva vermelha: menores P/D aumentam a rotação com um aumento marginal na potência.

A eficiência do propulsor é função da velocidade de avanço, da força propulsora, da rotação e de suas características geométricas

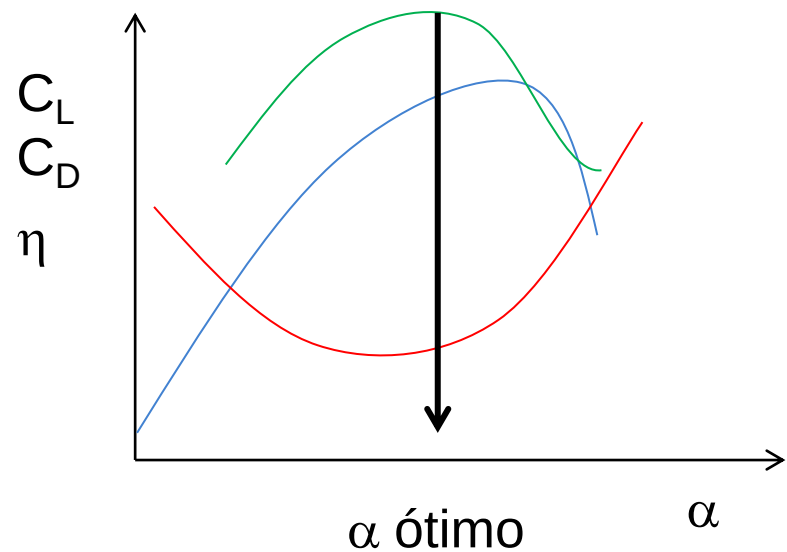
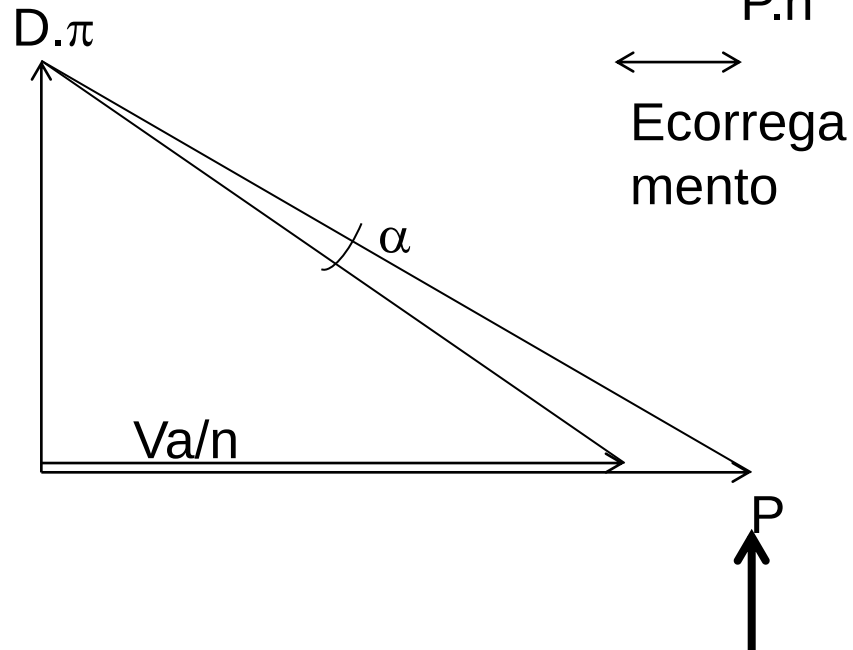
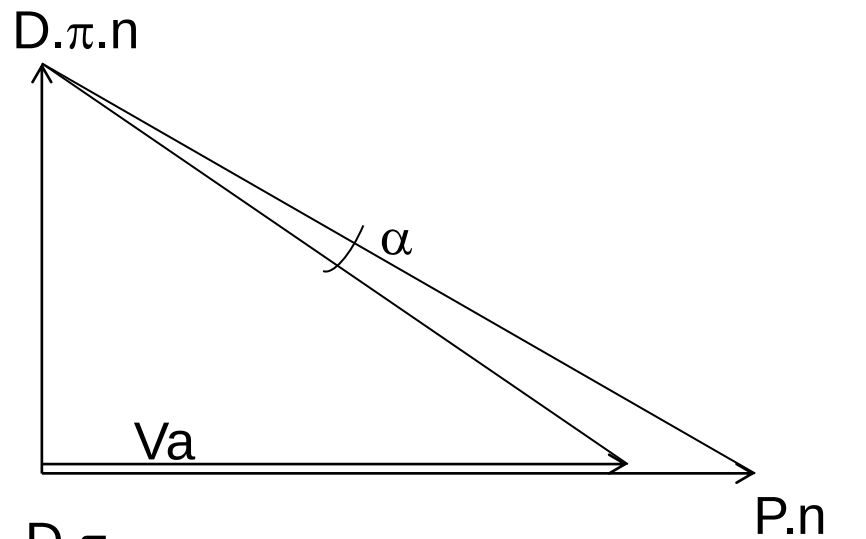


- Quanto maior o diâmetro, maior a eficiência;
- Limitações (calado/lastro);
- Quanto menor o número de pás, maior a eficiência;
- Dependência de P/D ;
- Altos A_E/A_0 levam a uma resistência adicional;
- Busca do P/D ótimo, que corresponde a uma rotação específica;

Série sistemática de hélices – resultados de ensaio em água aberta



Results of open-water tests on four-bladed model propellers of the Wageningen B 4-55 type.



$$V_A \cong N \cdot P$$

Integração casco-hélice:

Quantidades básicas

Massa..... M

Comprimento..... L

Tempo..... T

Qual conjunto de variáveis influencia no
força propulsora T do navio?

Velocidade..... [V] = L.T⁻¹

Diâmetro do hélice..... [D] = L

Densidade do fluido..... [ρ] = M.L⁻³

Viscosidade do fluido..... [ν] = M².T⁻¹

Aceleração da gravidade..... [g] = M.T⁻²

Rotação do hélice..... [N] = T⁻¹

$$T \propto V^a \cdot N^b \cdot D^c \cdot g^d \cdot \rho^e \cdot \nu^f$$


$$\left(\frac{M \cdot L}{T^2}\right) \propto \left(\frac{L}{T}\right)^a \cdot \left(\frac{1}{T}\right)^b \cdot L^c \cdot \left(\frac{L}{T^2}\right)^d \cdot \left(\frac{M}{L^3}\right)^e \cdot \left(\frac{L^2}{T}\right)^f$$

Assim, além dos parâmetros citados anteriormente, outros três apresentam importância destacada: coeficiente de avanço J , coeficiente de propulsão K_T e coeficiente de torque K_Q

Da análise dimensional da força propulsora:

$$\frac{T}{\rho \cdot V^2 \cdot D^2} = f \left[\left(\frac{V \cdot D}{\nu} \right), \left(\frac{V}{\sqrt{g \cdot L}} \right), \left(\frac{V}{N \cdot D} \right) \right]$$

Número de Reynolds

Número de Froude

Coeficiente de avanço

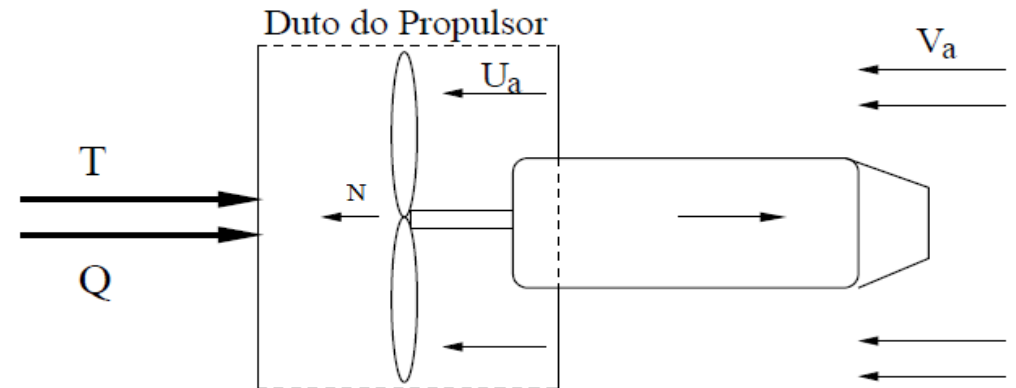
$$J = \frac{V}{N \cdot D}$$

Como $[V] = [D] \cdot [N] \rightarrow$

$$K_T = \frac{T}{\rho \cdot N^2 \cdot D^4}$$

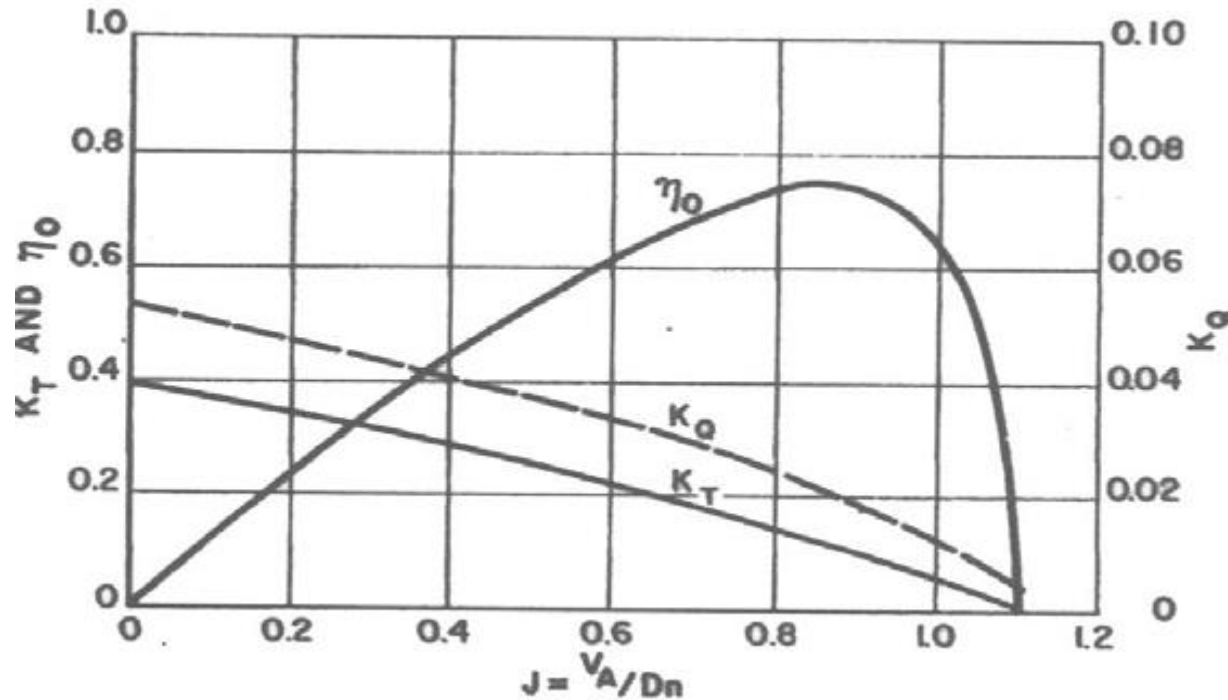
Como $[Q] = [T] \cdot [D] \rightarrow$

$$K_Q = \frac{Q}{\rho \cdot N^2 \cdot D^5}$$



$$\text{Eficiência em água aberta: } \eta_{H_0} = \frac{P_T}{P_{D_0}} = \frac{T \cdot V}{2\pi \cdot N \cdot Q} = \frac{J}{2\pi} \cdot \frac{K_T}{K_Q}$$

Curva típica dos coeficientes de empuxo (K_T) e de torque (K_Q) e eficiência do hélice de um propulsor em água aberta em função de J



- a curva de K_T para $J = 0$ representa o ponto de empuxo máximo (“*bollard pull*”), que é importante no caso de rebocadores;
- para cada passo a curva de K_T se anula para um determinado J . Isto ocorre porque a velocidade de avanço aumenta demasiadamente e o ângulo de ataque é tal que a água atinge o hélice pelo seu dorso;
- para cada razão passo/diâmetro há um valor de J para qual a eficiência é máxima.

Interação casco – propulsor: Coeficiente de esteira

- Movimento do navio → camada limite → descolamento → esteira
- Coeficiente de esteira w , mede o quanto a velocidade do fluido no hélice é reduzida com relação a velocidade V do navio

$$V_A = V(1 - w)$$

- Depende do formato do casco e da posição do hélice;
- Depende da razão entre o diâmetro do propulsor e o L_{pp} do navio (quanto maior essa razão, menor o coeficiente de esteira);
- O coeficiente de esteira aumenta com a rugosidade do casco;
- Quanto maior o C_B , maior o coeficiente de esteira;
- Para mono-hélices: $0,20 < w < 0,45$.

Interação casco – propulsor: Coeficiente de redução da propulsão

- Premissa inicial: força propulsora T = resistência ao avanço R ;

O propulsor acelera a água ao seu redor levando a uma diminuição da pressão á ré do navio. Isso aumenta a resistência em comparação a resistência R determinada no ensaio de arrasto

$$t = \frac{T_H - R}{T_H}$$

$$T_H = \frac{R}{1 - t}$$

- A forma do navio influencia no valor de coeficiente de redução da força propulsora.
- Em geral, quanto w aumenta, t também aumenta;
- Quanto maior o C_B , maior o coeficiente de esteira;
- Para mono-hélices: $0,12 < t < 0,30$.

Análise das eficiências

▪ Eficiência rotativa relativa do hélice

- Eficiência em água aberta (sem a presença do casco)

$$\eta_0 = \frac{P_T}{P_{D_0}} = \frac{T_H V_A}{2 \pi N_H Q_{H_0}}$$

- No entanto, um hélice atrás da esteira do navio (escoamento não-uniforme):

$$\eta_H = \frac{P_T}{P_D} = \frac{T_H V_A}{2 \pi Q_H N_H}$$

$$\eta_R = \frac{\eta_H}{\eta_{H_0}} = \frac{Q_{H_0}}{Q_H}$$

$$\eta_H = \eta_{H_0} \eta_R$$

- Para mono-hélices, essa eficiência varia entre 0,95 e 1,00.

Análise das eficiências

▪ Eficiência do casco

Definida como a razão entre a potência necessária para um navio desenvolver uma velocidade V , vencendo uma resistência R e a potência desenvolvida pelo hélice, isto é:

$$\eta_c = \frac{P_E}{P_T} = \frac{RV}{TV_A}$$

- R é a resistência do casco ao arrasto sem o hélice
- O hélice sendo arrastado atrás do navio também traz resistência, amplificando a resistência total

• Mas já vimos que: $V_A = V(1 - w)$ $T_H = \frac{R}{1 - t}$

• Assim:

Ou seja, a eficiência
do casco...

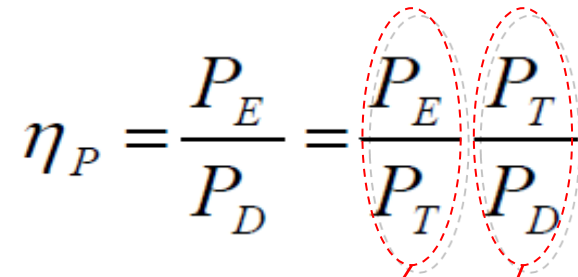
$$\eta_c = \frac{1 - t}{1 - w}$$

... depende dos
coeficientes de
propulsão e de esteira

Análise das eficiências

▪ Eficiência propulsiva

- É a relação entre a potência efetiva e a potência absorvida pelo hélice;

$$\eta_P = \frac{P_E}{P_D} = \frac{P_E}{P_T} \frac{P_T}{P_D}$$


- Considerando-se as demais eficiências descritas:

$$\eta_P = \eta_C \eta_{H_0} \eta_R$$

- Estas três eficiências levam em conta a integração casco – hélice.

Análise das eficiências

▪ Eficiência de transmissão

- Essa eficiência relaciona a potência entregue ao hélice P_D e a potência do motor principal P_M :

$$\eta_s = \frac{P_D}{P_M}$$

- Obviamente, essa eficiência depende do tipo de sistema de transmissão e das características de instalação, como o número de mancais, por exemplo.

Análise das eficiências

▪ Eficiência total

- Relaciona a potência efetiva requerida pelo navio e a potência do motor:

$$\eta_T = \frac{P_E}{P_M} = \frac{P_E}{P_D} \frac{P_D}{P_M}$$

- Levando-se em conta as demais eficiências definidas anteriormente:

Casco

Transmissão

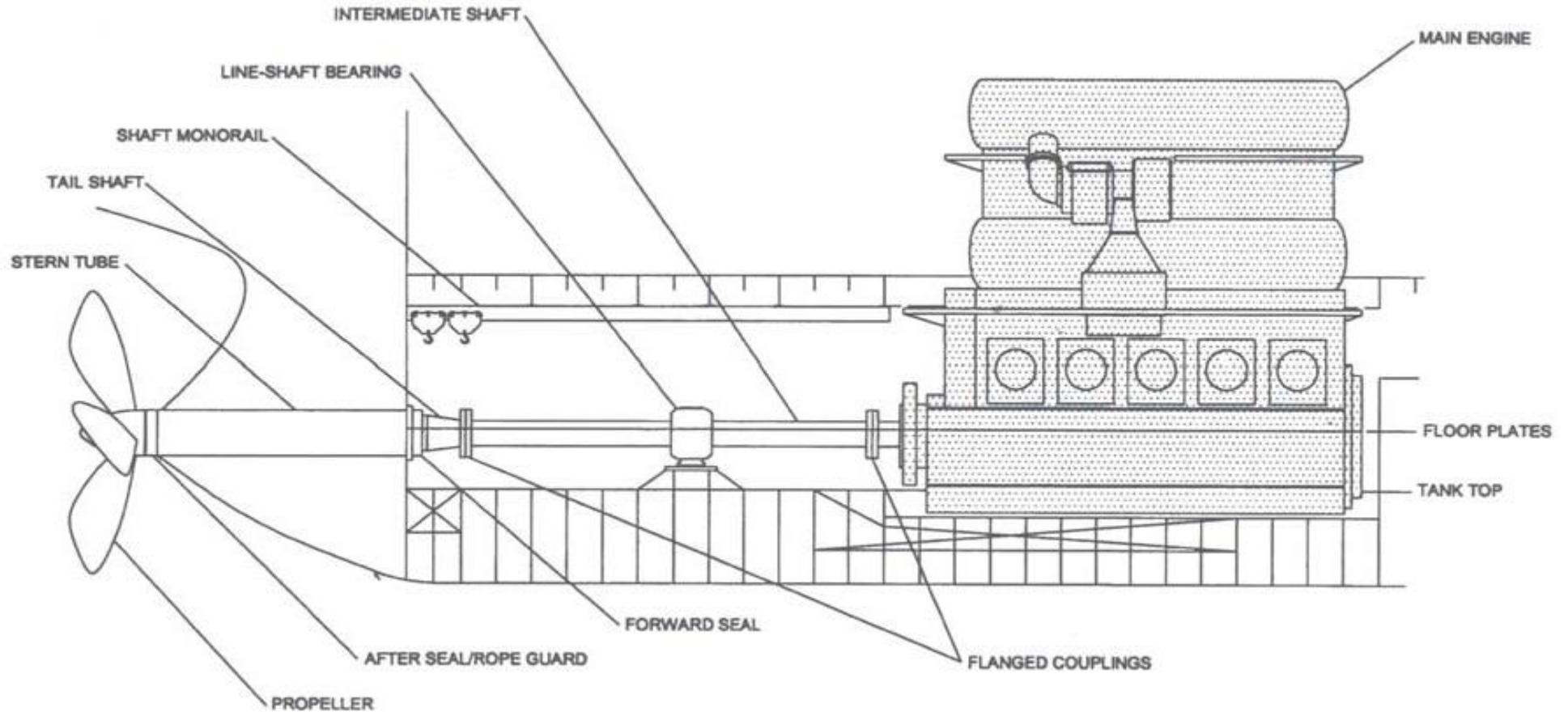
$$\eta_T = \eta_C \underbrace{\eta_{H_0} \eta_R}_{\text{Hélice}} \eta_s$$

Hélice

- Sob o ponto de vista prático, é interessante ter-se a ordem de grandeza da eficiência total;
- Seu valor é determinado pela eficiência do hélice.

Conjunto casco – hélice – motor

Caso mais comum entre navios cargueiros: instalação propulsora composta de um hélice de passo fixo e motor Diesel de baixa rotação com conexão direta.



Questões adicionais e fatores práticos a serem levados em consideração na integração casco – hélice – motor:

- **Curva de Resistência ao Avanço**

Em geral, considera-se resistências adicionais ao casco nu que levem em conta a rugosidade (de 8% a 11%) e o estado de mar (de 7% a 14%). Assim:

$$R(V) = R_0(V)(1 + \alpha) \text{ onde } 0,15 \leq \alpha \leq 0,25$$

- **Curvas características dos propulsores**

$$K_T = K_T(J, P/D, A_E/A_0, n_{pás})$$

$$K_Q = K_Q(J, P/D, A_E/A_0, n_{pás})$$

$$\eta_{H_0} = K_Q(J, P/D, A_E/A_0, n_{pás})$$

Equações de Integração

- Equalização da força propulsora e a resistência ao avanço

$$T_H(V, N_H, P, D, A_E/A_0, n_{pas}) = \frac{R(V)}{1 - t}$$

- Equalização da potência requerida com a potência fornecida pelo motor

$$\frac{2\pi N_H}{\eta_S} \frac{Q_{H_0}(V, N_H, P, D, A_E/A_0, n_{pas})}{\eta_R} = P_M(M_{tipo}, N_M)$$

- Tem-se duas equações com 5 incógnitas: 3 variáveis independentes, por exemplo, as características do propulsor – P/D , A_E/A_0 e n_{pas}

Equações de Integração

- Assim, essas duas equações podem ser reescritas como:

$$K_T (J) \rho N_H^2 D^4 = \frac{R(V)}{1-t}$$

$$\frac{2 \pi N_H}{\eta_S} \frac{K_Q (J) \rho N_H^2 D^5}{\eta_R} = P_M (M_{tipo}, N_M)$$

- Da equação de K_T :
$$K_T (J) = \frac{R(V)}{(1-t) \rho N_H^2 D^4}$$

- E da definição do coeficiente de avanço J :
$$N_H = \frac{V(1-w)}{J D}$$

Equações de Integração

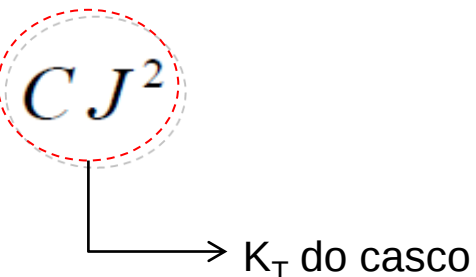
- Portanto,

$$K_T(J) = \frac{R(V)}{(1-t)\rho V^2 (1-w)^2 D^2} J^2$$

- Considerando V , t , D , ρ e w constantes, é possível definir a constante C :

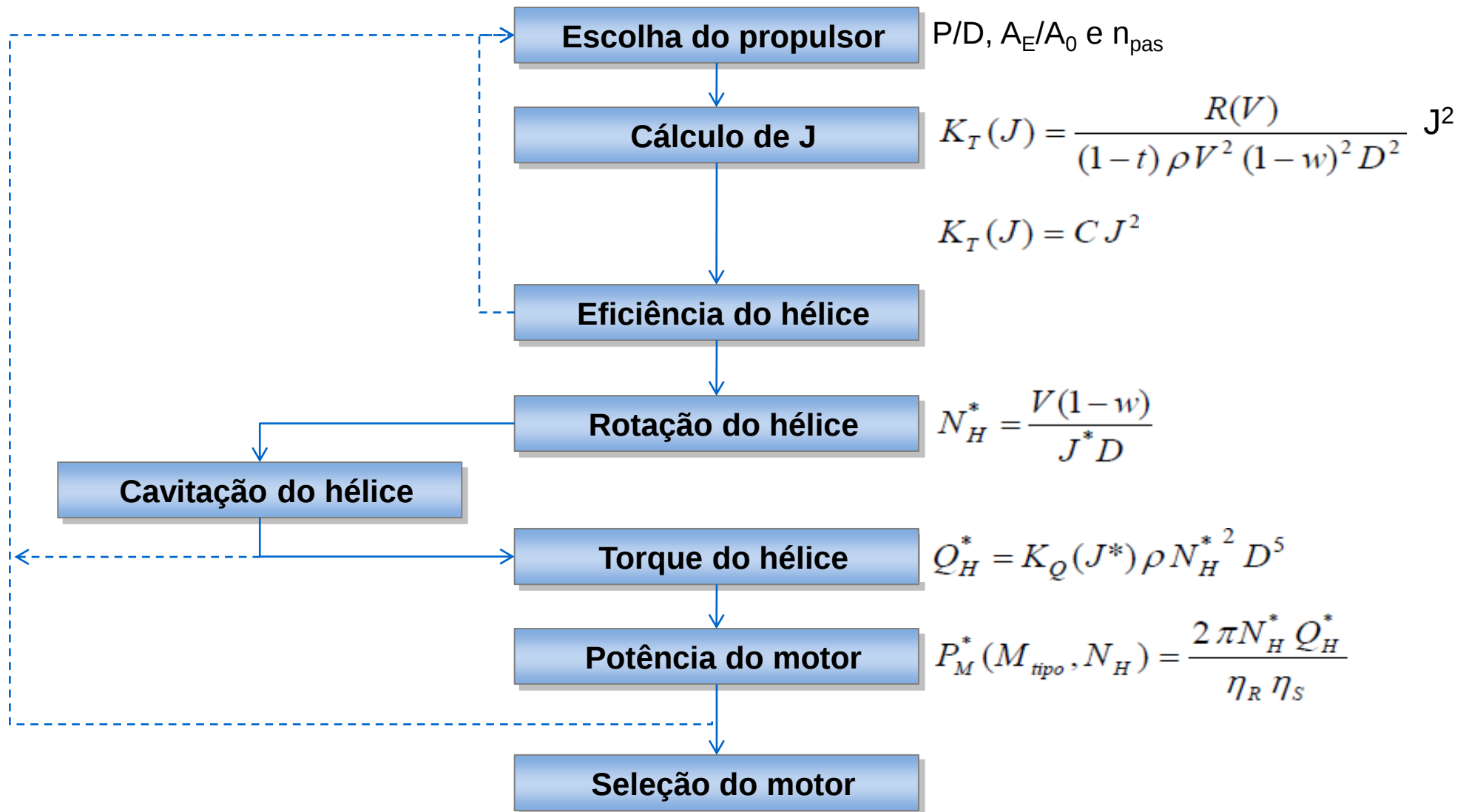
$$C = \frac{R(V)}{(1-t)\rho V^2 (1-w)^2 D^2}$$

- De maneira que

$$K_T(J) = C J^2$$


K_T do casco

Procedimentos para integração casco – hélice – motor

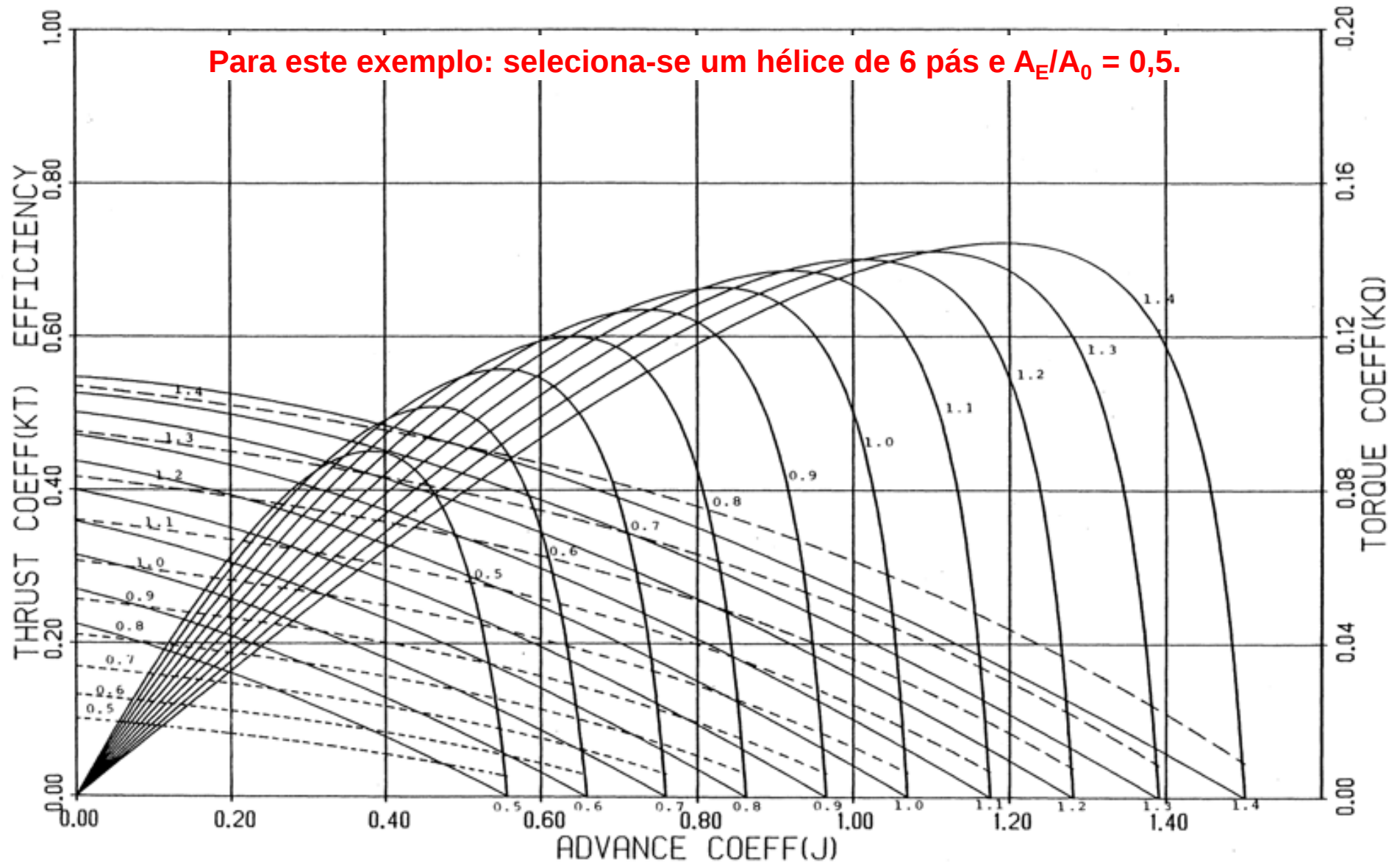


EXEMPLO: Escolha do propulsor

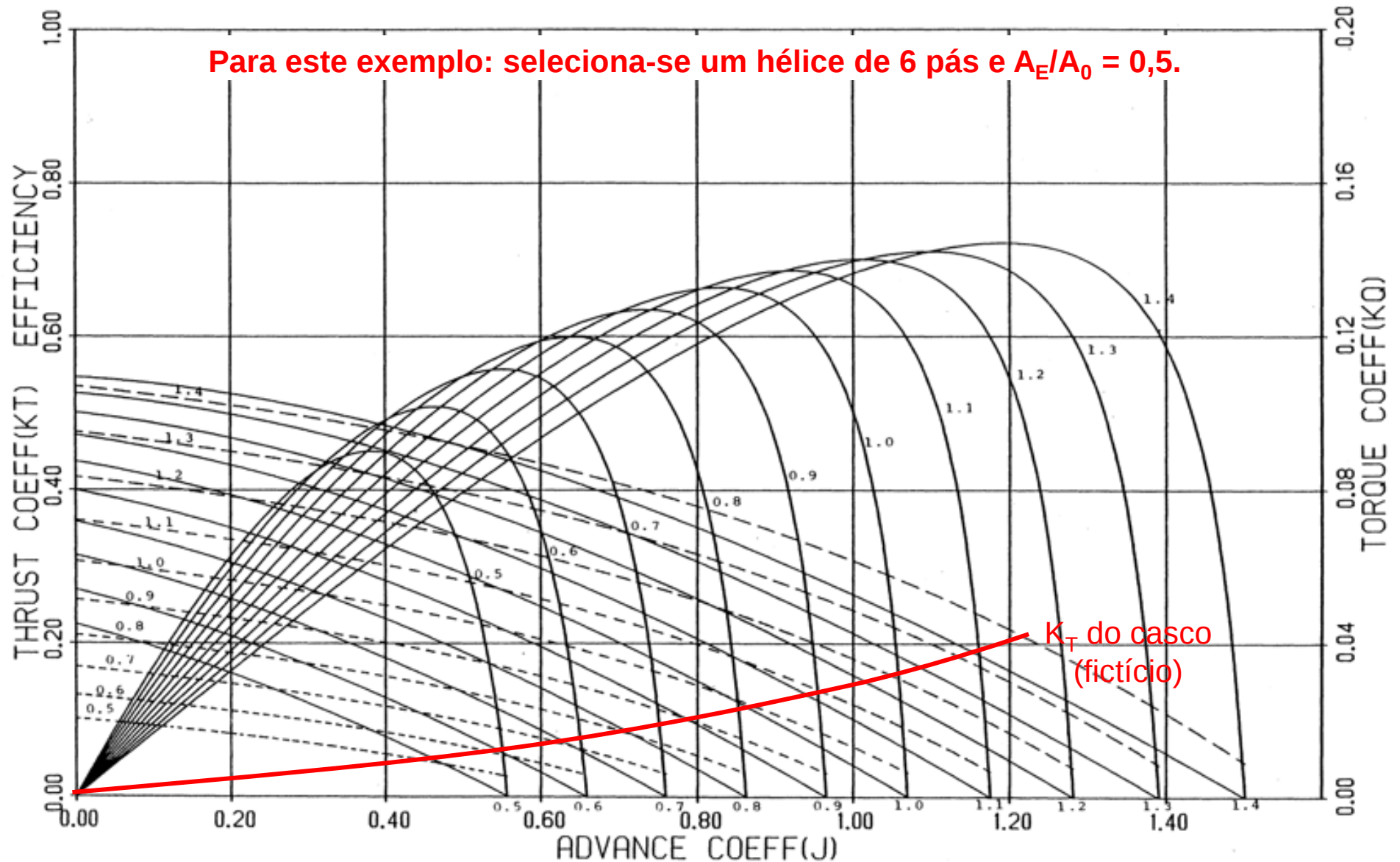
- Série B de Troost
- Série de Gawn
- Série de Schoenherr
- Série AU e MAU

Nº de pás	Razão $\frac{A_E}{A_0}$													
2	0,30													
3		0,35			0,50			0,65			0,80			
4			0,40			0,55			0,70			0,85	1,00	
5				0,45			0,60			0,75				1,05
6					0,50			0,65			0,80			
7						0,55			0,70			0,85		

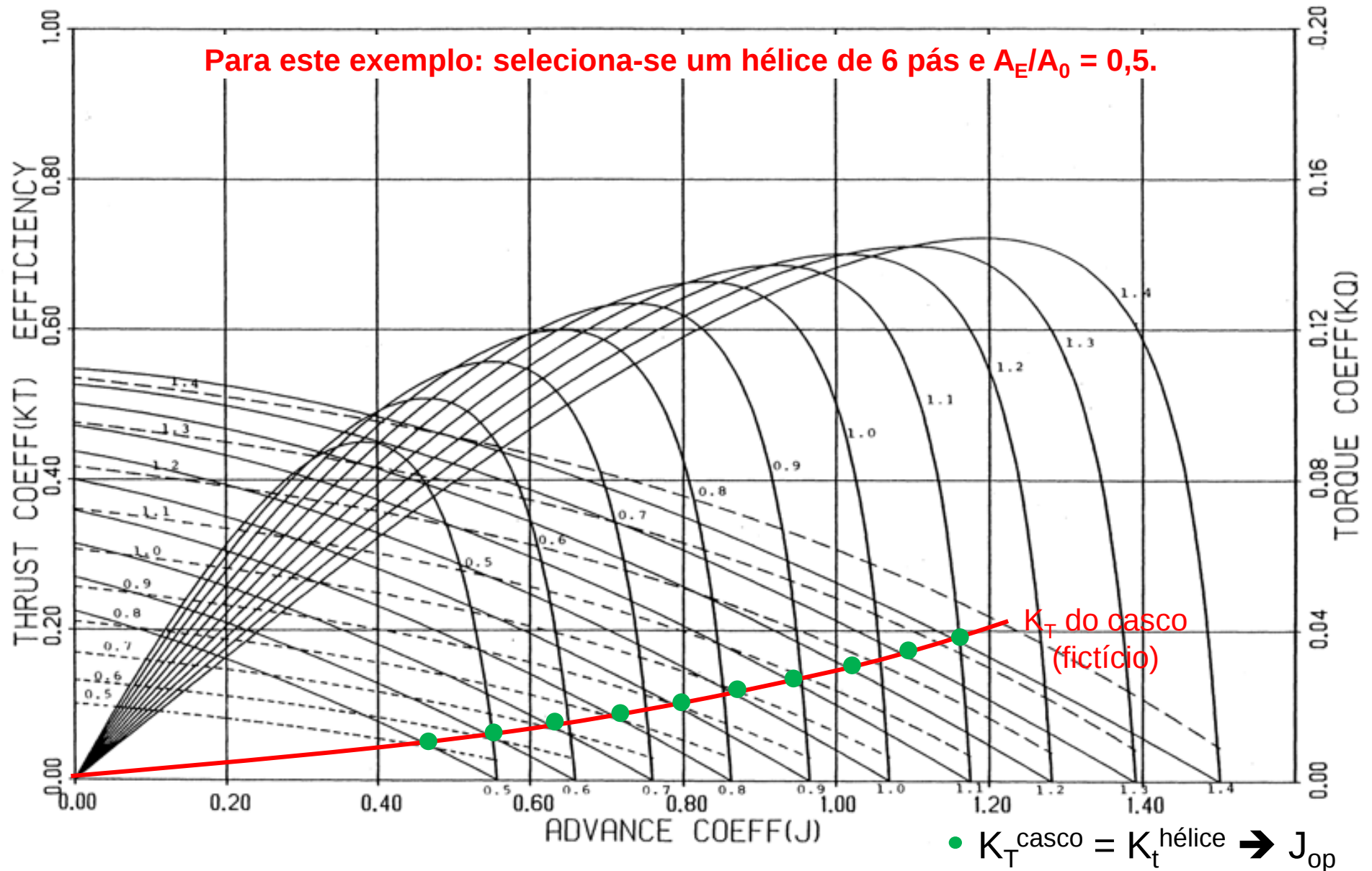
Exemplo de curva K_T e K_Q por J :



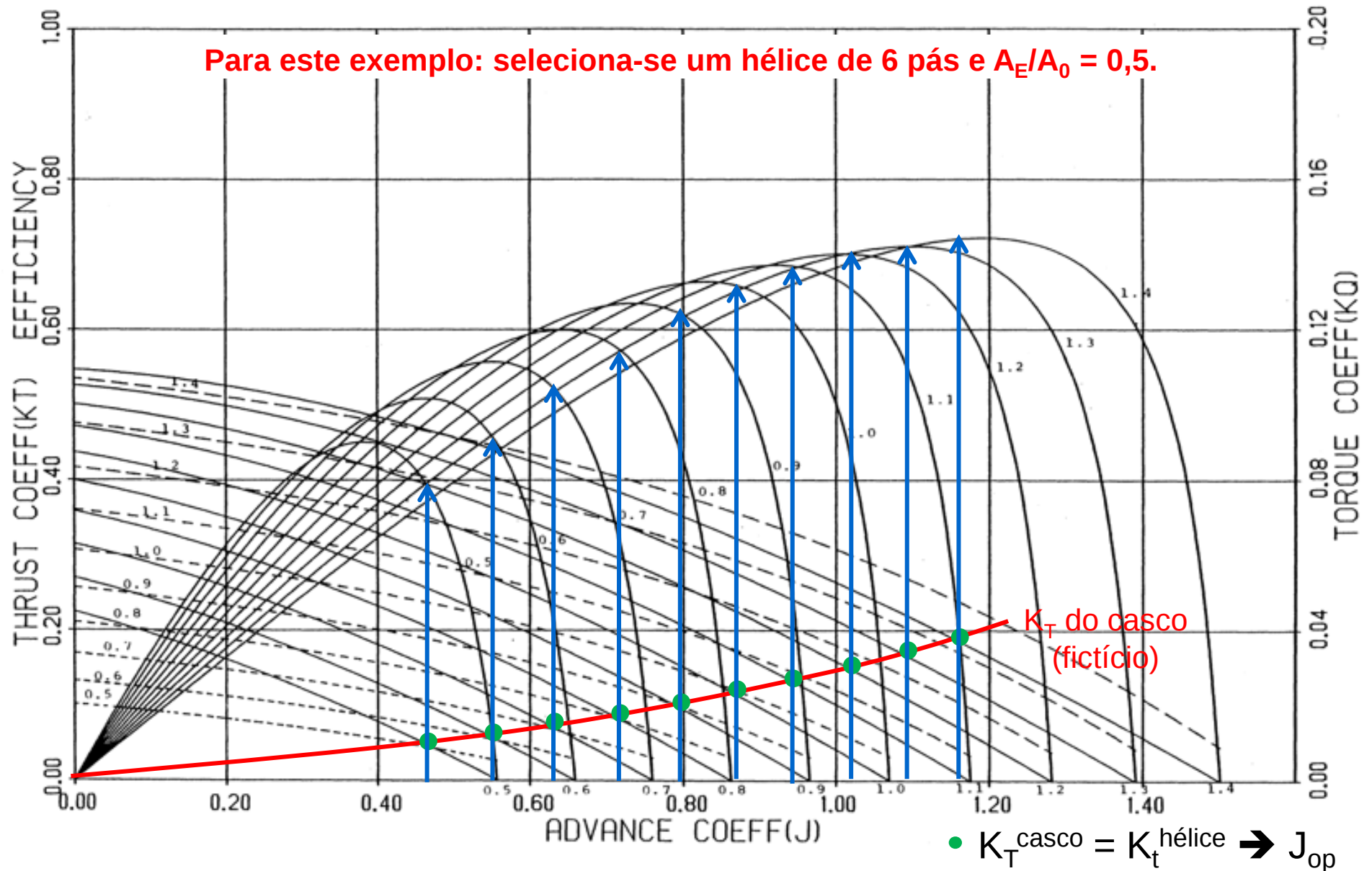
Exemplo de curva K_T e K_Q por J :



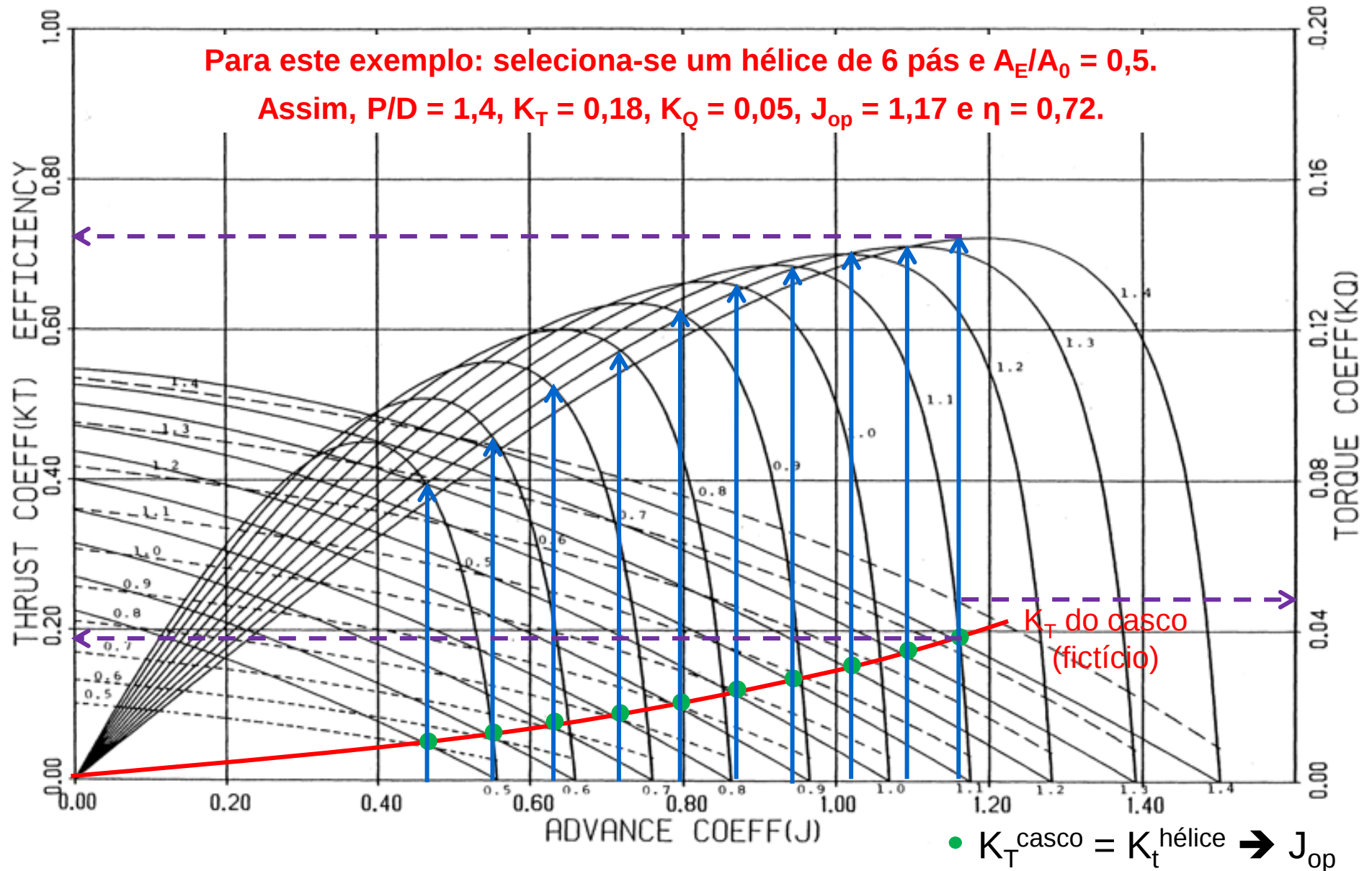
A curva K_T e K_Q e a integração casco-hélice



A curva K_T e K_Q e a integração casco-hélice



A curva K_T e K_Q e a integração casco-hélice



Exemplo de escolha do motor

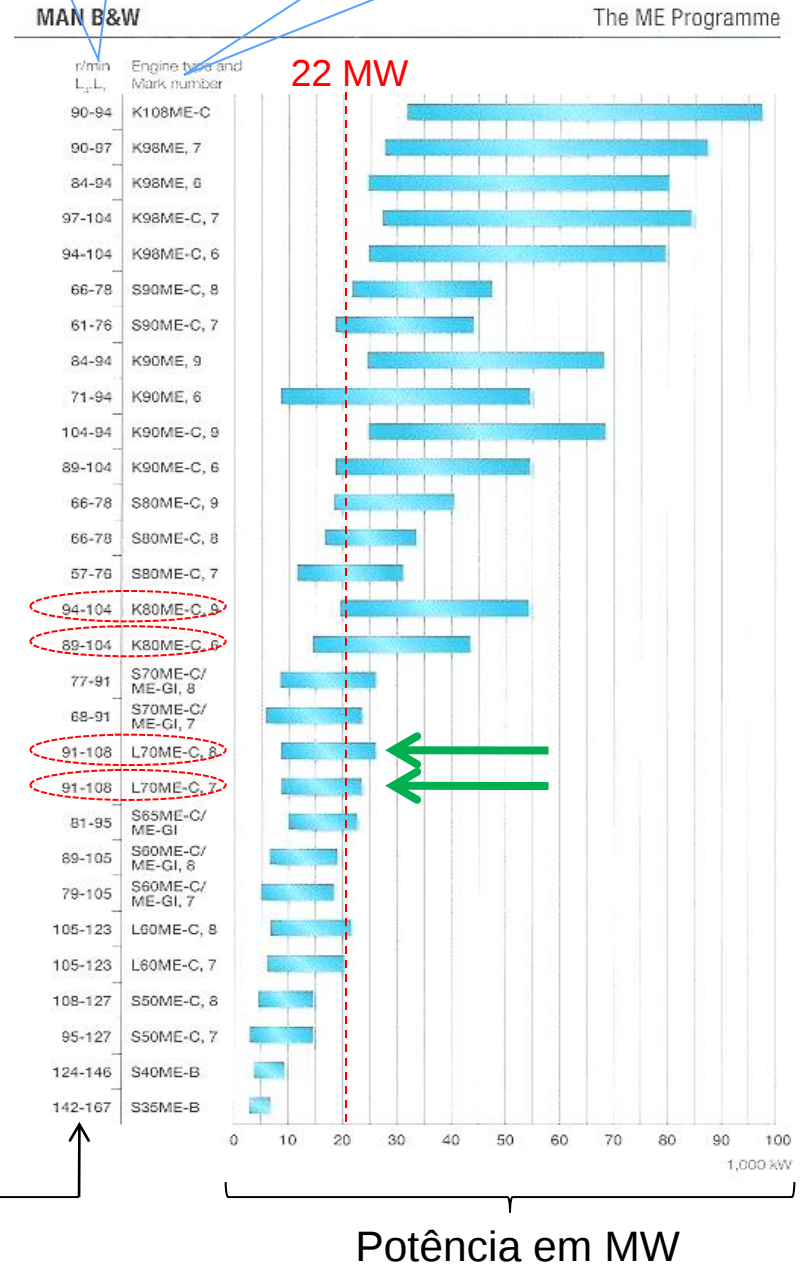
→ Dados disponíveis:

- Hélice: 6 pás, $A_E/A_0 = 0,5$ e $P/D = 1,4$
- $K_T = 0,18$, $K_Q = 0,05$ e $\eta = 0,72$, $J_{op} = 1,17$
- Velocidade desejada: 30 nós ≈ 15 m/s
- Potência requerida: 20 MW
- $D \approx 5,7$ m e $N = 93$ rpm
- É comum escolher um motor a partir de uma rotação 3% maior que a calculada e uma potência 10% maior que a requerida
- Procurar motores com 96 rpm e potência nominal de 22 MW.

Rotação em rpm

rotação

Identificação do motor



Motor escolhido: MAN B&W L70ME-C

Bore: 700 mm, Stroke: 2360 mm

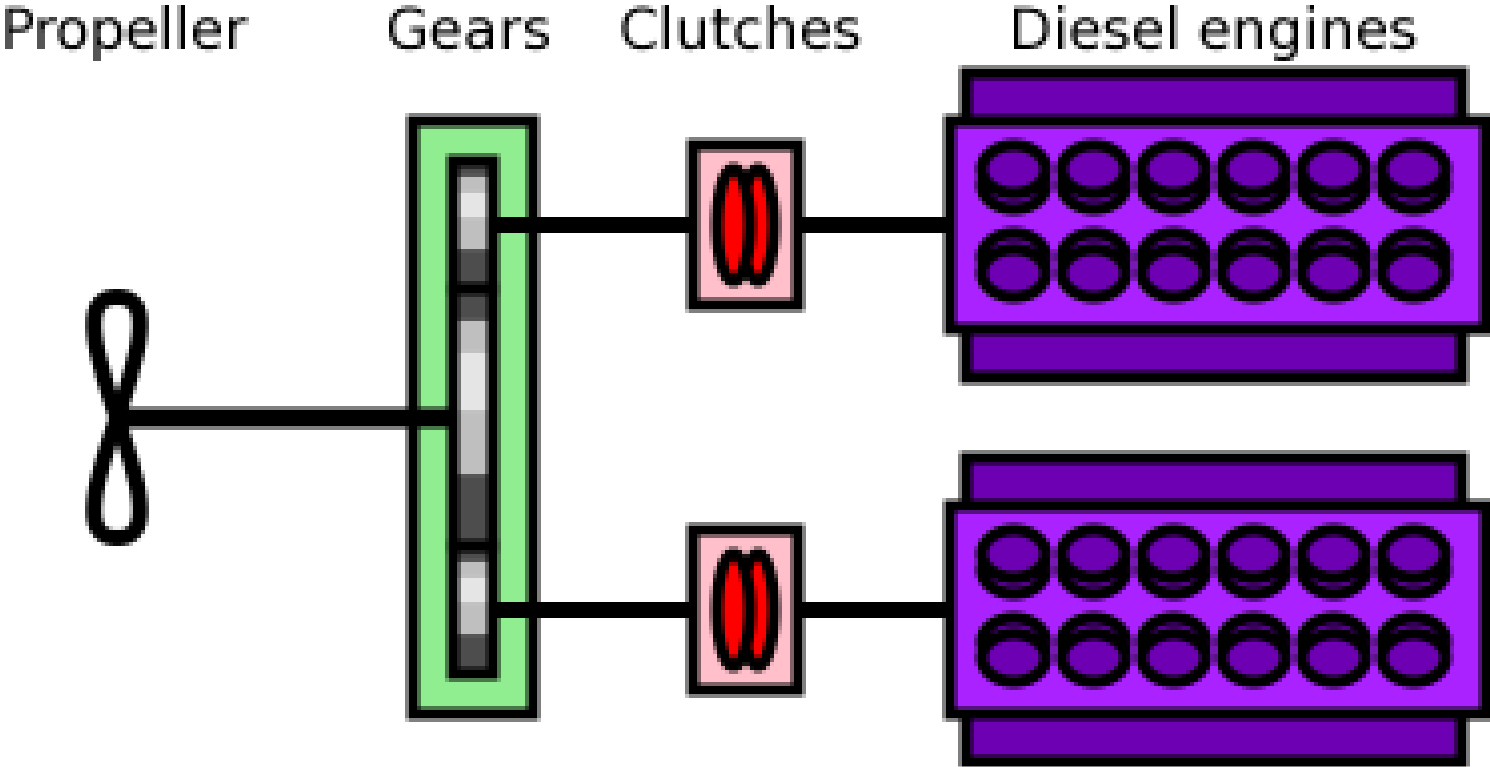
Main Data					
Layout points		L ₁	L ₂	L ₃	L ₄
Speed	r/min	108	108	91	91
mep	bar	20.0	16.0	20.0	16.0
		kW	kW	kW	kW
5L70ME-C8		16350	13100	13750	11000
6L70ME-C8		19620	15720	16500	13200
7L70ME-C8		22890	18340	19250	15400
8L70ME-C8		26160	20960	22000	17600
Specific Fuel Oil Consumption (SFOC)					
g/kWh		170	163	170	163

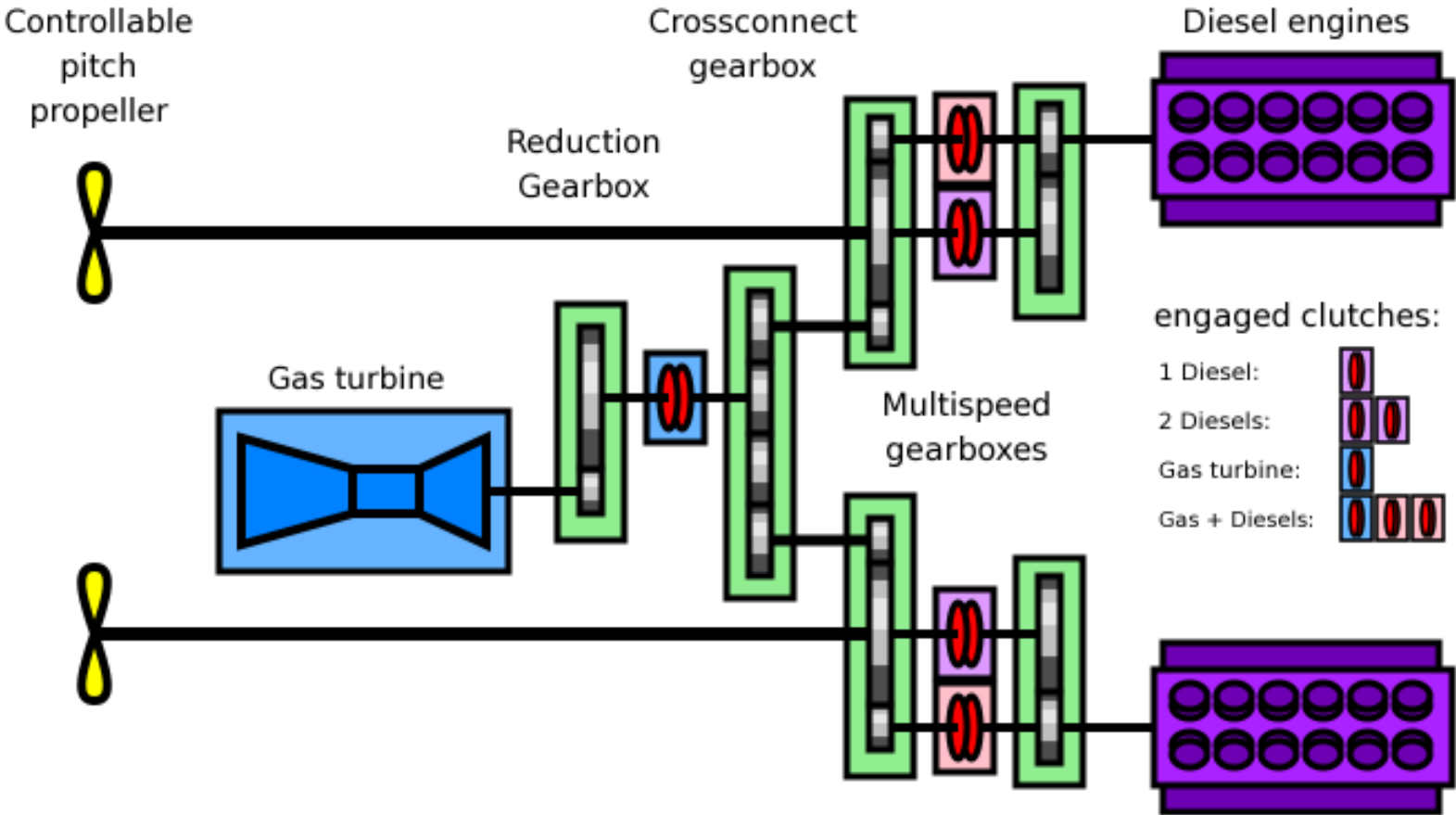
Lubricating and Cylinder Oil Consumption	
Lubricating oil	0.15 g/kWh
Cylinder oil	0.7 g/kWh

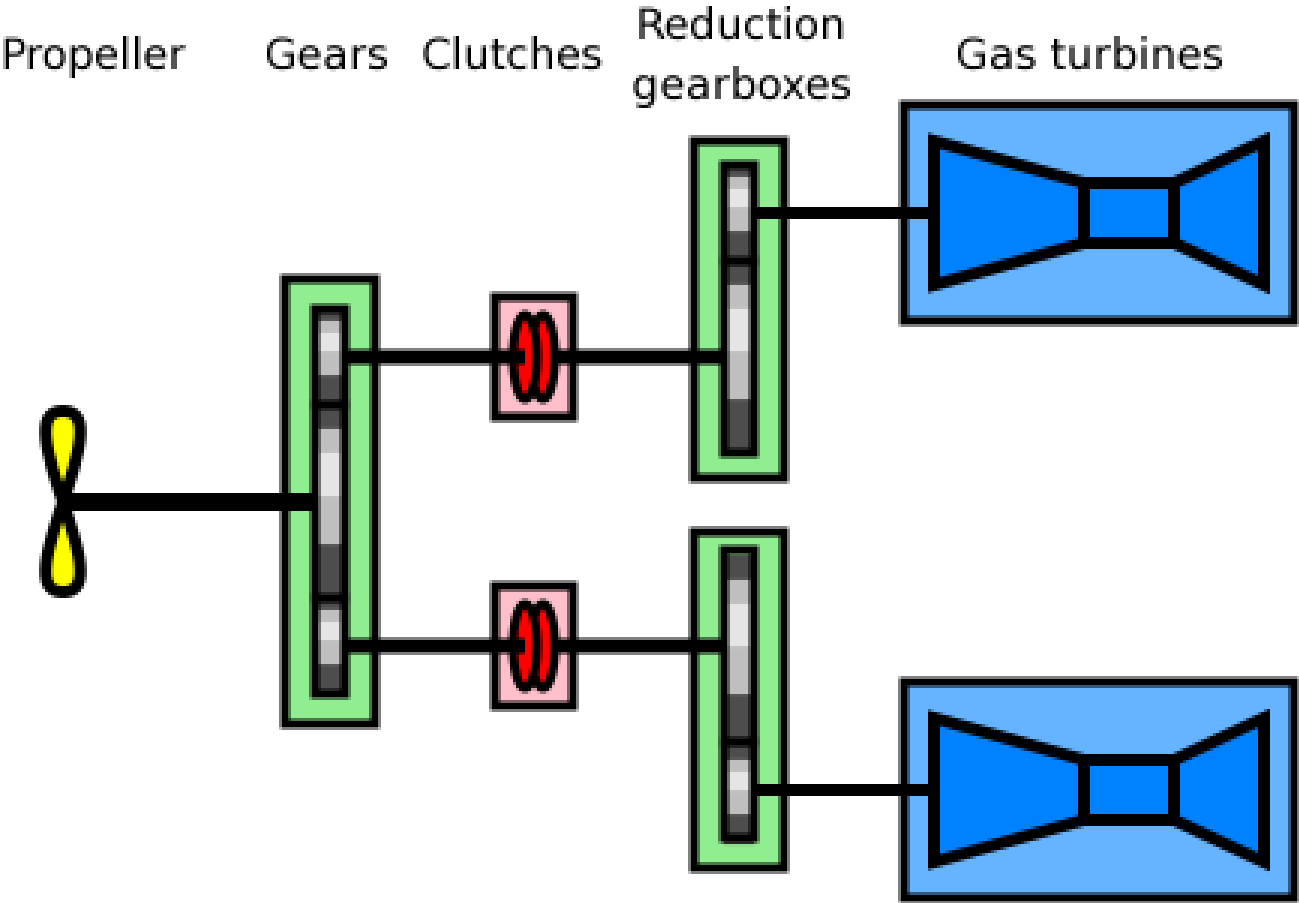
Cyl. No	5	6	7	8
L _{min} mm	7781	8971	10161	11351
H ₁ mm	11250	11250	11250	11250
H ₂ mm	10550	10550	10550	10550
H ₃ mm	10575	10575	10575	10575
A mm	1262	1262	1262	1262
B mm	3980	3980	3980	3980
E mm	1190	1190	1190	1190
Dry Mass t*	437	506	569	642

*The mass can vary up to 10% depending on the design and options chosen.

BACKUP







filmes:

<https://www.youtube.com/watch?v=SSo0fb0JQZA>

Praça de maquinas e partida de motor

<https://www.youtube.com/watch?v=ptDFqY-0Do8>

Motores do Titanic

<https://www.youtube.com/watch?v=HmkB5-MZTOo>

Paddle Wheel

<http://www.youtube.com/watch?v=HT0YrvJoCmc>

- fazendo propulsores de pequenos barcos

<http://www.youtube.com/watch?v=mV48f5D6kBY>

- fazendo o molde de madeira de um grande propulsor

<https://www.youtube.com/watch?v=ny04UDEnJ6Q>

– atividades Wartsila

<https://www.youtube.com/watch?v=0bP2MH3Lqvi> – aula longa propulsão aérea tudo sobre dinamica do helice MUST

<http://www.youtube.com/watch?v=Ffh8Ms6HrLI>

Cavitação – coca cola

<https://www.youtube.com/watch?v=N3WwQKZ05Uk>

Cavitação

<https://www.youtube.com/watch?v=62O7KYfb4GA>

Ancoragem

<https://www.youtube.com/watch?v=kiaYL9sp8Eo>

<https://www.youtube.com/watch?v=SPg7hOxFItI>

Motor grande à vapor

- Força de reação – porque o fólio é mais eficiente que a roda de pás? Porque eu preciso passar energia cinética ao fluido? É possível se propelir sem passar energia cinética? É possível minimizar a energia cinética transmitida? – quanto maior a massa do objeto de apoio mais eficiente é a propulsão (menor é o seu deslocamento/aceleração com a mesma força realizando trabalho); $F = m \cdot dv/dt$; $E = mv^2$ $F = 2m \cdot (dv/2)/dt$; $E = E1/2$ – conclusão, deixar energia cinética no fluido significa que você desperdiçou trabalho
- A pressão varia com o quadrado velocidade e apenas linearmente com a inércia. É mais eficiente explorar essa parcela da pressão e é o que o fólio faz - equação de bernouilli
- Forma do propulsor – passo constante ao longo do diâmetro

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{1}{2}v^2 + \frac{p}{\rho} + gz = f(t),$$

$$\frac{v^2}{2} + gh + \frac{p}{\rho} = \text{constante} \text{ ou } \frac{\rho v^2}{2} + \rho gh + p = \text{constante}$$

Diagrama esquemático das velocidades e forças sobre uma seção de propulsor em hélice

<https://www.youtube.com/watch?v=0bP2MH3Lqvl>

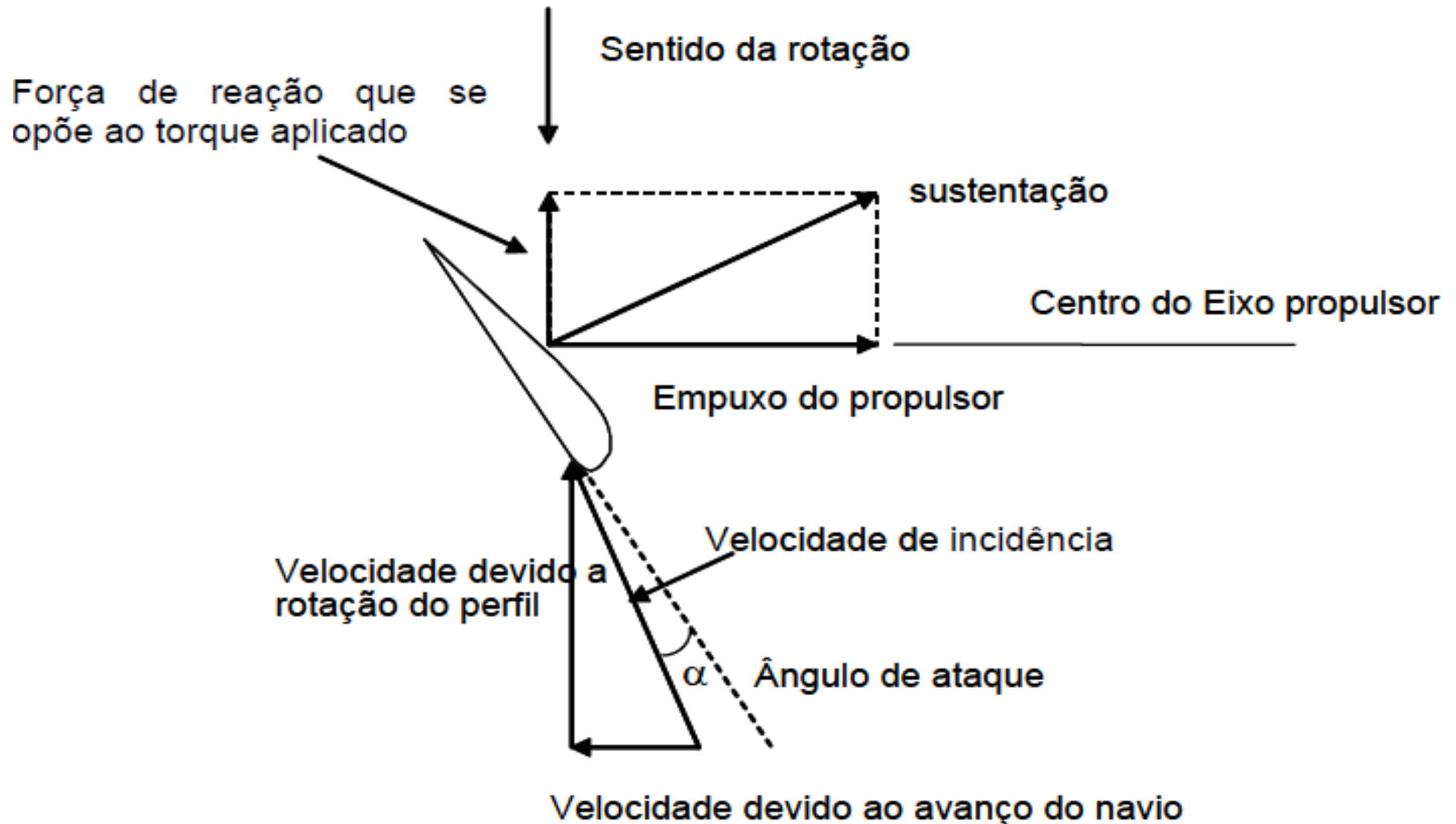


Diagrama esquemático das velocidades e forças sobre uma seção de propulsor em hélice

<https://www.youtube.com/watch?v=0bP2MH3Lqvl>

