

ANÁLISE DO DESEMPENHO DO SISTEMA PROPULSOR

AULA 07.05

1. REVISÃO
2. PREPARAÇÃO DO DIAGRAMA DE INTEGRAÇÃO
3. RESOLUÇÃO DA QUESTÃO ILUSTRATIVA
4. EXERCÍCIO DE APLICAÇÃO

ANÁLISE DO DESEMPENHO DO SISTEMA PROPULSOR

1. REVISÃO
2. PREPARAÇÃO DO DIAGRAMA DE INTEGRAÇÃO
3. RESOLUÇÃO DA QUESTÃO ILUSTRATIVA
4. EXERCÍCIO DE APLICAÇÃO

ANÁLISE DO DESEMPENHO DO SISTEMA PROPULSOR

REVISÃO

1. Questão Ilustrativa
2. Dimensionalização do diagrama do hélice
Curvas de empuxo versus velocidade de avanço parametrizadas na rotação do hélice
3. Integração casco -hélice

QUESTÃO ILUSTRATIVA

Uma empresa de navegação efetuou a substituição da instalação propulsora de um de seus navios graneleiros depois de 12 anos de vida. Em lugar do motor original, de potência normal 18.000 kW à rotação de 100 rpm, foi selecionado um motor com potência normal 17.500 kW à rotação de 90 rpm.

Este motor permite a utilização de um hélice, semelhante ao anterior, porém com diâmetro 5,5% maior, o que proporciona uma maior eficiência do propulsor.

QUESTÃO ILUSTRATIVA

Na prova de mar efetuada depois da reforma, o navio atingiu a velocidade de serviço, 16 nós, com o motor fornecendo 16.400 kW a 88 rpm

Como a potência consumida na prova de mar, para manter a velocidade V_s , foi considerada alta, o armador consultou um escritório de projeto para analisar estes dados

O engenheiro responsável pela análise explicou que a potência relativamente alta requerida na prova de mar era consequência do acréscimo de resistência do casco, devida ao aumento da rugosidade das chapas ao longo do tempo

QUESTÃO ILUSTRATIVA

Assim, mesmo depois de docado e limpo, o navio apresenta um aumento de resistência, devido ao aumento de rugosidade, dado por:

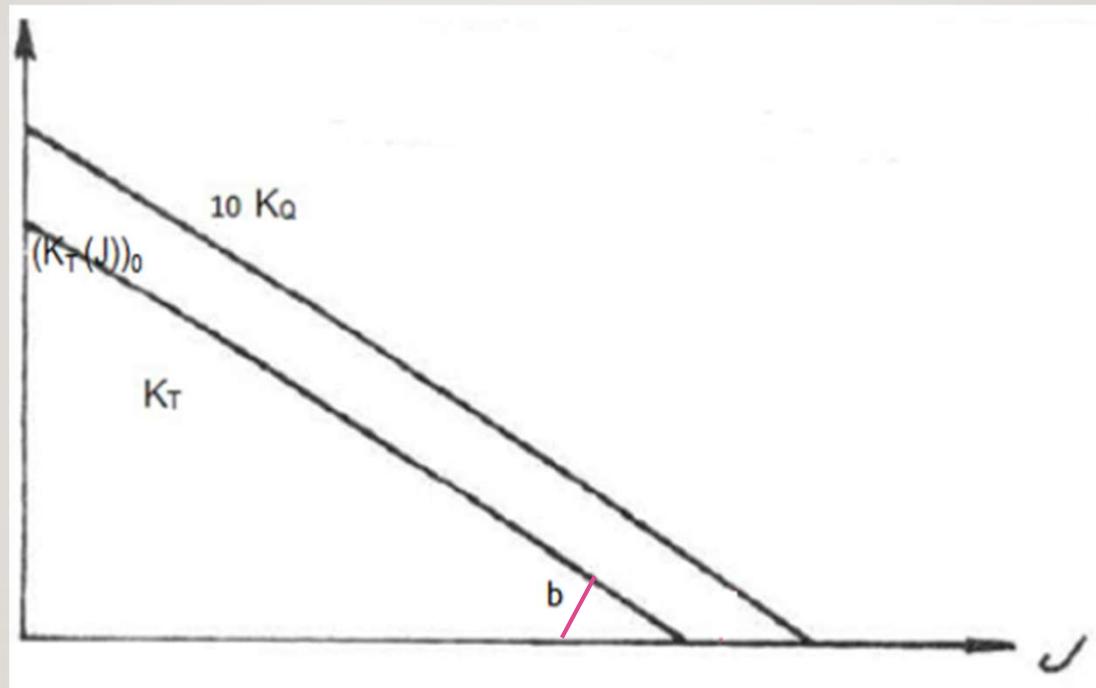
$$\Delta R_T / R_T = \alpha_1 n$$

onde n é o número de anos

- a) Apresentar um procedimento, empregando o diagrama de série sistemática de hélice, para determinar o valor de α_1
- b) Desenvolver um procedimento, empregando gráficos com variáveis dimensionais, para determinar o valor de α_1
- c) Empregando o procedimento desenvolvido, mostrar como se determina a velocidade que o navio atingirá em condições médias de casco e mar?

DIMENSIONALIZAÇÃO DO DIAGRAMA DO HÉLICE

CURVAS
ADIMENSIONAIS
DO HÉLICE
 $K_T(J)$, $10 K_Q(J)$



DIMENSIONALIZAÇÃO DO DIAGRAMA DO HÉLICE

PRIMEIRO PASSO: CONVERTER O DIAGRAMA $K_T(J)$ EM
DIAGRAMA $T(V_a)N = CTE$

SEGUNDO PASSO: CONVERTER O DIAGRAMA $K_Q(J)$ EM
DIAGRAMA $(PAH)_{AA}(V_a)N = CTE$

DIMENSIONALIZAÇÃO DA CURVA $K_T (J)$

HIPÓTESE:

$$K_T (J) = (K_T (J))_0 - b J$$

em que:

$$K_T (J) = T / \rho N^2 D^4 = T / C_1 (N)$$

$$J = V_a / N D = V_a / C_2 (N) D$$

onde

$$C_1 (N) = \rho N^2 D^4$$

$$C_2 (N) = N D$$

DIMENSIONALIZAÇÃO DA CURVA $K_T (J)$

REPRESENTAÇÃO DO EMPUXO DO HÉLICE

$$T = C_1 (N) K_T (J)$$

$$T = C_1 (N) [(K_T (J))_0 - b Va / C_2 (N)]$$

Em particular, para $N = N_1$ tem-se:

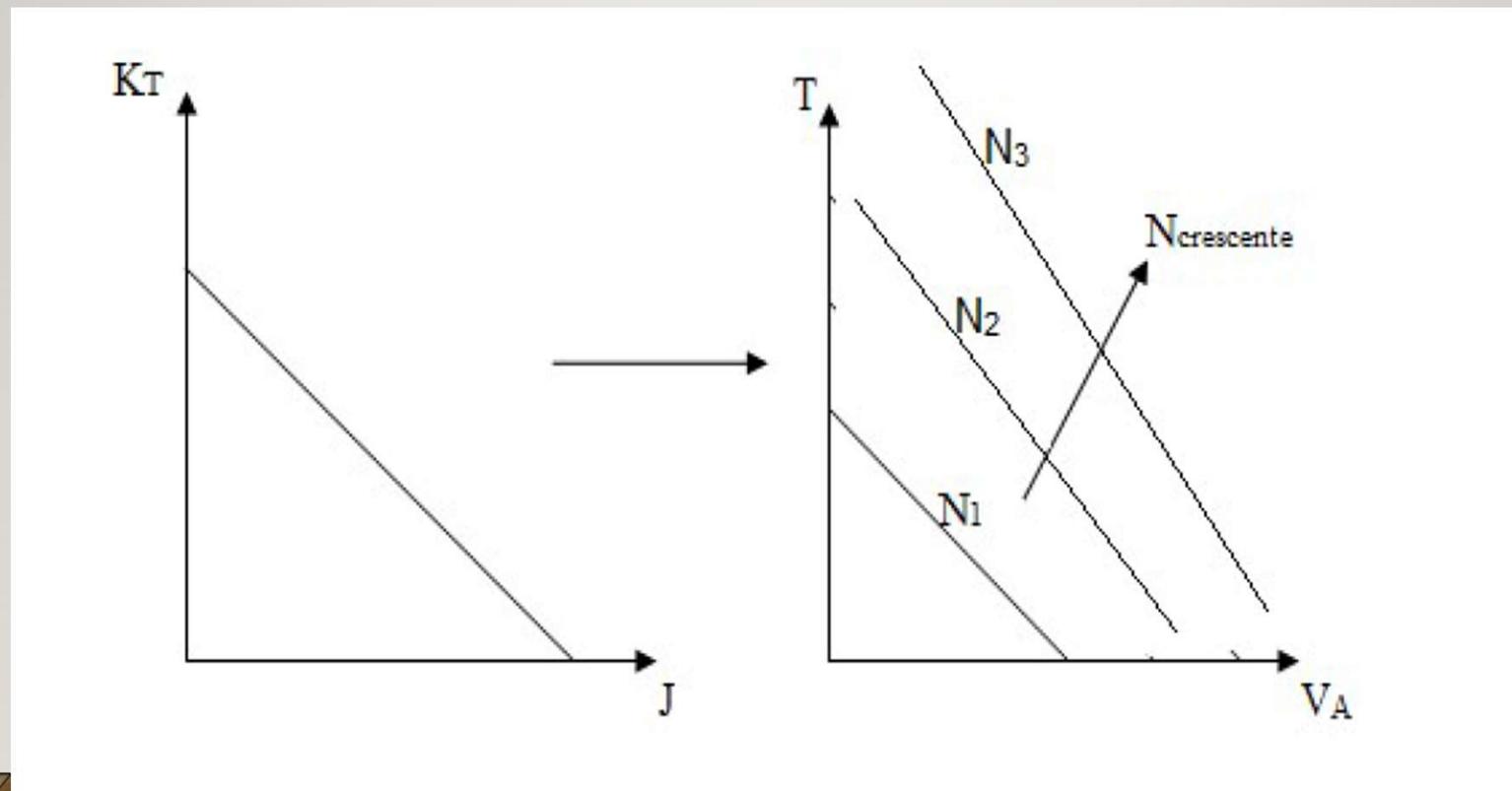
$$T = T_0(N_1) - b'(N_1) Va$$

em que

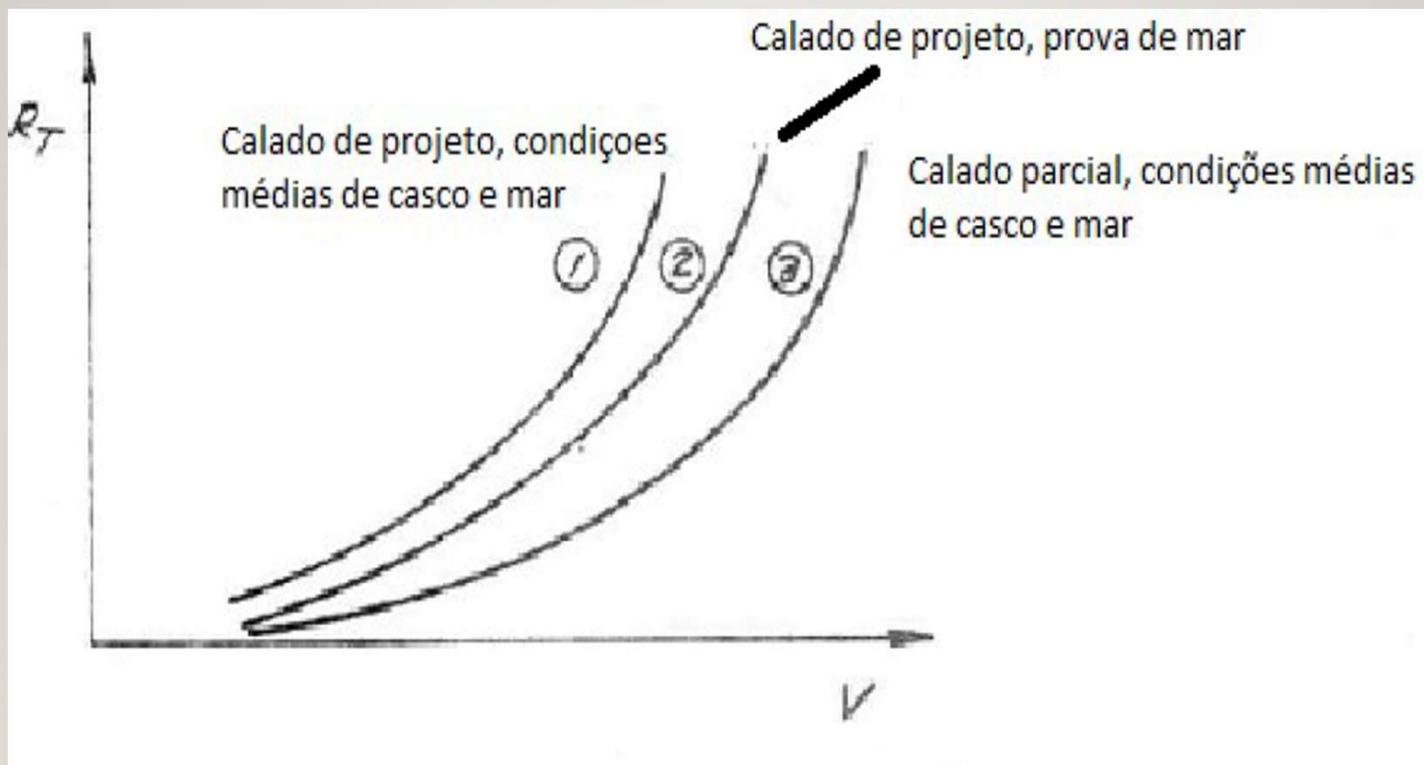
$$T_0(N_1) = C_1 (N_1) (K_T (J))_0$$

$$b'(N_1) = C_1(N_1) b / C_2 (N_1)$$

DIMENSIONALIZAÇÃO DA CURVA $K_T(J)$



INTEGRAÇÃO CASCO HÉLICE

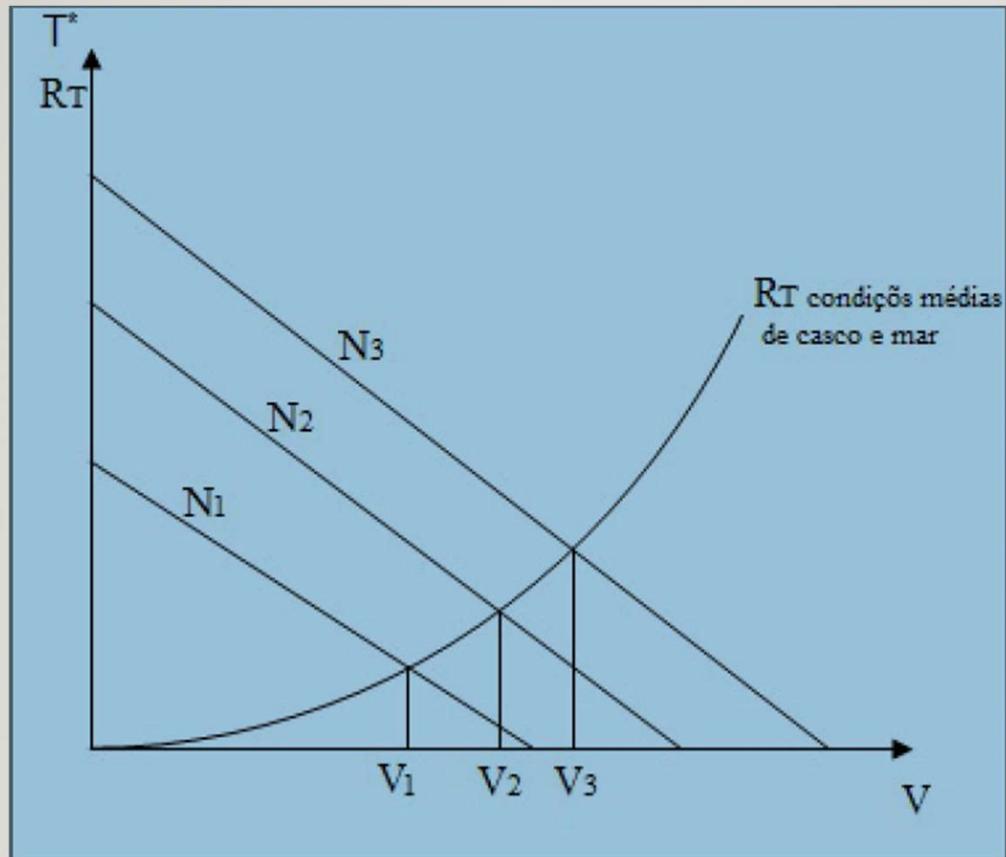


INTEGRAÇÃO CASCO - HÉLICE

Mudança de escala

$$T^* = T(1-t)$$

$$V = V_a / (1-w)$$



COMENTÁRIOS SOBRE A INTEGRAÇÃO CASCO - HÉLICE

1. A integração casco - hélice é efetuada para regime permanente, isto é, para velocidade constante

$$F = M \, dV / dt$$

em que

$$F = T - R_T / (1-t)$$

Então, para

$$dV / dt = 0$$

vem

$$T = R_T / (1-t)$$

Como empregam-se, como referência as curvas de resistência do casco, deve-se utilizar

$$T (1-t) = R_T$$

2. Assim as curvas $T(V_a)N_{=CTE}$ devem ser multiplicadas por $(1 - t)$

$$T^* = T (1-t)$$

COMENTÁRIOS SOBRE A INTEGRAÇÃO CASCO - HÉLICE

1. As curvas de Resistência do casco são plotadas em função da velocidade do navio
2. As curvas de empuxo do hélice são plotadas em função da velocidade de avanço
3. Assim, é preciso fazer outra transformação de variável para utilizar o mesmo gráfico
4. Multiplica-se V_a por $1 / (1 - w)$

Isto é:

$$V = V_a / (1 - w)$$

PREPARAÇÃO PARA A INTEGRAÇÃO CASCO – HÉLICE - MOTOR

1. DIMENSIONALIZAÇÃO DA CURVA $K_Q(j)$
2. INTEGRAÇÃO CASCO – HÉLICE
3. INTEGRAÇÃO HÉLICE - MOTOR

DIMENSIONALIZAÇÃO DA CURVA $K_Q(J)$

HIPÓTESE:

$$K_Q(J) = (K_Q(J))_0 - d J$$

em que:

$$K_Q(J) = Q / \rho N^2 D^5 = Q / C_3(N)$$

$$J = V_a / N D = V_a / C_2(N) D$$

onde

$$C_3(N) = \rho N^2 D^5$$

$$C_2(N) = N D$$

DIMENSIONALIZAÇÃO DA CURVA $K_Q(J)$

REPRESENTAÇÃO DO TORQUE DO HÉLICE

$$Q = C_3(N) K_Q(J)$$

$$Q = C_3(N) [(K_Q(J))_0 - b Va / C_2(N)]$$

Em particular, para $N = N_1$ tem-se:

$$Q = Q_0(N_1) - d'(N_1) Va$$

em que

$$Q_0(N_1) = C_3(N_1) (K_Q(J))_0$$

$$d'(N_1) = C_3(N_1) d / C_2(N_1)$$

PREPARAÇÃO DA INTEGRAÇÃO CASCO-HÉLICE - MOTOR

REPRESENTAÇÃO DA POTÊNCIA ABSORVIDA PELO HÉLICE EM ÁGUA ABERTA – $(PAH)_{AA}$

$$(PAH)_{AA} = 2 \pi Q N$$

Mas

$$Q = C_3 (N) [(K_Q (J))_0 - b V_a / C_2 (N)]$$

Portanto:

$$(PAH)_{AA} = 2 \pi N [C_3 (N) [(K_Q (J))_0 - b V_a / C_2 (N)]]$$

para $N = N_1$ tem-se:

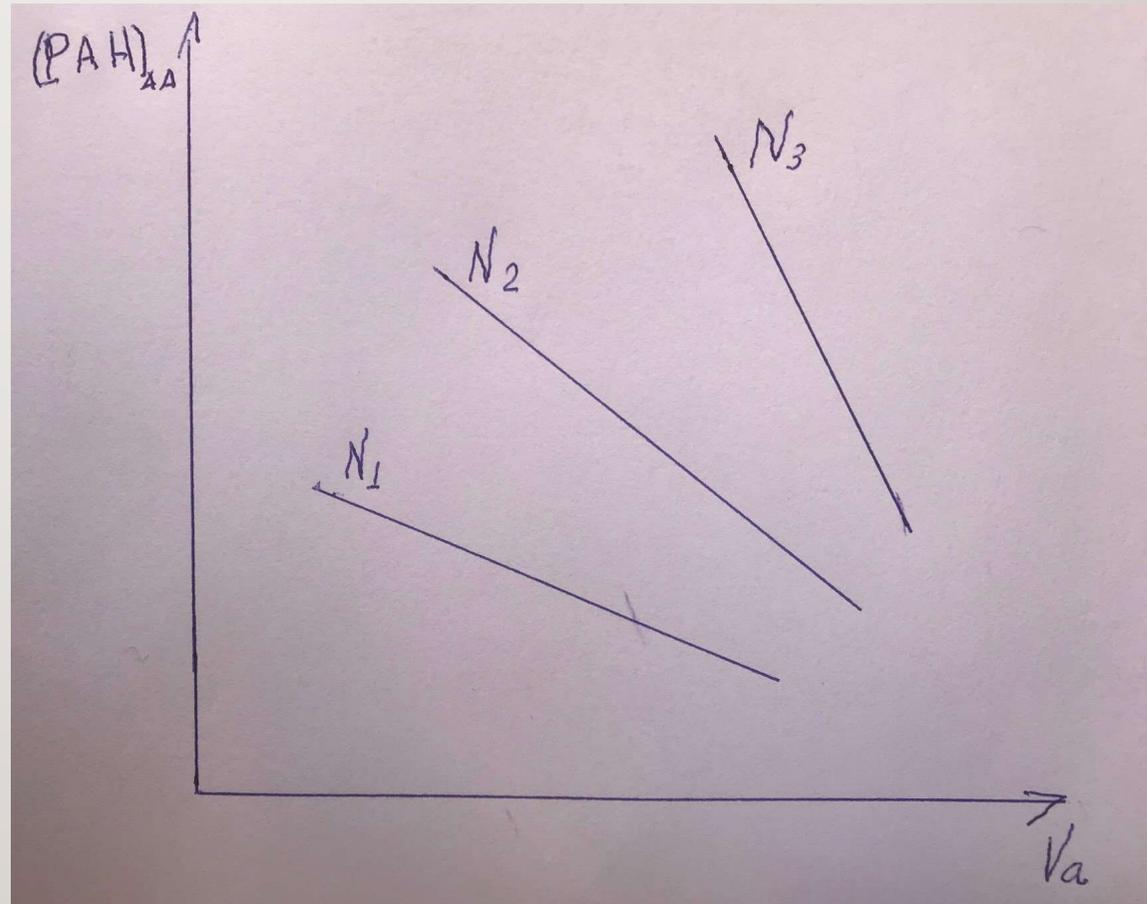
$$(PAH)_{AA} = ((PAH)_{AA})_0 (N_1) - d''(N_1) V_a$$

em que

$$((PAH)_{AA})_0 (N_1) = 2\pi N_1 C_3 (N_1) (K_Q (J))_0$$

$$d''(N_1) = 2\pi N_1 C_3(N_1) d / C_2 (N_1)$$

Representação das curvas de potência absorvida pelo hélice em água aberta em função da velocidade de avanço



COMENTÁRIOS SOBRE A INTEGRAÇÃO CASCO - HÉLICE

1. As curvas de Resistência do casco são plotadas em função da velocidade do navio
2. As curvas de potência absorvida pelo hélice em água aberta são plotadas em função da velocidade de avanço
3. Assim, é preciso fazer uma transformação de variável para utilizar o mesmo gráfico
4. Multiplica-se V_a por $1 / (1 - w)$

Isto é:

$$V = V_a / (1 - w)$$

COMENTÁRIOS SOBRE A INTEGRAÇÃO HÉLICE - MOTOR

Para a integração hélice – motor deve-se considerar a equação do movimento

$$J \frac{d\Omega}{dt} = Q_r$$

onde:

J é o momento de inércia total do sistema propulsor

Ω é a velocidade angular do eixo propulsor ($\Omega = 2\pi N$);

Q_r é a resultante dos conjugados que atuam sobre o eixo;

$$Q_r = Q_m - Q_p - Q_{at}$$

em que Q_m , Q_p e Q_{at} são respectivamente os torques do motor, do propulsor e de atrito

Para a condição de regime permanente:

$$\frac{d\Omega}{dt} = 0$$

Portanto

$$Q_m = Q_p + Q_{at}$$

COMENTÁRIOS SOBRE A INTEGRAÇÃO HÉLICE - MOTOR

Considerando o resultado anterior,

$$Q_m = Q_p + Q_{at}$$

e multiplicando os 2 lados por $2 \pi N$ vem

$$Pot_m = PAH + Pot_{at}$$

Ou, de outra forma

$$PAH = Pot_m e_t$$

Mas

$$PAH = (PAH)_{AA} / e_{rr}$$

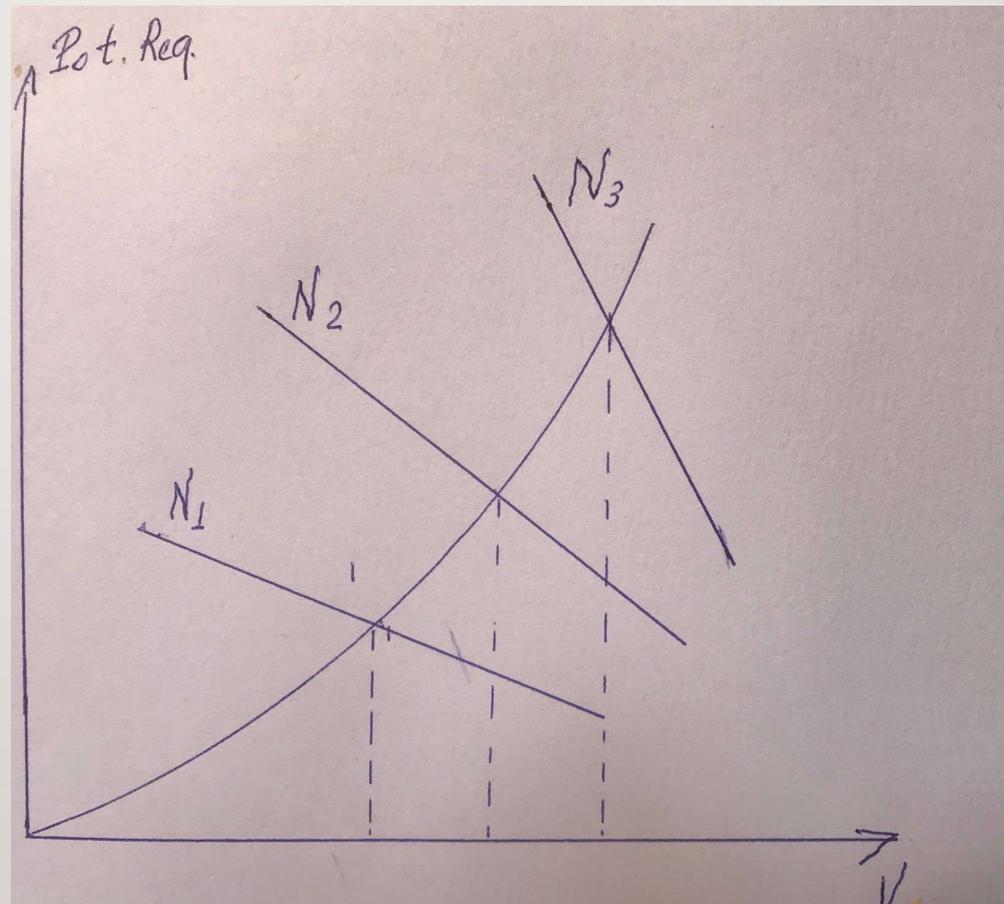
Logo

$$(PAH)_{AA} = Pot_m (e_{rr} e_t)$$

Portanto, para colocar em um mesmo gráfico de potência, define-se:

$$Pot_{Req} = (PAH)_{AA} / e_{rr} e_t$$

Representação das curvas de potência requerida em função da velocidade do navio

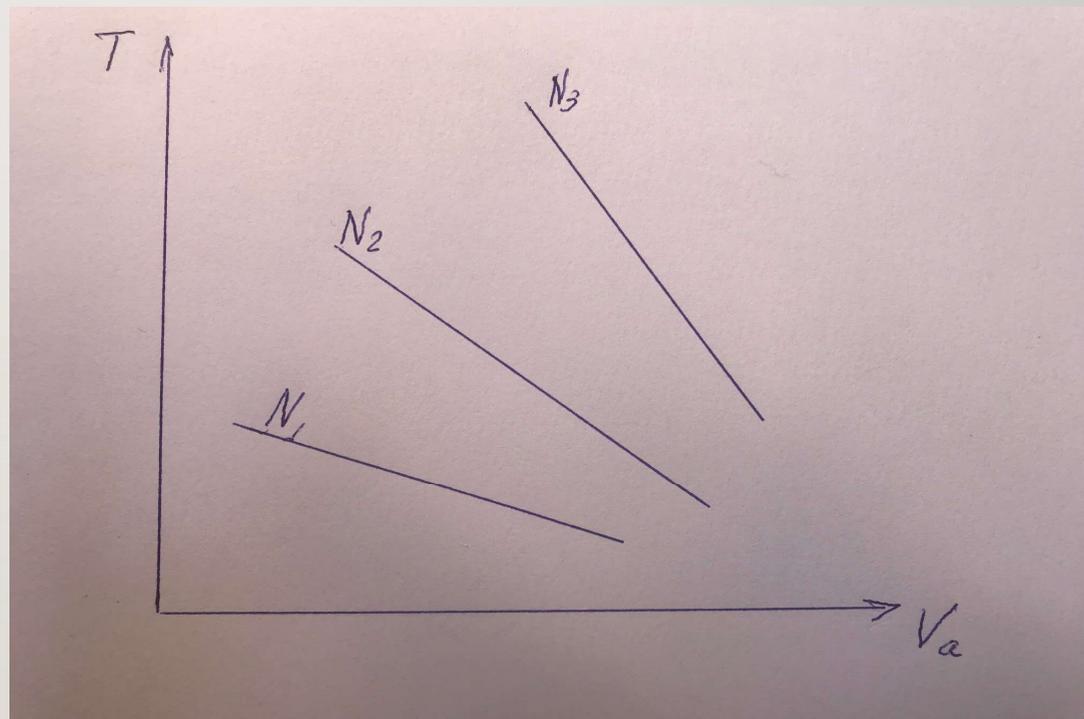


PREPARAÇÃO DO DIAGRAMA DE INTEGRAÇÃO CASCO-HÉLICE - MOTOR

APRESENTAÇÃO DE UMA SEQUÊNCIA DE PASSOS PARA
ELABORAÇÃO DE UM PROCEDIMENTO PARA ANÁLISE DE
DESEMPENHO DO SISTEMA PROPULSOR

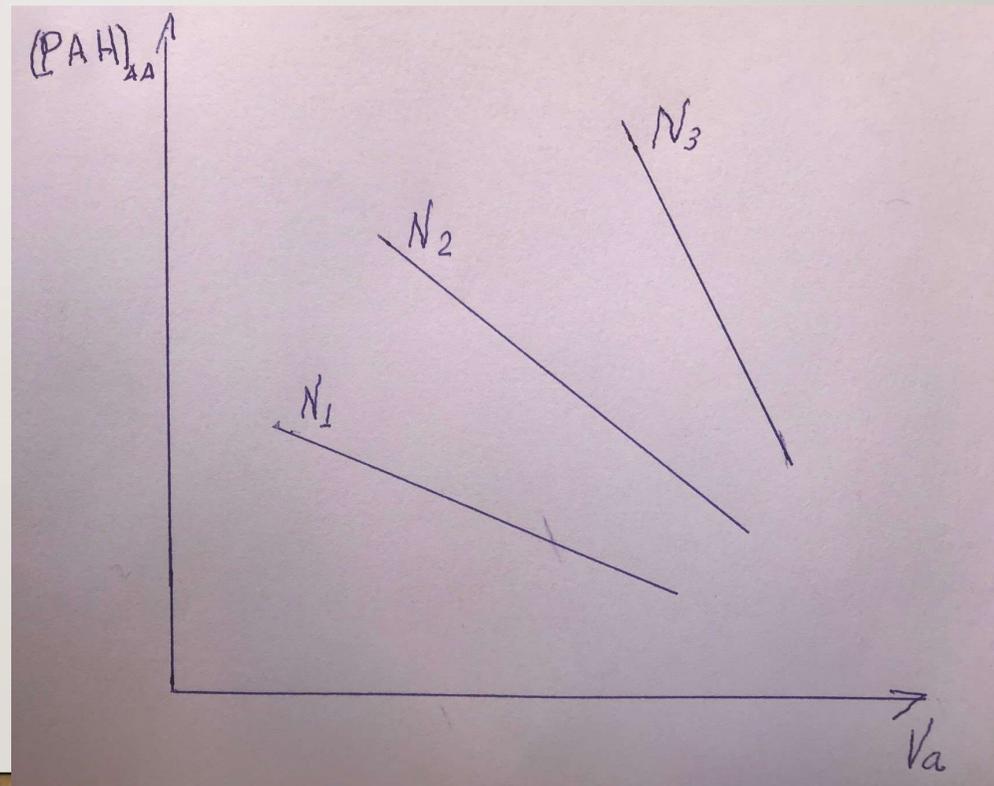
PREPARAÇÃO DO DIAGRAMA DE INTEGRAÇÃO CASCO-HÉLICE - MOTOR

Primeiro passo
Representação das
curvas de empuxo do
hélice em função da
velocidade de avanço



PREPARAÇÃO DO DIAGRAMA DE INTEGRAÇÃO CASCO-HÉLICE - MOTOR

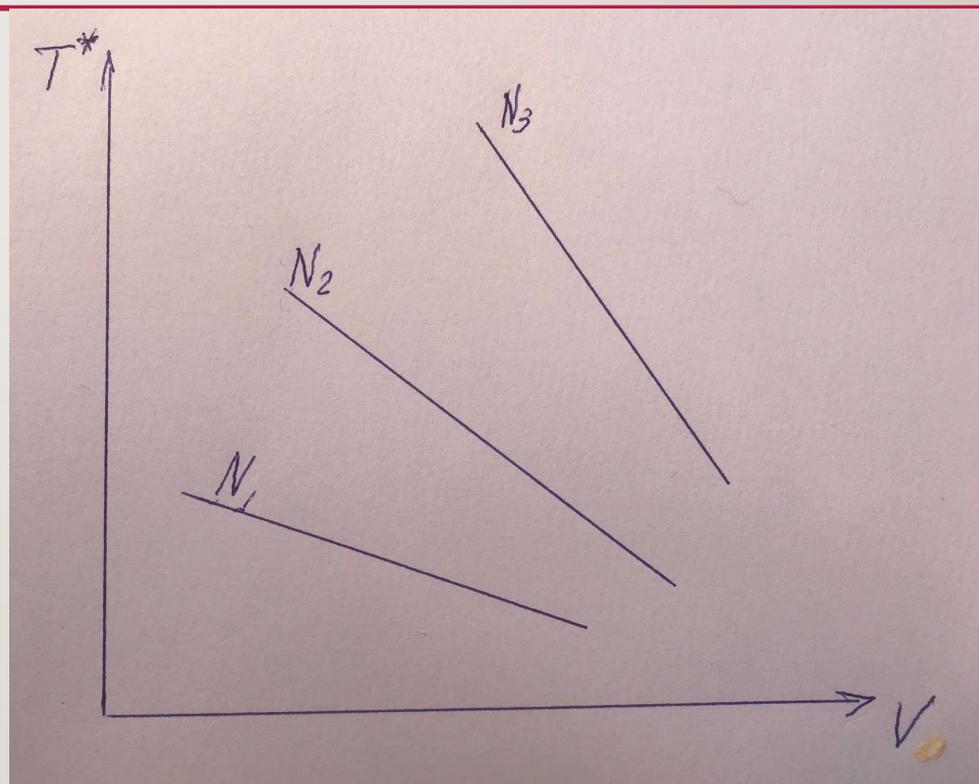
Segundo passo
Representação das
curvas de potência
absorvida pelo hélice
em água aberta em
função da velocidade
de avanço



PREPARAÇÃO DO DIAGRAMA DE INTEGRAÇÃO CASCO-HÉLICE - MOTOR

Terceiro passo
Representação das
curvas de empuxo
líquido do hélice em
função da velocidade
do navio

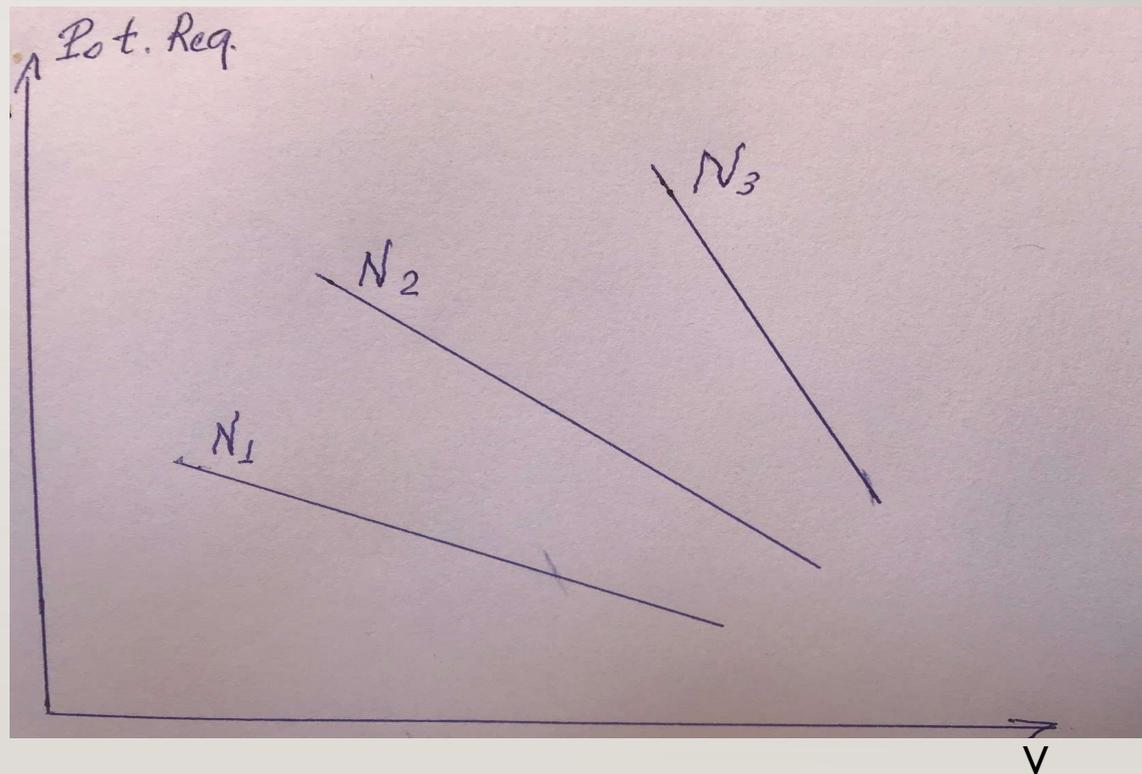
$$T^* = T(1-t)$$
$$V = V_a / (1-w)$$



PREPARAÇÃO DO DIAGRAMA DE INTEGRAÇÃO CASCO-HÉLICE - MOTOR

Quarto passo
Representação das
curvas de potência
requerida pelo hélice em
função da velocidade
de avanço

$$\text{Pot Req} = (\text{PAH}) / (e_t e_{rr})$$
$$V = V_a / (1-w)$$



OBSERVAÇÃO

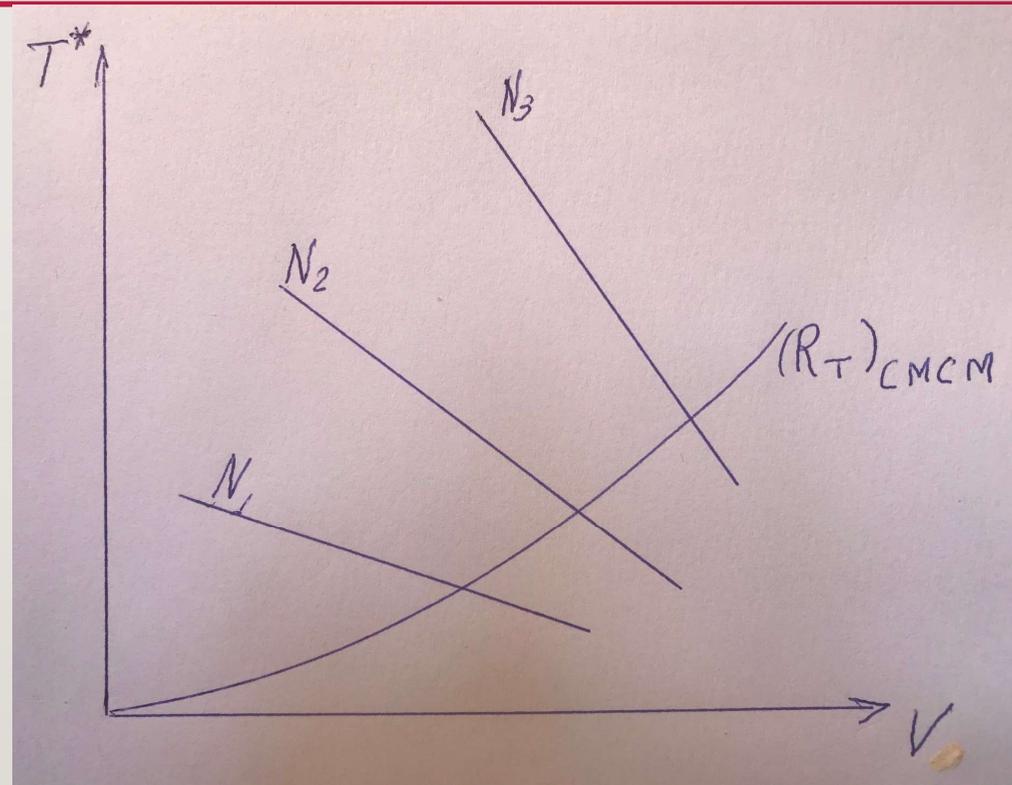
COM A MECANIZAÇÃO DO PROCEDIMENTO
PODE-SE SUPRIMIR OS PASSOS 1 E 2, INDO
DIRETAMENTE PARA OS PASSOS 3 E 4

PREPARAÇÃO DO DIAGRAMA DE INTEGRAÇÃO CASCO-HÉLICE - MOTOR

Quinto passo

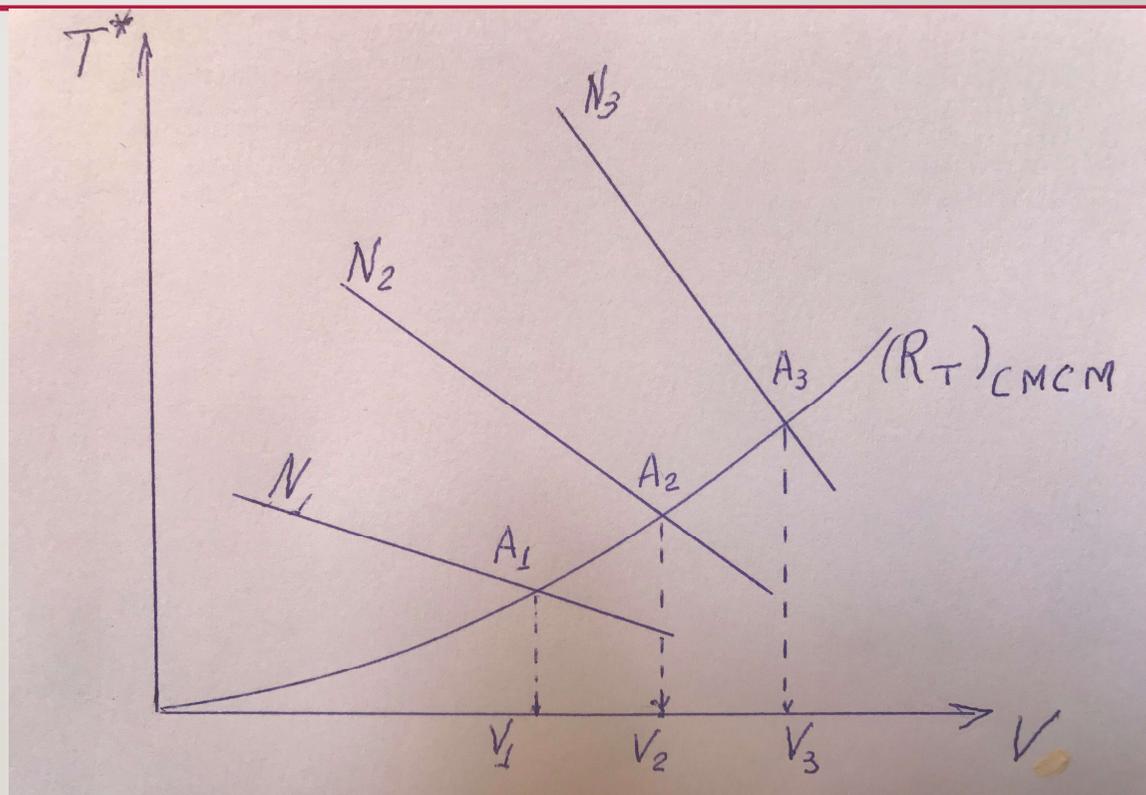
Gráfico de forças

Representação das
curvas de empuxo
do hélice e da
resistência do
navio em função da
velocidade



PREPARAÇÃO DO DIAGRAMA DE INTEGRAÇÃO CASCO-HÉLICE - MOTOR

Sexto passo
Gráfico de forças
Determinação dos pontos de interação casco – hélice
Cada ponto A_j define um ponto de regime permanente
 $A_j = A_j(N_j, V_j)$



PREPARAÇÃO DO DIAGRAMA DE INTEGRAÇÃO CASCO-HÉLICE - MOTOR

Sétimo passo

Gráfico de potência

Determinação dos pontos
de interação casco –
hélice no diagrama de
integração

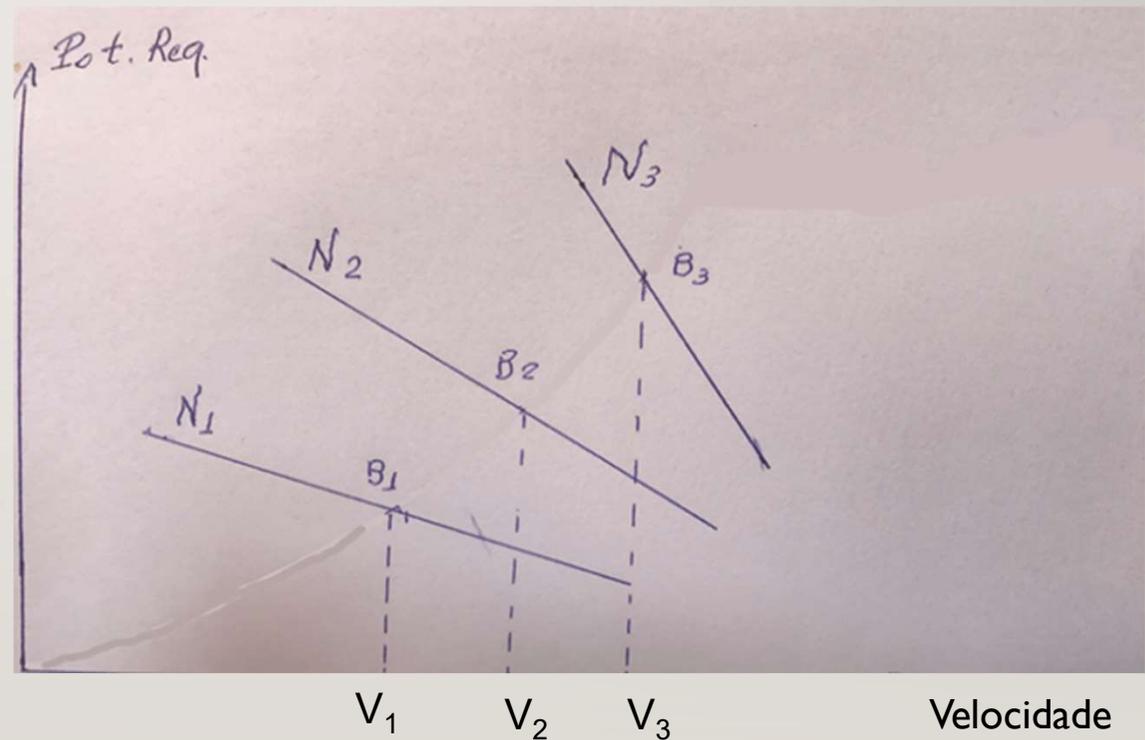
Cada ponto do gráfico de
força A_j

$$A_j = A_j(N_j, V_j)$$

tem seu correspondente

No gráfico de potência B_j

$$B_j = B_j(N_j, V_j)$$



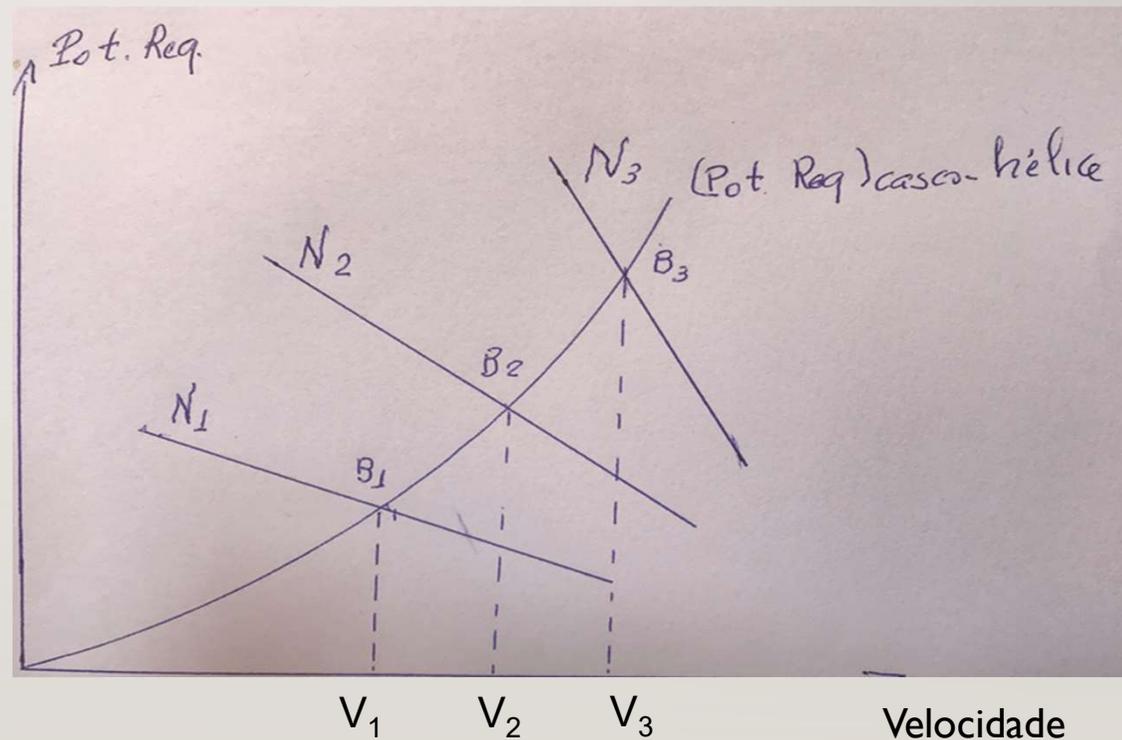
PREPARAÇÃO DO DIAGRAMA DE INTEGRAÇÃO CASCO-HÉLICE - MOTOR

Oitavo passo

Gráfico de potência

Levantamento da curva de potência requerida casco – hélice passando pelos pontos

$$B_j = B_j(N_j, V_j)$$



PREPARAÇÃO DO DIAGRAMA DE INTEGRAÇÃO CASCO-HÉLICE - MOTOR

Como os gráficos de força e potência tem como eixo comum a velocidade coloca-se no mesmo digrama os dois gráficos
Para isto efetua-se uma rotação de 180 graus no eixo de forças

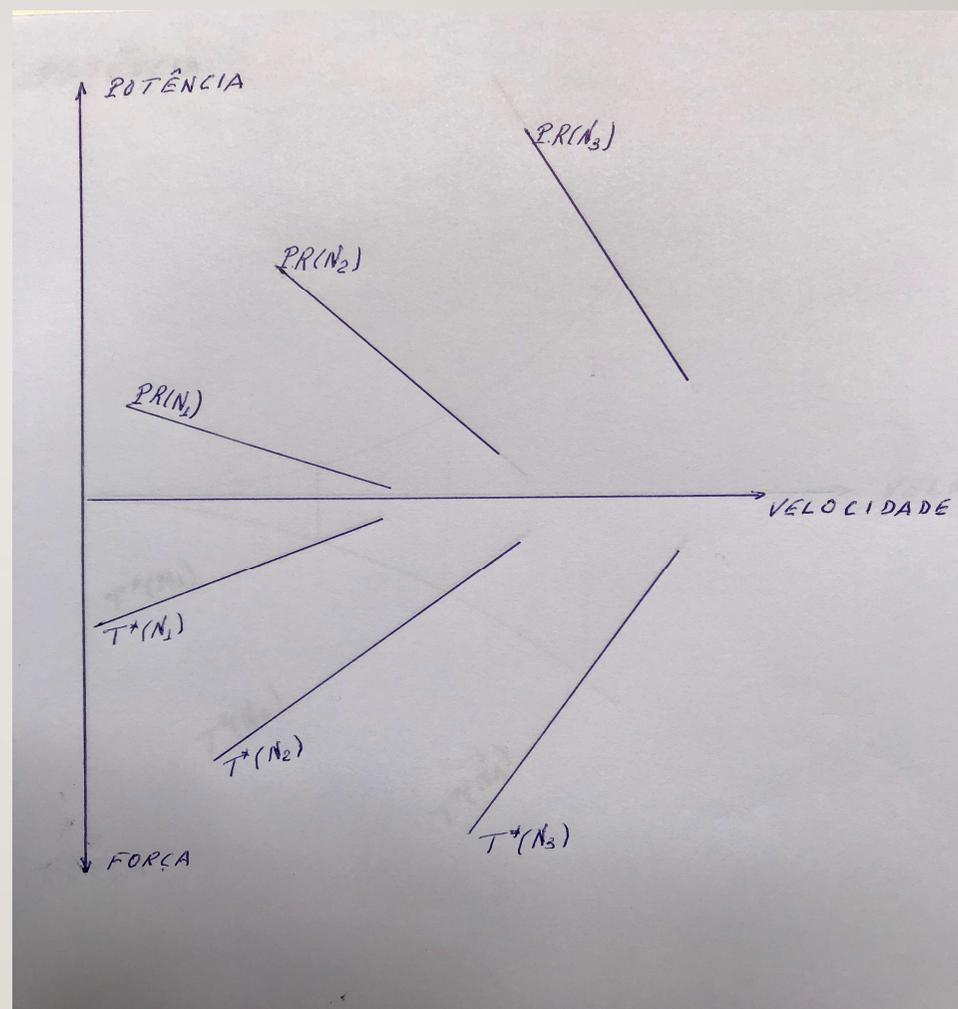
A vantagem desta mudança é que fica mais simples determinar os pontos $B_j = B_j(N_j, V_j)$ a partir dos pontos $A_j = A_j(N_j, V_j)$

NONO PASSO

Diagrama de integração

Curvas do hélice

- empuxo líquido - T^*
- potência requerida - PR



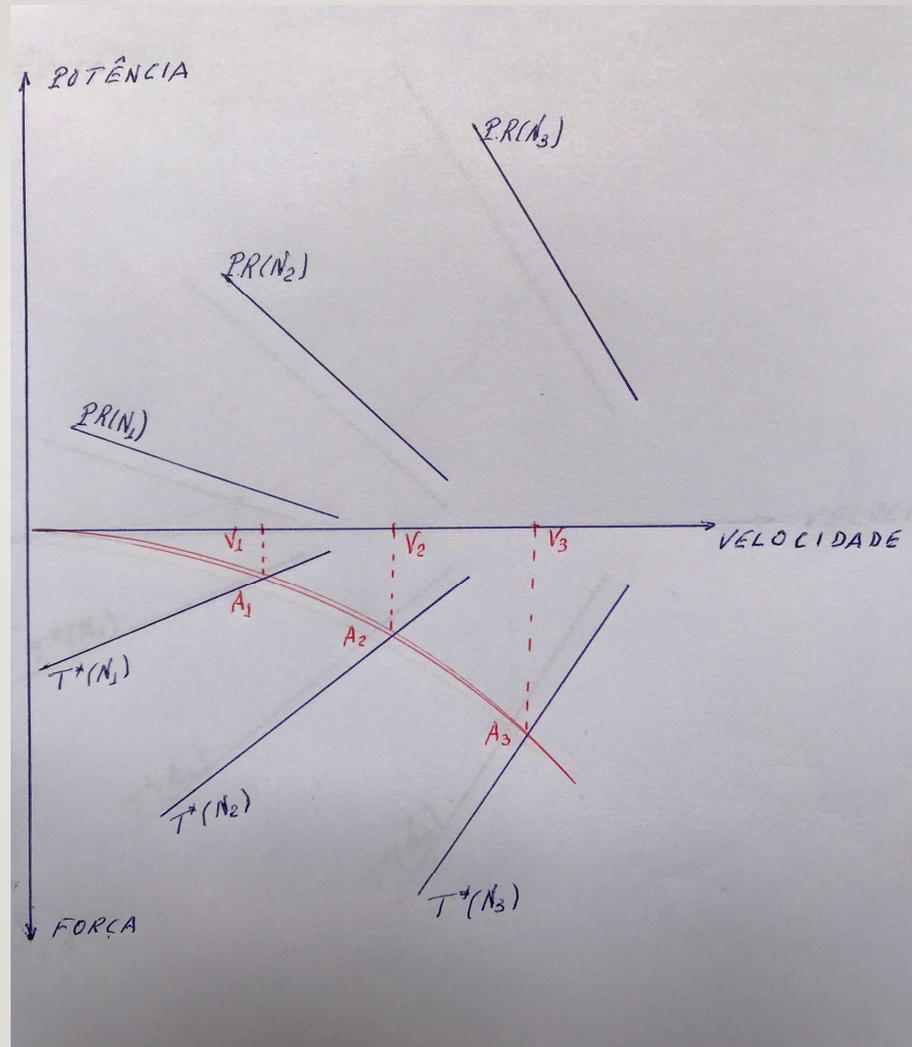
DÉCIMO PASSO

Interação casco - hélice

Desenha-se no gráfico de força a curva de resistência do casco

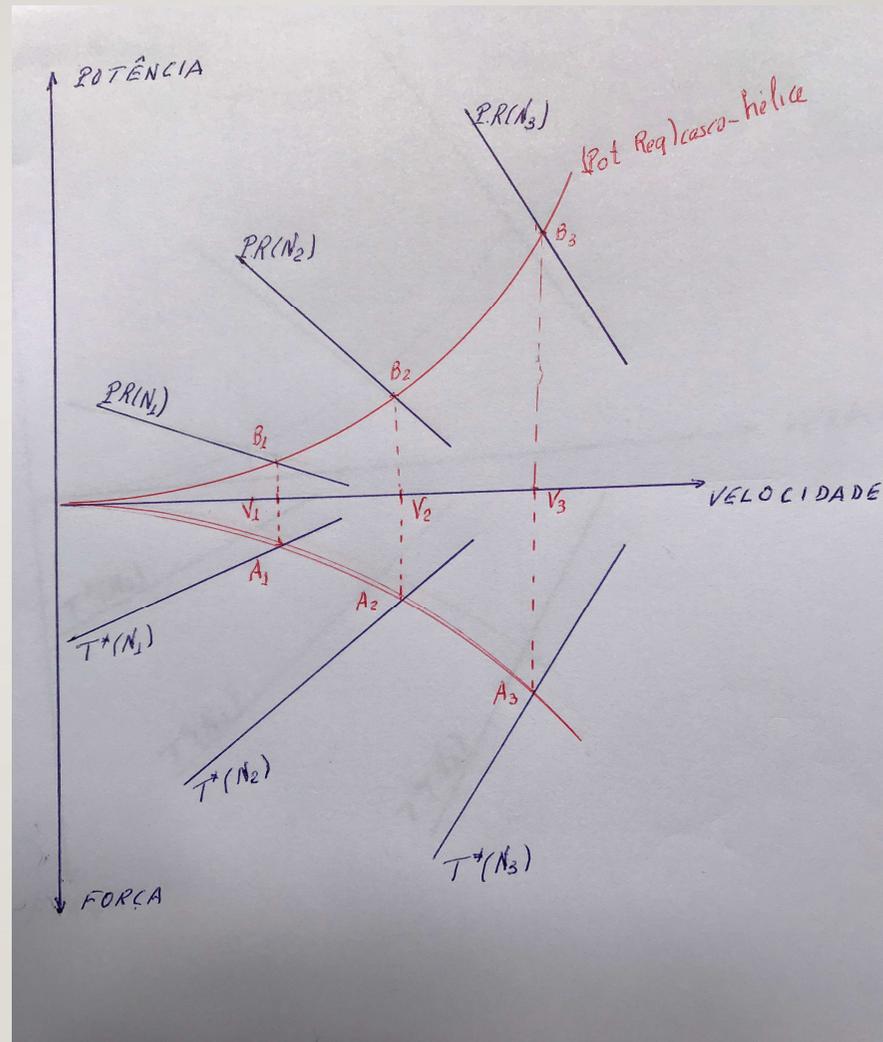
Obtém-se os pontos

$$A_j = A_j(N_j, V_j)$$



DÉCIMO PRIMEIRO PASSO

Marcam-se os pontos
 $B_j = B_j(N_j, V_j)$ e
desenha-se a curva de
potência requerida
casco - hélice



CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES PARA INTEGRAÇÃO HÉLICE - MOTOR

1. GRÁFICO DE POTÊNCIA EM FUNÇÃO DA ROTAÇÃO DO MOTOR

Pode-se representar a região de operação do motor

2. CURVA DE POTÊNCIA REQUERIDA CASCO – HÉLICE

A curva de potência versus velocidade, do diagrama de integração, pode ser convertida numa curva potência versus rotação

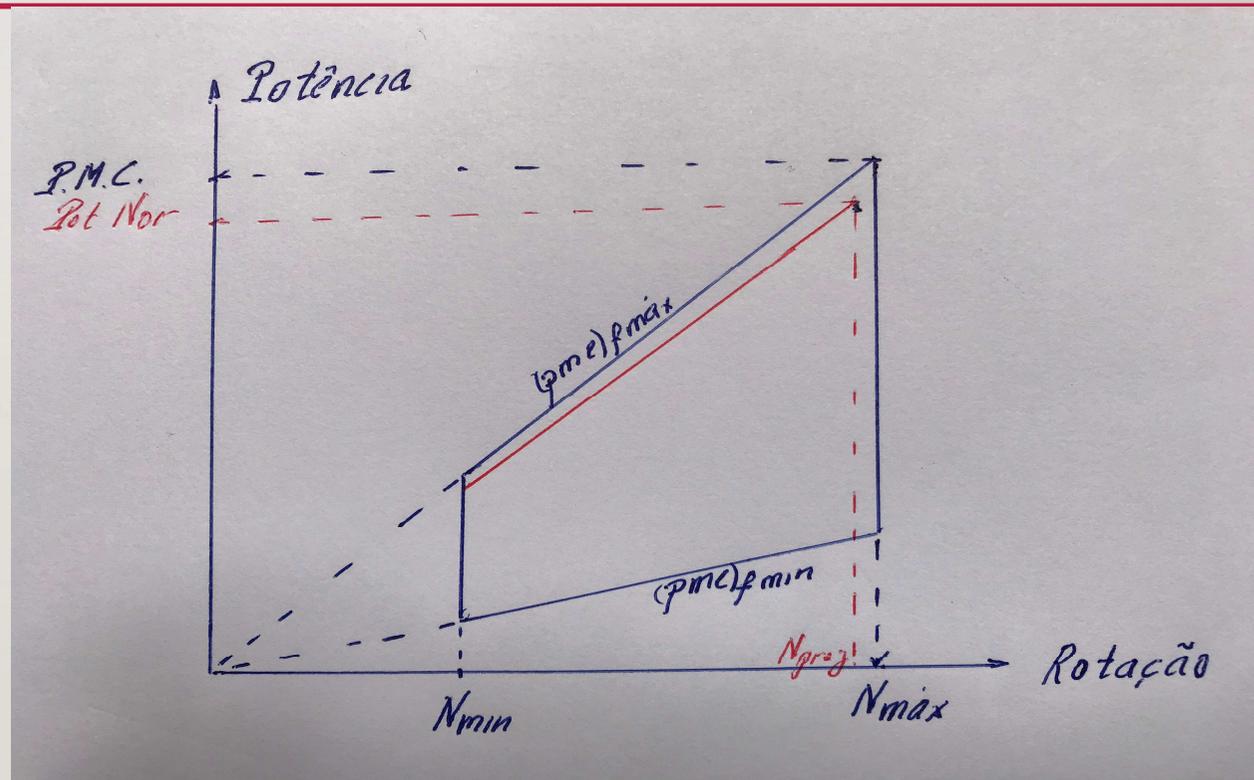
3. REPRESENTAÇÃO NUMA MESMA FIGURA

GRÁFICO DE POTÊNCIA EM FUNÇÃO DA ROTAÇÃO DO MOTOR

Região de operação do motor

Delimitada pelas curvas de rotação máxima e mínima e de pressão média efetiva no freio máxima e mínima

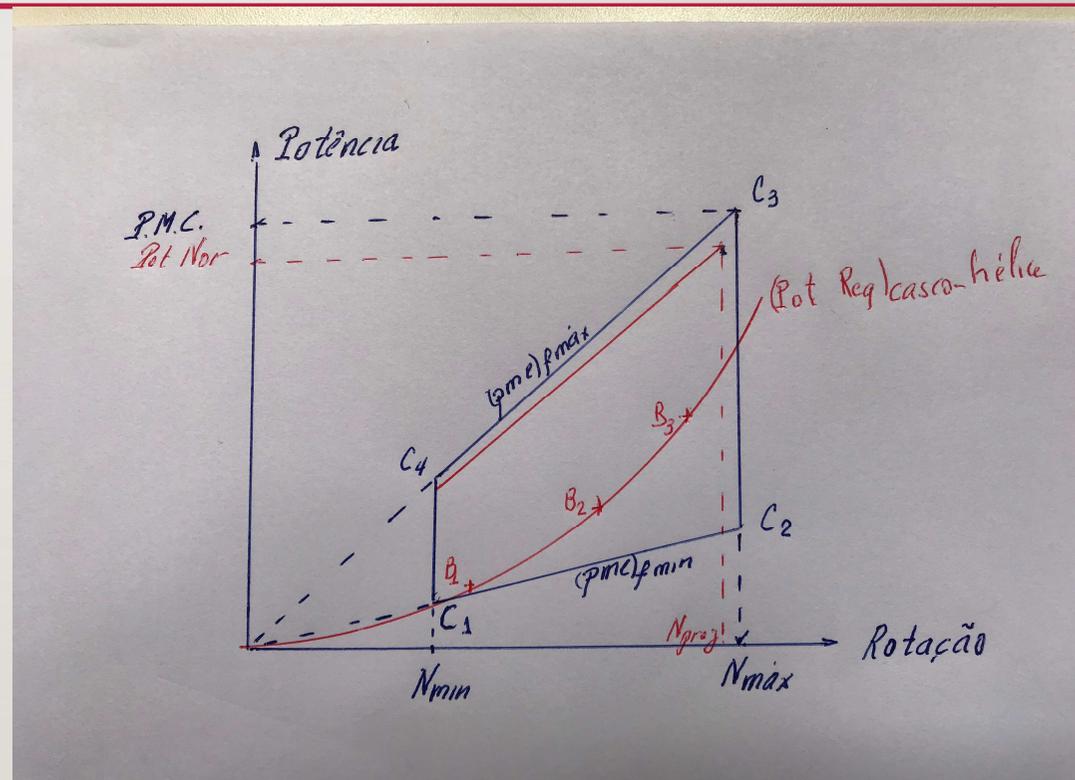
Identificação do ponto de projeto (Pot Nor e N_{proj})



REPRESENTAÇÃO NUMA MESMA FIGURA DAS CURVAS DO MOTOR E DO CASCO - HÉLICE

Região de operação do motor e Curva de potência requerida casco – hélice

Observação: pode-se verificar quais os pontos da curva de potência requerida estão dentro da região de operação do motor



PREPARAÇÃO PARA A INTEGRAÇÃO CASCO – HÉLICE - MOTOR

No slide anterior a curva de potência requerida foi desenhada no gráfico do motor

É possível analisar a integração com o motor neste diagrama

Porém, é mais conveniente representar a região de operação do motor no gráfico de potência do diagrama de integração

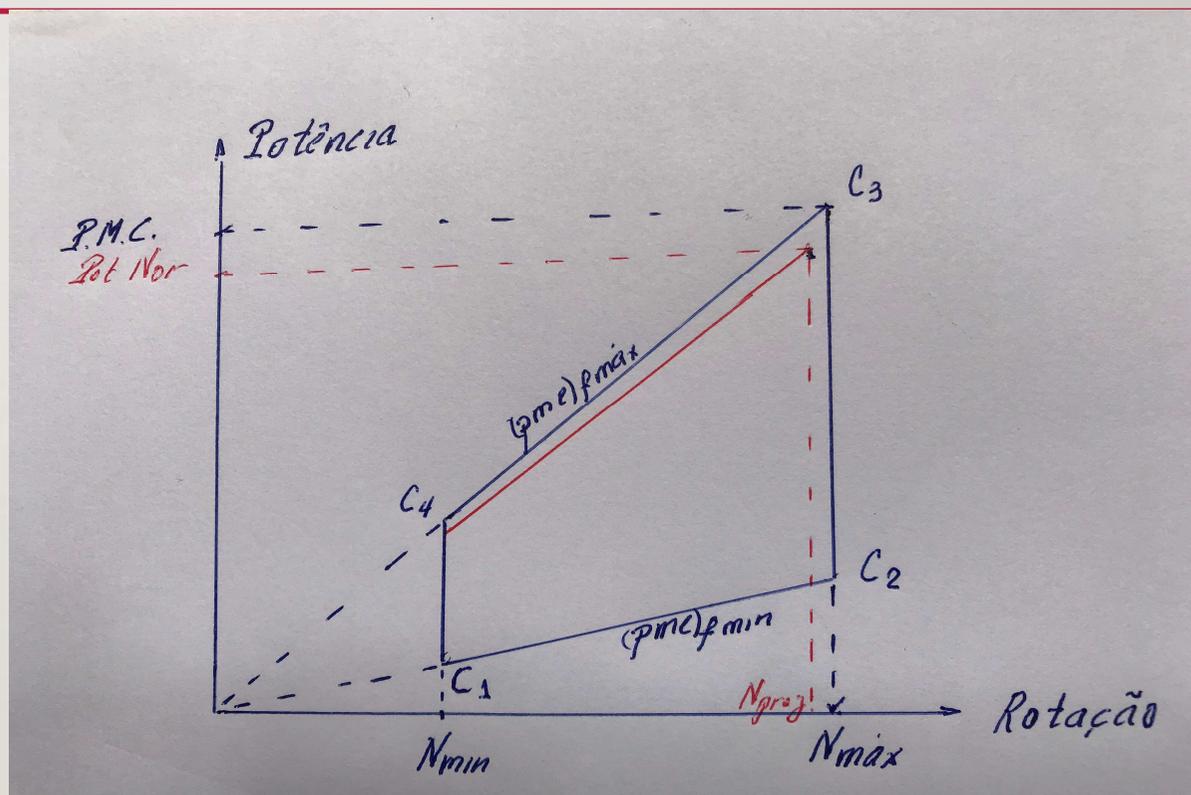
Para isto os pontos que limitam a região de operação do motor C_j $j = 1$ a 4 , mostrados no próximo slide, são transferidos para o gráfico

As curvas que unem esses pontos delimitam a região de operação

PREPARAÇÃO PARA A INTEGRAÇÃO CASCO – HÉLICE - MOTOR

Identificação dos pontos

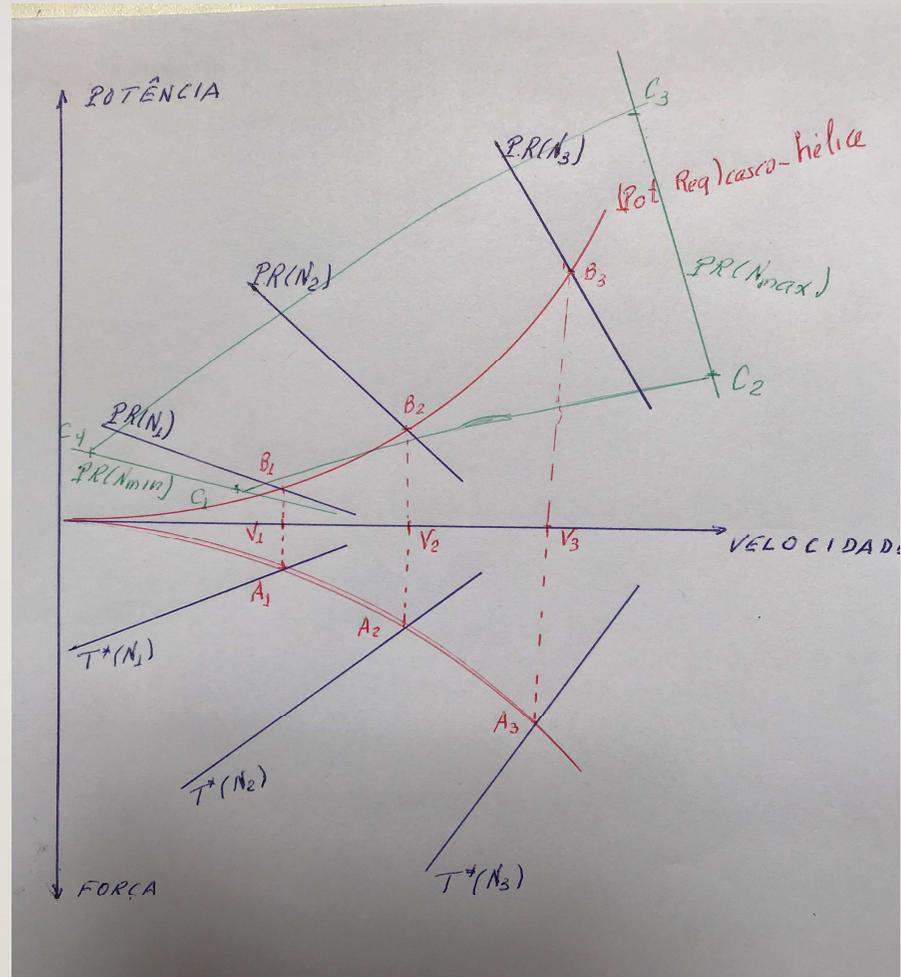
- $C_1: (N_{\min}, (pme)_{f\min})$
- $C_2: (N_{\max}, (pme)_{f\min})$
- $C_3: (N_{\max}, (pme)_{f\max})$
- $C_4: (N_{\min}, (pme)_{f\max})$



DÉCIMO SEGUNDO PASSO

Marcam-se os pontos $C_j = C_j(N_j, Pot_j)$ e desenha-se a região de potência do motor

Observação:
A transferência da região de operação feita vale para instalação direta em que motor e hélice têm a mesma rotação



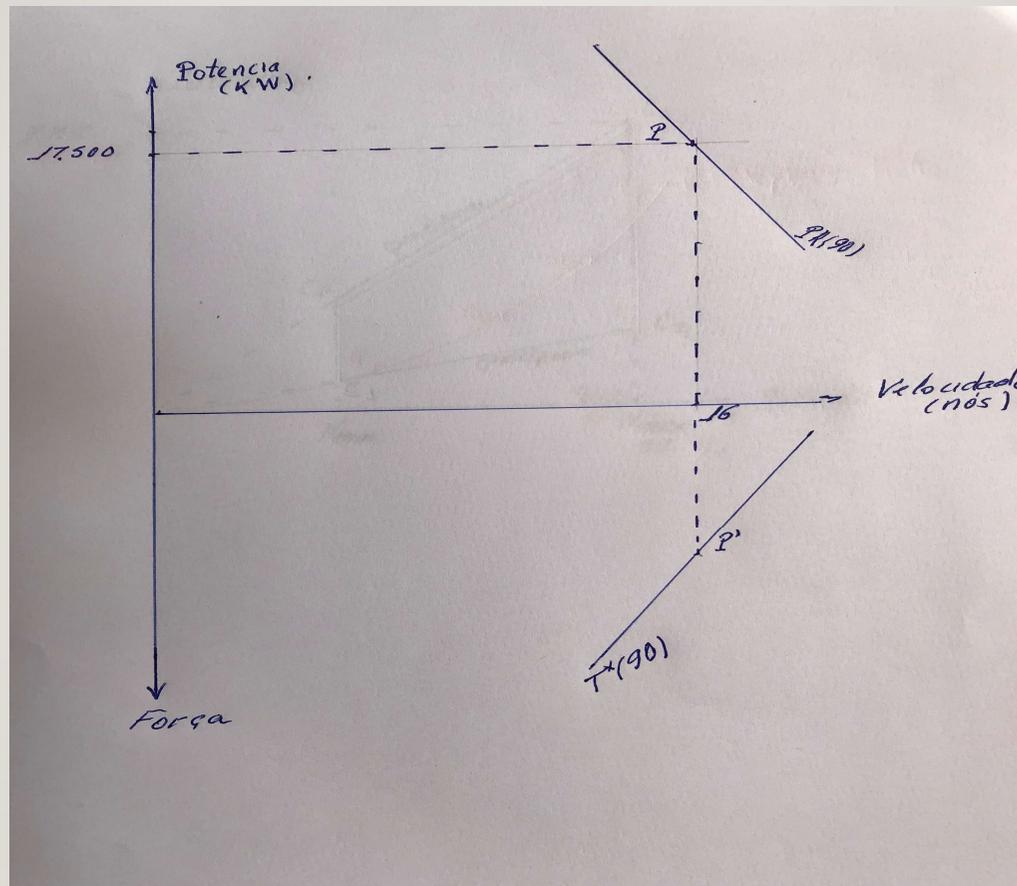
RESOLUÇÃO DA QUESTÃO ILUSTRATIVA

APLICAÇÃO DO PROCEDIMENTO

1. Desenhar o diagrama de integração
 - com os gráficos de força e potência em função da velocidade
 2. Representar o ponto de projeto neste diagrama
 - P: no gráfico de potência $P = P(16 \text{ nós}, 17.500 \text{ kW}, 90 \text{ rpm})$
 - P': no gráfico de força $P = P(16 \text{ nós}, 90 \text{ rp})$
- (Veja Figura 1)

Figura 1
Representação do
ponto de projeto da
nova instalação
propulsora

Hipótese:
Resistência de
casco novo



RESOLUÇÃO DA QUESTÃO ILUSTRATIVA

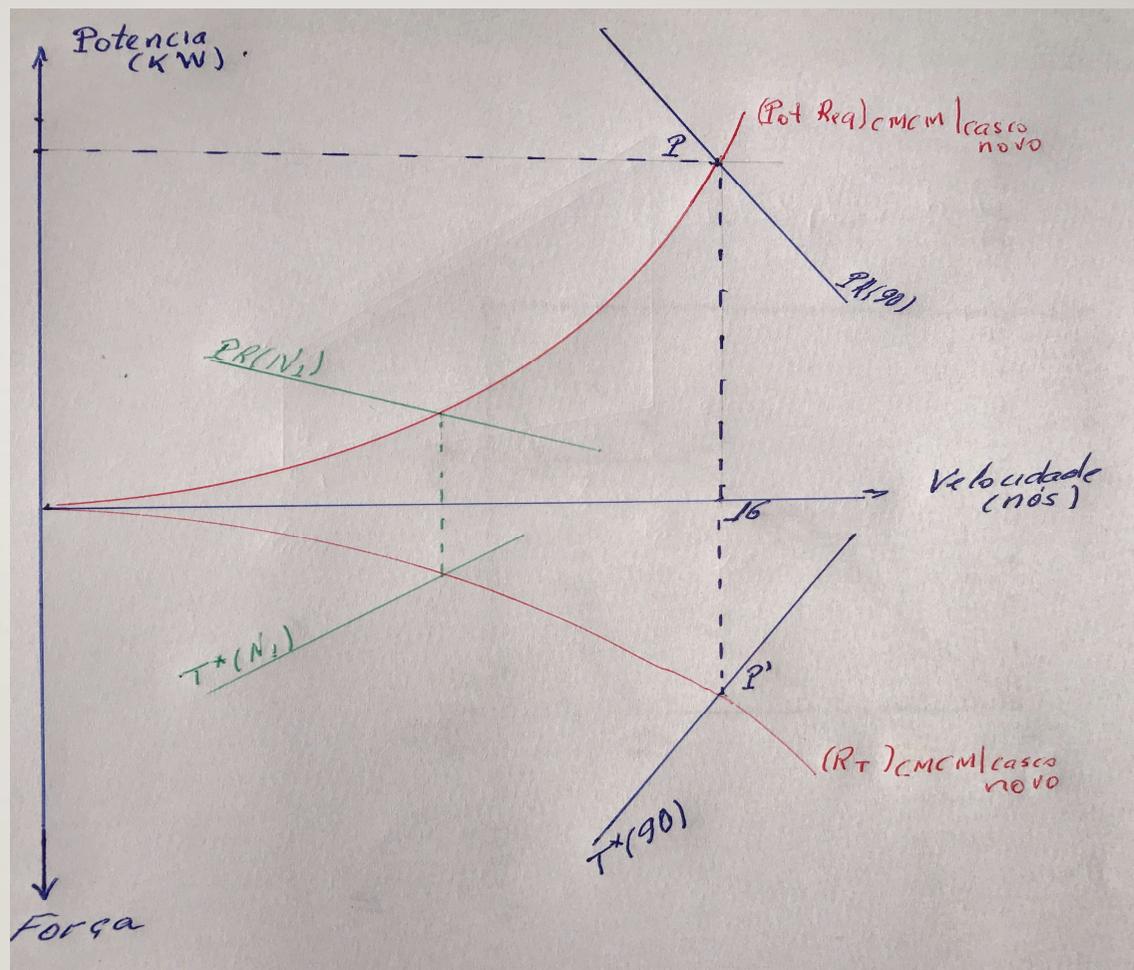
APLICAÇÃO DO PROCEDIMENTO

3. Pelo ponto P' passa a curva de resistência para condições médias de casco e mar, admitindo rugosidade de casco novo

4. Pelo ponto P passa a curva de potência requerida casco - hélice para condições médias de casco e mar, admitindo rugosidade de casco novo
(Veja Figura 2)

Observação: Foram desenhadas as curvas auxiliares de $T^*(N_1)$ e $PR(N_1)$

Figura 2
Representação das
curvas de projeto
- Resistência do casco
- Potência requerida
casco - hélice



REPRESENTAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DO MOTOR

1. São conhecidas as especificações de projeto do motor

Potência Normal 17.500 kW

Rotação de projeto 90 rpm

2. Adotam-se valores para margem de potência e margem de rotação

$$MP = 0,10$$

$$Mrot = 0,03$$

3. Admite-se adicionalmente

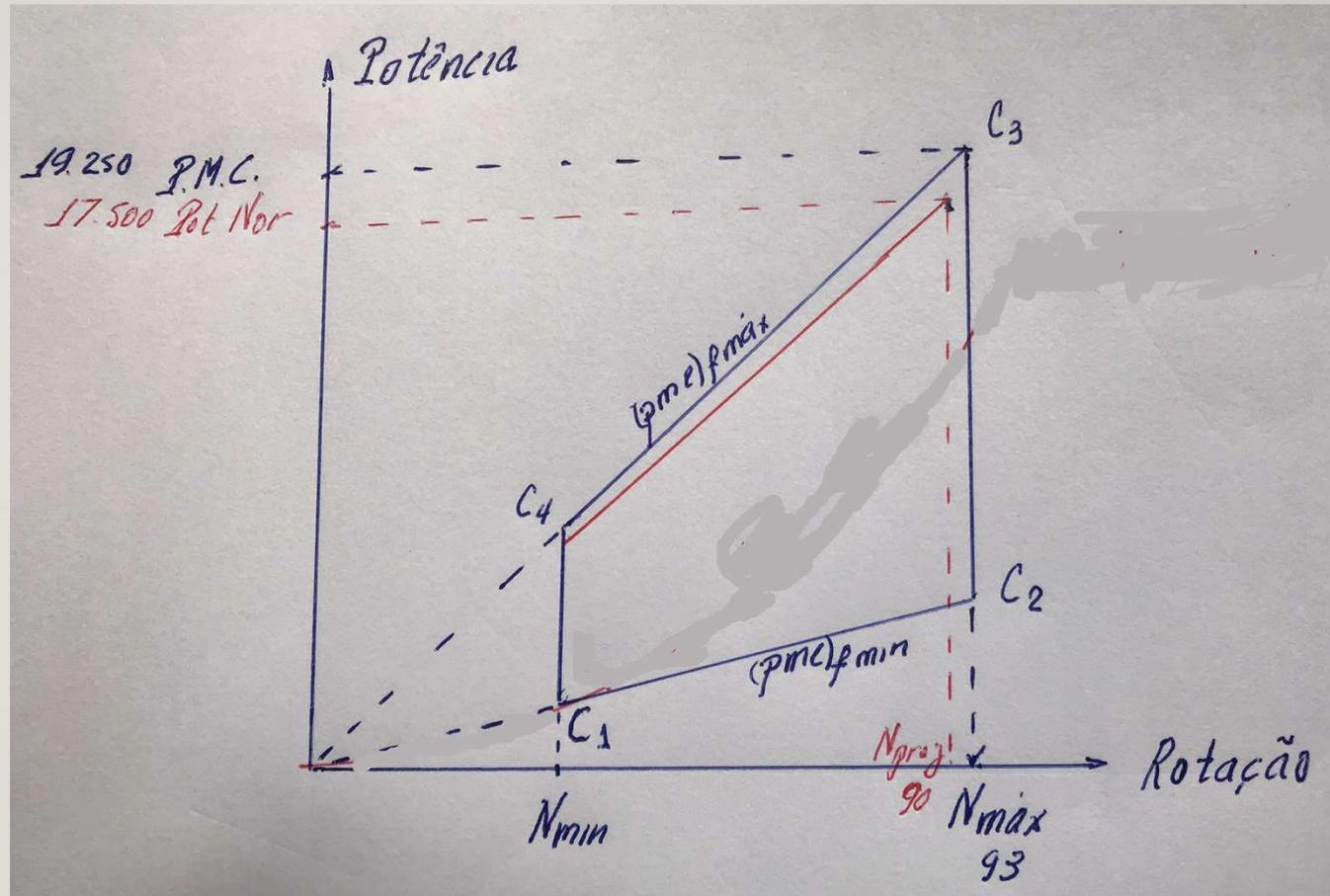
$$N_{min} = 0,4 N_{max}$$

$$(pme)_{fmin} = 0,3(pme)_{fproj}$$

Pode-se, então, construir no gráfico potência versus rotação a região de operação do motor

(veja Figura 3)

Figura 3
Representação
da região de
operação do
motor



REPRESENTAÇÃO DA REGIÃO DE OPERAÇÃO DO MOTOR

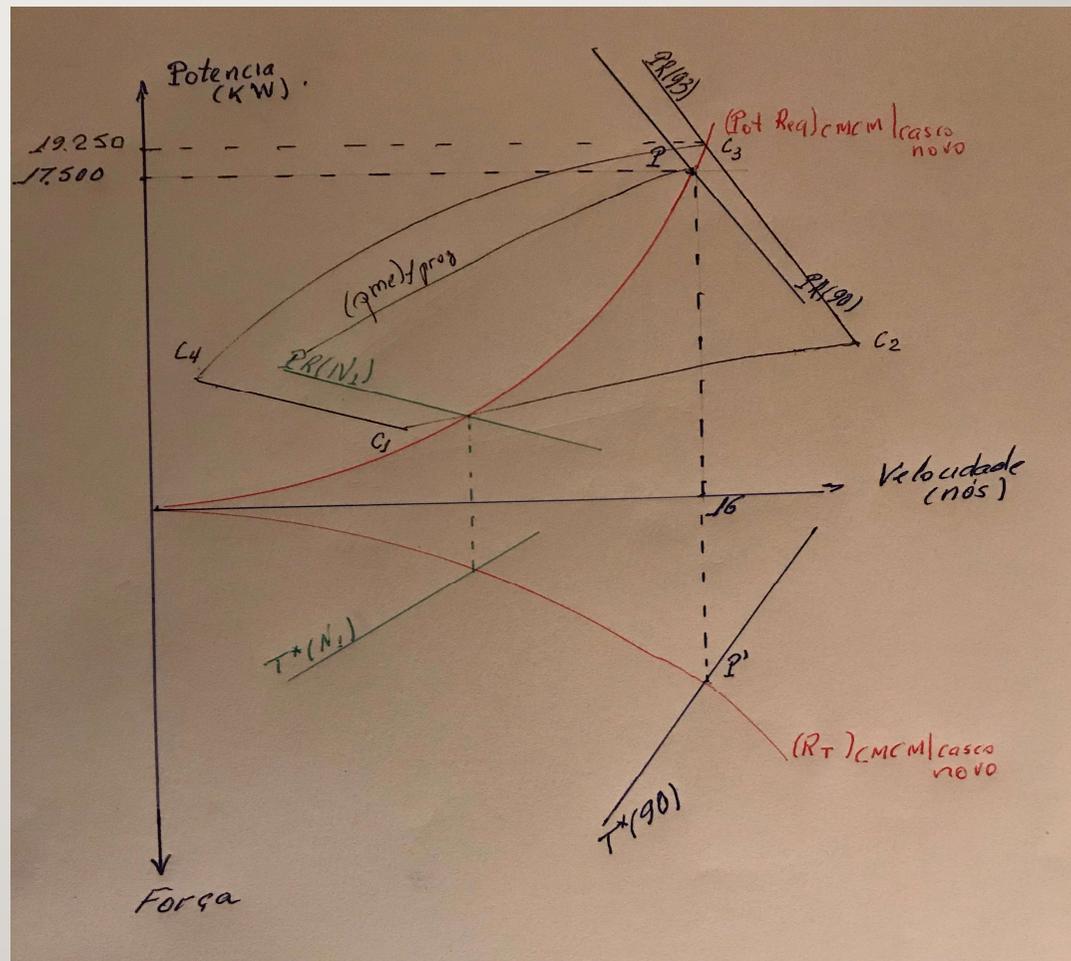
1. Os dados da figura 3 podem ser transferidos para o gráfico de potência do diagrama de integração

Pontos: C_1 C_2 C_3 C_4

Curva de pressão média efetiva no freio de projeto

(Veja Figura 4)

Figura 4
Representação da
região de operação
do motor no
diagrama de
integração



REPRESENTAÇÃO DOS DADOS DA PROVA DE MAR

Representar o ponto da prova de mar no diagrama

- D: no gráfico de potência $P = P(16 \text{ nós}, 16.800 \text{ kW}, 88 \text{ rpm})$

Desenha-se a curva de potência requerida que passa por esse ponto

(Veja Figura 5)

Pode-se desenhar no gráfico de força a curva de empuxo líquido para rotação 88 rpm

Determina-se, então, o ponto D' para $V = 16$ sobre a curva de $T^*(88)$

(Veja Figura 6)

Figura 5
Representação do
ponto de operação em
prova de mar
Ponto D: ($V = 16$ nós,
potência = 16.800 kW,
rotação = 88 rpm)

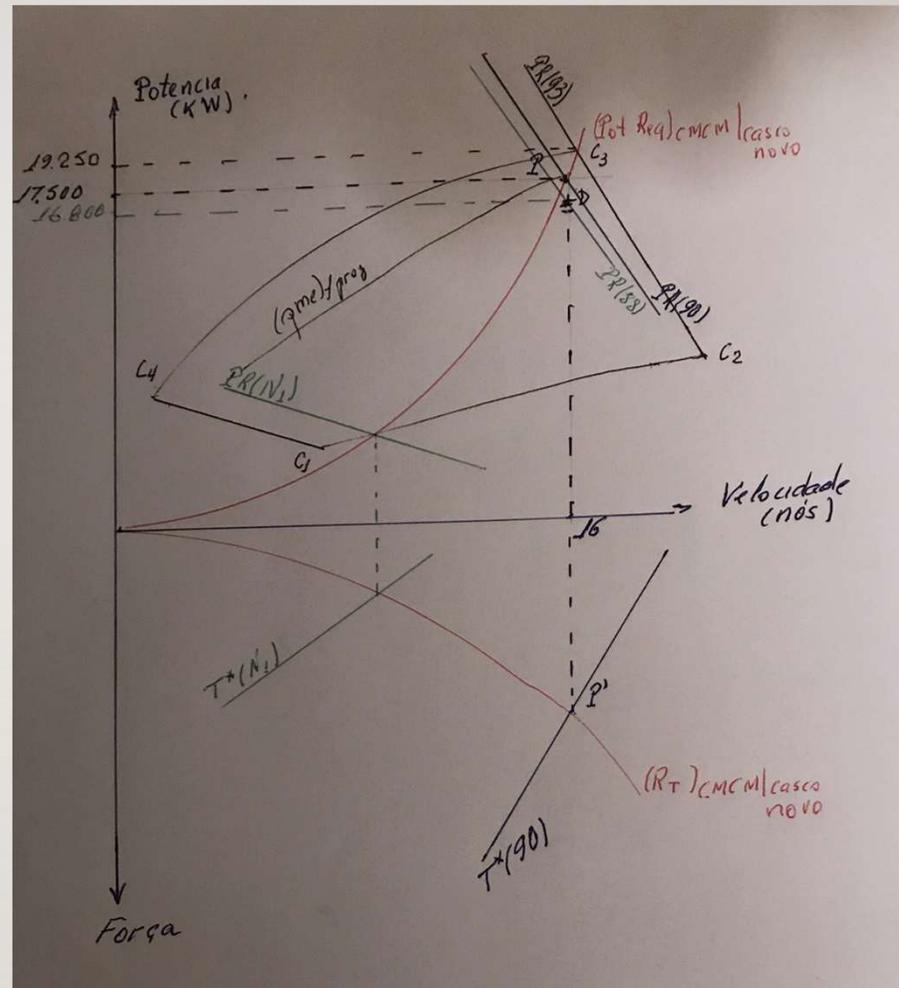
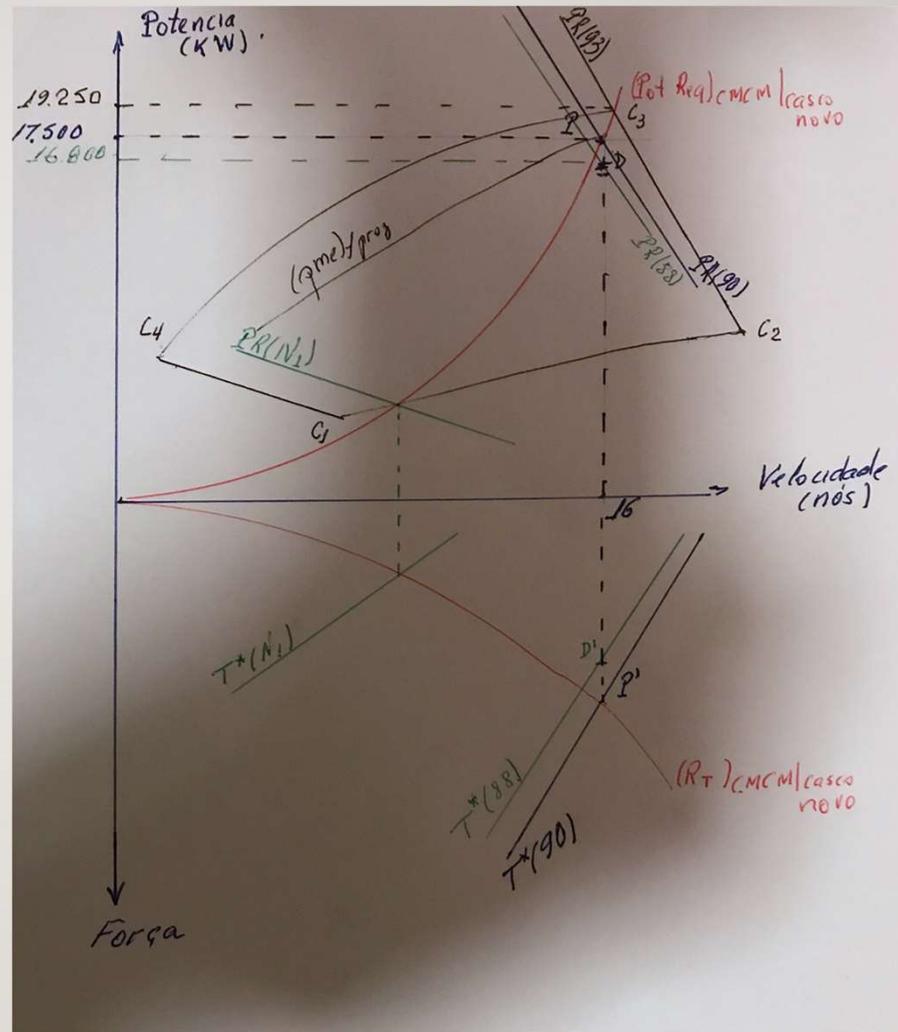


Figura 6
 Representação do ponto de operação em prova de mar no gráfico de força
 Ponto D': (V = 16 nós, rotação = 88 rpm)



DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA EM PROVA DE MAR

O ponto D' determina a resistência ao avanço para a velocidade de 16 nós, na prova de mar realizada depois da reforma

$$(R_T (16)_{PM})_{12 \text{ anos}}$$

Pelo ponto D' passa a curva de resistência para esta condição

(Veja Figura 7)

DETERMINAÇÃO DA VARIAÇÃO DE RESISTÊNCIA

Para calcular a variação de resistência é preciso usar o valor da resistência para a velocidade de 16 nós, na prova de mar, para o casco novo

$$(R_T(16)_{PM})_{\text{casco novo}}$$

Na figura 8 destaca-se o valor de

$$(R_T(16)_{CMCM})_{\text{casco novo}}$$

Conhecendo-se a margem de resistência, pode-se obter

$$(R_T(16)_{PM})_{\text{casco novo}} = (R_T(16)_{CMCM})_{\text{casco novo}} / (1 + MR)$$

Obtém-se, assim, o ponto E', assinalado na Figura 9

DETERMINAÇÃO DA VARIAÇÃO DE RESISTÊNCIA

A partir dos pontos D' e E', assinalado na Figura 9, é possível calcular a variação de resistência

$$\Delta R_T = (R_T(16)_{PM})_{12} - (R_T(16)_{PM})_{\text{casco novo}}$$

Então obtém-se

$$\alpha_1 = [\Delta R_T / (R_T(16)_{PM})_{\text{casco novo}}] / 12$$

FIGURA 8

Pode-se observar na figura o valor da resistência na velocidade de 16 nós em condições médias de casco e mar com o casco novo

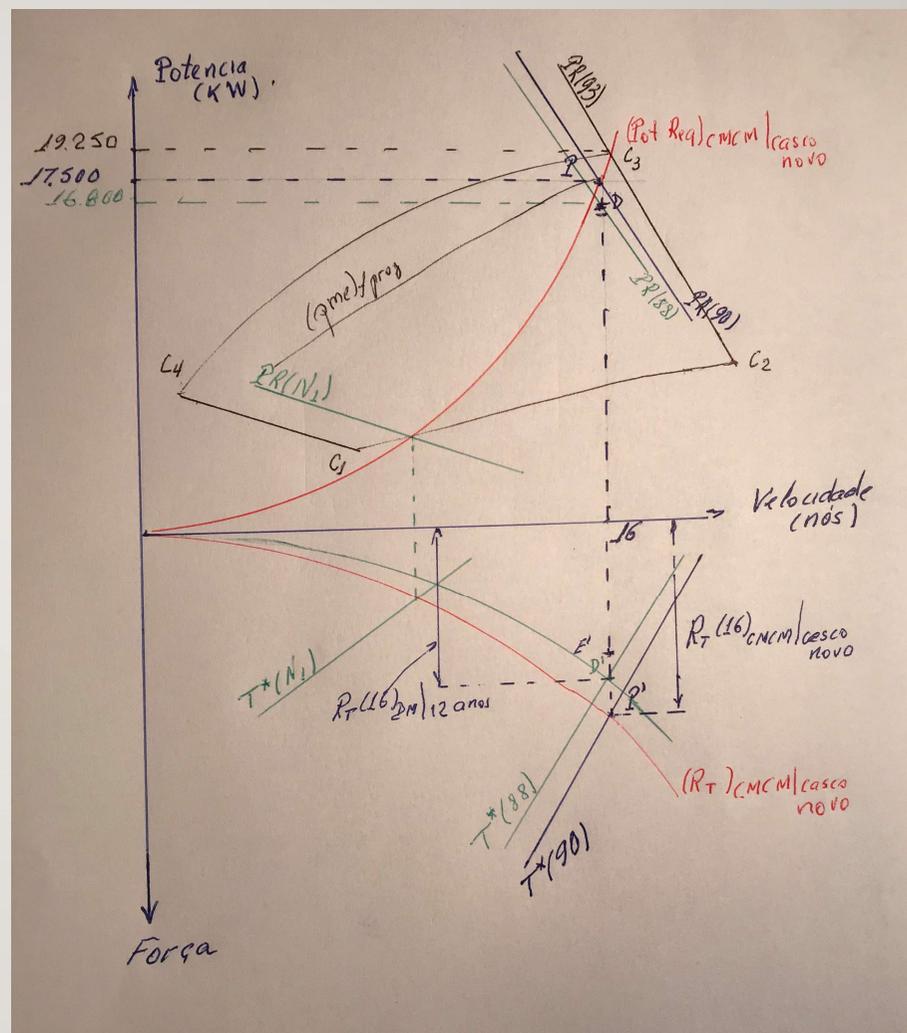
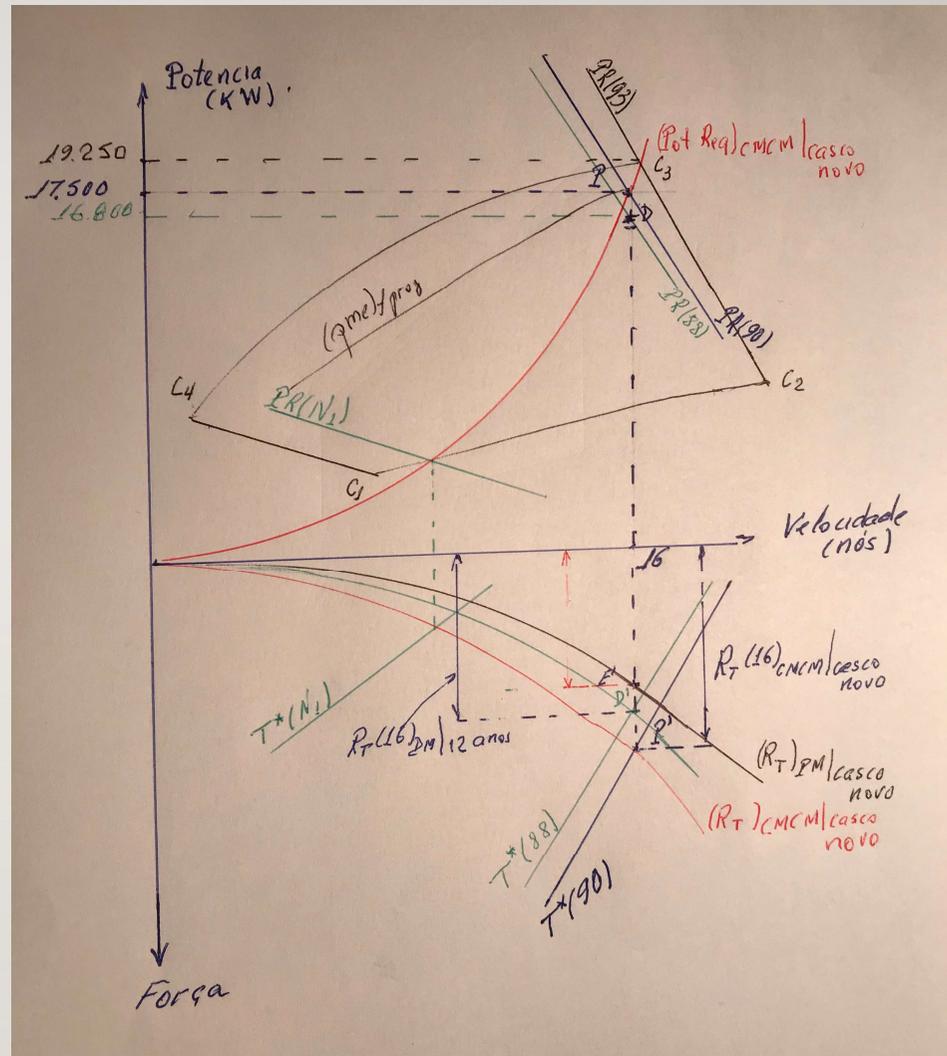


FIGURA 9

Pode-se observar na figura o valor da resistência na velocidade de 16 nós na prova de mar com o casco novo



DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE EM CONDIÇÕES MÉDIAS DE CASCO E MAR

Sabe-se que em prova de mar o navio atingiu 16 nós com o motor fornecendo 16.800 kW

Qual, então, é a velocidade que o navio pode atingir em condições médias de casco e mar?

Para responder a esta questão é necessário representar a curva de resistência para condições médias de casco e mar para o casco com 12 anos.

Conhecendo-se $(R_T(16))_{PM}^{12 \text{ anos}}$, pode-se determinar $(R_T(16))_{CMCM}^{12 \text{ anos}}$

DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE EM CONDIÇÕES MÉDIAS DE CASCO E MAR

$$(R_T (16)_{CMCM})_{12 \text{ anos}} = (R_T (16)_{PM})_{12 \text{ anos}} (1+MR)$$

Obtém-se assim o ponto F', por onde passa a curva de resistência para condições médias de casco e mar para o casco com 12 anos de vida

(Veja Figura 10)

Conhecida a curva de resistência pode-se levantar a curva de potência requerida casco – hélice correspondente ; utilizou-se para isto o ponto G'

Pelo ponto G passa essa curva

(Veja Figura 11)

No encontro da curva de potência requerida em condições médias de casco e mar para o casco com 12 anos com a curva de $(pme)_{fproj}$ obtém-se o ponto H que determina a velocidade máxima que o navio pode operar

Figura 11
 Determinação da
 velocidade do navio
 em condições
 médias de casco e
 mar

