

ANÁLISE DO DESEMPENHO DO SISTEMA PROPULSOR

AULA 11.05

1. REVISÃO
2. DISCUSSÃO DO EXERCÍCIO DE 07.05
3. DESENVOLVIMENTO DE EXERCÍCIO DE APLICAÇÃO
4. COMENTÁRIOS FINAIS

ANÁLISE DO DESEMPENHO DO SISTEMA PROPULSOR

AULA 11.05

1. REVISÃO
2. DISCUSSÃO DO EXERCÍCIO DE 07.05
3. DESENVOLVIMENTO DE EXERCÍCIO DE APLICAÇÃO
4. COMENTÁRIOS FINAIS

ANÁLISE DO DESEMPENHO DO SISTEMA PROPULSOR

REVISÃO

1. DIAGRAMA DE INTEGRAÇÃO
2. CONCLUSÃO DA ANÁLISE DA QUESTÃO ILUSTRATIVA

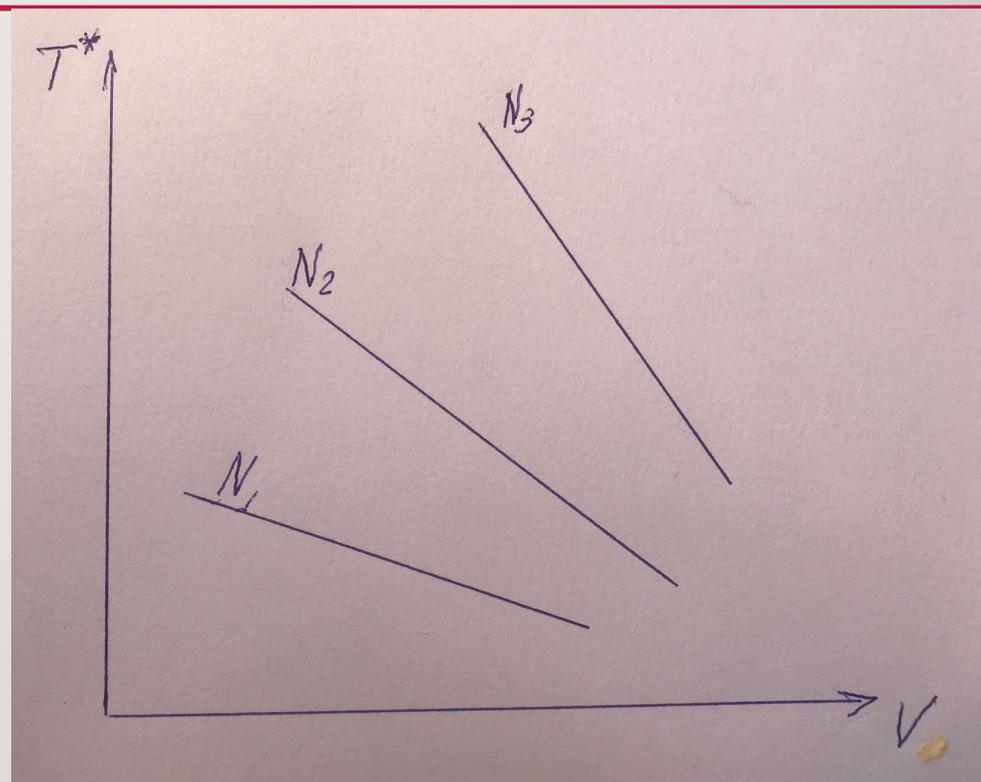
PREPARAÇÃO DO DIAGRAMA DE INTEGRAÇÃO CASCO-HÉLICE - MOTOR

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

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

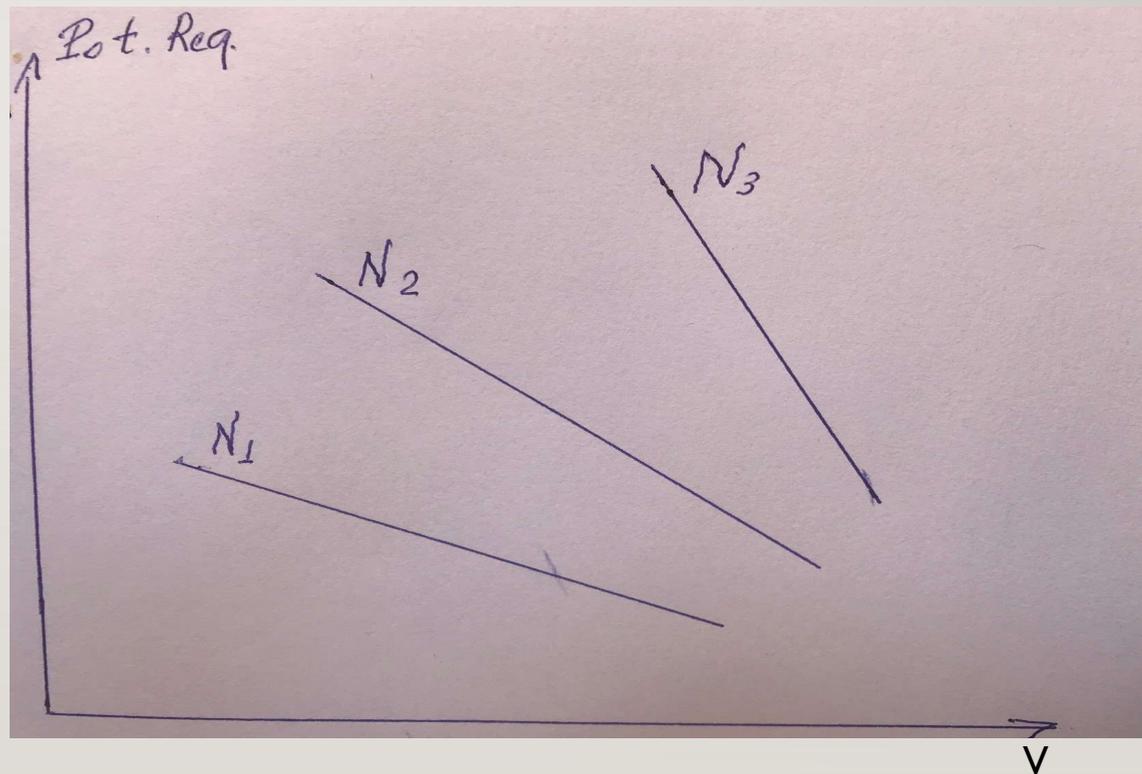
$$T^* = T(1-t)$$
$$V = V_a / (1-w)$$



PREPARAÇÃO DO DIAGRAMA DE INTEGRAÇÃO CASCO-HÉLICE - MOTOR

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

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

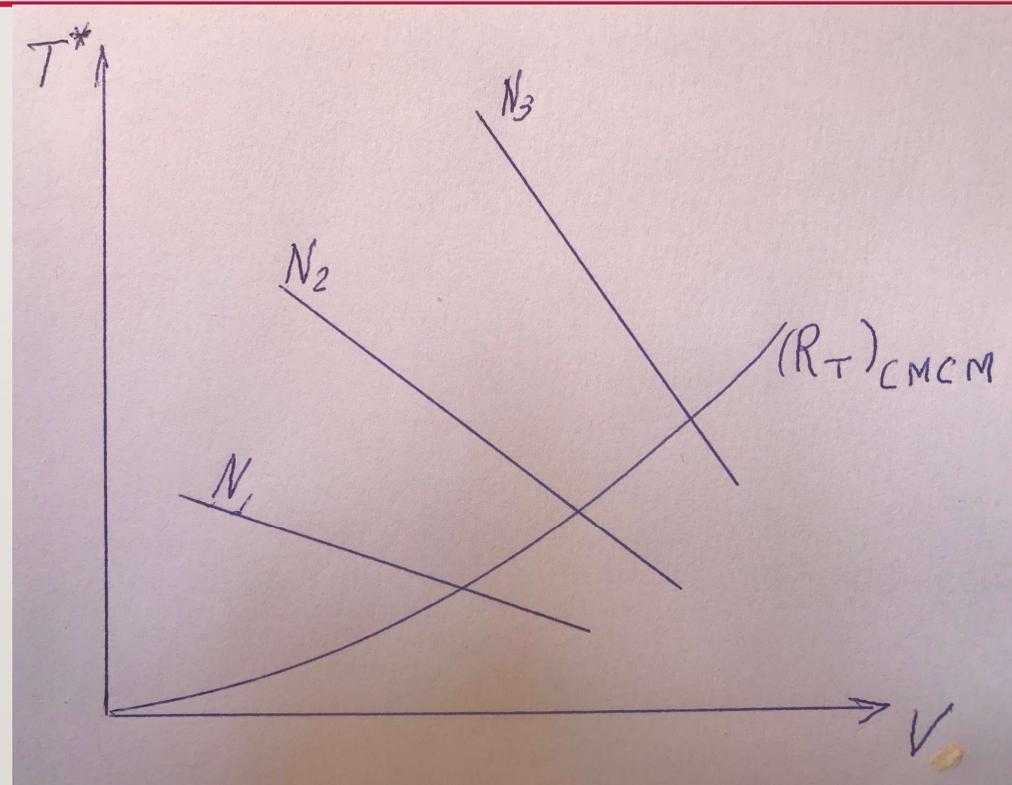


PREPARAÇÃO DO DIAGRAMA DE INTEGRAÇÃO CASCO-HÉLICE - MOTOR

Quinto passo

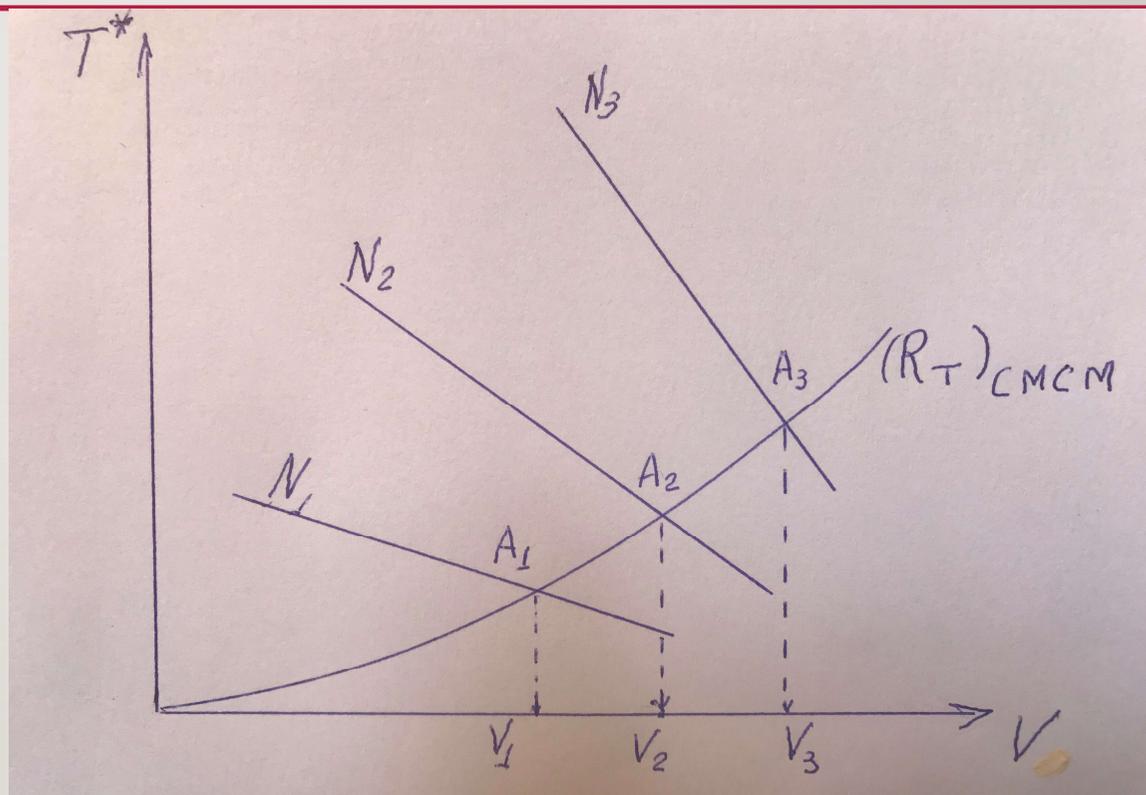
Gráfico de forças

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

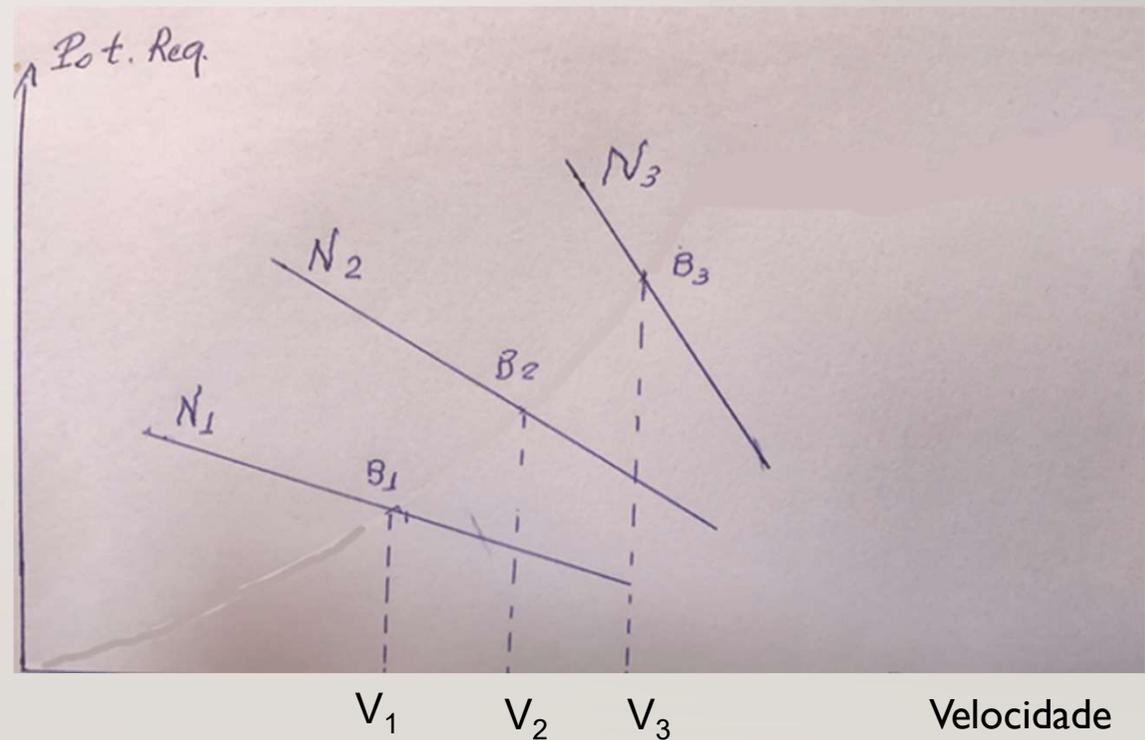
Cada ponto do gráfico de força A_j

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

tem seu correspondente

No gráfico de potência B_j

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



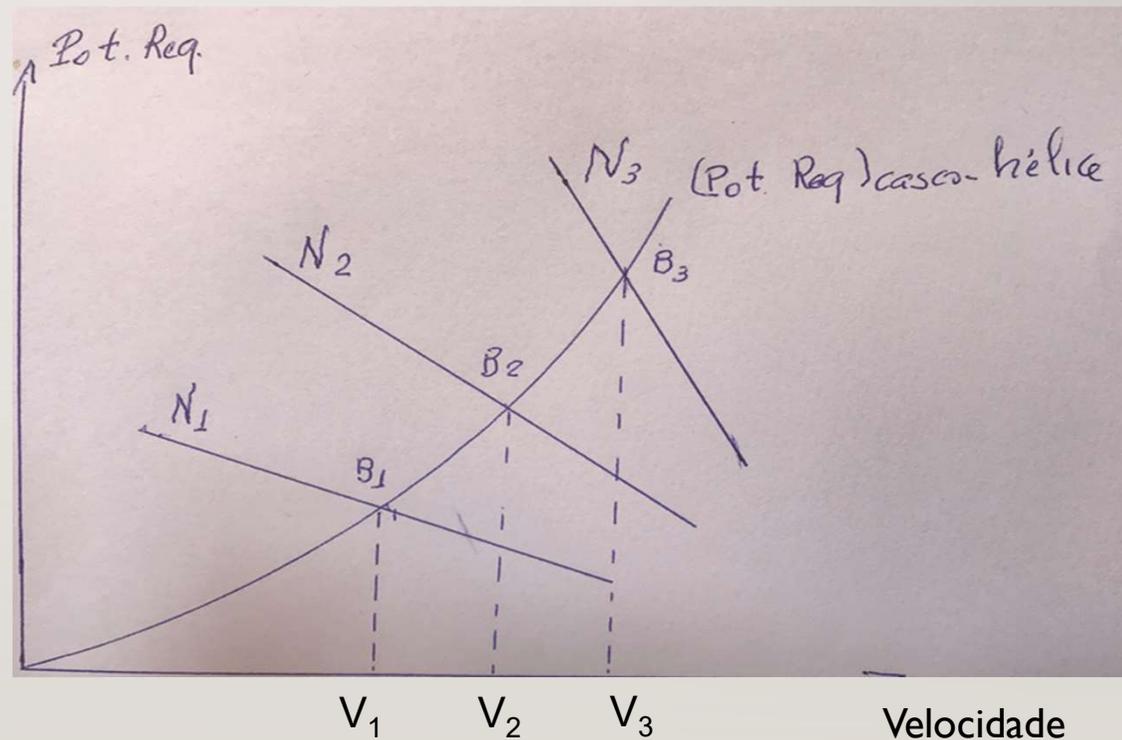
PREPARAÇÃO DO DIAGRAMA DE INTEGRAÇÃO CASCO-HÉLICE - MOTOR

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

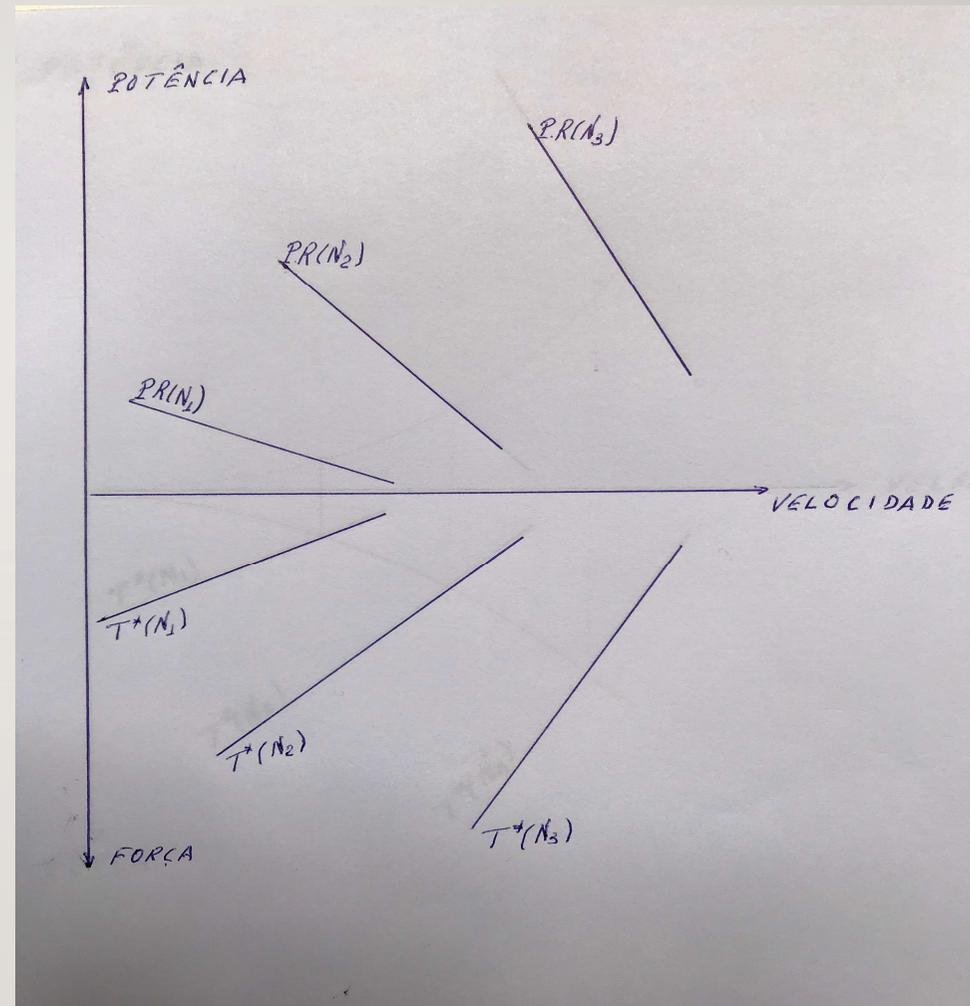
A vantagem desta mudança é que fica mais simples determinar os pontos $B_j = B_j(N_j, V_j)$ a partir dos pontos $A_j = A_j(N_j, V_j)$

NONO PASSO

Diagrama de integração

Curvas do hélice

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



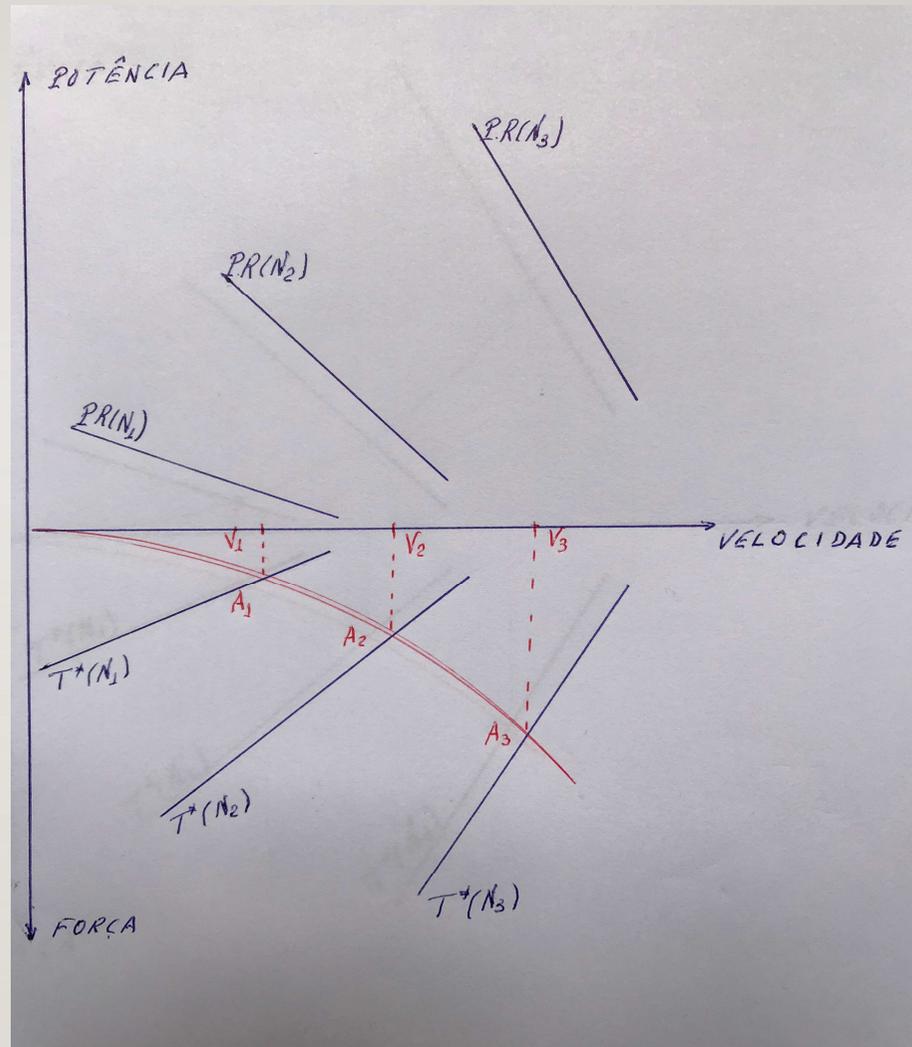
DÉCIMO PASSO

Interação casco - hélice

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

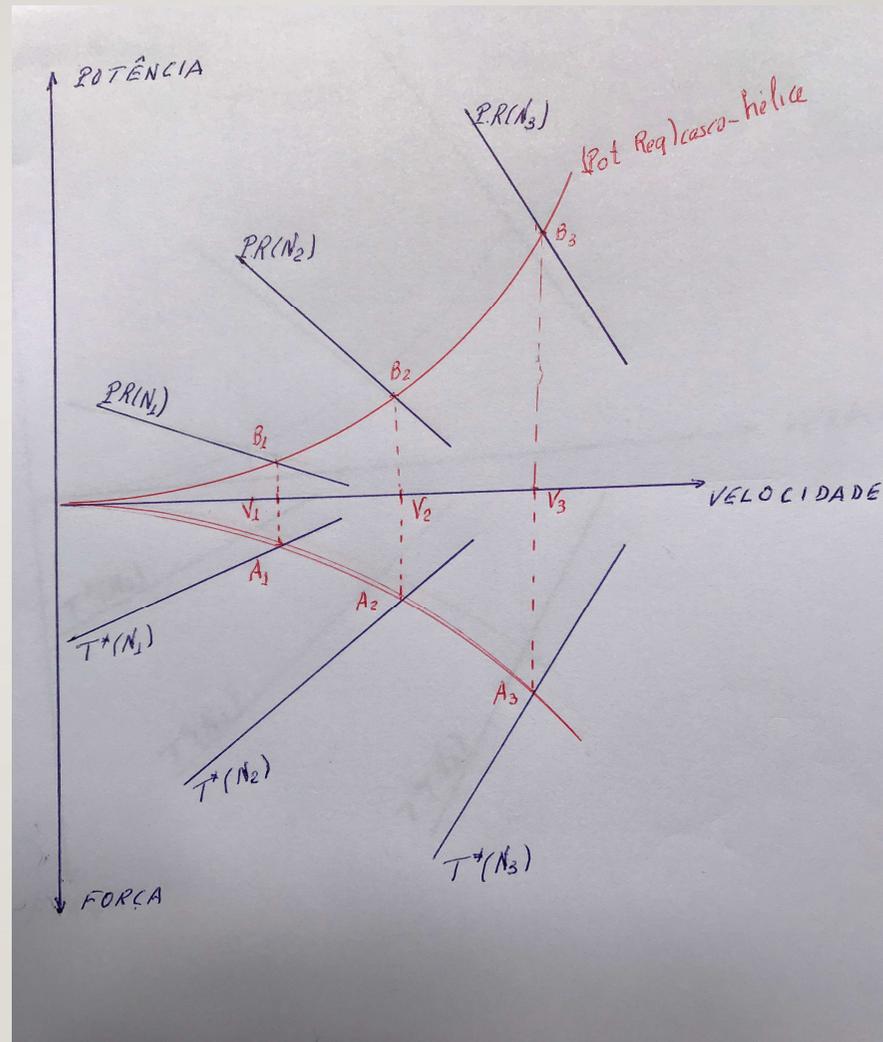
Obtém-se os pontos

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



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

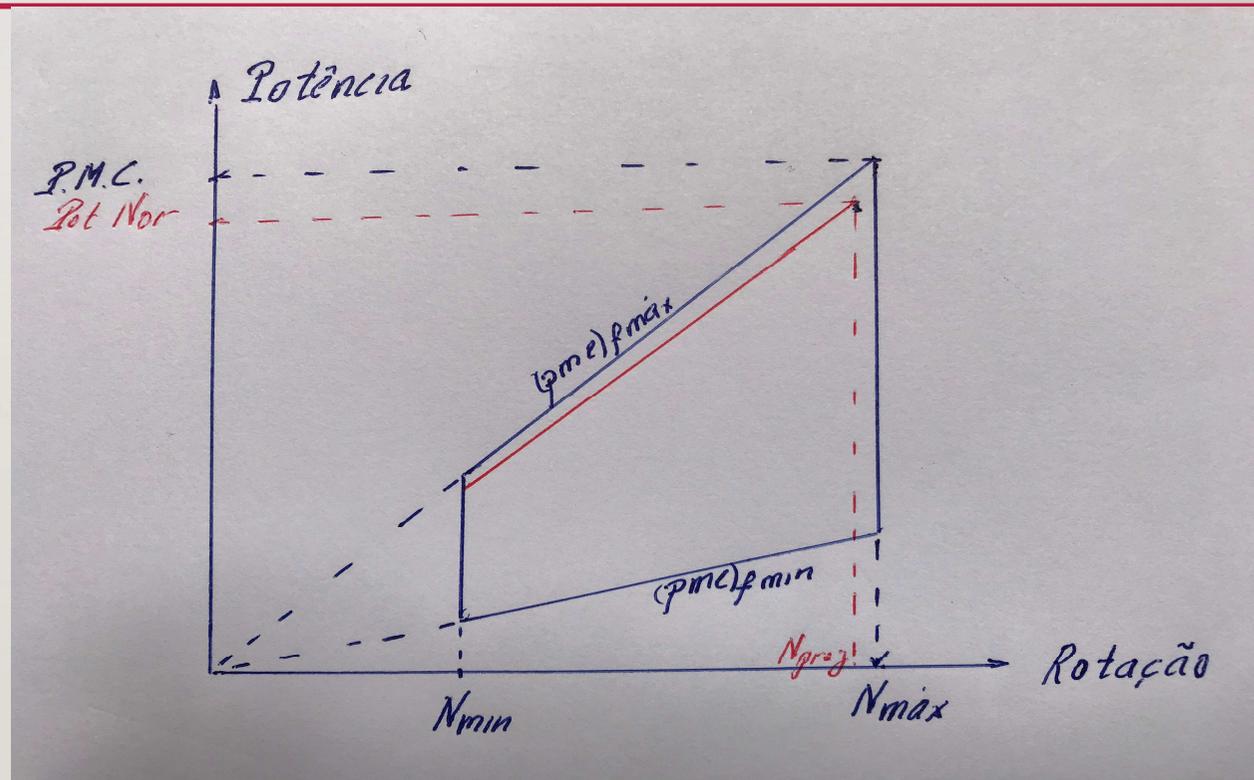
3. REPRESENTAÇÃO NUMA MESMA FIGURA

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

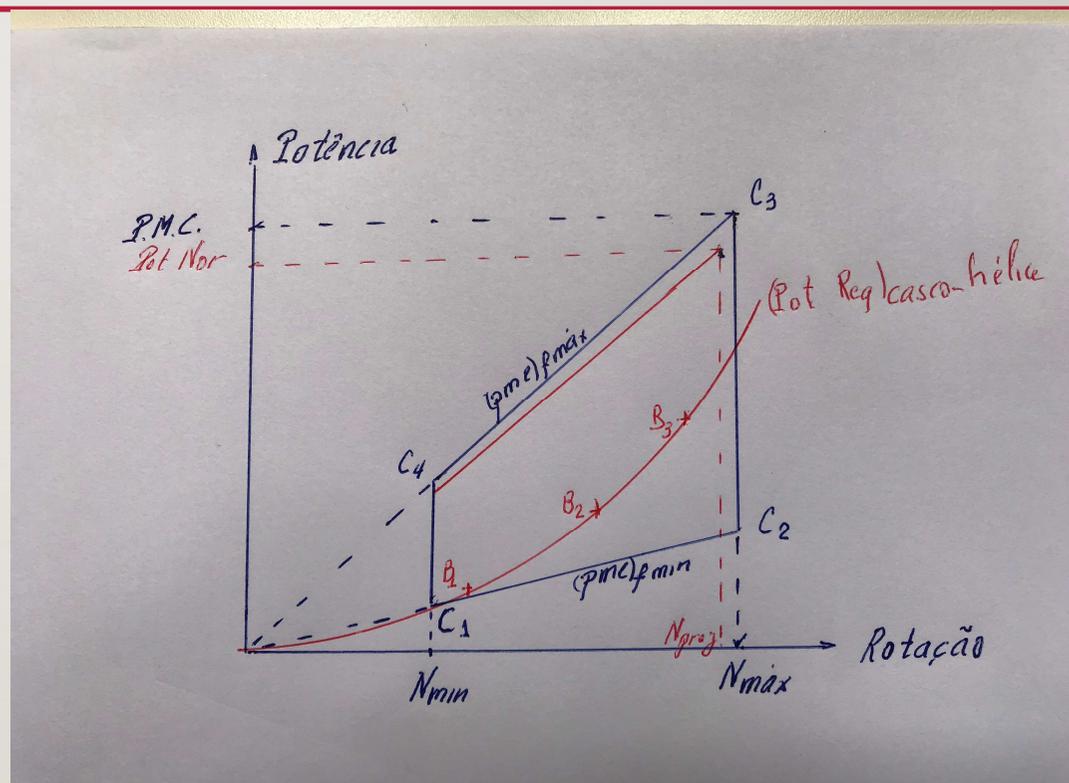
Identificação do ponto de projeto (Pot Nor e N_{proj})



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

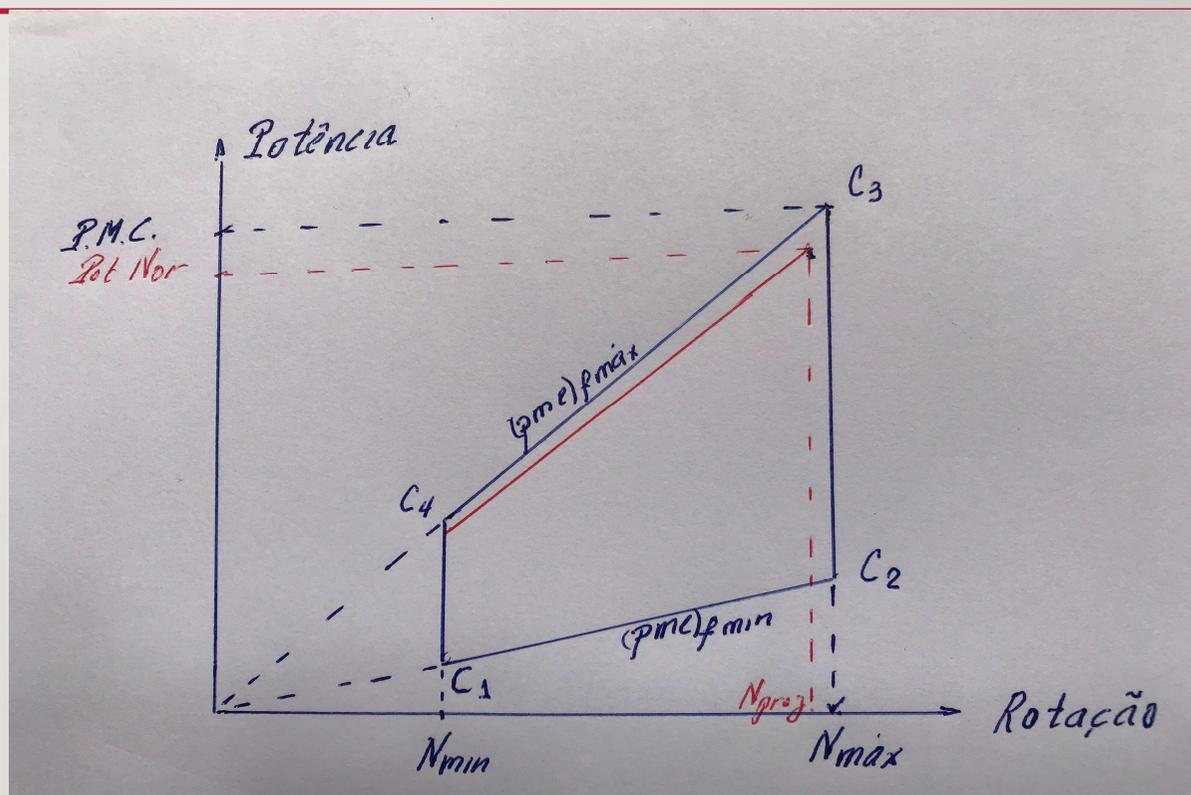
Para isto os pontos que limitam a região de operação do motor C_j $j = 1$ a 4 , mostrados no próximo slide, são transferidos para o gráfico

As curvas que unem esses pontos delimitam a região de operação

PREPARAÇÃO PARA A INTEGRAÇÃO CASCO – HÉLICE - MOTOR

Identificação dos pontos

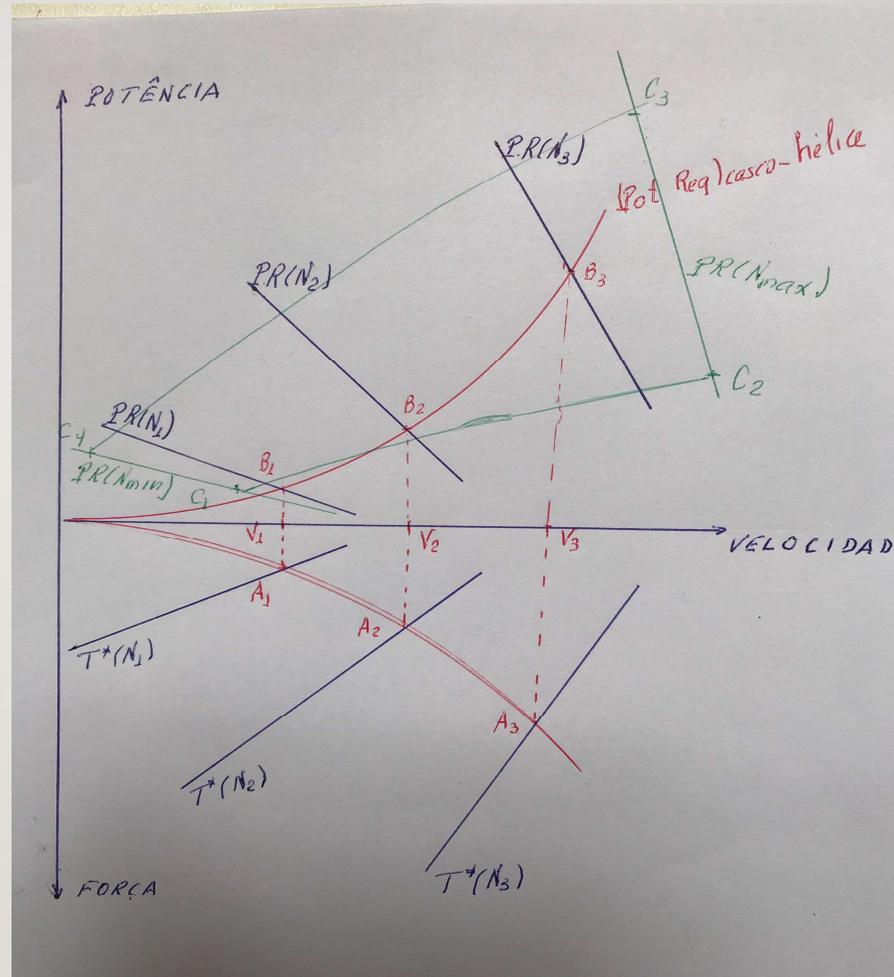
- $C_1: (N_{\min}, (pme)_{f\min})$
- $C_2: (N_{\max}, (pme)_{f\min})$
- $C_3: (N_{\max}, (pme)_{f\max})$
- $C_4: (N_{\min}, (pme)_{f\max})$



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



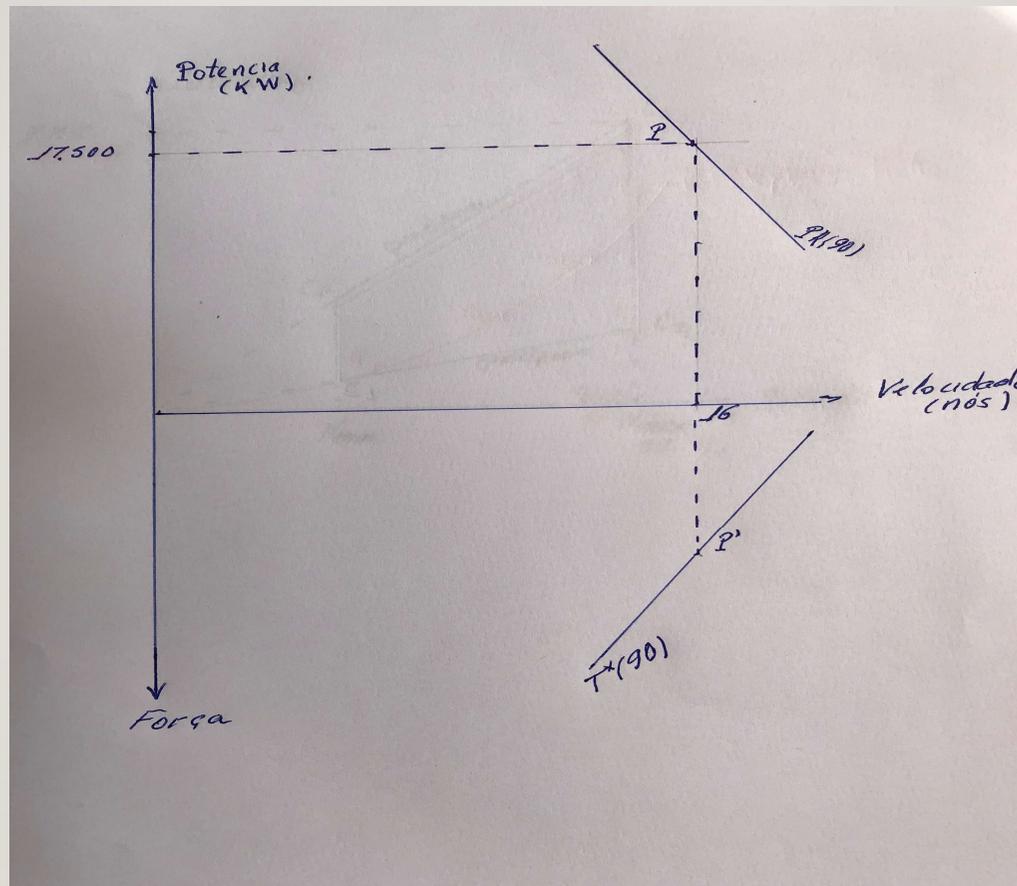
RESOLUÇÃO DA QUESTÃO ILUSTRATIVA

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 $P = P(16 \text{ nós}, 90 \text{ rpm})$
- (Veja Figura 1)

Figura 1
Representação do
ponto de projeto da
nova instalação
propulsora

Hipótese:
Resistência de
casco novo



RESOLUÇÃO DA QUESTÃO ILUSTRATIVA

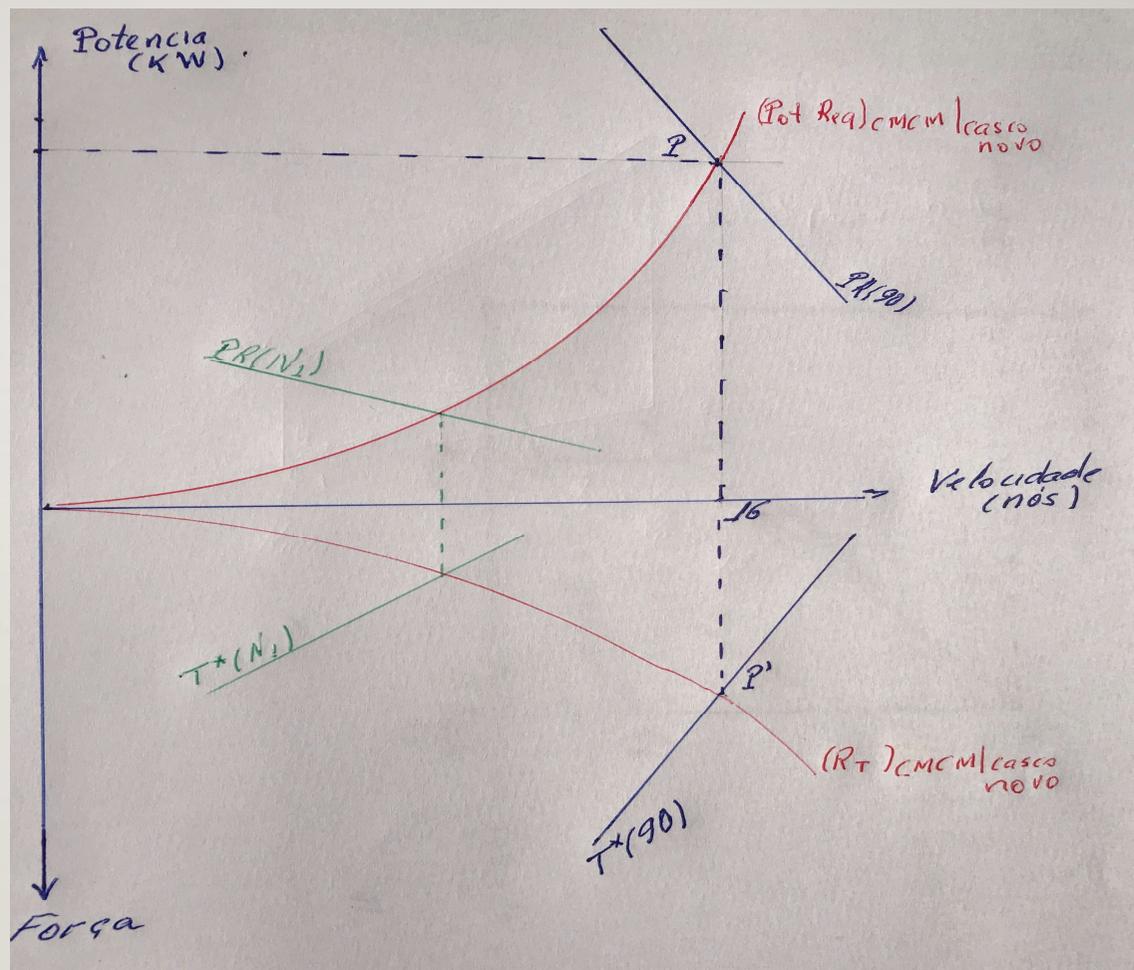
APLICAÇÃO DO PROCEDIMENTO

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

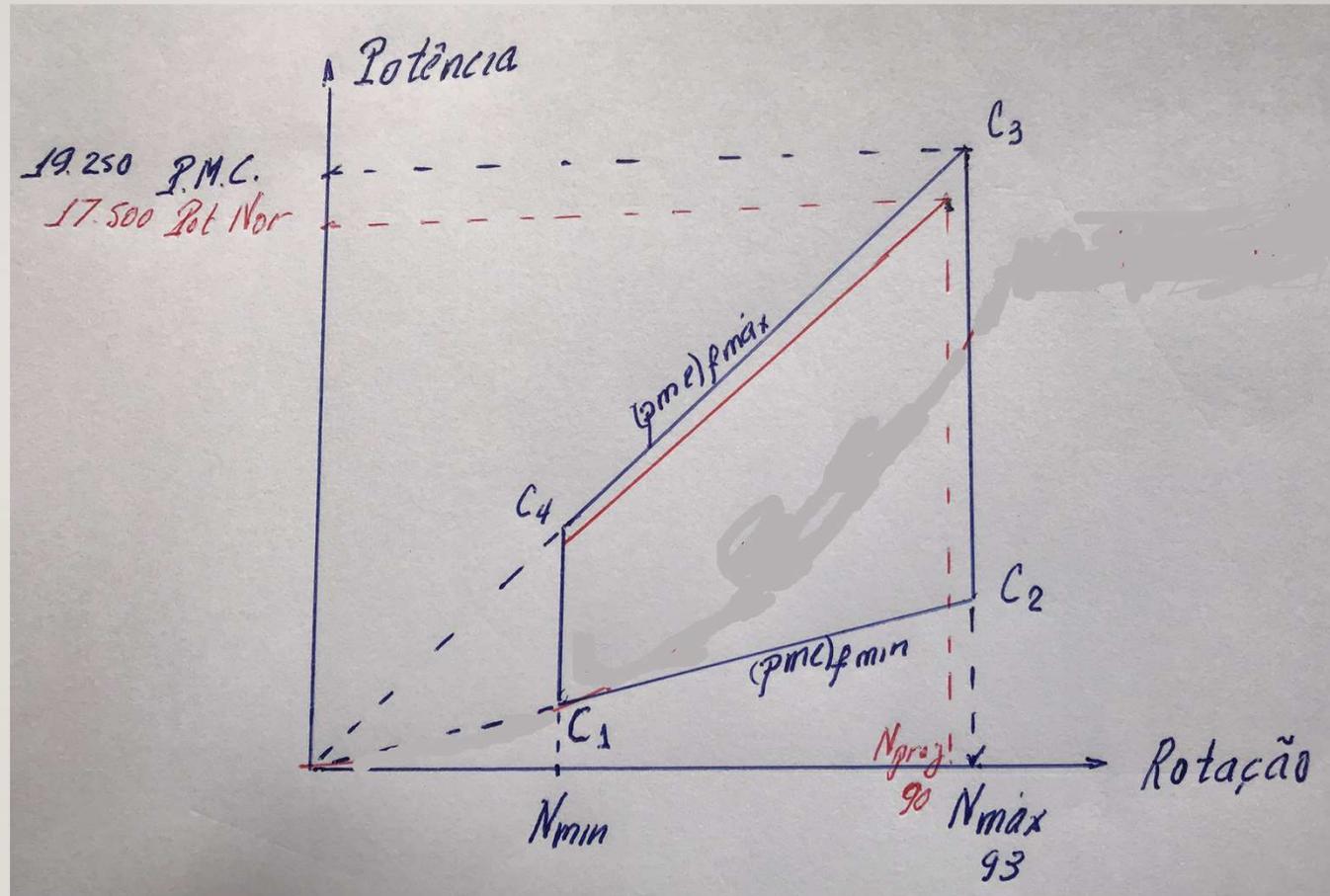
$$N_{min} = 0,4 N_{max}$$

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

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

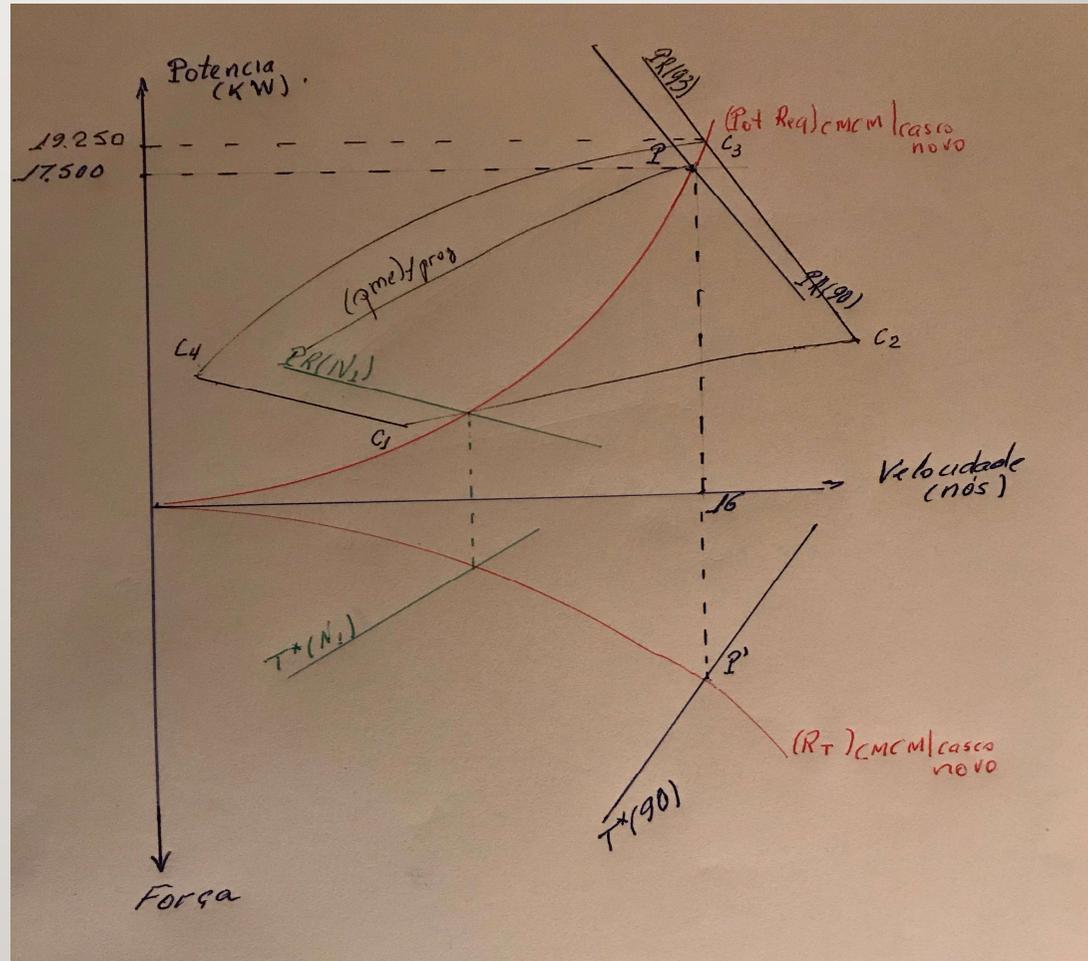
1. Os dados da figura 3 podem ser transferidos para o gráfico de potência do diagrama de integração

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)

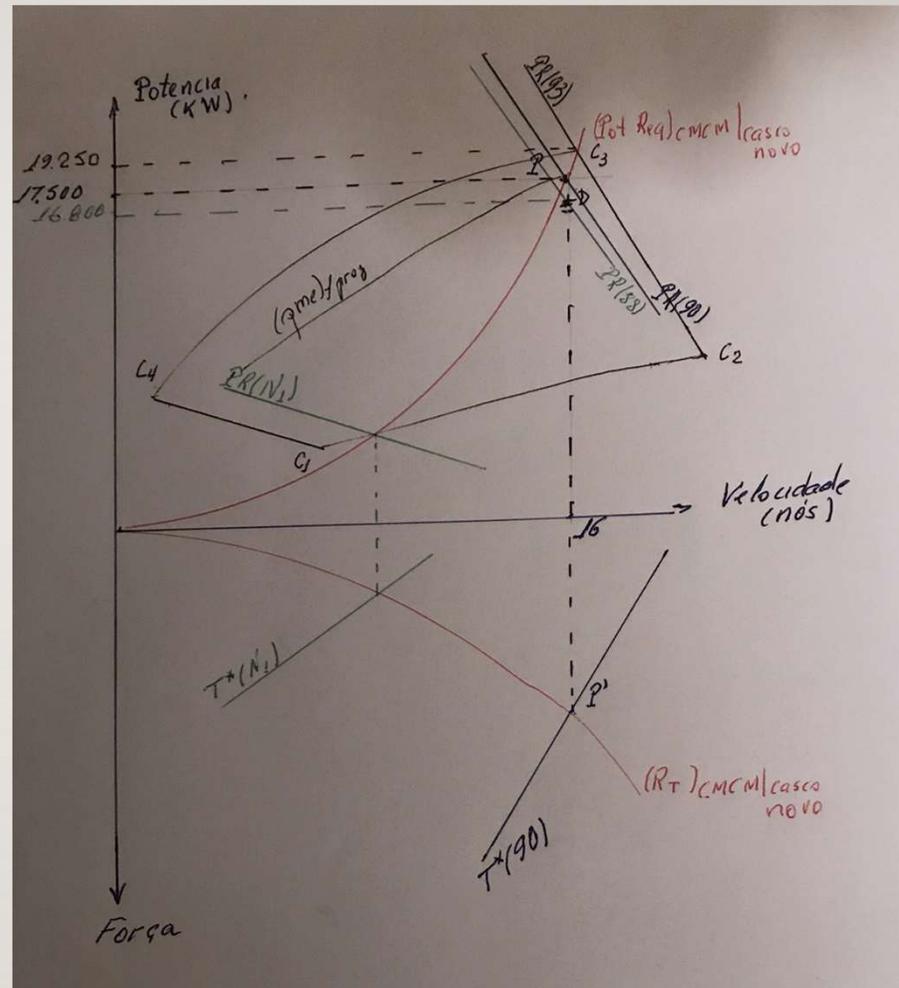
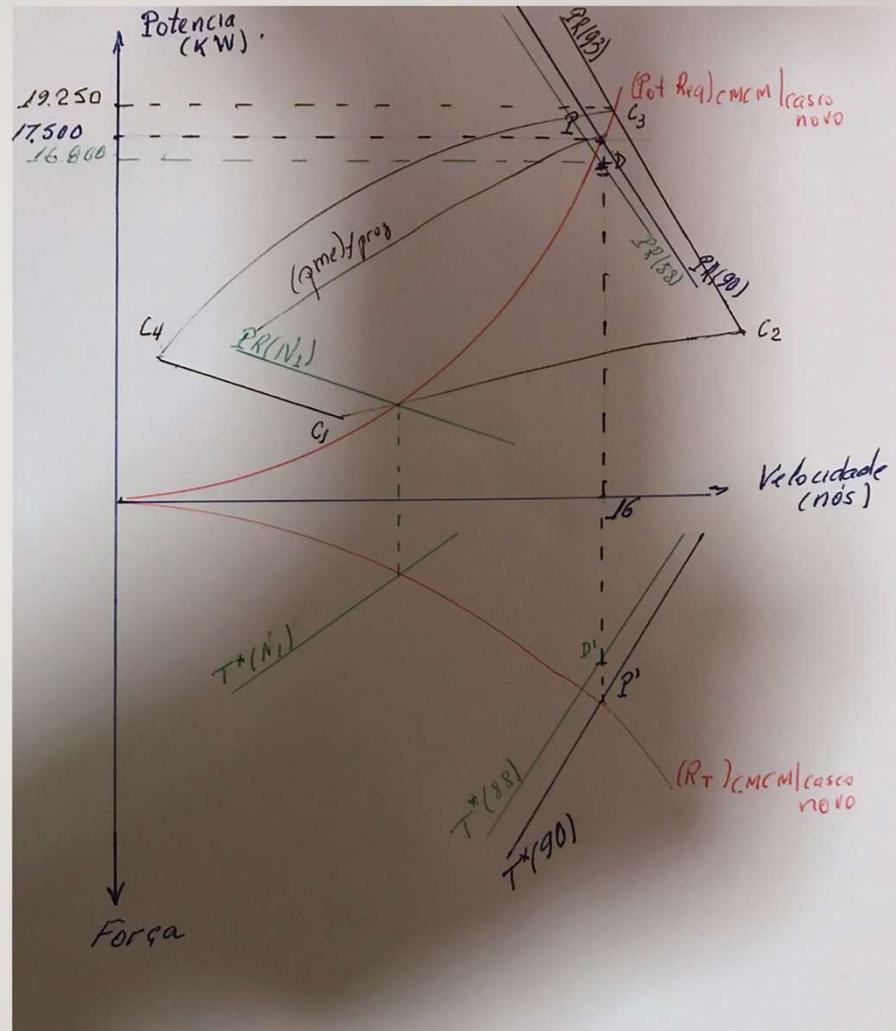


FIGURA 6
Representação do ponto de operação em prova de mar no gráfico de força
Ponto D': (V = 16 nós,
rotação = 88 rpm)



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

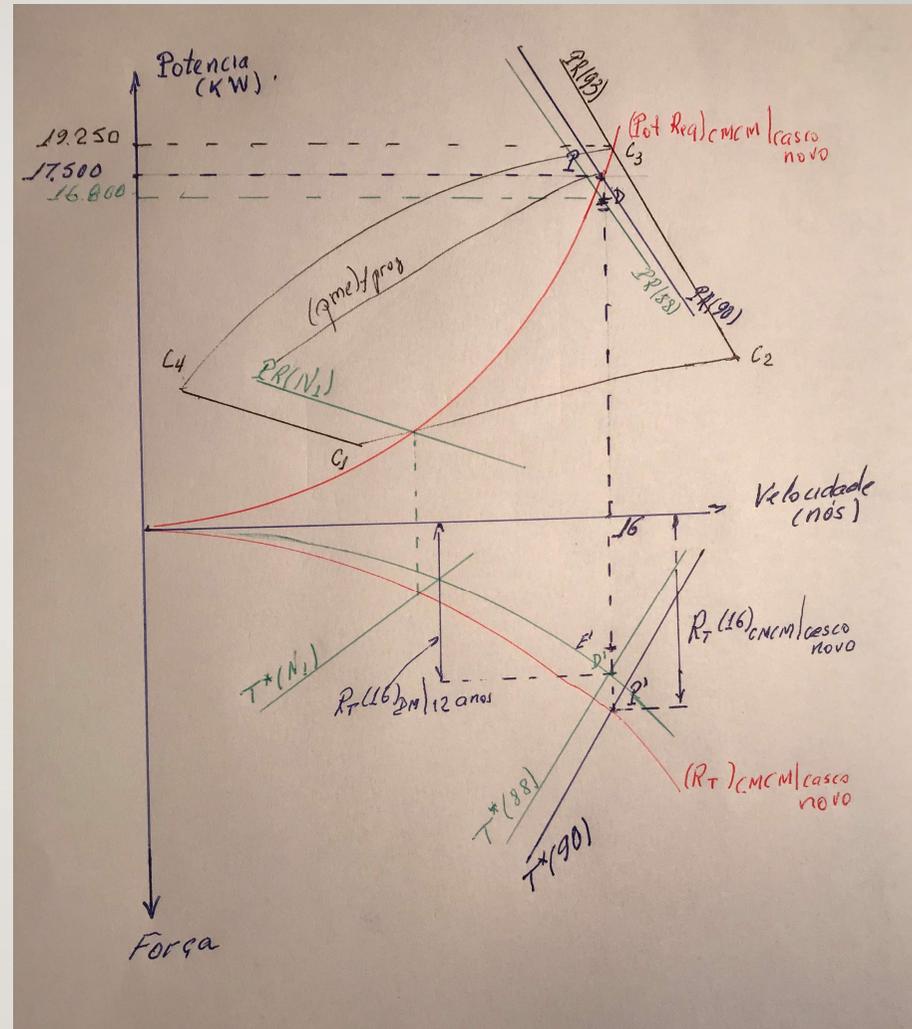
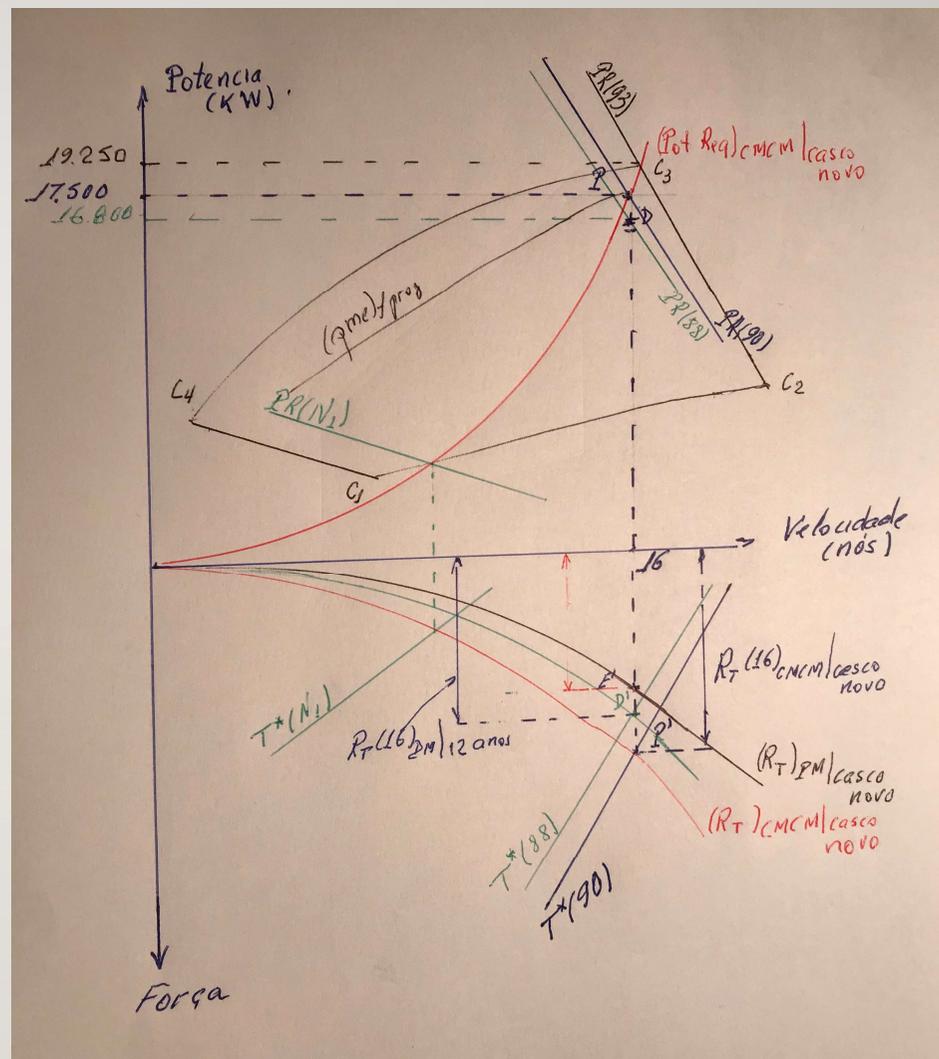


FIGURA 9
 Pode-se observar na
 figura o valor da
 resistência na velocidade
 de 16 nós na prova de mar
 com o casco novo



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 10

Determinação da curva de resistência para condições médias de casco e mar para o casco com 12 anos de vida

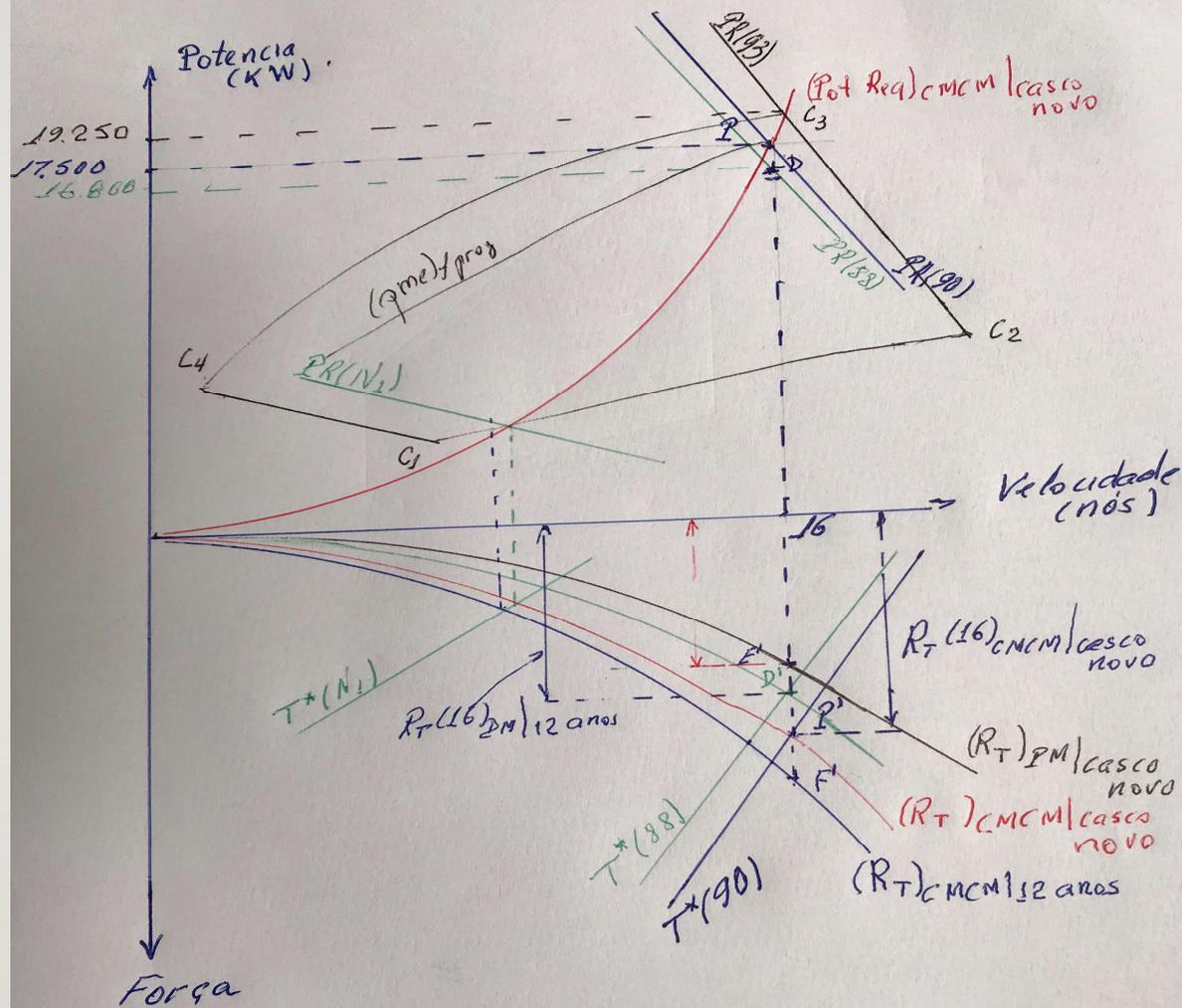
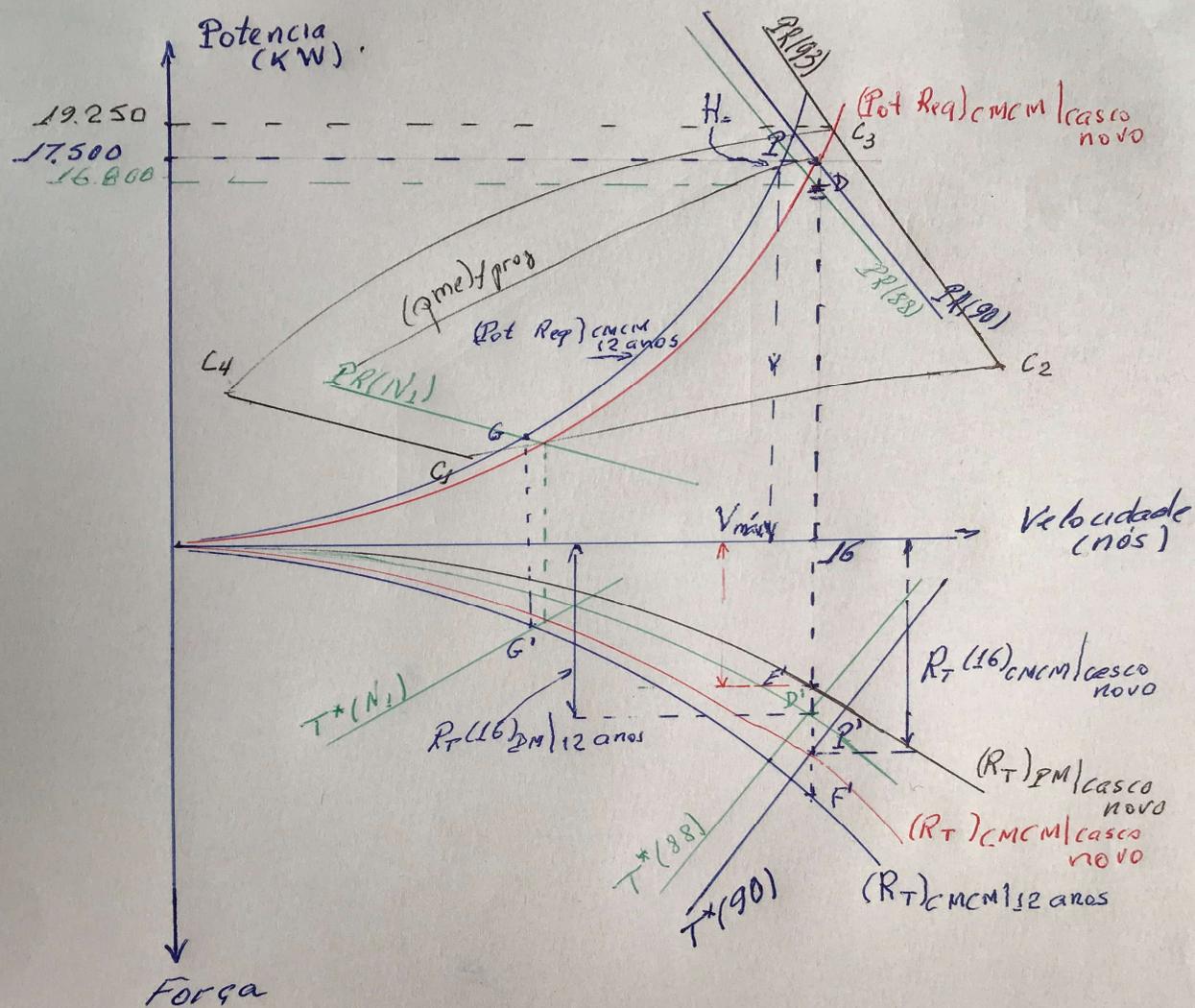


FIGURA 11
 Determinação da
 velocidade do navio em
 condições médias de
 casco e mar



EXERCÍCIO

07/05

Um navio de cabotagem opera com diferentes condições de carregamento, resultando numa grande variação de deslocamento. O deslocamento máximo é 20.000 toneladas, e nesta condição, para se mover na velocidade de serviço, 15 nós, é requerida uma potência de máquina 6.000 kW à rotação 120 rpm. Foi selecionado, portanto, um motor com potência normal 6.000 kW à rotação 120 rpm.

Em outra condição de operação, com deslocamento parcial, o navio atingiu a velocidade de 15 nós com a utilização de 4.500 kW.

Sabe-se que, para velocidade constante, a resistência ao avanço varia com o deslocamento da seguinte forma:

$$\frac{(R_T) \Delta_{\text{parcial}}}{(R_T) \Delta_{\text{proj.}}} = \left(\frac{\Delta_{\text{parcial}}}{\Delta_{\text{proj.}}} \right)^{\frac{2}{3}}$$

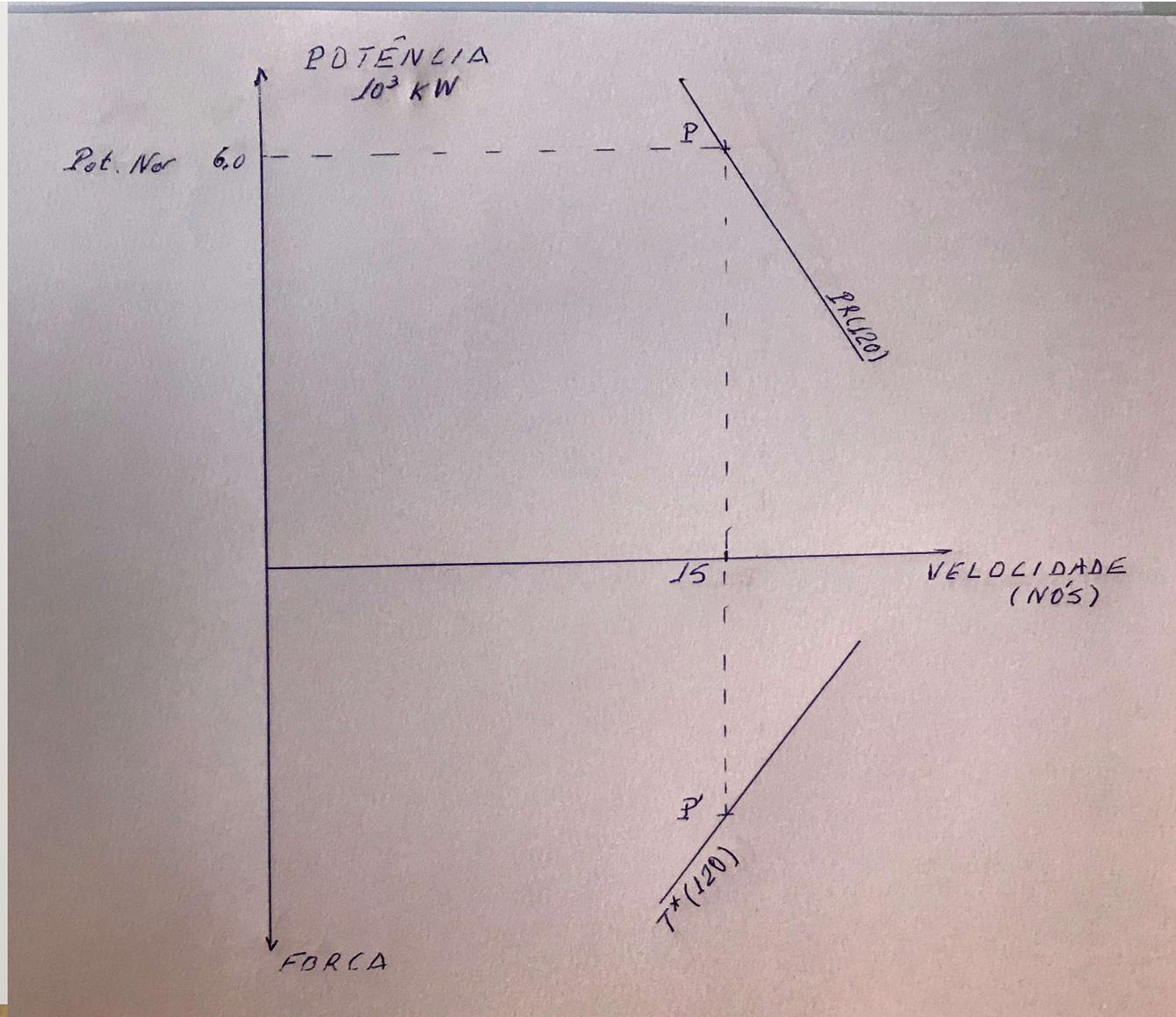
- Indicar um procedimento para determinar qual era o deslocamento do navio naquela condição
- Qual a máxima velocidade que o navio poderia atingir nesta condição

RESOLUÇÃO DO EXERCÍCIO

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 $P = P(15 \text{ nós}, 6.00 \text{ kW}, 120 \text{ rpm})$
 - P': no gráfico de força $P = P(15 \text{ nós}, 120 \text{ rpm})$
- (Veja Figura 12)

FIGURA 12
Representação do ponto
de projeto da instalação
propulsora



RESOLUÇÃO DO EXERCÍCIO

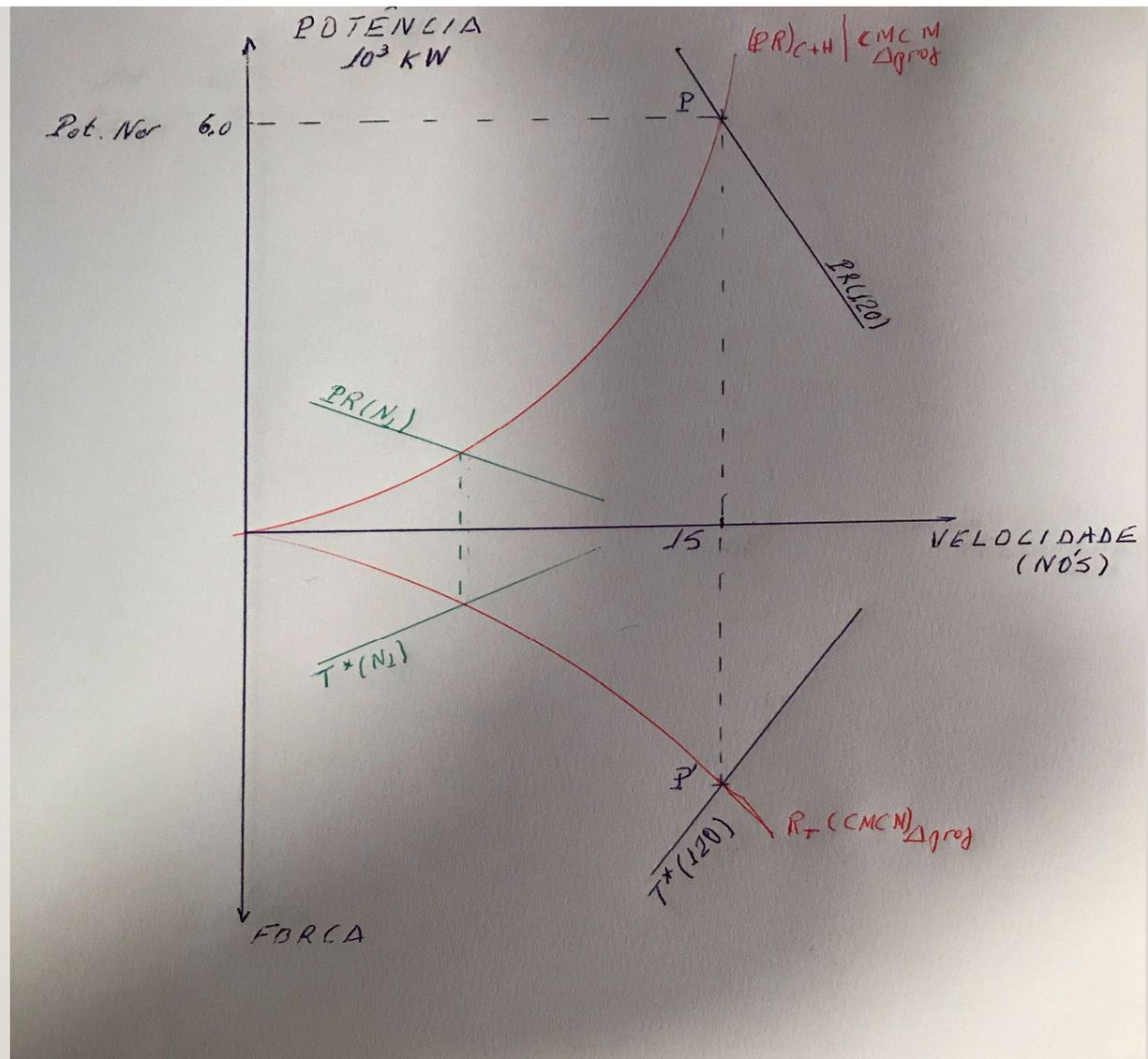
APLICAÇÃO DO PROCEDIMENTO

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 13)

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

FIGURA 13
 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 6.000 kW

Rotação de projeto 120 rpm

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

$$MP = 0,10$$

$$Mrot = 0,03$$

3. Admite-se adicionalmente

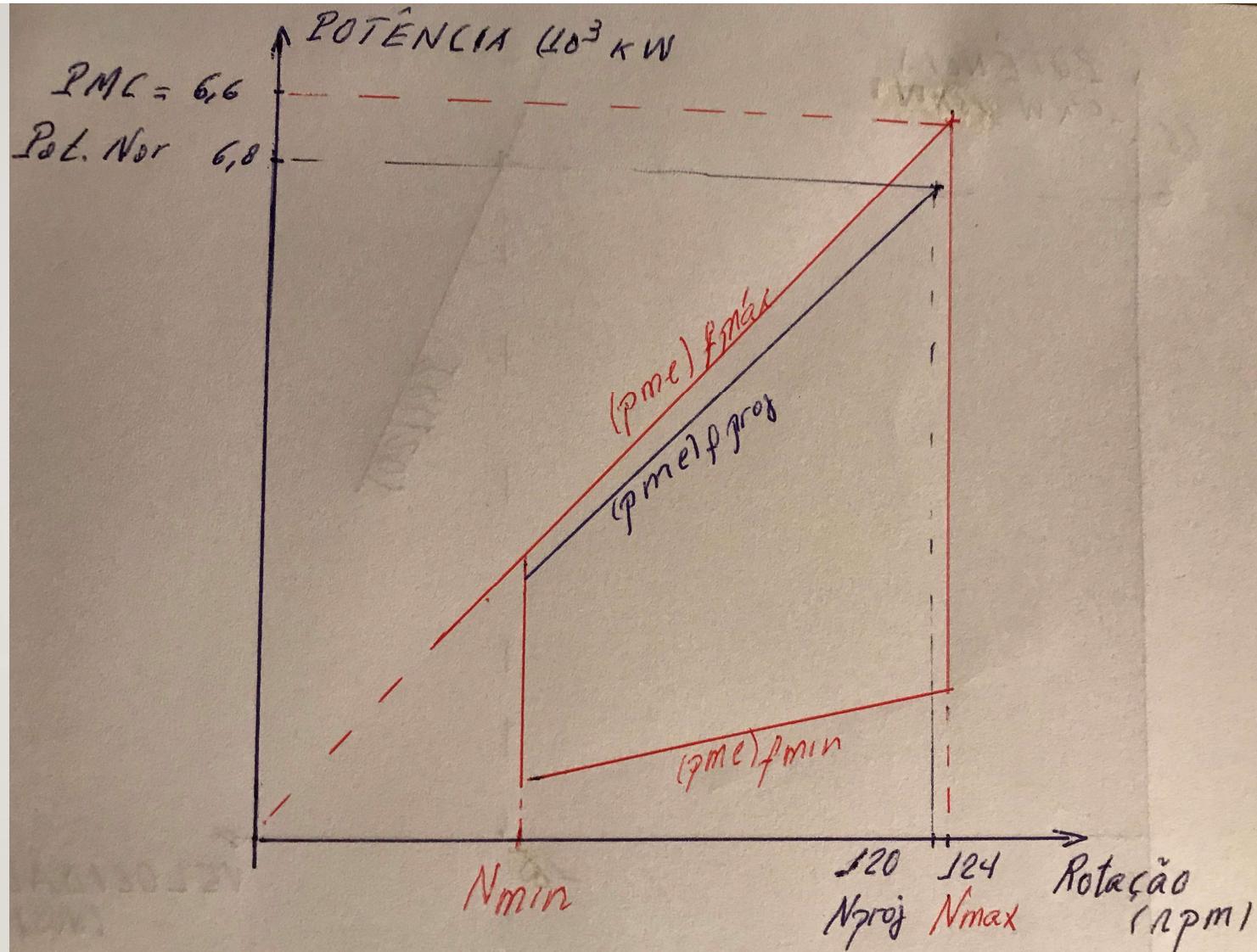
$$N_{min} = 0,4 N_{max}$$

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

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

(veja Figura 14)

FIGURA 14
Representação da
região de operação do
motor



REPRESENTAÇÃO DA REGIÃO DE OPERAÇÃO DO MOTOR E DA CONDIÇÃO DE DESLOCAMENTO PARCIAL

Os dados da figura 14 - região de operação do motor - são transferidos para o gráfico de potência do diagrama de integração

Além dos limites da região de operação, foi transcrita a curva de pressão média efetiva no freio de projeto

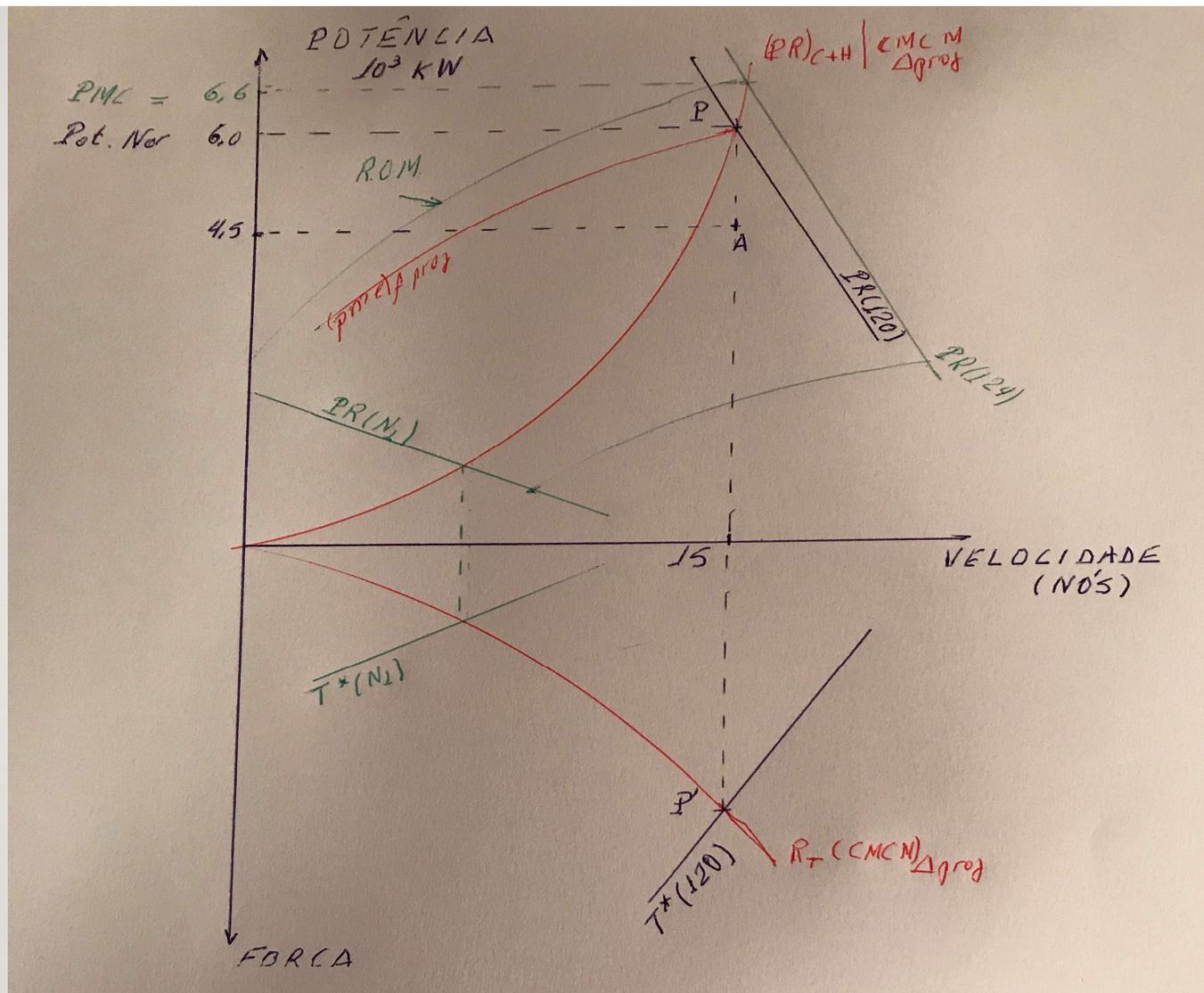
(Veja Figura 15)

Foi também representada nessa figura o ponto de operação em deslocamento parcial – ponto A

A = A(15 nós, 4.500 kW)

FIGURA 15

Representação da região de operação do motor no diagrama de integração. e do ponto de operação com deslocamento parcial: A
A(V= 15 nós; Potência= 4.500 kW)



REPRESENTAÇÃO DOS DADOS DA CONDIÇÃO DE DESLOCAMENTO PARCIAL

Conhecidas a velocidade e a potência do ponto A, fica definida uma rotação; chama-se N_A esta rotação

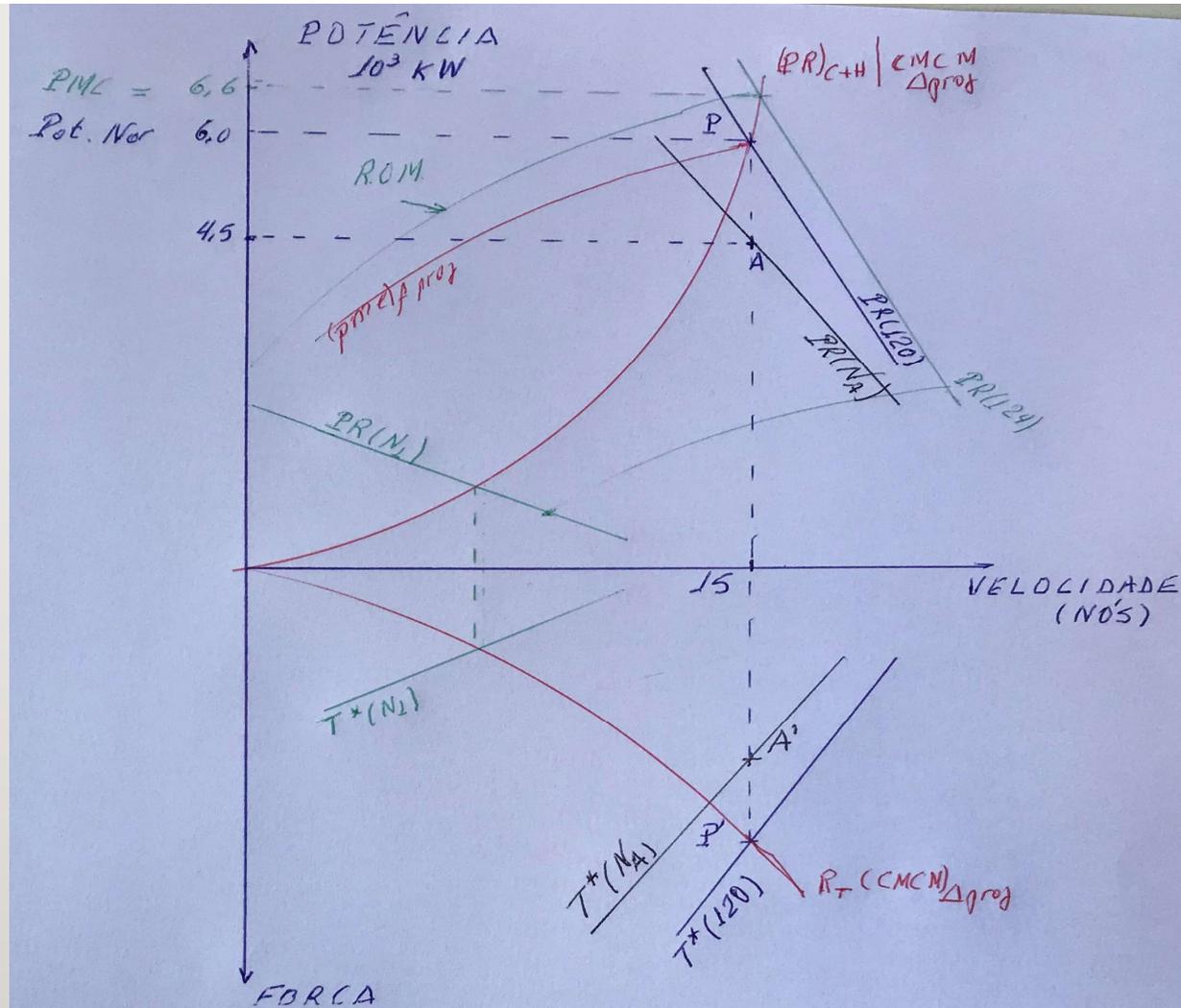
Desenha-se a curva de potência requerida N_A

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

Determina-se, então, o ponto A' para $V = 15$ sobre a curva de $T^*(120)$

(Veja Figura 16)

FIGURA 16
 Representação da curva de empuxo líquido para rotação N_A
 Determinação do ponto A'
 Sobre a curva de $T^*(N_A)$



REPRESENTAÇÃO DOS DADOS DA CONDIÇÃO DE DESLOCAMENTO PARCIAL

Pode-se desenhar no gráfico de força a curva de Resistência para deslocamento parcial, passando pelo ponto A'

Pode-se assinalar no gráfico de forças os valores de resistência para a velocidade de 16 nós nas condições médias de casco e mar, para deslocamento parcial e de projeto

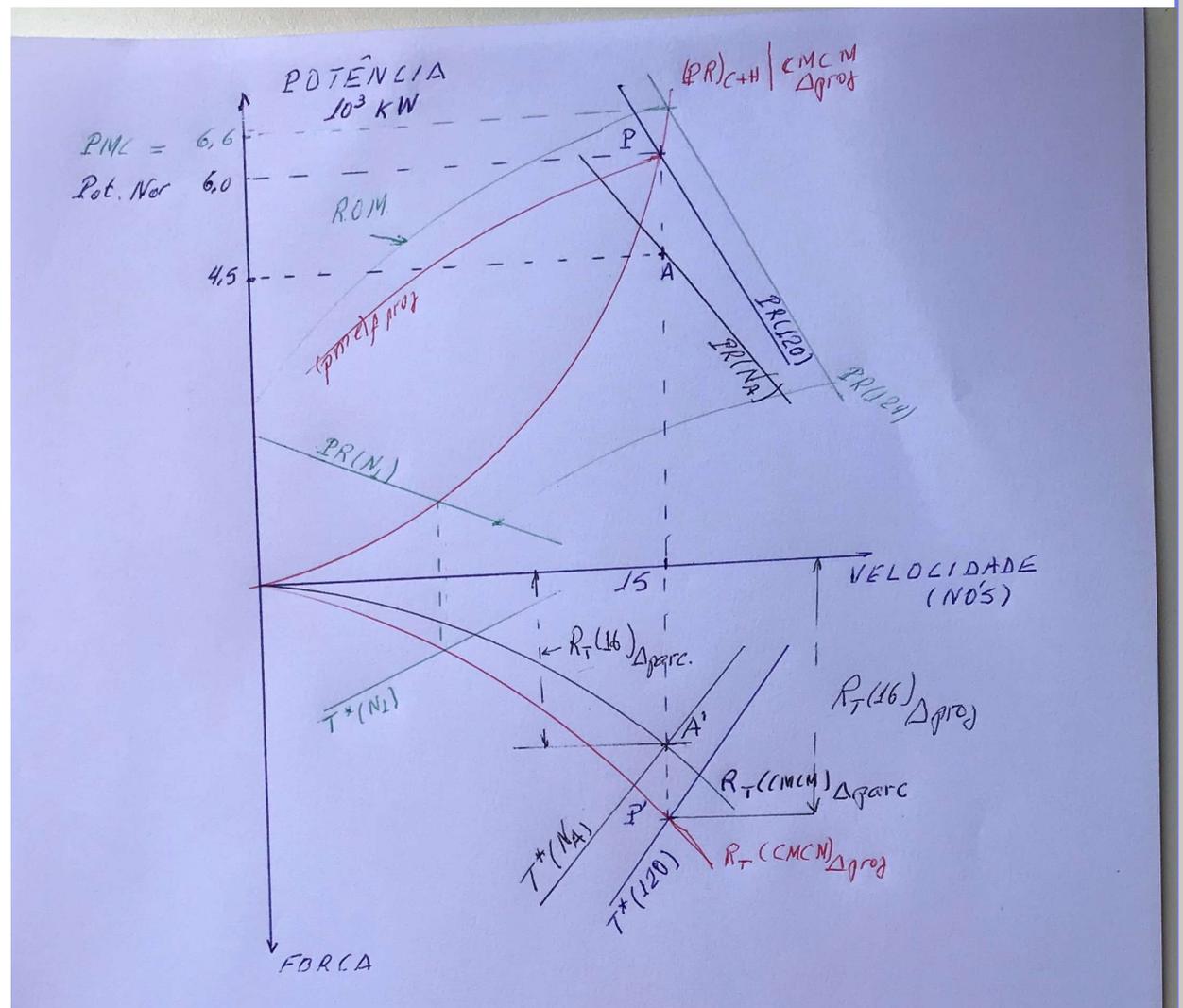
$$(R_T(16))_{(\Delta)_{\text{parc}}} \text{ e } R_T(16)_{(\Delta)_{\text{proj}}}$$

(Veja Figura 17)

Pode-se, então, determinar o valor do deslocamento

$$(\Delta)_{\text{parc}} = (\Delta)_{\text{proj}} \left[\frac{(R_T(16))_{(\Delta)_{\text{parc}}}}{R_T(16)_{(\Delta)_{\text{proj}}}} \right]^{3/2}$$

FIGURA 17
 Representação da curva de resistência para deslocamento parcial em condições médias de casco e mar e de $(R_T(16))_{(\Delta)parc}$ e $R_T(16)_{(\Delta)proj}$



DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE MÁXIMA COM DESLOCAMENTO PARCIAL

Desenha-se no gráfico de potência a curva de potência requerida casco – hélice para a condição de deslocamento parcial

Esta curva passa pelo ponto A

Na intersecção da curva com o limite da região de operação do motor encontra-se o ponto B

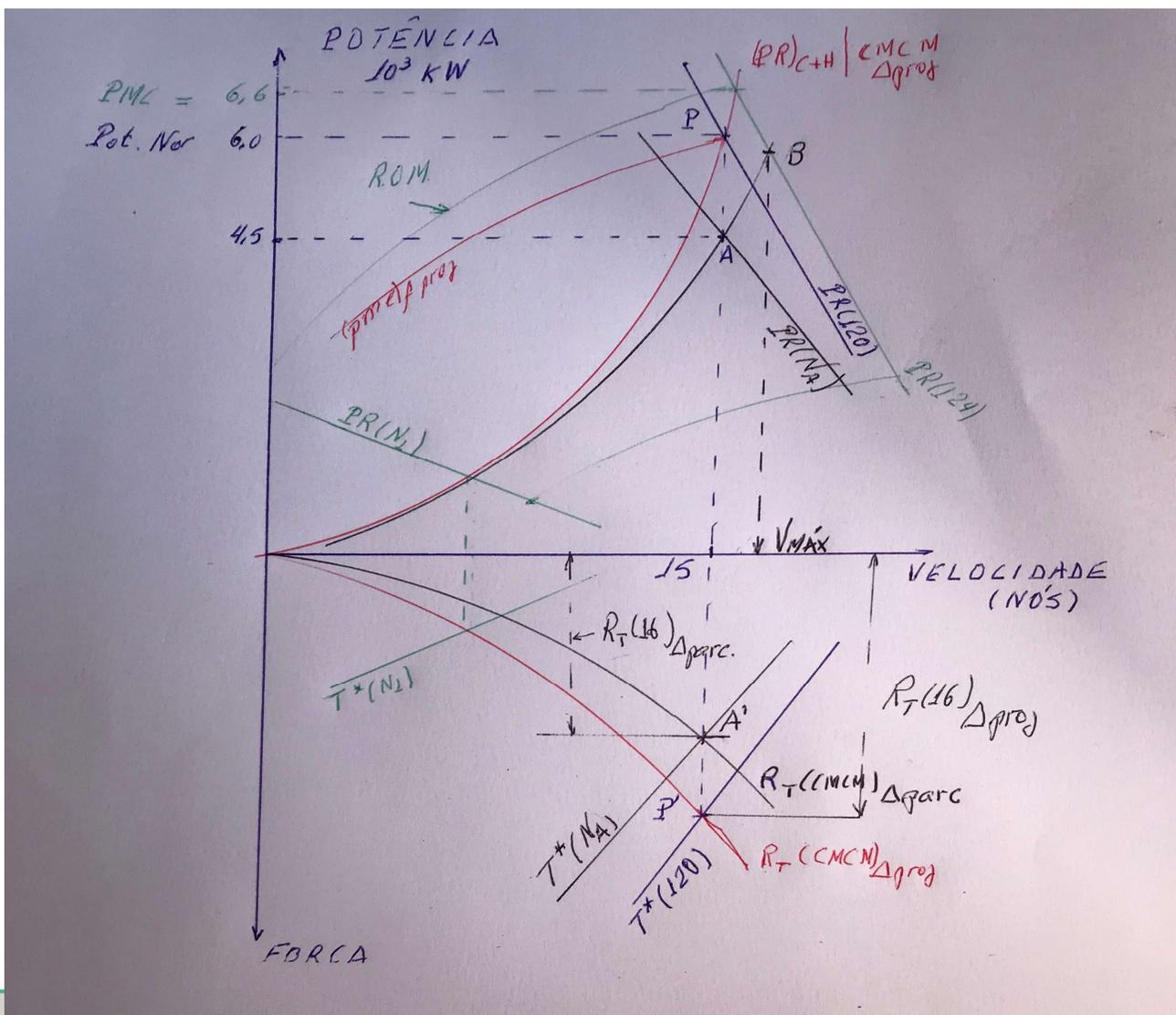
Este ponto define a velocidade máxima que o navio pode atingir com este deslocamento parcial

(Veja Figura 18)

FIGURA 18

Representação da curva de potência requerida para deslocamento parcial em condições médias de casco e mar e determinação da velocidade máxima

B(PR(124); ((PR)_{C+H}) (Δ)_{parc}



EXERCÍCIO DE APLICAÇÃO

Um navio apresenta uma instalação propulsora constituída por 2 motores Diesel de média rotação acoplados através de um redutor a um hélice de passo fixo.

Cada motor tem potência normal 10.000 kW a 480 rpm. O hélice absorve a potência 20.000 kW a 96 rpm para que o navio, nas condições de projeto, se desloque à velocidade de serviço de 20 nós.

Em prova de mar o navio vai ser testado em diferentes condições, para as quais se deseja prever os resultados.

Descrever os procedimentos para se determinar a solução dos seguintes itens, ilustrando com gráficos apropriados toda a análise feita.

DETERMINAR

a) a máxima velocidade que o navio, com deslocamento de projeto, atinge quando:

EXERCÍCIO DE APLICAÇÃO

a1) os 2 motores estão em operação

a2) só um motor está em operação

b) o deslocamento parcial do navio que permitiria atingir a velocidade 20 nós com apenas um motor trabalhando em condição de serviço contínuo

Admitir que, para uma dada velocidade, a resistência ao avanço varia com o deslocamento da seguinte forma:

$$R_T / (R_T) (\Delta_{proj}) = ((\Delta / (\Delta_{proj}))^{2/3}$$

Observações:

1) Por serviço contínuo entende-se que o motor opera com a mesma pressão média efetiva no freio da condição de projeto.

2) O importante é descrever e justificar o procedimento utilizado para obter as respostas. Adotar as hipóteses que julgar necessárias.

EXERCÍCIO DE APLICAÇÃO

RESOLUÇÃO

1. Considerações Preliminares

a) Instalação Diesel com redução

A rotação do hélice é igual à rotação do motor dividida pela razão de redução

b) Instalação com múltiplos motores

Se os dois motores estão em operação as potências fornecidas pelos 2 motores são iguais

Para uma mesma rotação somam-se as potências de cada motor

A região de operação de dois motores é a soma da região de cada motor

RESOLUÇÃO DO EXERCÍCIO

Como a instalação é diferente das anteriores, vamos iniciar pela representação das características dos motores

1. São conhecidas as especificações de projeto de cada motor

Potência Normal 10.000 kW

Rotação de projeto 480 rpm

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

$$MP = 0,10$$

$$M_{rot} = 0,03$$

3. Admite-se adicionalmente

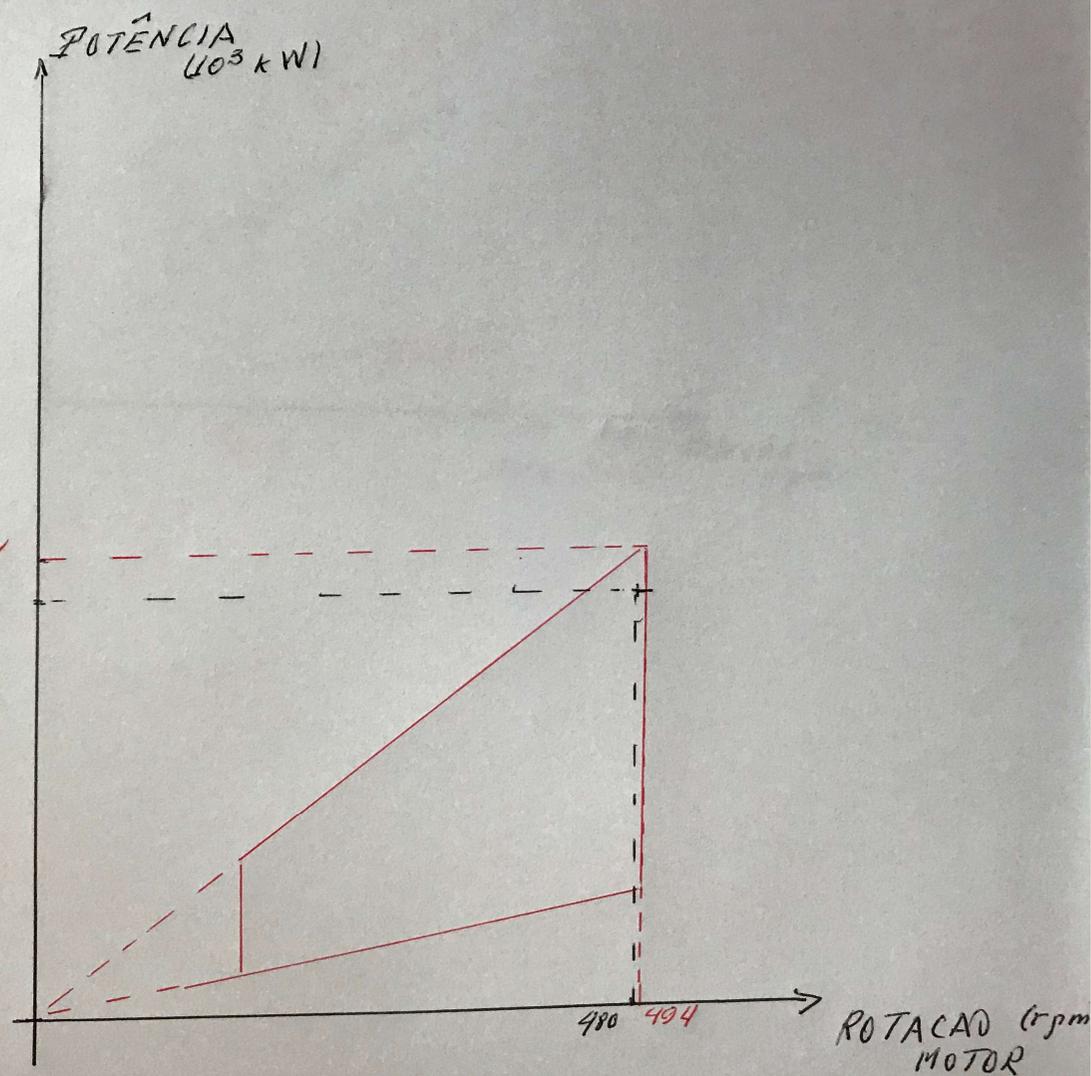
$$N_{min} = 0,4 N_{max} \quad (pme)_{fmin} = 0,3(pme)_{fproj}$$

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

(veja Figura 19)

FIGURA 19
Representação
da região de
operação de um
motor

PMC = 11
Pot Nor = 10



RESOLUÇÃO DO EXERCÍCIO

Representação da região de operação de 2 motores

1. Para o conjunto

Potência Normal 20.000 kW

Rotação de projeto 480 rpm

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

$$MP = 0,10$$

$$M_{rot} = 0,03$$

Potência máxima contínua para dois motores

$$PMC = 22.000 \text{ kW}$$

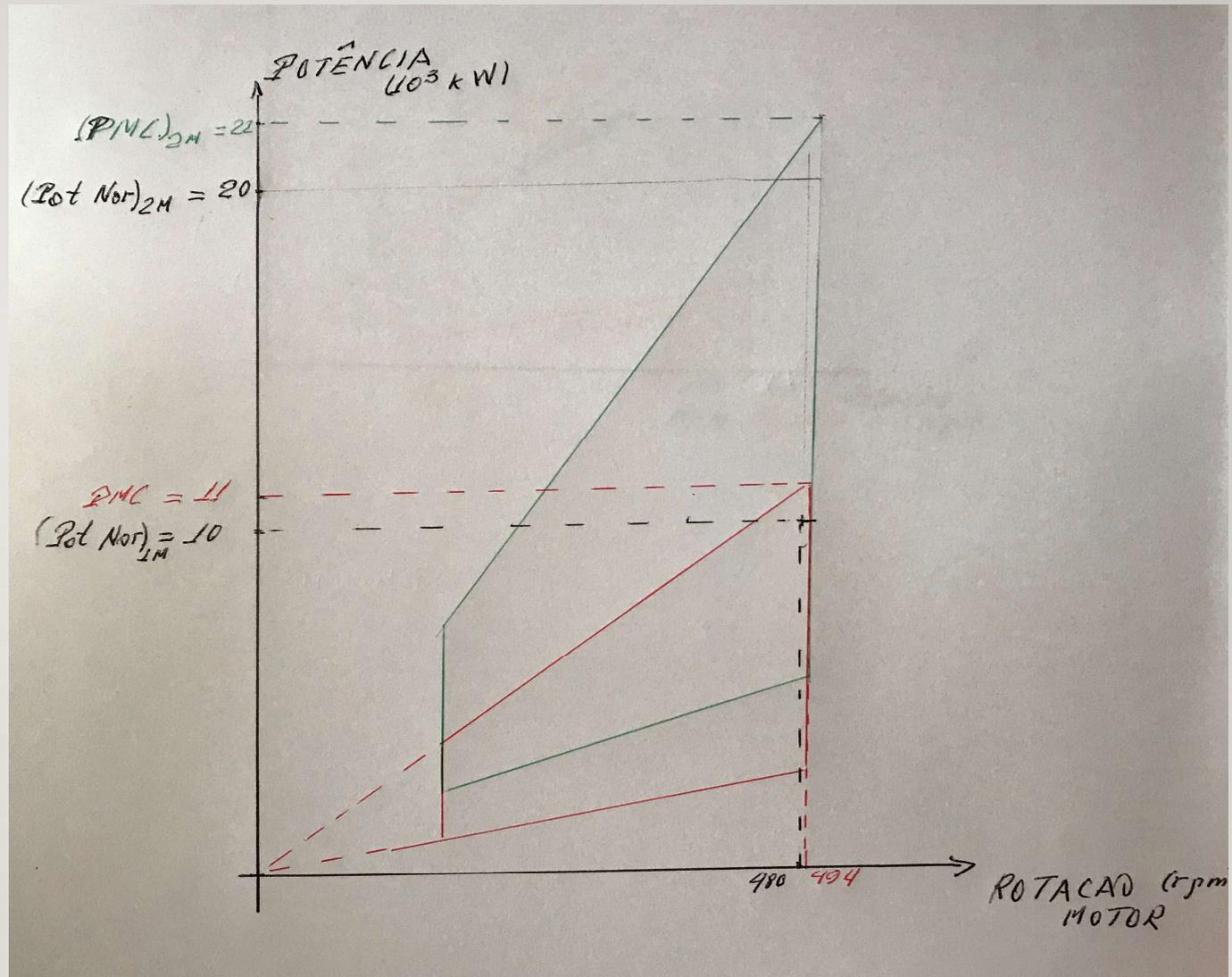
3. Admite-se adicionalmente

$$N_{min} = 0,4 N_{max} \quad (pme)_{fmin} = 0,3(pme)_{fproj}$$

Tem-se assim a região de operação dos 2 motores

(veja Figura 20)

FIGURA 20
Representação da
Região de operação
de dois motores



RESOLUÇÃO DO EXERCÍCIO

Preparação para transferência da região de operação dos motores para o diagrama de integração

Tratamento do caso de instalações com redução

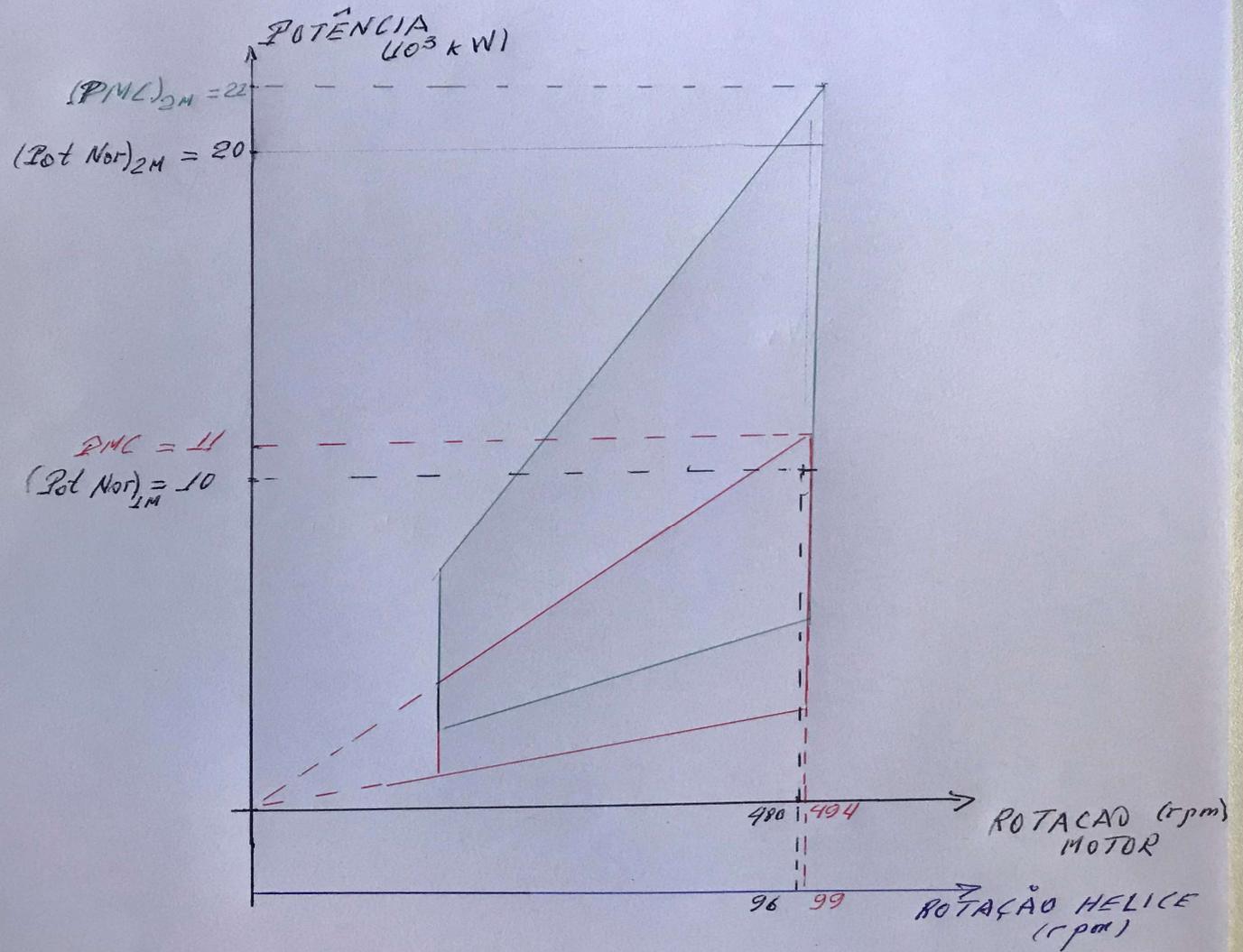
A rotação do hélice é igual à rotação do motor dividida pela razão de redução, no caso 5:1

Acrescenta-se no gráfico de potência contra rotação o eixo de rotações do hélice

(Veja Figura 21)

FIGURA 21

Representação da região de operação de dois motores, referida à rotação do hélice



RESOLUÇÃO DO EXERCÍCIO

APLICAÇÃO DO PROCEDIMENTO

1. Desenhar o diagrama de integração

- com os gráficos de força e potência em função da velocidade

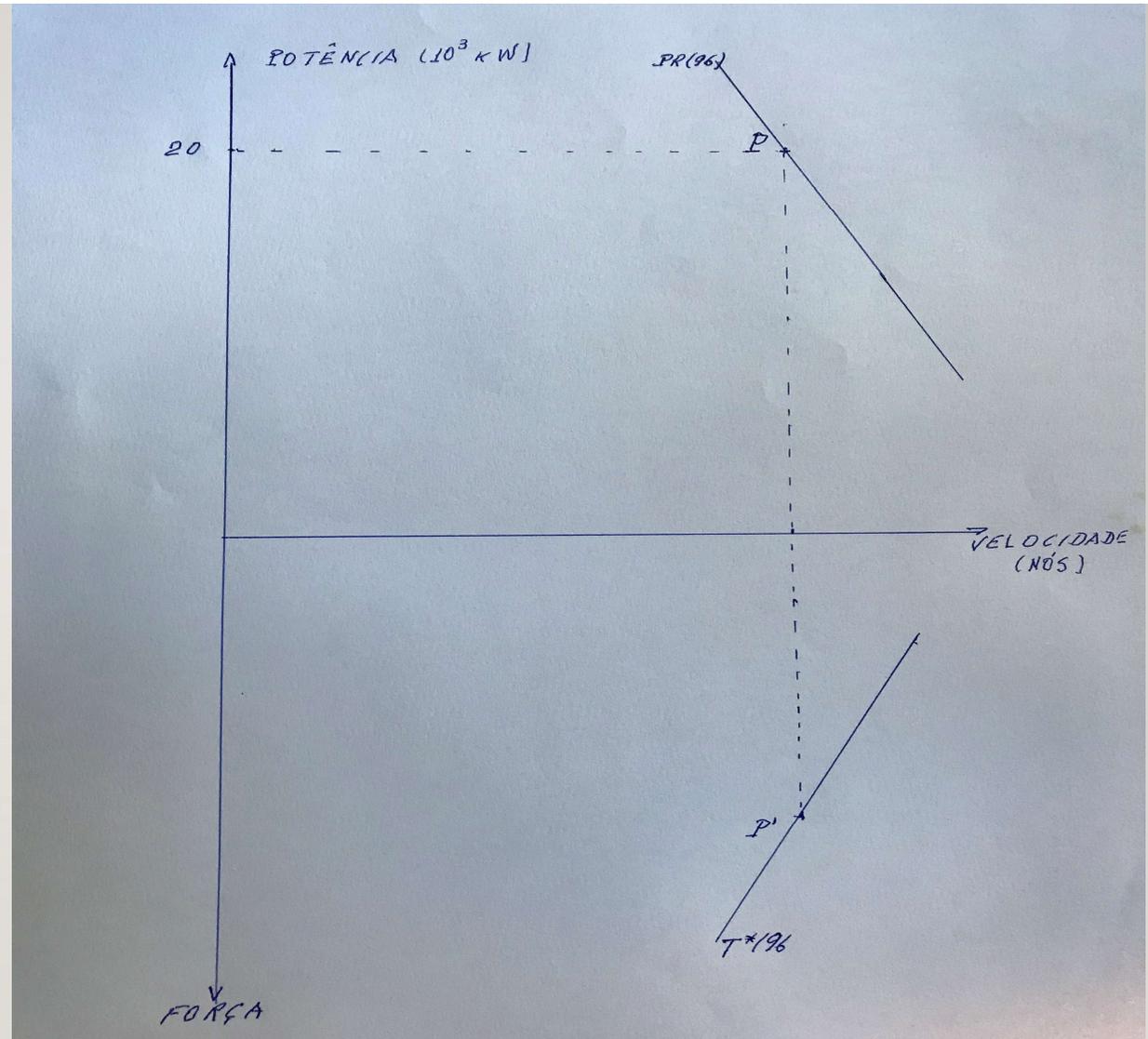
2. Representar o ponto de projeto neste diagrama

- P: no gráfico de potência $P = P(20 \text{ nós}, 20.000 \text{ kW}, 96 \text{ rpm})$

- P': no gráfico de força $P = P(20 \text{ nós}, 96 \text{ rpm})$

(Veja Figura 22)

FIGURA 22
Representação do ponto
de projeto da instalação
propulsora



RESOLUÇÃO DO EXERCÍCIO

APLICAÇÃO DO PROCEDIMENTO

1. Desenhar no diagrama de integração a curva de resistência em condições médias de casco e mar, passando pelo ponto P'
2. Desenhar no diagrama de integração a curva de potência requerida casco -hélice em condições médias de casco e mar, passando pelo ponto P

(Veja Figura 23)

FIGURA 23
Representação das
curvas de resistência e
potência requerida
casco – hélice para
condições médias de
casco e mar

