

# ANÁLISE DO DESEMPENHO DO SISTEMA PROPULSOR

---

## HÉLICE DE PASSO CONTROLÁVEL

1. REVISÃO
2. EXERCÍCIO DE 28.05 DISCUSSÃO
3. EXERCÍCIO DO BARCO REBOCADOR

# HÉLICE DE PASSO CONTROLÁVEL REVISÃO

---

## 1. MÉTODOS DE ABORDAGEM

- a) Diagrama do Motor
- b) Diagrama de Integração

## 2. EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

- a) Barco pesqueiro
- b) Navio de cabotagem

# HÉLICE DE PASSO CONTROLÁVEL

---

REPRESENTAÇÃO DO EMPUXO

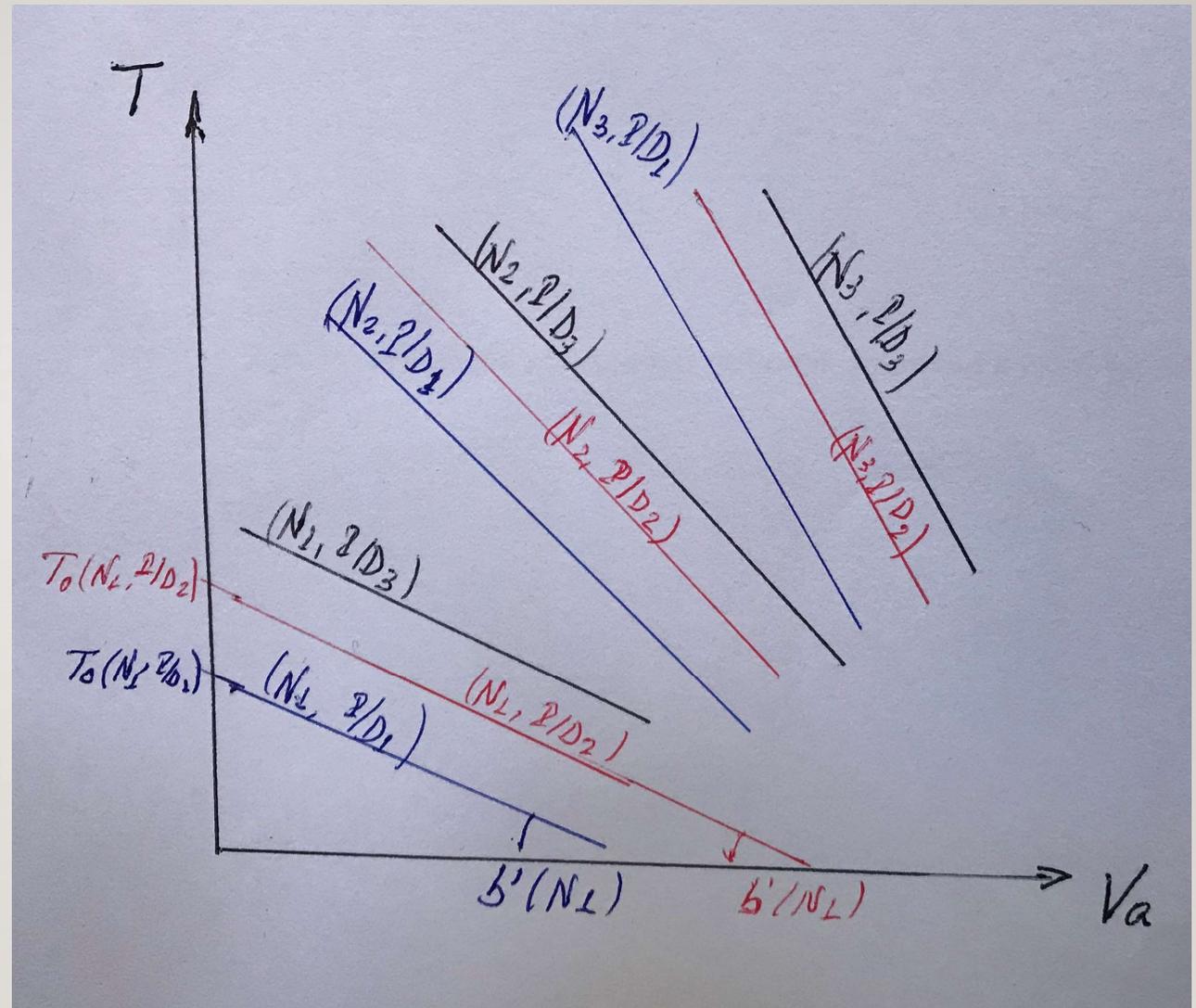
VEJA FIGURA 1A

REPRESENTAÇÃO DA POTÊNCIA ABSORVIDA PELO HÉLICE

VEJA FIGURA 2A

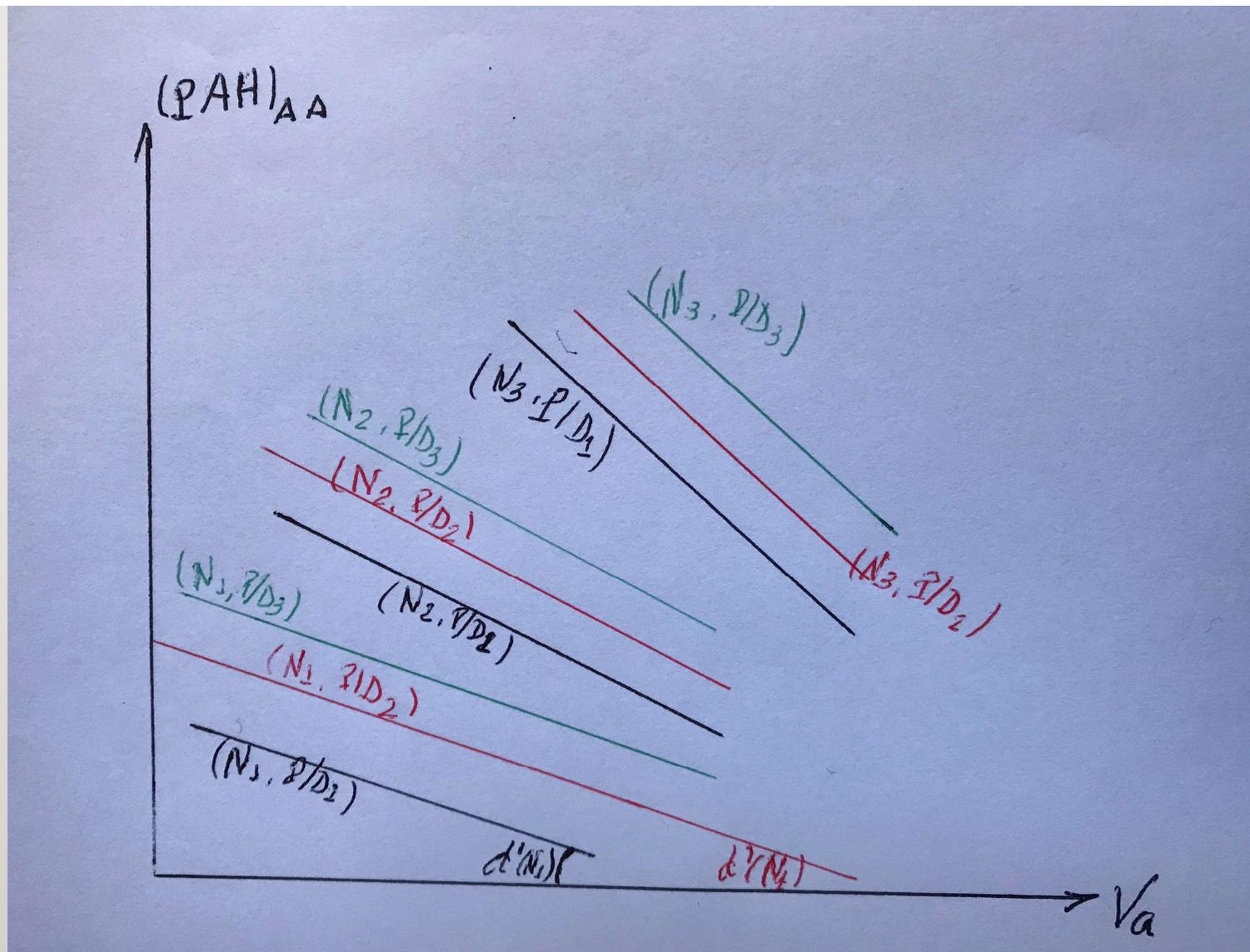
## FIGURA 1A

Representação das curvas de empuxo do hélice em função da velocidade de avanço e parametrizadas em termos de rotação e razão passo – diâmetro  
 $(P/D)_3 > (P/D)_2 > (P/D)_1$



### FIGURA 2A

Representação das curvas de potência absorvida pelo hélice em água aberta em função da velocidade de avanço e parametrizadas em termos de rotação e razão passo – diâmetro  $(P/D)_3 > (P/D)_2 > (P/D)_1$



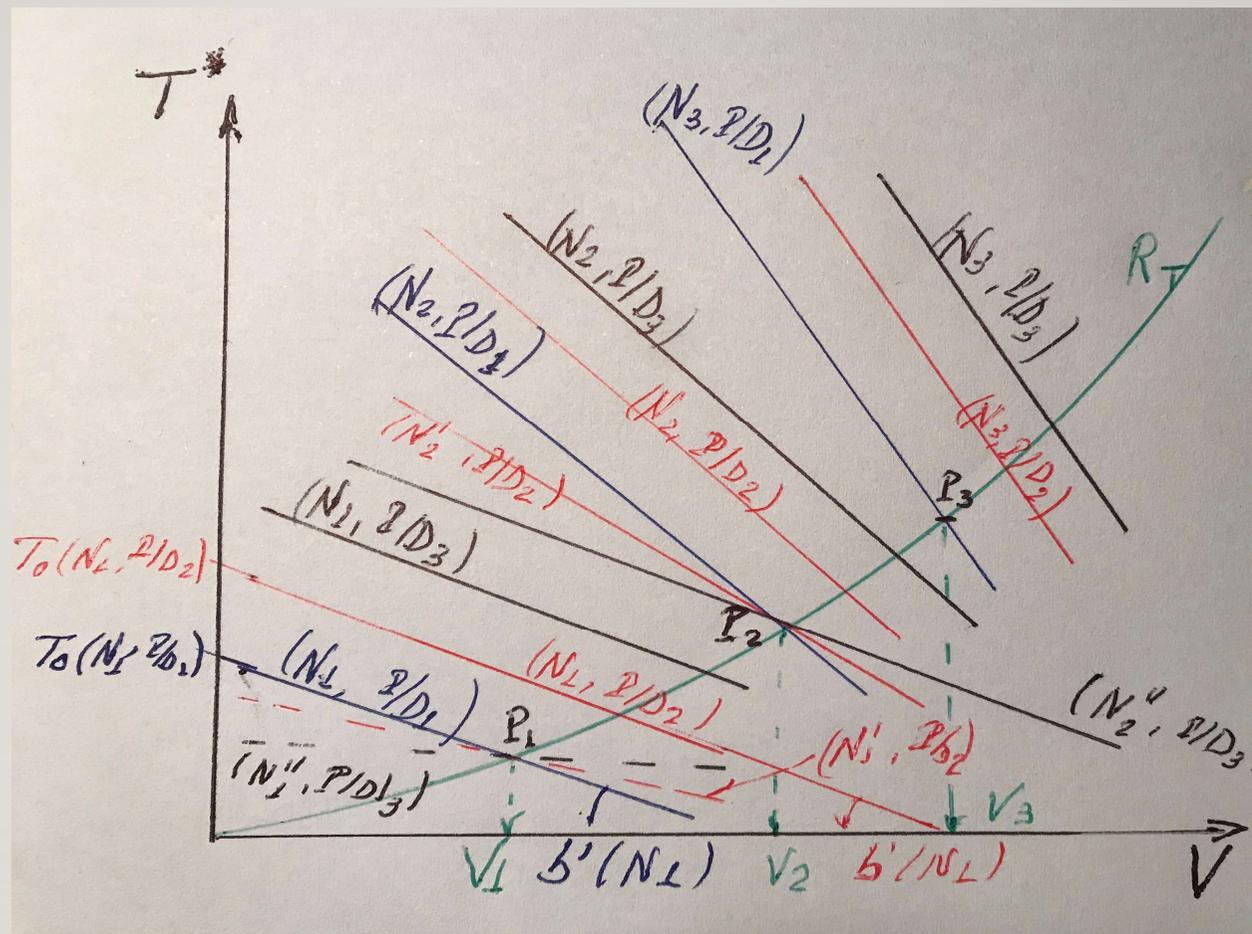
## INTEGRAÇÃO CASCO - HÉLICE

---

A exemplo do que foi feito com o emprego de hélice de passo fixo, coloca-se em um gráfico de força versus velocidade do navio a curva de resistência do casco e as curvas de empuxo líquido do hélice para diferentes rotações e diferentes valores da razão passo – diâmetro

Veja figura 3A

**FIGURA 3A**  
 Integração casco  
 – hélice no gráfico  
 de força



# INTEGRAÇÃO CASCO - HÉLICE

---

## ANÁLISE DA FIGURA 3A

Para uma dada velocidade do navio, existem diversas combinações rotação – razão passo – diâmetro que representam pontos de equilíbrio

Quando se aumenta a razão passo – diâmetro uma dada velocidade é mantida com uma menor rotação do hélice

A velocidade  $V_1$  pode ser obtida com:  $(N_1, P/D_1)$ ,  $(N'_1, P/D_2)$ ,  $(N''_1, P/D_3)$

em que

$$N_1 > N'_1 > N''_1$$

$$P/D_1 < P/D_2 < P/D_3$$

O mesmo raciocínio aplica-se a outras velocidades

# INTEGRAÇÃO CASCO - HÉLICE

---

## ANÁLISE DA FIGURA 3A

Cada ponto  $P_j$  define um ponto de regime permanente

$$P_j = P_j(V_j, N_k, P/D_l)$$

em que há uma correspondência entre cada  $N_k$  e uma dada  $P/D_l$

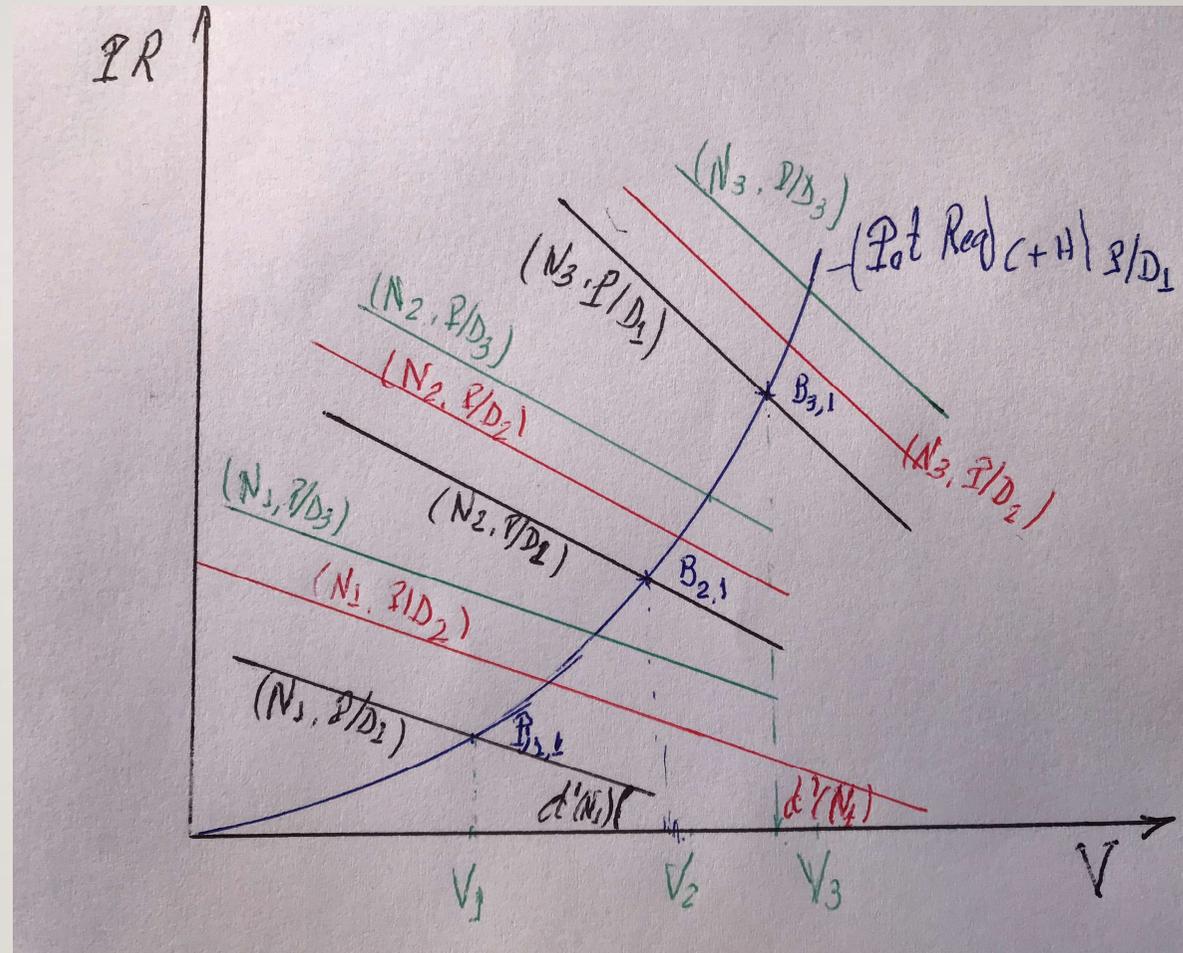
Se fixarmos uma razão  $P/D_l$  podemos encontrar no diagrama de potência requerida do hélice a curva de potência requerida casco – hélice

Por exemplo, considerando a razão  $P/D_1$ , obém-se a curva desenhada na Figura 4A

A um ponto  $P_j$  correspondem diferentes pontos  $B_{jl}$  no gráfico de potência

Os pontos  $B_{jl}$  ( $j$  fixo e  $l = 1, 2, \dots, n$ ) poderão ser coincidentes se a eficiência do hélice for a mesma quando se altera a razão passo – diâmetro)

**FIGURA 4A**  
Integração  
casco – hélice  
no gráfico de  
potência



# CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES PARA INTEGRAÇÃO HÉLICE - MOTOR

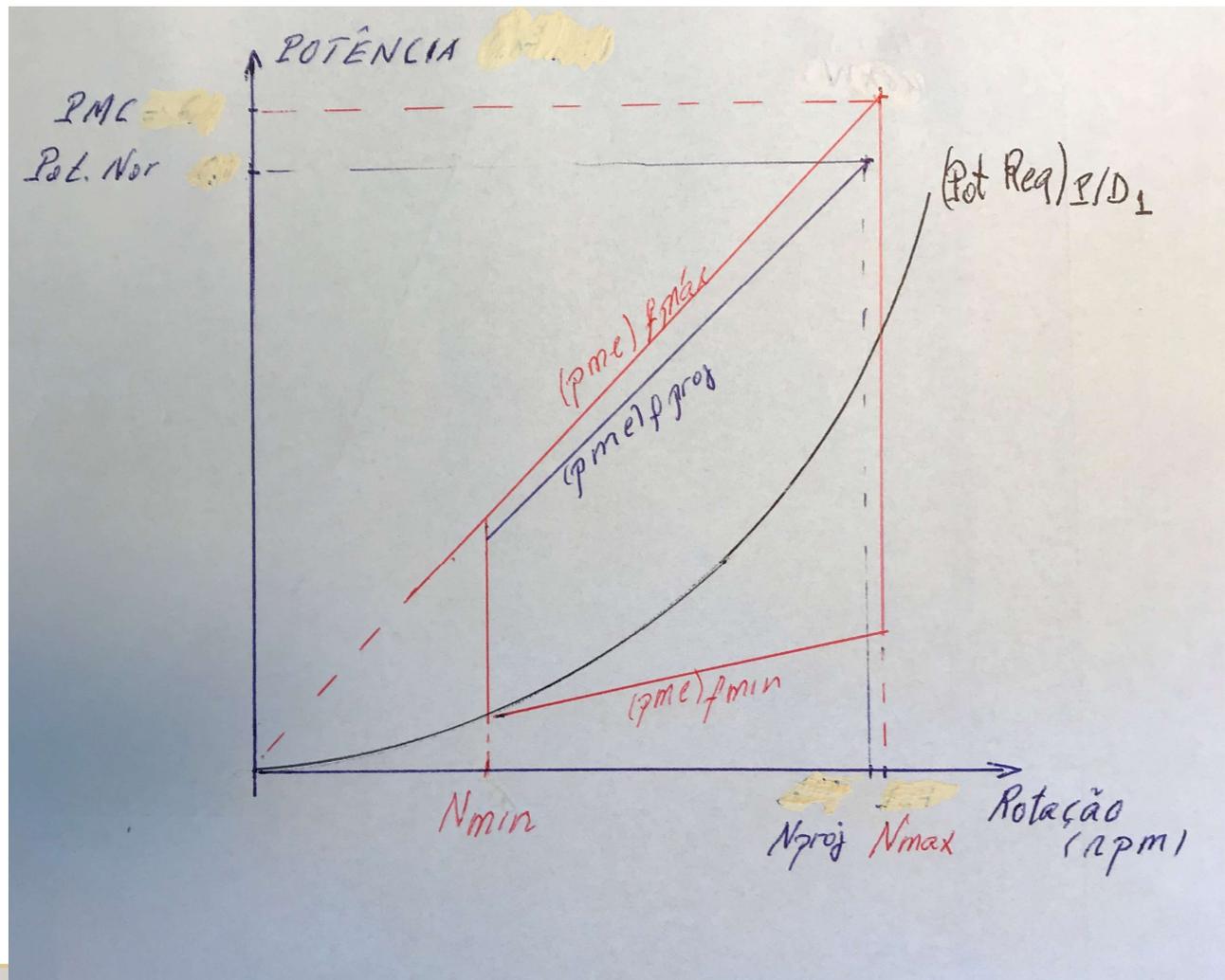
---

## 1. CURVA DE POTÊNCIA REQUERIDA CASCO – HÉLICE

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

## 2. REPRESENTAÇÃO NUMA MESMA FIGURA (VEJA FIGURA 5A)

**FIGURA 5A**  
Região de operação  
do motor e Curva de  
potência requerida  
casco – hélice



## VARIAÇÃO DA RAZÃO PASSO DIÂMETRO

---

Na Figura 5A foi plotada sobre a região de operação do motor a curva de potência requerida para a razão passo – diâmetro 1

Como se posicionam as curvas de potência requerida para as outras razões passo diâmetro?

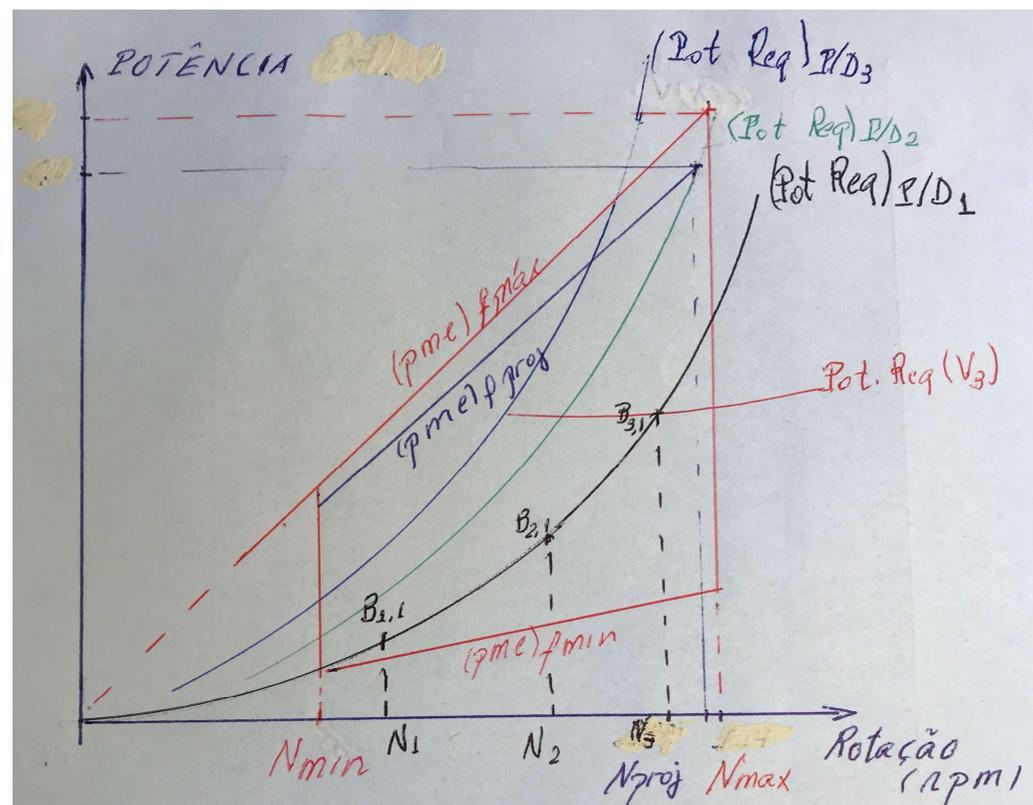
Essas curvas estão plotadas na Figura 6A

Observa-se que quando aumenta a razão passo – diâmetro a curva de potência requerida se aproxima do eixo de potência

Para se atingir uma dada velocidade há uma redução da rotação quando se aumenta a razão passo - diâmetro

### FIGURA 6A

Região de operação do motor e Curvas de potência requerida para diferentes razões passo - diâmetro



## INTEGRAÇÃO CASCO – HÉLICE – MOTOR

### COMENTÁRIOS SOBRE A FIGURA 6A

---

1. Dependendo do (razão passo – diâmetro) passo escolhido a curva de potência requerida atinge a fronteira da região do motor em diferentes posições

a) na reta de rotação máxima

b) na reta de pressão média efetiva no freio máxima

2. Foi desenhada na figura a curva de potência requerida para que o navio se movimente com a velocidade  $V_3$

Observações:

a) Esta curva vale para um dado deslocamento do navio e uma dada condição de casco e mar

b) Pela forma que foi desenhada esta curva, constata-se que o hélice tem maior eficiência para a velocidade  $V_3$

# INTEGRAÇÃO CASCO – HÉLICE – MOTOR NO DIAGRAMA DE INTEGRAÇÃO

---

## DIFERENÇAS EM RELAÇÃO AO CASO DE PASSO FIXO

1. Há uma curva de potência requerida casco – hélice para cada razão passo – diâmetro; elas podem estar muito próximas umas das outras
2. Para cada razão passo – diâmetro há uma posição diferente para a região de operação do motor; isto resulta que para uma mesma rotação a curva de potência requerida se afasta da origem quando se aumenta a rotação

# EXEMPLO DE APLICAÇÃO

---

EXERCÍCIO

28/05

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 8.000 kW à rotação 110 rpm. Foi selecionado, portanto, um motor com potência normal 8.000 kW à rotação 110 rpm.

Em outra condição de operação, com deslocamento 15.000 toneladas, a potência requerida para atingir a velocidade de 15 nós é 6.500 kW à rotação 110 rpm.

## EXEMPLO DE APLICAÇÃO

---

EXERCÍCIO

28/05 (CONTINUAÇÃO)

- a) Mostrar que o sistema propulsor emprega hélice de passo variável. Dizer qual a relação entre os passos para os deslocamentos de 20.000 ( $p_1$ ) e de 15.000 toneladas ( $p_2$ ).
- b) Se, para o deslocamento de 15.000 toneladas, deseja-se aumentar a velocidade, que mudança deve ser feita no passo?
- c) Qual seria o efeito sobre a velocidade do navio para a condição de deslocamento máximo de se operar o hélice com passo  $p_2$ ?

## EXEMPLO DE APLICAÇÃO

---

EXERCÍCIO

28/05 (CONTINUAÇÃO)

d) Considerando o passo do hélice,  $p_1$ , para deslocamento de 20.000 toneladas, descreva o procedimento para determinar o menor deslocamento que ainda permitiria manter continuamente a velocidade 15 nós.

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

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

Adotar as hipóteses necessárias à análise da questão com a devida justificação

## EXEMPLO DE APLICAÇÃO

---

### RESOLUÇÃO

Para resolver a questão vamos colocar inicialmente os dados do problema no gráfico de potência versus rotação do motor e depois no diagrama de integração.

A figura 1 mostra o diagrama da região de operação do motor e os pontos de operação apresentados no enunciado da questão:

Ponto A = A ( $\Delta = 20.000$  ton,  $V = 15$  nós,  $N = 110$  rpm; Pot = 8.000 kW)

Ponto B = B ( $\Delta = 15.000$  ton,  $V = 15$  nós,  $N = 110$  rpm; Pot = 6.500 kW)

Precisa-se verificar se os pontos A e B são compatíveis com o uso de hélice de passo fixo.

# EXEMPLO DE APLICAÇÃO

---

## RESOLUÇÃO

Item a)

Sabe-se que para hélice de passo fixo a curva de potência absorvida pelo hélice é proporcional ao cubo da rotação:

$$\text{Potência} = \alpha (\text{Rotação})^3$$

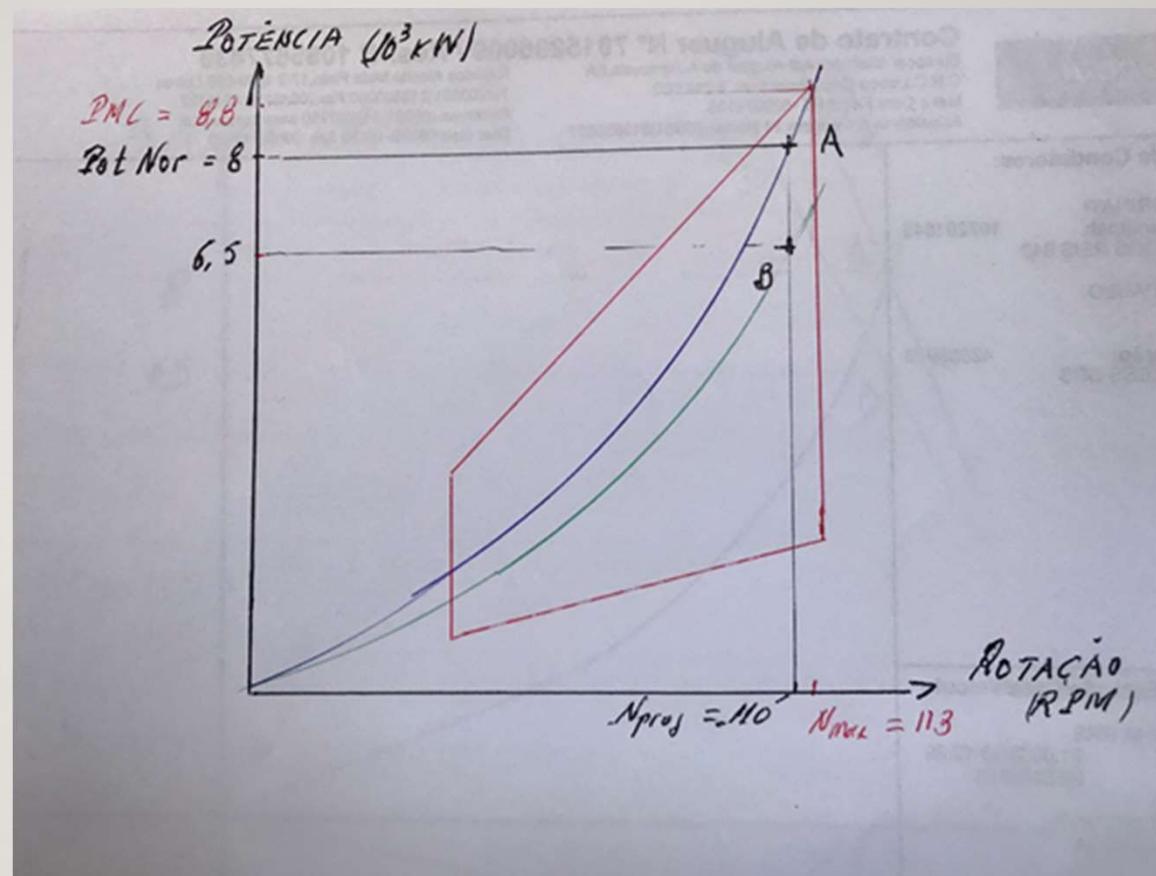
Mas essa relação pressupõe uma mesma condição de carga, isto é, mesmo deslocamento do navio e mesmas condições de casco e mar.

Essas condições não se observam no presente caso pois o deslocamento do navio para o ponto B é parcial.

Portanto, as curvas mostradas na figura 1 podem ser para um mesmo passo do hélice.

## FIGURA 1

Região de operação do motor e pontos de operação da instalação propulsora



## EXEMPLO DE APLICAÇÃO

---

### RESOLUÇÃO

Nessas condições, vamos recorrer à figura 2 que mostra o diagrama de integração

Nesta figura está representado o ponto A, que se refere à condição de projeto, em que o navio com deslocamento de projeto opera na velocidade de 15 nós:

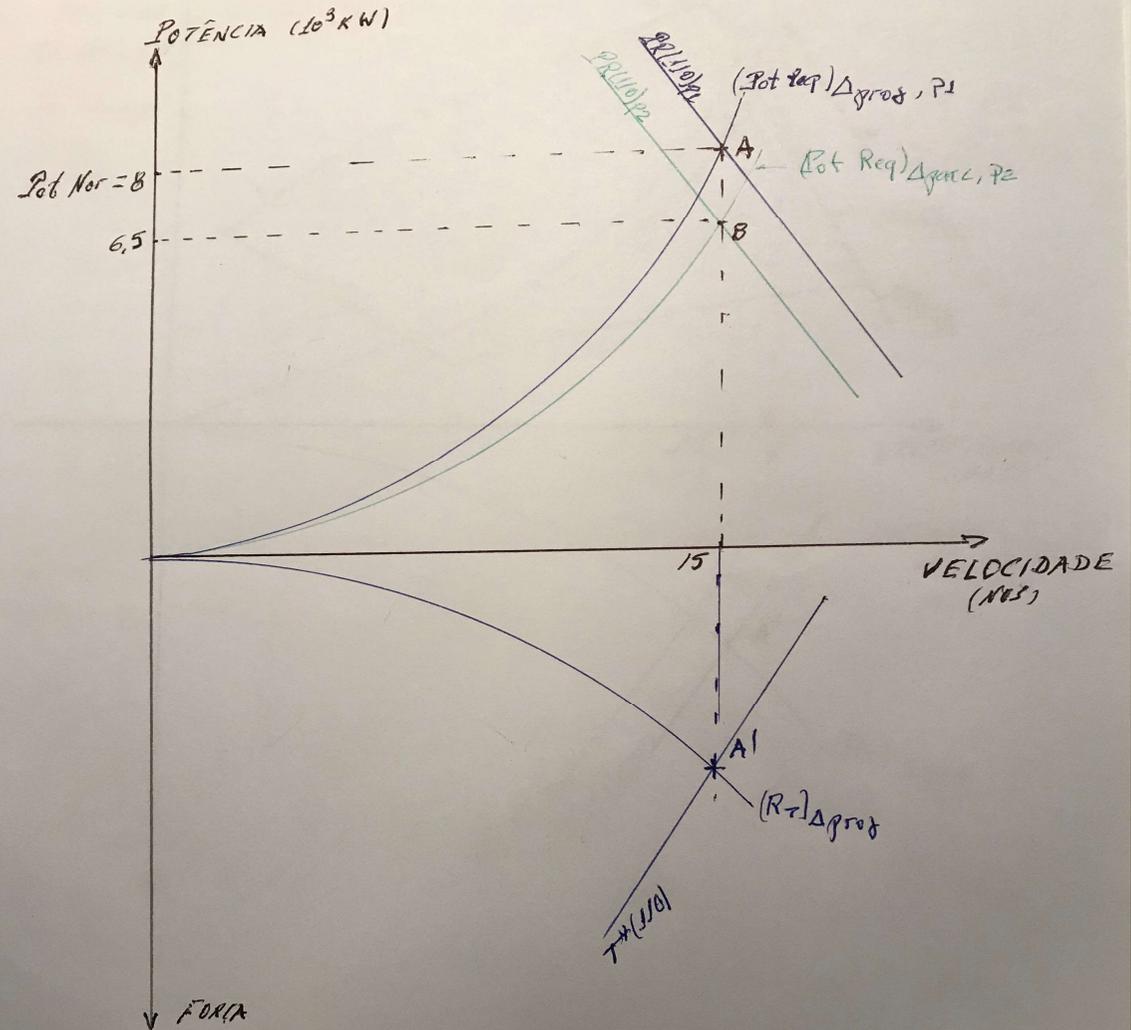
Ponto A = A ( $\Delta = 20.000$  ton,  $V = 15$  nós,  $N = 110$  rpm; Pot = 8.000 kW)

Por este ponto passa a curva de potência requerida casco-hélice.

O outro ponto também está representado:

Ponto B = B ( $\Delta = 15.000$  ton,  $V = 15$  nós,  $N = 110$  rpm; Pot = 6.500 kW)

**FIGURA 2**  
Diagrama de integração  
e pontos de operação da  
instalação propulsora



## EXEMPLO DE APLICAÇÃO

---

### RESOLUÇÃO

Observando esta figura constata-se que o hélice é de passo controlável, porque os dois pontos correspondem à mesma rotação do hélice

Neste caso, como a potência para o ponto B é menor que a do ponto A e os dois são de mesma rotação, conclui-se que o passo do ponto B, condição de deslocamento parcial é menor que a do ponto A, de deslocamento de projeto:

$$(P/D)_{\Delta_{\text{parc}}} < (P/D)_{\Delta_{\text{proj}}}$$

Ou:

$$(P/D)_2 < (P/D)_1$$

## EXEMPLO DE APLICAÇÃO

---

### RESOLUÇÃO

Item b)

Para analisar esse item vamos usar inicialmente a figura 3

O ponto B, que determina a velocidade de 15 nós, para o navio com deslocamento parcial, está situado na rotação de projeto com potência inferior à normal

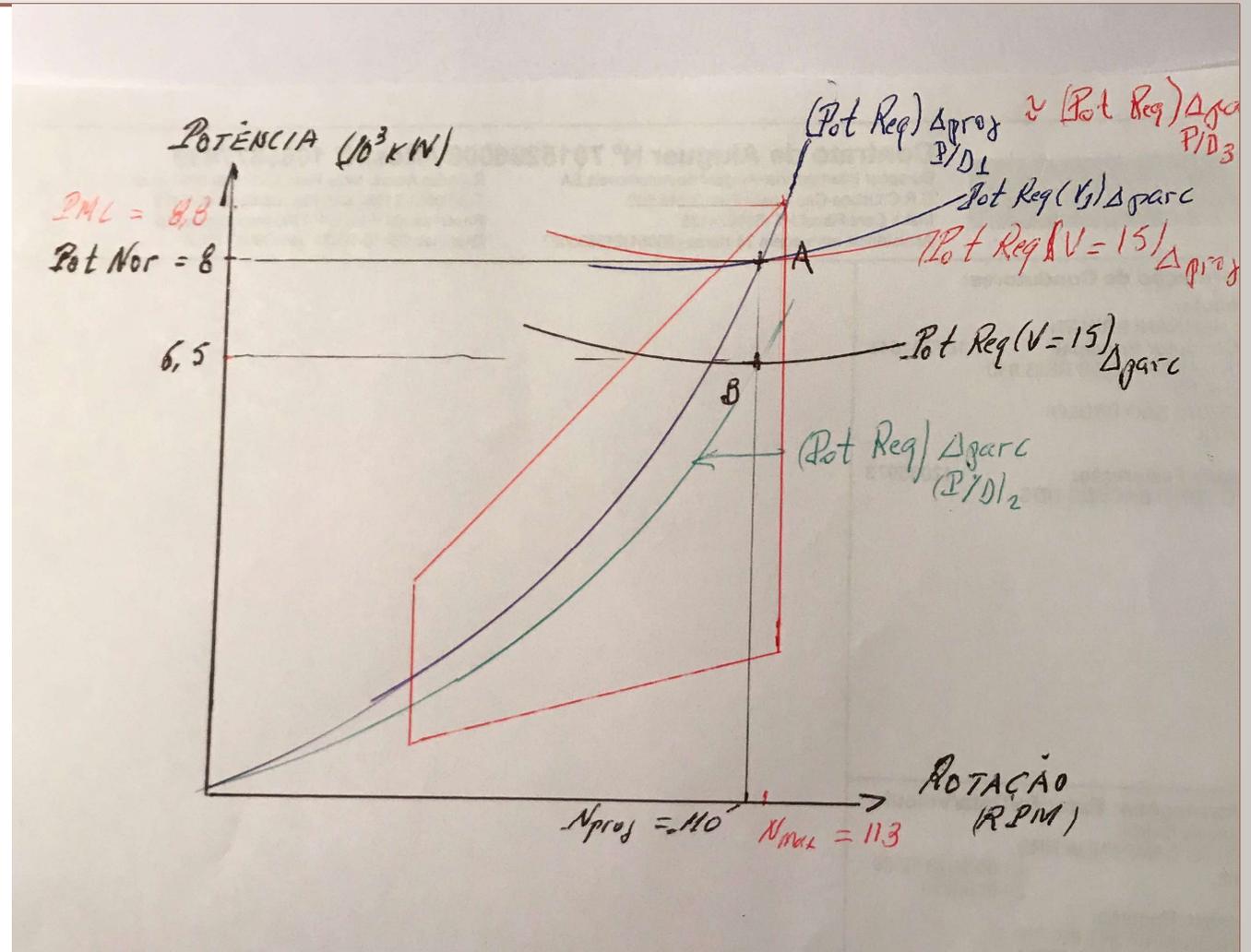
Neste caso, para aumentar a velocidade do navio é necessário aumentar o passo:

$$(P/D)_3 > (P/D)_2$$

Com o novo passo o hélice absorve a potência de 8.000 kW e o navio atinge uma velocidade  $V_1$  maior que 15 nós

### FIGURA 3

Variação do passo do hélice para se obter maior velocidade com deslocamento de 15.000 toneladas



## EXEMPLO DE APLICAÇÃO

---

### RESOLUÇÃO

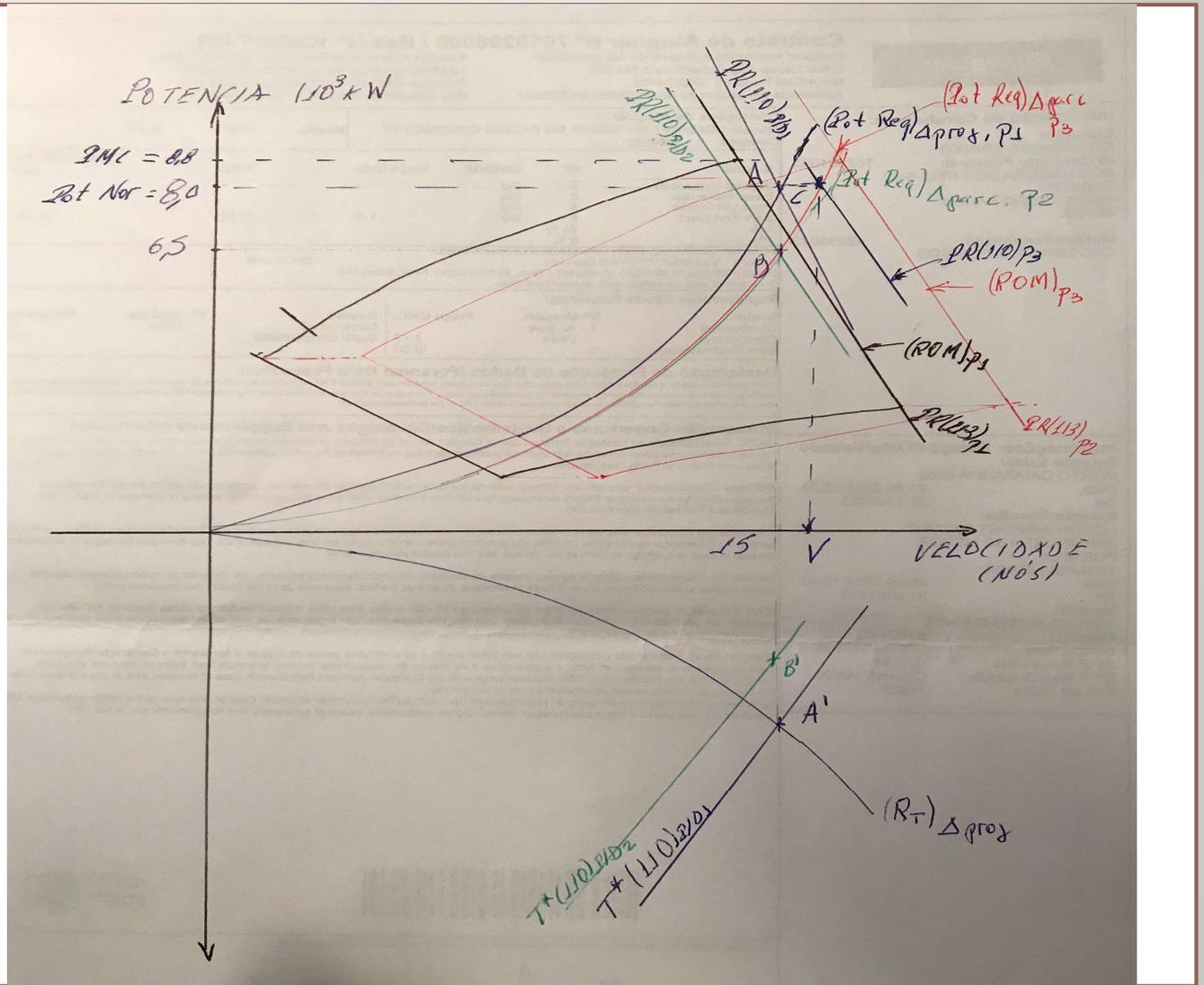
Pode-se analisar esta questão usando o diagrama de integração. Constrói-se inicialmente a região de operação do motor para o passo  $p_2$ . Veja figura 4

Desenha-se a região de operação do motor para um passo  $p_3$  maior que  $p_2$

A região foi desenhada de tal forma que o ponto de projeto do motor (Potência normal = 8.000 kW e rotação 110 rpm) esteja situado sobre curva de potência requerida para deslocamento parcial e passo  $p_2$

Sabe-se que com o passo  $p_3$  a curva será ligeiramente diferente, mas a diferença no valor da velocidade será pequena.

**FIGURA 4**  
 Variação do passo do hélice para se obter maior velocidade com deslocamento parcial



# EXEMPLO DE APLICAÇÃO

---

## RESOLUÇÃO

### Item c)

Para saber o efeito de se usar o passo  $p_2$  quando o navio opera em deslocamento de projeto, examina-se o efeito do deslocamento da região de operação do motor para a esquerda no gráfico de potência do diagrama de operação

Desenha-se então a região de operação para o passo  $p_1$  e depois para o passo  $p_2$  (Veja Figura 5)

# EXEMPLO DE APLICAÇÃO

---

## RESOLUÇÃO

A região de operação do motor para o passo  $p_2$  está á esquerda da região para o passo  $p_1$

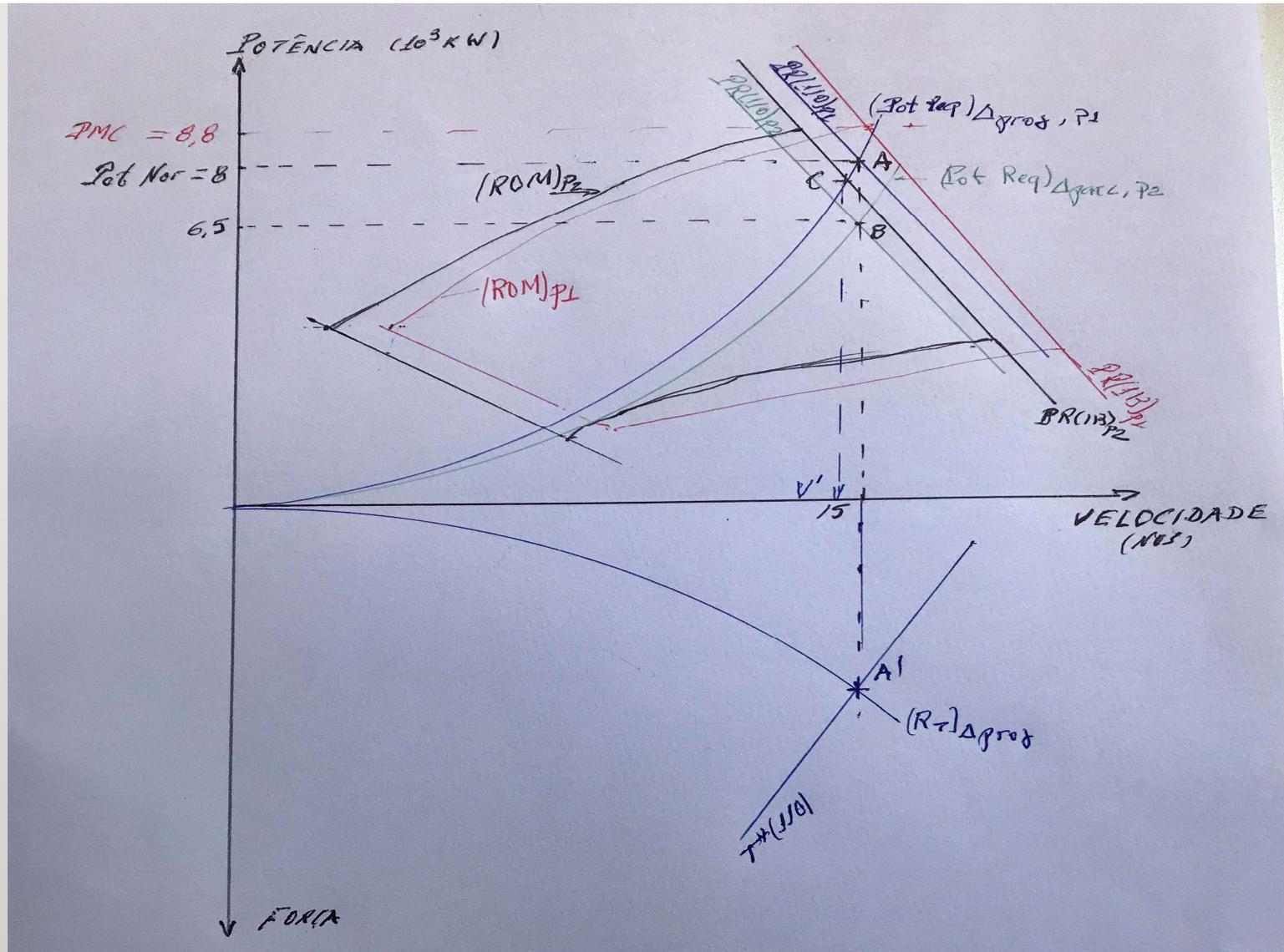
A curva da potência requerida casco-hélice encontra o limite de região no ponto C

Obtém-se, assim, o valor de velocidade máxima  $V'$  que é menor que 15 nós  
Na verdade, deveria ser considerada uma pequena alteração na curva de potência requerida casco-hélice com o passo  $p_2$

De fato, com um passo diferente do de projeto, há uma queda na eficiência do hélice, pelo menos para a velocidade de serviço.

## FIGURA 5

Efeito da redução de passo quando o navio opera com deslocamento de projeto



# EXEMPLO DE APLICAÇÃO

---

## RESOLUÇÃO

A análise do item c pode também ser feita no digrama do motor

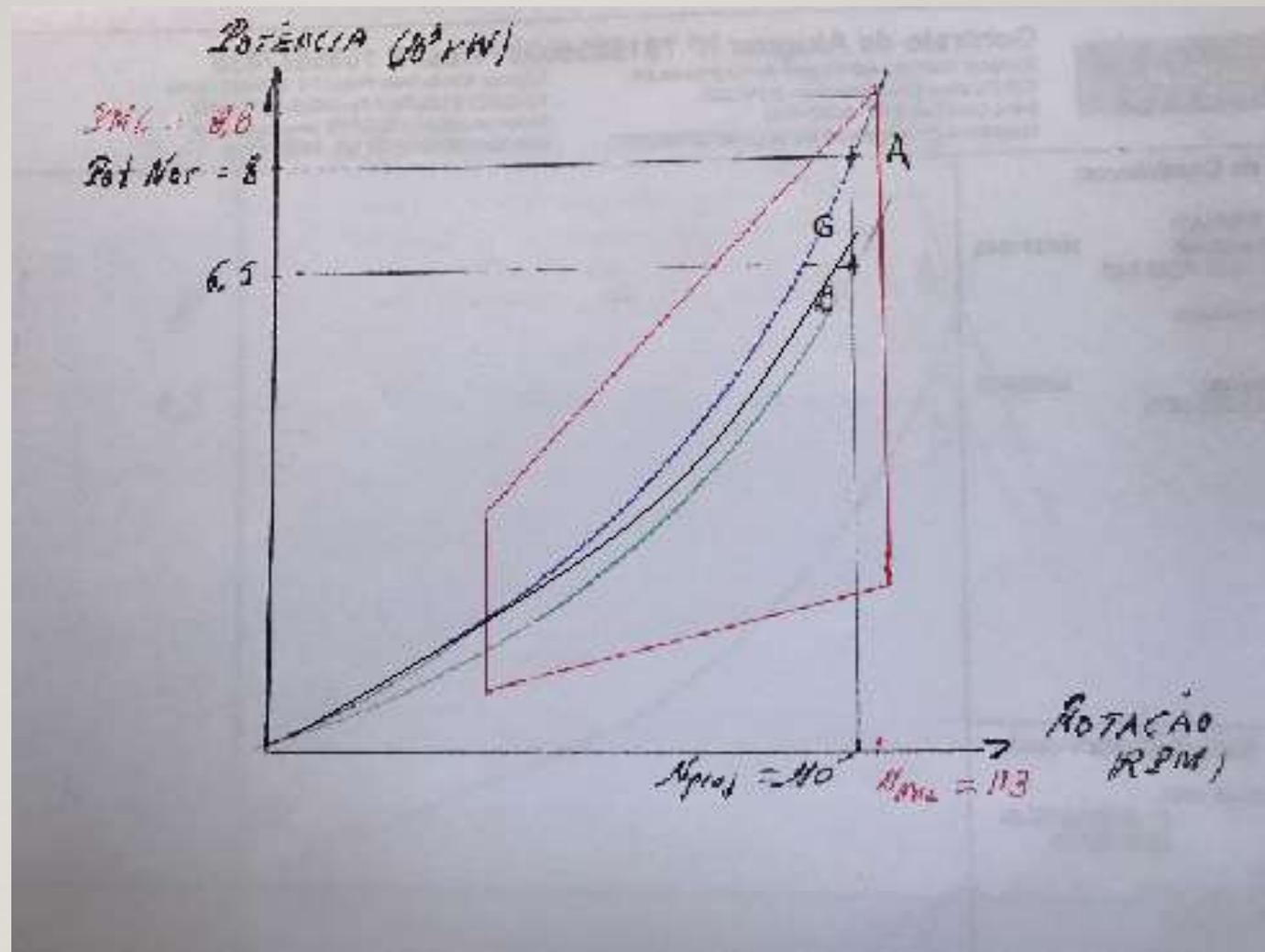
A redução da razão passo-diâmetro faz com que a curva de potência requerida se desloque para a direita

No encontro com a restrição de rotação máxima do motor está o ponto de operação

Com isto a potência absorvida é menor que 8.000 kW e a velocidade do navio é menor

Veja ponto G na figura 6

**FIGURA 6**  
Efeito da redução  
de passo quando o  
navio opera com  
deslocamento  
de projeto



# EXEMPLO DE APLICAÇÃO

---

## RESOLUÇÃO

Item d)

Vamos admitir que numa dada condição o navio esteja com uma carga bem reduzida

Com a diminuição do deslocamento há uma queda da resistência ao avanço e da potência requerida casco-hélice.

O motor tem uma limitação de pressão média efetiva no freio

Qual é o menor valor de deslocamento que ainda permite que o motor operasse de forma segura

Para  $V$  igual a 15 nós pode-se marcar o ponto D na curva de  $(p_{mef})_{min}$

Este ponto determina uma rotação do motor,  $N_D$

## EXEMPLO DE APLICAÇÃO

---

### RESOLUÇÃO

Pelo ponto D passa a curva de potência requerida  $N_D$

Desenha-se no gráfico de força a curva de empuxo líquido para a rotação  $N_D$ , marcando-se para a velocidade de 15 nós o ponto D'

Pelo ponto D' passa a curva de resistência para este deslocamento parcial mínimo

Os pontos A' e D' definem os valores de  $R_T(15)_{\Delta_{proj}}$  e  $R_T(15)_{\Delta_{parc.min}}$ .

Veja Figura 7

## EXEMPLO DE APLICAÇÃO

---

### RESOLUÇÃO

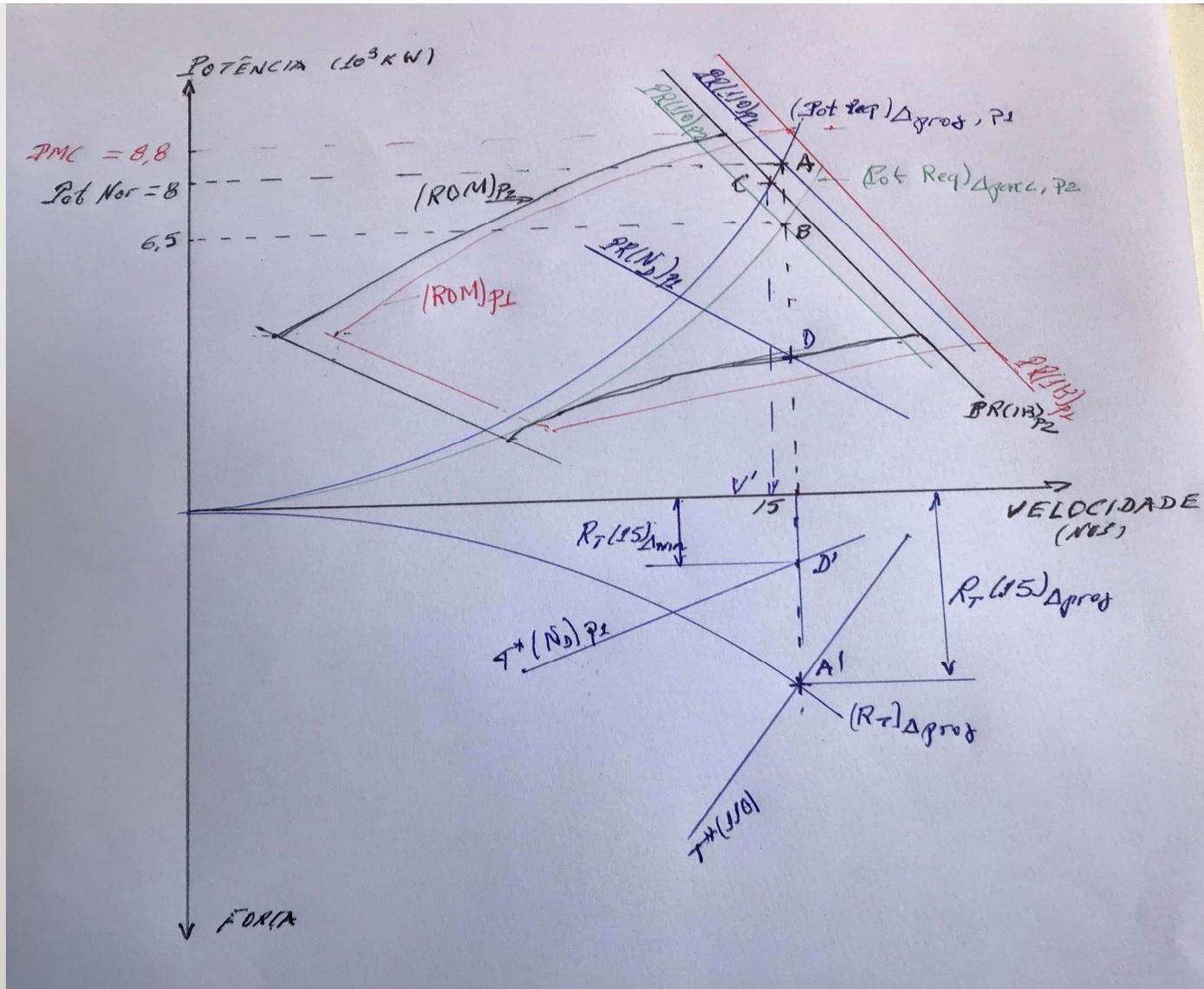
Com os valores de  $R_T(15)_{\Delta_{proj}}$  e  $R_T(15)_{\Delta_{parc.min}}$  pode-se usar a expressão:

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

para determinar o valor de  $\Delta_{min}$

$$\Delta_{min} = \Delta_{proj} \left[ R_T(15)_{\Delta_{parc.min}} / R_T(15)_{\Delta_{proj}} \right]^{3/2}$$

**FIGURA 7**  
 Determinação do deslocamento mínimo



# EXERCÍCIO DE APLICAÇÃO REBOCADOR PORTUÁRIO

---

A instalação propulsora de um rebocador foi projetada para que a embarcação fornecesse uma força de tração estática (“bollard pull”, isto é, para velocidade zero) de 150 KN

Para satisfazer este requisito foi escolhido um hélice de passo fixo que na condição de “bollard pull” opera a 180 rpm, requer do motor uma potência de 600 Kw

Foram selecionados um motor, com potência normal 600 kW à rotação de serviço 1.080 rpm, e um redutor de razão de redução 6:1

# EXERCÍCIO DE APLICAÇÃO REBOCADOR PORTUÁRIO

---

- a) Indicar no diagrama de integração casco-hélice-motor o ponto de operação na condição de reboque nos gráficos de força e potência
- b) Indicar o procedimento para obter a maior velocidade que o rebocador pode atingir em corrida livre

## EXERCÍCIO DE APLICAÇÃO REBOCADOR PORTUÁRIO

---

c) Você aconselharia a utilizar um hélice de passo controlável para se obter uma velocidade mais alta em corrida livre? Como se compara a razão passo-diâmetro para corrida livre com o valor usado para bollard pull?

d) Indicar como se obtém o valor máximo de tração que o rebocador poderia fornecer para uma velocidade igual à metade da velocidade de corrida livre, considerando as duas alternativas de passo

# REBOCADOR PORTUÁRIO

---

## RESOLUÇÃO

Item a)

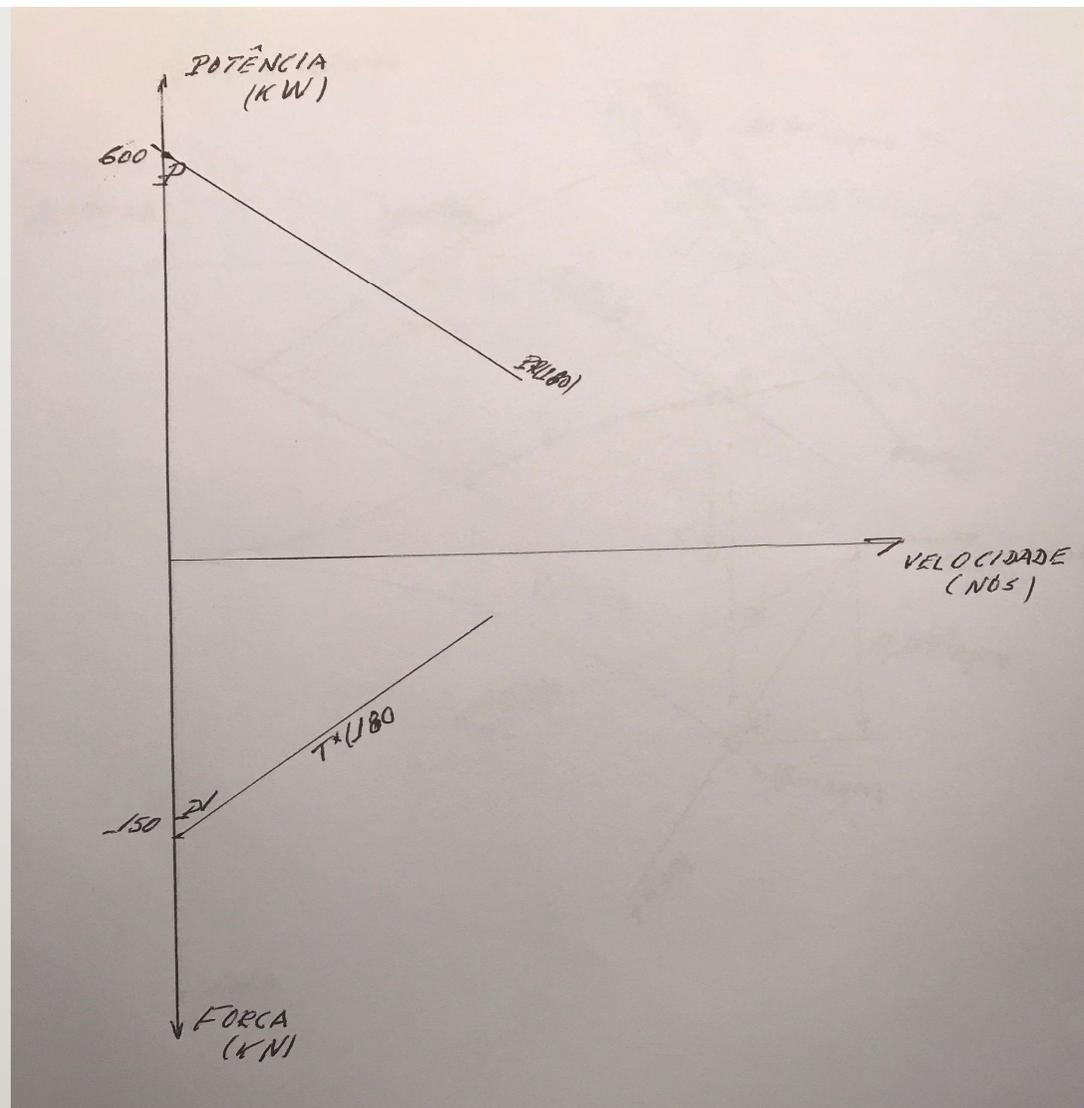
O projeto da instalação propulsora só considerou o requisito de bollard pull  
O ponto de operação no diagrama de integração casco-hélice-motor está  
situado sobre os eixos de força e potência

No gráfico de potência:  $P = P(V=0; N= 180 \text{ rp,; Pot} = 600 \text{ kW})$

No gráfico de força:  $P = P(V=0; N= 180 \text{ rp,; Força} = 150 \text{ kN})$

Veja Figura 8

**FIGURA 8**  
Ponto de projeto  
da instalação  
propulsora



# REBOCADOR PORTUÁRIO

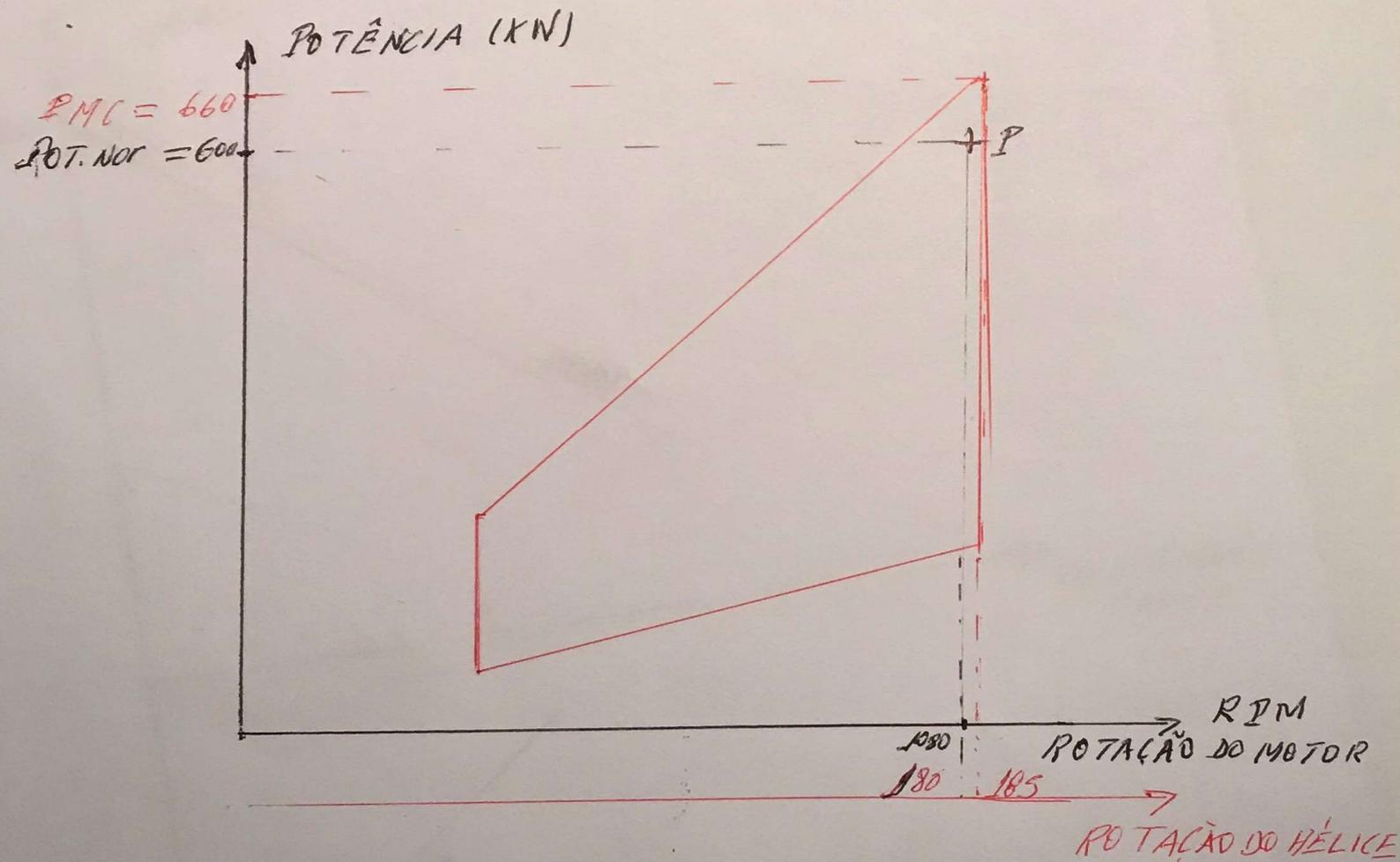
---

## RESOLUÇÃO

Item a)

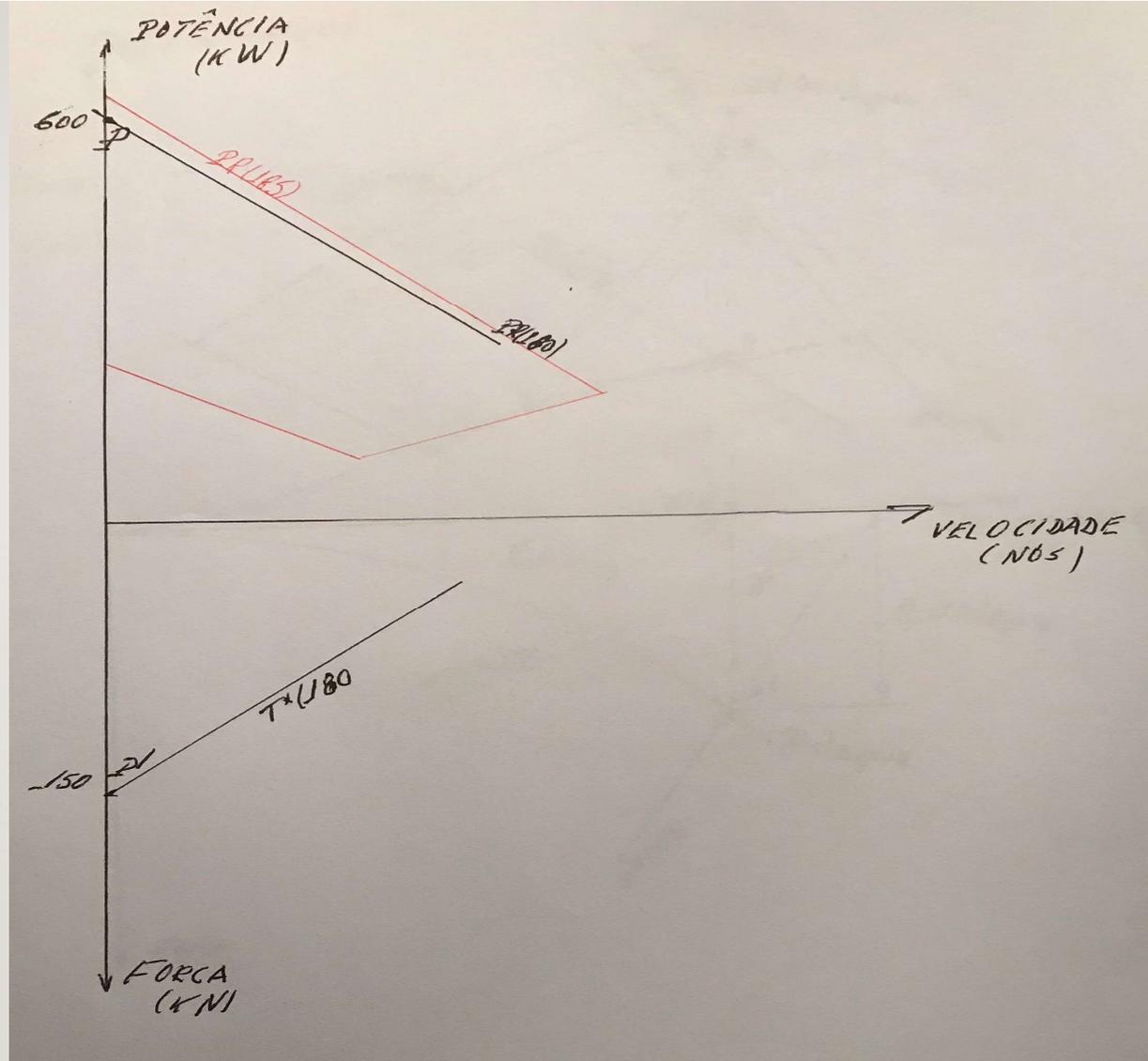
Antes de prosseguir no exame dos demais itens convém desenhar a região de operação do motor (Veja figura 9) e transportá-la para o diagrama de integração (Veja figura 10)

**FIGURA 9**  
Região de  
operação do  
motor



Pot Nor =

**FIGURA 10**  
Região de  
operação do  
motor no  
diagrama de  
integração



# REBOCADOR PORTUÁRIO

---

## RESOLUÇÃO

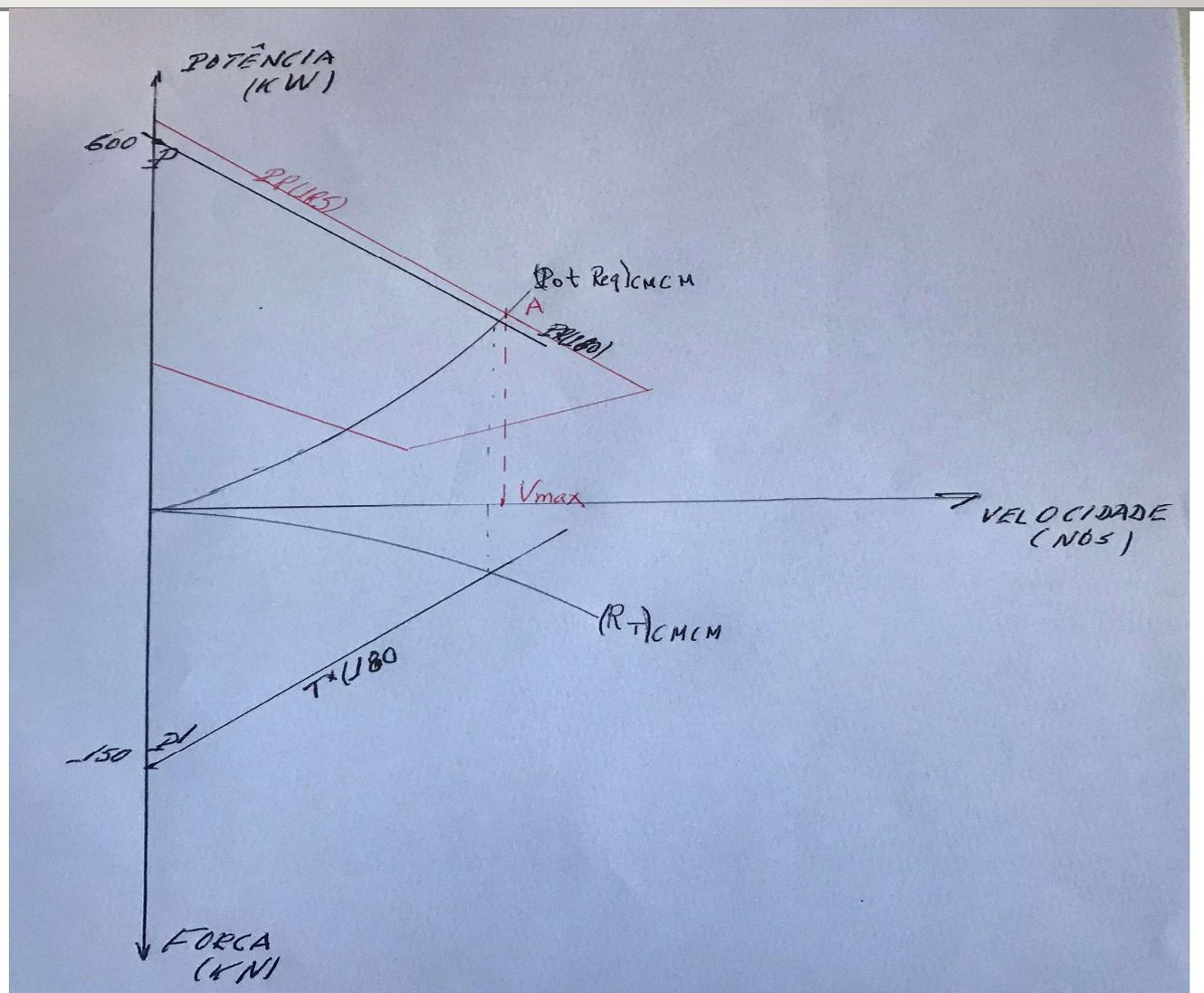
Item b)

Para determinação da velocidade máxima que o rebocador pode atingir sem tracionar outra embarcação o procedimento é o seguinte:

- i) desenha-se a curva de  $R_T$  para condições médias de casco e mar
- ii) Obtém-se a curva de potência requerida casco-hélice
- iii) Na intersecção desta curva com o limite da região de operação do motor (rotação máxima) obtém-se o ponto A que determina a velocidade máxima do rebocador

Veja figura 11

**FIGURA 11**  
Determinação  
da velocidade  
máxima do  
rebocador



# REBOCADOR PORTUÁRIO

---

## RESOLUÇÃO

OS ITENS (C) E (D) FICAM PARA ENTREGA ATÉ A PRÓXIMA AULA