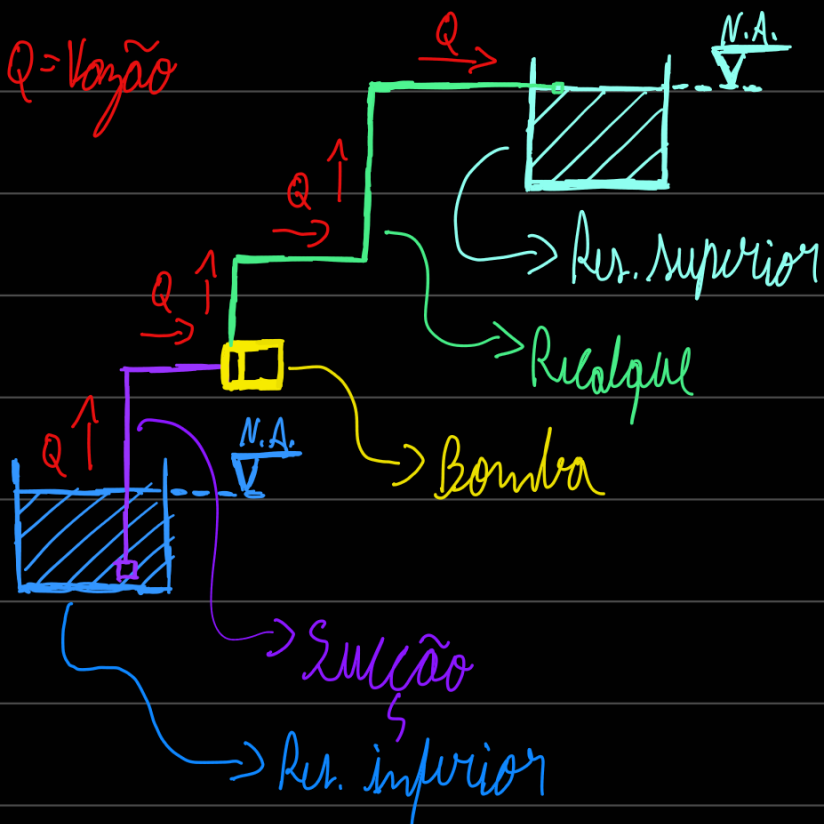




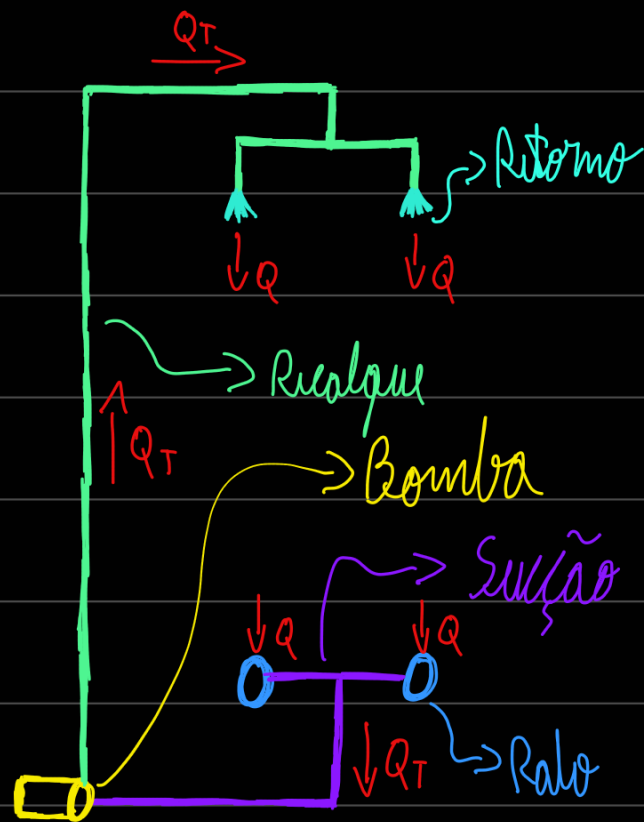
→ Passo a passo completo para dimensionar bombas hidráulicas

1- Definir o encaminhamento do sistema de tubos;

Recalque / Abastecimento



Recirculação / Distinção



2- Determinar a vazão mínima necessária;

Para qualquer abastecimento:

↳ 1º - Qual é o consumo de água estimado no local?

Exemplo: Escritórios = 50 litros/dia/pessoa

Apartamentos = 200 litros/dia/pessoa

↳ 2º - Em quanto tempo você precisa encher o reservatório superior ou fazer a reposição total do consumo de água do local?

↳ Esse é o tempo de funcionamento da bomba.

↳ A NBR 5626:2020, no item 6.7.2, recomenda um tempo de funcionamento de no máximo 6h para reposição total do volume destinado ao consumo diário de água no local e de 3h para residências unifamiliares.

↳ 3º - Com o volume de água (consumo diário total no local) e tempo máximo de reposição desse volume, é possível calcular a vazão mínima de água que a

bomba deve bombear. Para isso basta dividir o volume de água por tempo.

Exemplo: Empreendimento do tipo "apartamento" com 600 moradores.

↳ Consumo diário = $200 \times 600 = 120.000 \text{ L}$

↳ Tempo de reposição = 3 horas

↳ Vazão mín. da bomba = $\frac{120.000}{3} = \underline{\underline{40.000 \text{ L/h}}}$

Para circulação/piscina

↳ 1º - Calcular o volume total da piscina.

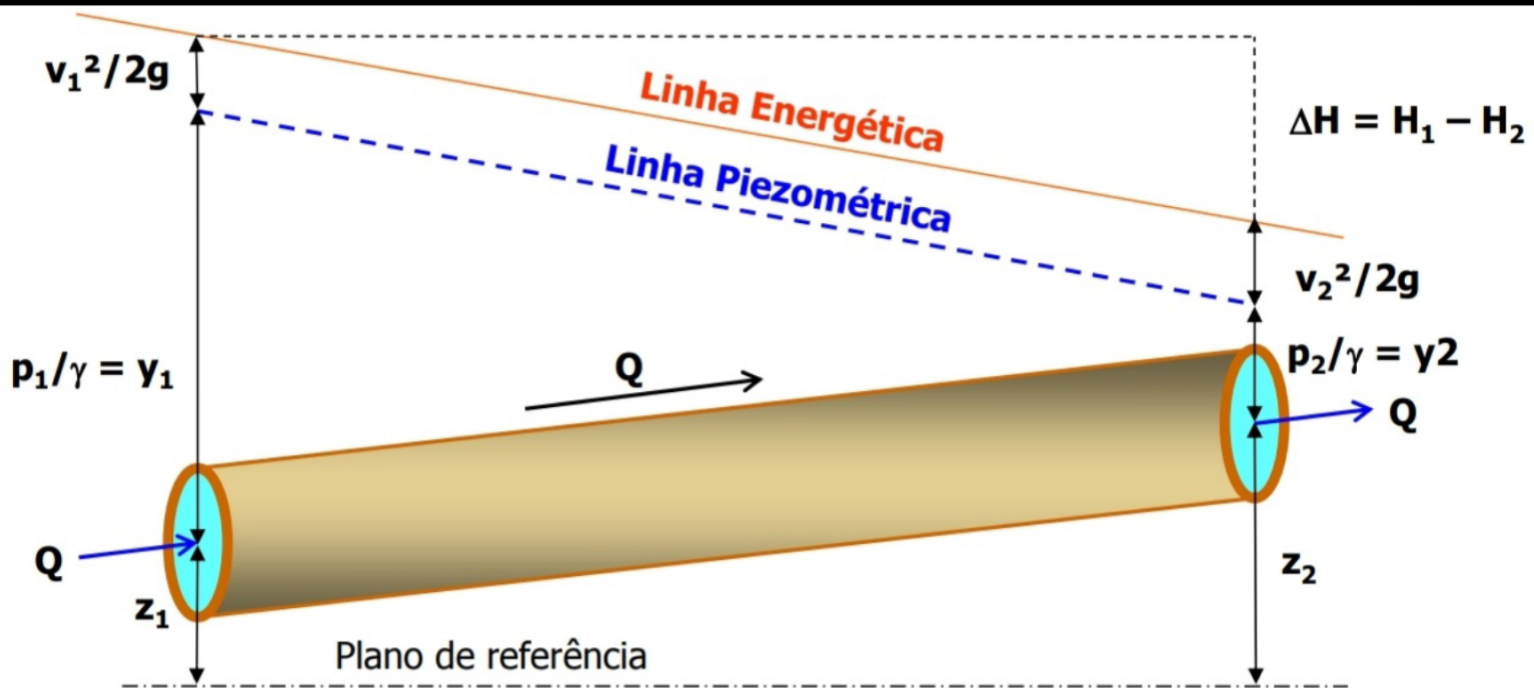
↳ 2º - Identificar o tempo máximo de filtração a partir da Tabela 4 da NBR 10339:2018

Tabela 4 – Tempo máximo de filtração (horas)			
Profundidade de água média m	Tipologia		Para piscinas com taxa de ocupação > 1 usuário para cada 2 m²/12 h de uso ^a h
	Residencial privativa h	Pública Coletiva Hospedaria <u>Residencial coletiva</u> h	
Até 0,60	4	2	2
<u>0,60 a 1,50</u>	8	<u>6</u>	4
> 1,50	8	8	6

^a Aplicável a todas as tipologias, exceto as residenciais privativas. Neste caso, utilizar taxa de renovação de no mínimo três vezes por dia.

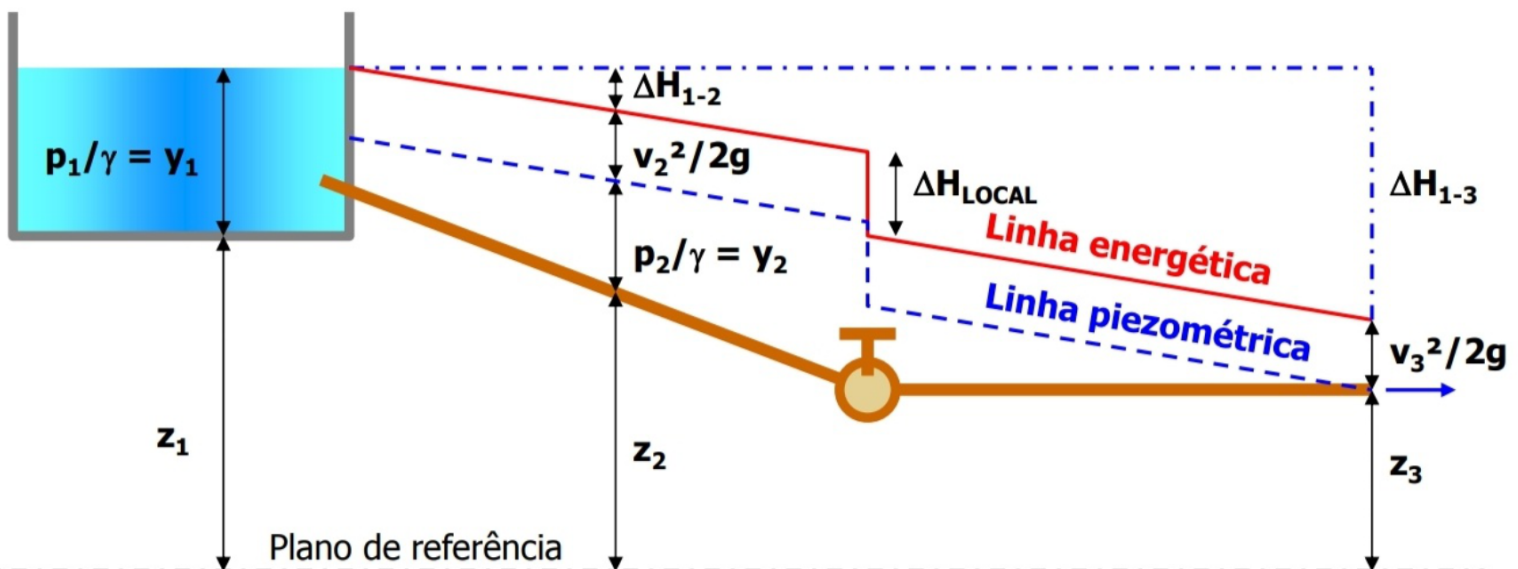
↳ 3º - Calcular →
$$\text{Vazão de projeto (m}^3\text{/h)} = \frac{\text{Volume da piscina (m}^3\text{)}}{\text{Tempo máx. de circulação (h)}}$$

Para o próximo passo vamos relembrar a Equação de Bernoulli



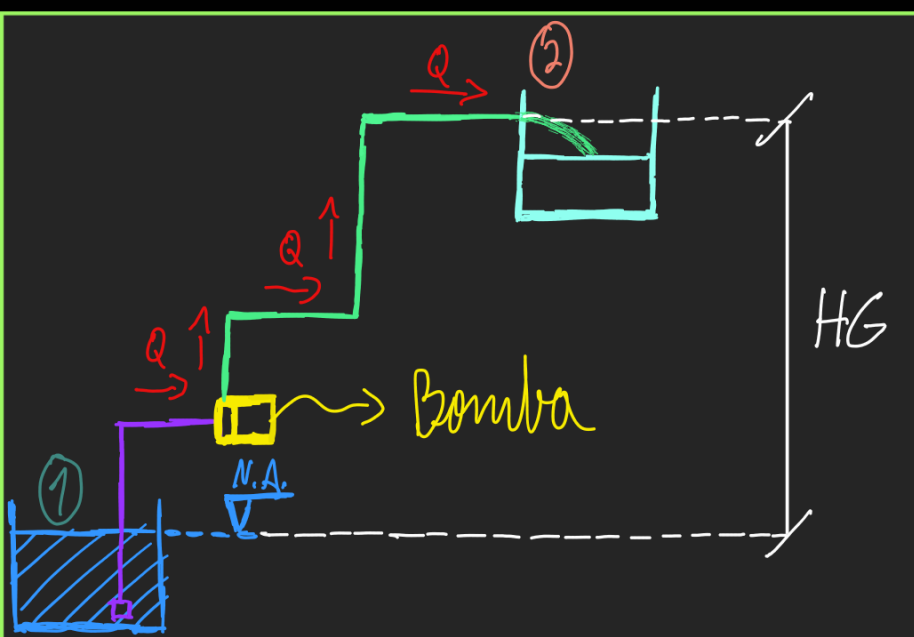
$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + \Delta H_{1-2}$$

p/γ = Energia interna ou de pressão;
 $v^2/2g$ = Energia cinética ou de velocidade;
 z = Energia potencial ou de cota.



3- Calcular a altura manométrica mínima a ser vencida pela bomba.

Altura manométrica (H_m) = Energia (pressão) fornecida pela bomba para transportar um fluido de um ponto a outro com determinada vazão.



O cálculo da H_m entre os pontos 1 e 2 é feito aplicando a Equação de Bernoulli considerando a energia fornecida pela bomba.

$$z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + H_m = z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + \Delta H_{1-2}$$

$$HG = (z_2 - z_1)$$

↳ Altura Geométrica

$$H_m = (z_2 - z_1) + \left(\frac{P_2}{\gamma} - \frac{P_1}{\gamma} \right) + \left(\frac{V_2^2}{2g} - \frac{V_1^2}{2g} \right) + \Delta H_{1-2}$$

$$V = \frac{Q}{A} \left. \vphantom{\frac{Q}{A}} \right\} \text{Equação de Continuidade}$$

$$H_m = HG + \left(\frac{P_2}{\gamma} - \frac{P_1}{\gamma} \right) + \left(\frac{1}{2g \cdot A_2^2} - \frac{1}{2g \cdot A_1^2} \right) \cdot Q^2 + \Delta H_{1-2}$$

Qual é a perda de carga (ΔH) no sistema?

A perda de carga (ΔH) é calculada pela fórmula universal (Darcy-Weisbach).

→ Fator de atrito

→ Vazão no tubo (m^3/s)

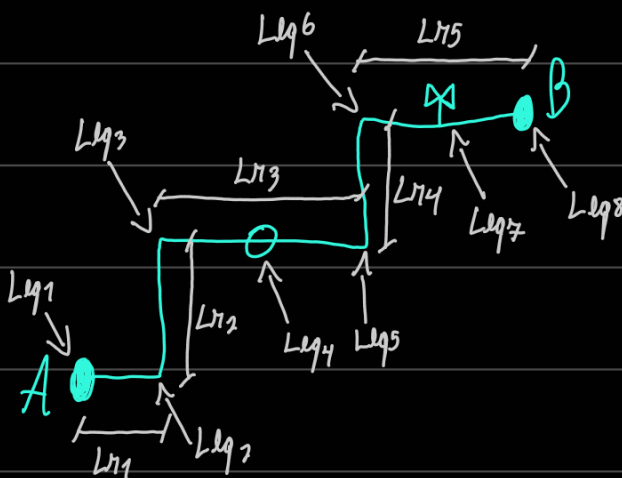
$$\Delta H = 0,0826 \times f \times \frac{Q^2}{D^5} \times L$$

→ Comprimento total do tubo (m)

→ Diâmetro interno dos tubos no tubo (m)

O comprimento total (L) é o comprimento real (Lr) do tubo considerado + o somatório dos comprimentos equivalentes (Lq) de todas singularidades presentes nesse tubo.

Exemplo:



$$L = (Lr1 + Lr2 + Lr3 + Lr4 + Lr5) + (Lq1 + Lq2 + Lq3 + Lq4 + Lq5 + Lq6 + Lq7 + Lq8)$$



→ Cálculo do fator de atrito (f)

Equação de Swamee

$$f = \left\{ \left(\frac{64}{Re} \right)^8 + 95 \left[\ln \left(\frac{\epsilon}{3,7 \cdot D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) - \left(\frac{2500}{Re} \right)^6 \right]^{\frac{16}{5}} \right\}^{0,125}$$

Equação de Haaland

$$f = \left(\frac{1}{-1,8 \log_{10} \left[\left(\frac{\epsilon}{3,7 \cdot D} \right)^{1,11} + \frac{6,9}{Re} \right]} \right)^2$$

Válidos para fluxo de transição e turbulento.

Regime de fluxo

→ Laminar: $Re < 2000$

→ Transição: $2000 \leq Re < 4000$

→ Turbulento: $Re \geq 4000$

Dados:

ϵ = Rugosidade absoluta do (m)

D = Diâmetro interno do tubo (m)

Re = Número de Reynolds

↓
 $Re = \frac{V \cdot D}{\nu}$ → Velocidade do fluido (m/s)

→ Viscosidade cinemática do fluido (m^2/s)

Equação da continuidade

$V_{el} = \frac{Q}{A}$ → Vazão no tubo (m^3/s)

A → Área da seção transversal do tubo (m^2)

Para água

Para tubos circulares

$$Re = \frac{\left[\frac{Q}{\left(\frac{\pi \cdot D^2}{4} \right)} \right] \cdot D}{\nu}$$

TEMPERATURA °C	VISCOSIDADE CINEMÁTICA ν m^2/s
0	$1,785 \times 10^{-6}$
5	$1,519 \times 10^{-6}$
10	$1,306 \times 10^{-6}$
15	$1,139 \times 10^{-6}$
20	$1,003 \times 10^{-6}$
25	$0,893 \times 10^{-6}$
30	$0,800 \times 10^{-6}$
40	$0,658 \times 10^{-6}$
50	$0,553 \times 10^{-6}$
60	$0,474 \times 10^{-6}$
70	$0,413 \times 10^{-6}$
80	$0,364 \times 10^{-6}$
90	$0,326 \times 10^{-6}$
100	$0,294 \times 10^{-6}$

Material	ϵ (mm) Rugosidade absoluta equivalente
Ferro fundido oxidado	1 a 1,5
Cimento amianto novo	0,025
Concreto centrifugado novo	0,16
Concreto armado liso, vários anos de uso	0,20 a 0,30
Concreto com acabamento normal	1 a 3
Concreto protendido Freyssinet	0,04
Cobre, latão, aço revestido de epoxi, PVC, plásticos em geral, tubos extrudados	0,0015 a 0,010

4- Escolha da bomba que atenda a Q e H_m

Para escolha da bomba, analise os catálogos de seleção de bombas dos fabricantes.

Exemplo: Escolha uma bomba $\rightarrow Q=40 \text{ m}^3/\text{h}$; $H_m=59 \text{ m}$

Seleção por tabela de dados de $Q \times H_m$

Modelo	Potência (cv)	Características Hidráulicas																							
		Altura Manométrica Total (m.c.a.)																							
		20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48	50	52	56	60	64	68	72	76	80
		Vazão em m³/h válida para sucção de 0 m.c.a.																							
BC-22 R 1 A	3	10,2	9,7	9,2	8,7	8,1	7,5	6,8	6,1	5,2															
	4	*	*	10,7	10,3	9,9	9,4	8,9	8,4	7,9	7,3	6,7	6	5,2	4,3										
	5	*	*	*	11,1	10,8	10,4	10,1	9,7	9,4	9	8,6	8,2	7,7	7,2	6,7	6,1	5,5							
BC-22 R 1 B	3	14,5	13,8	13,1	12,2	11,3	10,2																		
	4	*	*	15,7	15,1	14,5	13,8	13	12,2	11,2	10,1	8,4													
	5	*	*	*	16,6	16,3	15,9	15,5	15,1	14,6	14,1	13,5	12,8	11,9	11	9,7	7,5								
	7,5	*	*	*	*	*	17,2	17	16,7	16,4	16,1	15,8	15,5	15,2	14,8	14,5	14,1	13,6	12,7	11,4	9,4				
BC-22 R 11/4	5	*	*	*	*	*	*	*	19,9	19,1	18,3	17,3	16,2	14,9	12										
	7,5	*	*	*	*	*	*	*	*	*	20	19,6	19,2	18,7	18,2	17,7	17,2	16,5	15	11,9	15,8	14,3			
	10	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	20	19,6	19,2	18,8	18	17					
BC-22 R 11/2	7,5	*	*	*	*	*	*	*	*	39,7	36,2	32,2	27,1	19											
	10	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	44,8	41,2	37,1	32,2	25,6							
	12,5	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	49,1	45,3	41,3	31,8						
	15	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	51	43,9	34,5				
	20	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*				
BC-22 R/F 2	10	*	*	*	*	*	*	*	*	53,3	45,5	36,8	27												
	12,5	*	*	*	*	*	*	*	*	71	65,2	58,8	51,8	43,7	33										
	15	*	*	*	*	*	*	*	*	*	83,9	78,5	72,8	66											
	20	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	88,5	83,1	77,3	71,2	57,6	41,2					
	25	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	92	81,8	70,3	56,7	39		

Valor acima e próximo

Valor abaixo

Valor muito mais alto

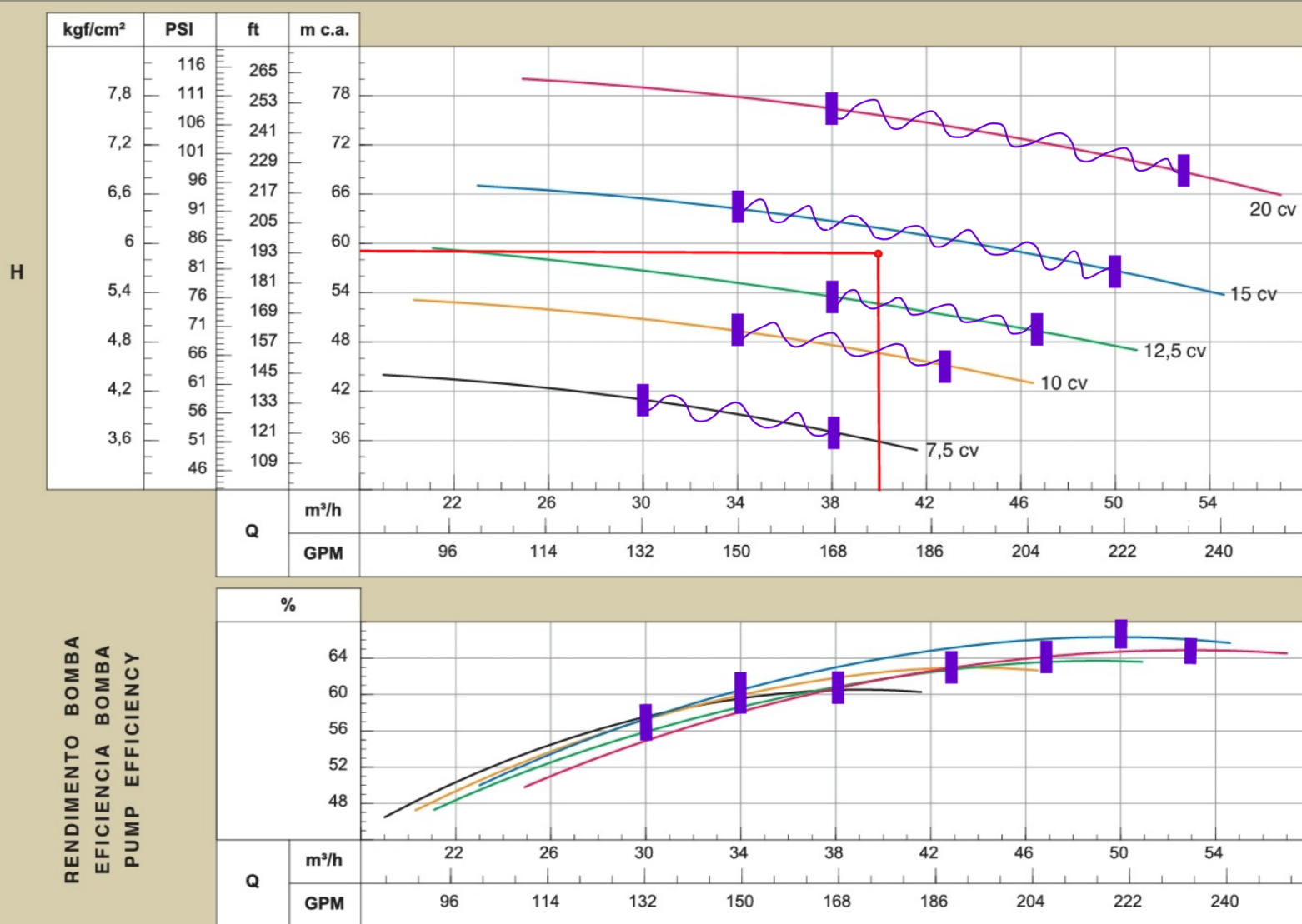
Próximo do fim

Valor acima e próximo

!

Solução por curvas características

SCHNEIDER MOTOBOMBAS	MODELO	BC-22 R 1 1/2	71328	sch NAC			
	MODEL			60 Hz II polos/poles			
Sucção / Succión / Suction	2"	Potência / Potencia / Power [kW(cv)]	5,5 (7,5)	7,5 (10)	9,2 (12,5)	11 (15)	15 (20)
Recalque / Descarga / Discharge	1 1/2"	Rotor / Impulsor / Impeller [mm]	156	167	175	186	201



Bomba Molhada → BC-22 R 1 1/2-15 CV

Potência (cv)	Monofásico	Trifásico	Ø Sucção (pol)	Ø Recalque (pol)	Pressão máxima sem vazão (m.c.a.)	Altura máxima de sucção (m.c.a.)	Ø Rotor (mm)
15	x	x	2	1 1/2	68	8	186



Atenção! O dimensionamento não acaba aqui!

É necessário analisar o Ponto de Trabalho da bomba molhada instalada no sistema.

↳ Com isto iremos avaliar:

- * Vazão real de trabalho
- * Hm real de trabalho
- * NPSH Requerido da bomba
- * Rendimento da bomba
- * Potência de trabalho da bomba

Ponto de Trabalho

Ponto de Trabalho é também chamado de Ponto de operação.

5- Encontrar o Ponto de Trabalho/Operação da Bomba

Passo a passo para encontrar o Ponto de Trabalho

→ 1º- Definir a Equação Característica do Sistema em função da vazão

$$H_m = HG + \left(\frac{P_2}{\gamma} - \frac{P_1}{\gamma} \right) + \left(\frac{1}{2g \cdot A_2^2} - \frac{1}{2g \cdot A_1^2} \right) \cdot Q^2 + \Delta H_{1-2}$$

$$\Delta H = 0,0826 \times f \times \frac{Q^2}{D^5} \times L$$

$$\frac{P_2}{\gamma} - \frac{P_1}{\gamma} \quad \frac{1}{2g \cdot A_2^2} - \frac{1}{2g \cdot A_1^2} \quad \frac{0,0826 \times L}{D^5}$$

ΔE_p = Diferença de pressão C_c = Constante Cínica C_H = Constante de perda

∴ Equação Característica do Sistema

$$H_m = HG + \Delta E_p + (C_c + C_H \cdot f) \cdot Q^2$$

→ 2º - Definir a equação da bomba em função da vazão.

Normalmente os fabricantes não fornecem as equações de bombas, apenas as curvas e/ou tabelas.

Então, como encontrar uma equação a partir dos dados de tabelas e curvas de fabricantes?

Resposta: Fazendo Regressão Polinomial!

Entenda:

É possível representar toda curva ou sequência de pontos (x, y) por uma expressão algébrica (equação linear ou não-linear).

Para fazer uma regressão polinomial, precisamos de uma sequência de pontos com coordenadas x e y .

↳ Para encontrar a equação de uma bomba, devemos considerar:

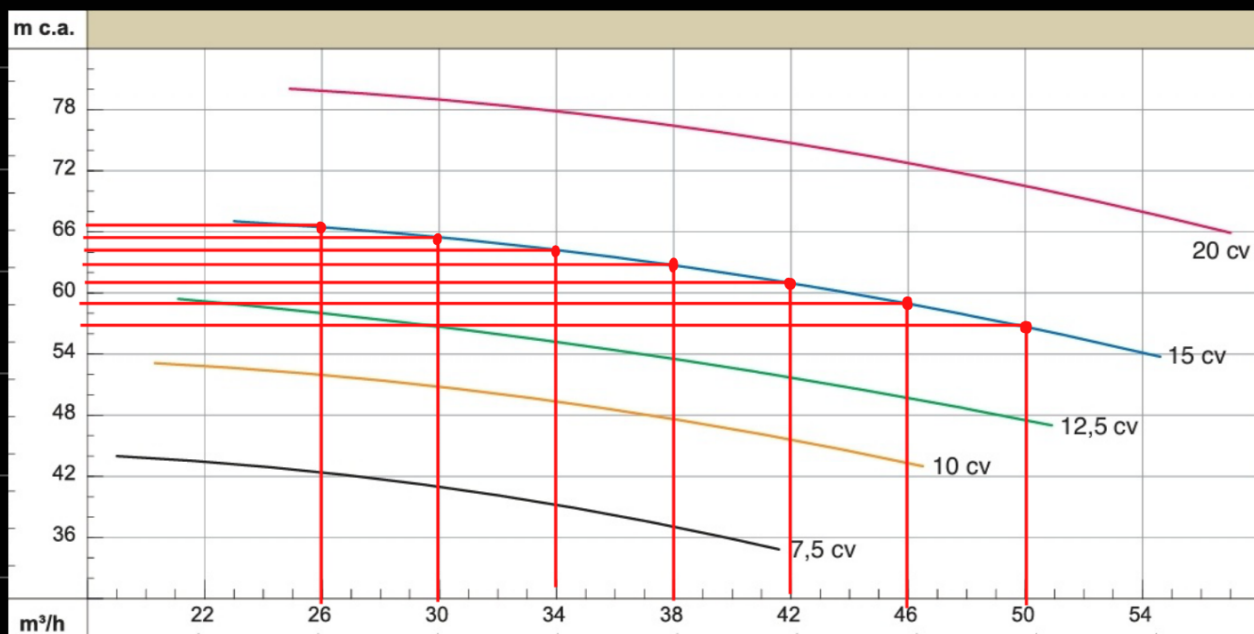
$H_m \rightarrow$ Eixo das ordenadas (valores de y)

$Q \rightarrow$ Eixo das abscissas (valores de x)

Se o fabricante fornecer apenas as curvas?

↳ Extrair pontos (x, y) manualmente

Exemplo: Para a curva "15 cv"



Pontos: $(26; 66,4) - (30; 65,6) - (34; 64,1) - (38; 62,5) - (42; 61) - (46; 59) - (50; 56,7)$

É recomendado considerar a equação de uma bomba como um polinômio de, pelo menos, 3º grau.

Regressão Polinomial para encontrar as constantes de um polinômio de 3º grau:

$$H_{tm} = a \cdot Q^3 + b \cdot Q^2 + c \cdot Q + d$$
$$P_3(x) = a \cdot x^3 + b \cdot x^2 + c \cdot x + d$$

Constantes $\rightarrow [a, b, c, d]$

Na equação da bomba, temos:

H_{tm} = Variável de Resultado

Q = Variável preditora

d = Constante do intercepto

c = Constante de 1º grau

b = Constante de 2º grau

a = Constante de 3º grau

Para encontrar as constantes, basta resolver a seguinte matriz:

$$\begin{bmatrix} N & \sum x & \sum x^2 & \sum x^3 \\ \sum x & \sum x^2 & \sum x^3 & \sum x^4 \\ \sum x^2 & \sum x^3 & \sum x^4 & \sum x^5 \\ \sum x^3 & \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d \\ c \\ b \\ a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum y \\ \sum xy \\ \sum x^2y \\ \sum x^3y \end{bmatrix}$$

N = número de pontos

→ Para resolver → Método de Gauss

→ É muita conta para fazer na mão!

Olha que beleza! O Excel faz toda essa conta rapidinho com um comando.

→ PROV. LIN

→ 3º - Igualar a equação de sistema com a equação da bomba

Sistema $\rightarrow H_m = H_G + \Delta E_P + (\Delta E_C + C.f).Q^2$
Bomba $\rightarrow H_m = a.Q^3 + b.Q^2 + c.Q + d$

Eq. da bomba = Eq. do sistema

$$a.Q^3 + b.Q^2 + c.Q + d = H_G + \Delta E_P + (\Delta E_C + C.f).Q^2$$

$$a.Q^3 + (b - \Delta E_C - C.f).Q^2 + c.Q + (d - H_G - \Delta E_P) = 0$$

$\rightarrow 1^\circ$ - Encontrar o valor de Q

2° - Encontrar o valor de H_m

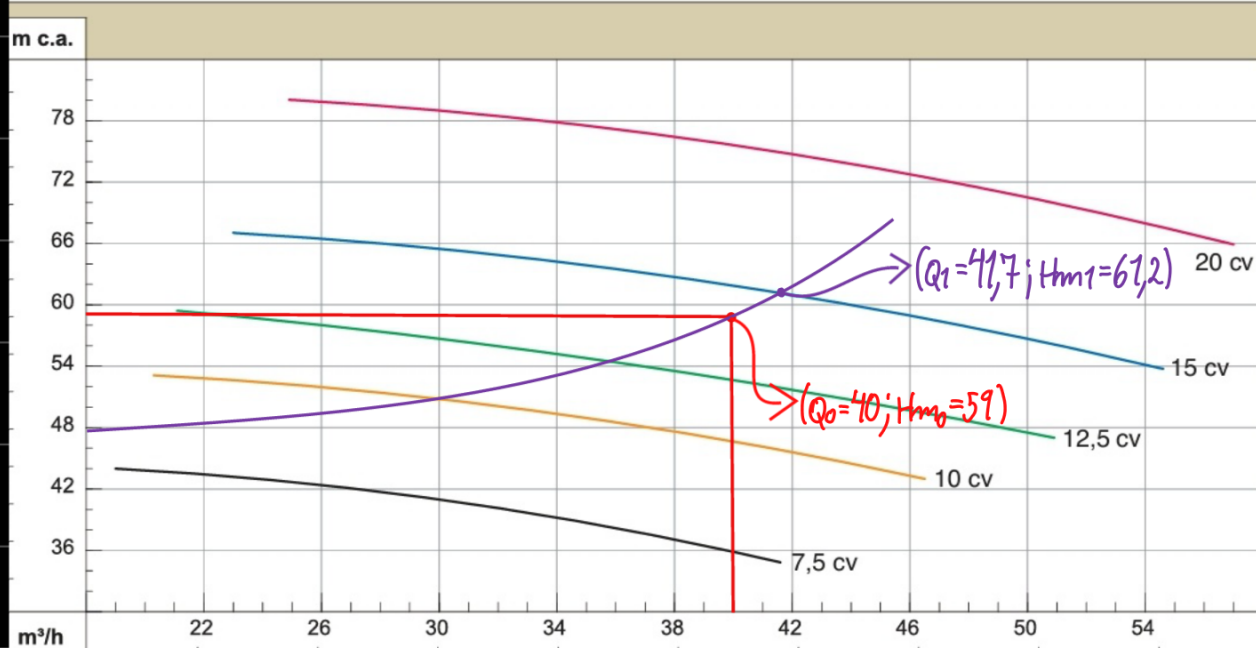
3° - (Q_1, H_{m1}) = Ponto de Operação

O Ponto de Operação encontrado nessa etapa ainda não é o definitivo!

Exemplo: A vazão inicial (Q_0) e altura manométrica inicial (H_{m0}) que iniciamos os cálculos eram iguais a, respectivamente, $31 \text{ m}^3/\text{h}$ e $61,5 \text{ m}$.

Quando encontramos a vazão (Q_1) no ponto de operação da bomba, o seu valor não é mais igual ao inicial.

MODELO	BC-22 R 1 1/2		71328		sch NAC	
MODEL					60 Hz II polos/poles	
2"	Potência / Potencia / Power [kW(cv)]	5,5 (7,5)	7,5 (10)	9,2 (12,5)	11 (15)	15 (20)
1 1/2"	Rotor / Impulsor / Impeller [mm]	156	167	175	186	201



Lembra que o fator de atrito (f) da equação foi calculado considerando a Q_0 ?

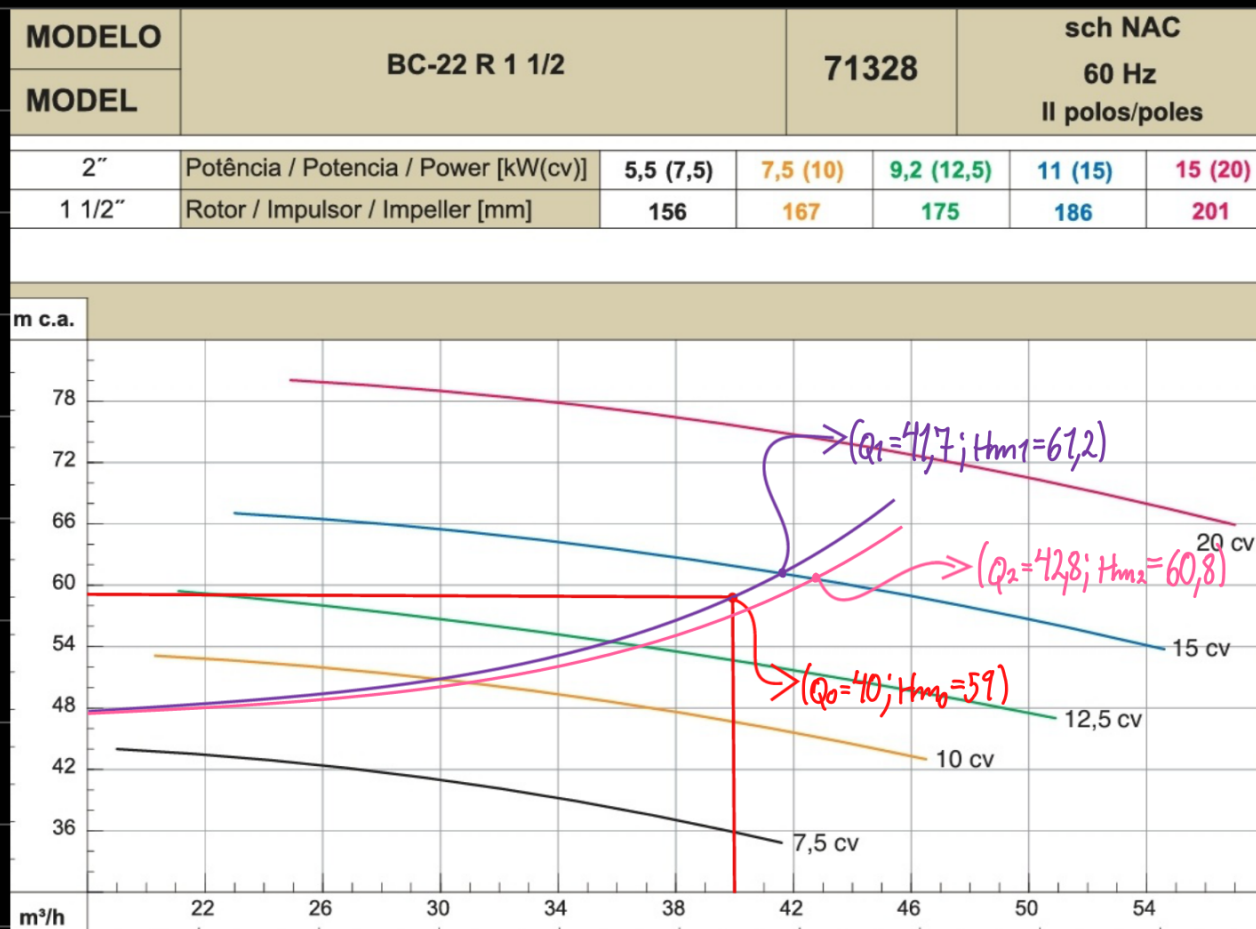
→ Com a vazão agora de 41.7 m³/h (Q_1) o valor de f vai mudar!

→ 4º - Ajustar o ponto de operação

É necessário recalcular a curva do sistema considerando o novo valor de f com a vazão Q_1 .

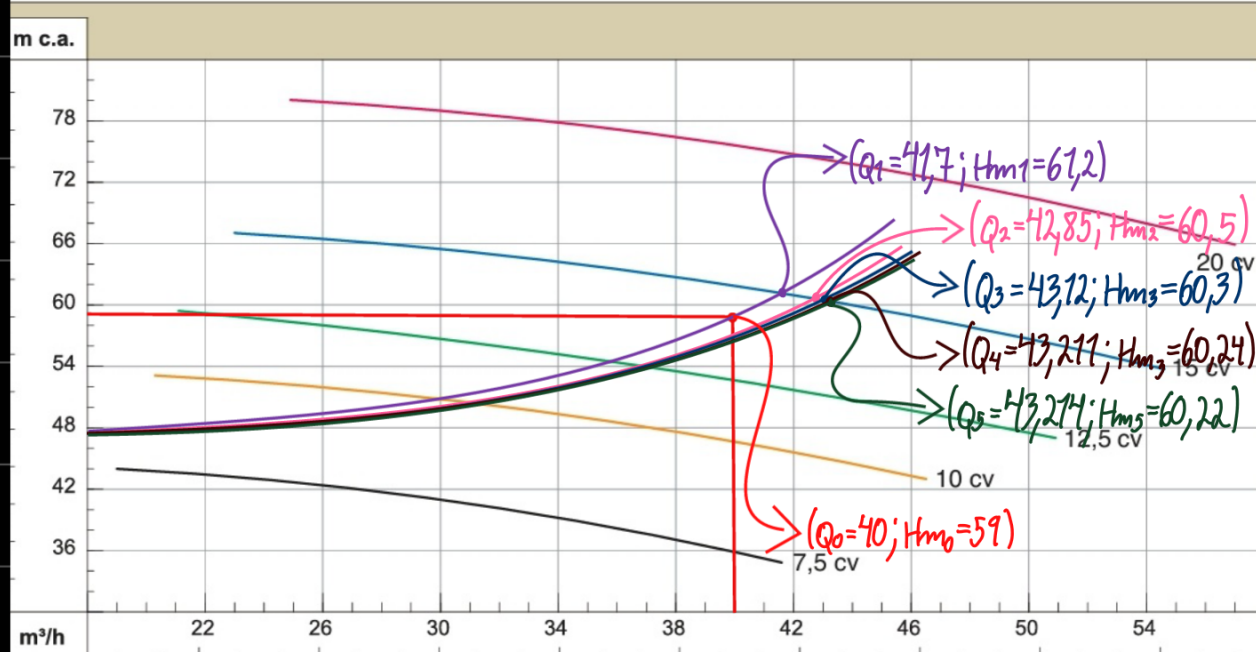
→ Mas é a 1ª iteração!

→ Será encontrado um novo ponto de operação!



Recomenda-se fazer n iterações até a diferença entre Q_n e Q_{n+1} ser praticamente igual a 0.

MODELO	BC-22 R 1 1/2		71328		sch NAC	
MODEL					60 Hz	
					II polos/poles	
2"	Potência / Potencia / Power [kW(cv)]	5,5 (7,5)	7,5 (10)	9,2 (12,5)	11 (15)	15 (20)
1 1/2"	Rotor / Impulsor / Impeller [mm]	156	167	175	186	201



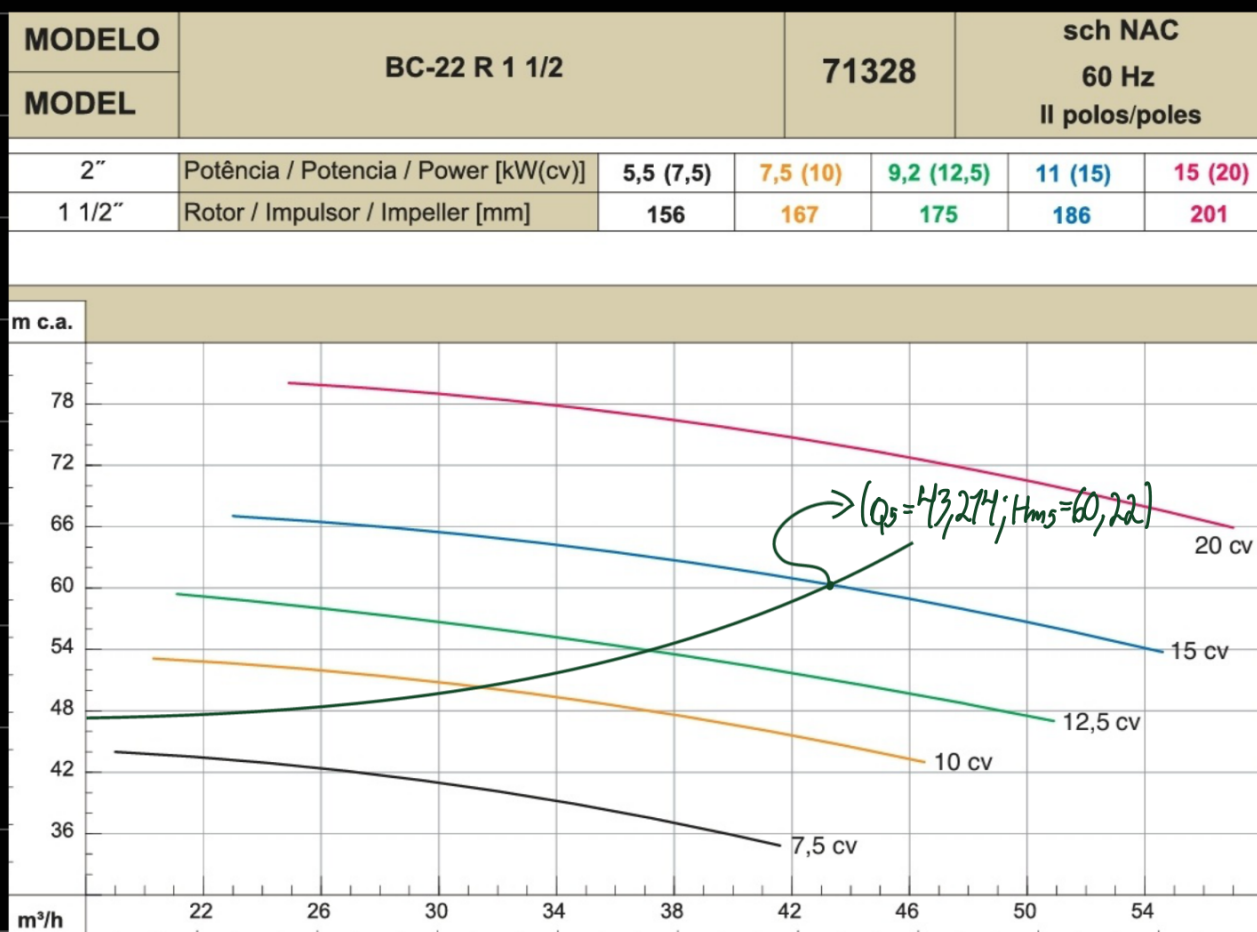
Com isso temos o Ponto de Operação definitivo!

$$PO = (Q_5 = 43,214 \text{ m}^3/\text{h}; H_{m5} = 60,22 \text{ m})$$

→ Essa é finalmente a condição real de trabalho do sistema e da bomba.

→ 5º - Definir os dados de trabalho reais da bomba - Vazão, Altura manométrica, NPSH requerido, Rendimento e Potência.

Vazão e Altura Manométrica: Foram definidos no passo anterior.



NPSH requerido e Rendimento: Assim como a curva de $Q \times H_m$, é fornecido também pelo fabricante as curvas de $Q \times \text{NPSH requerido}$ e $Q \times \text{Rendimento}$.

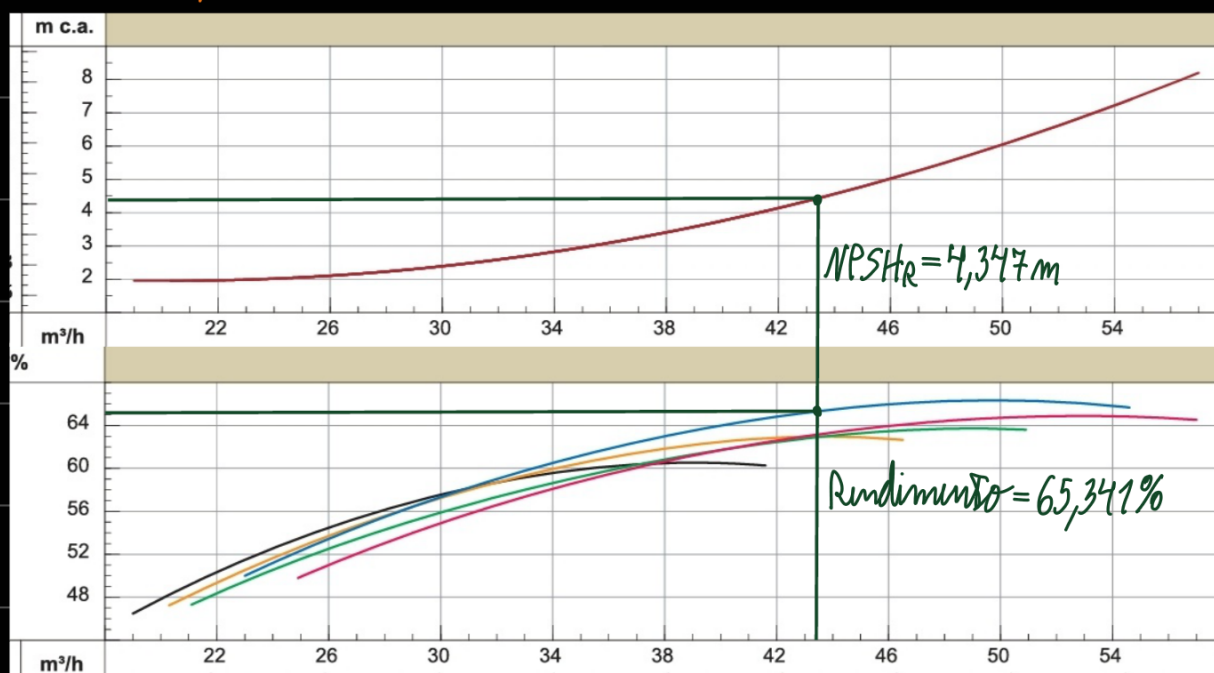
Para encontrar os valores de trabalho do NPSH requerido e Rendimento:

1º - Definir as equações das curvas de $Q \times \text{NPSH}_{\text{requerido}}$ e $Q \times \text{Rendimento}$. Seguir passo do 2º item deste tópico (5).

2º - Jogar o valor da vazão de trabalho (Q) encontrado nessas duas equações.

$$\text{NPSH}_{\text{requerido}} = a_N \cdot Q^3 + b_N \cdot Q^2 + c_N \cdot Q + d_N$$
$$\text{Rendimento} = a_R \cdot Q^3 + b_R \cdot Q^2 + c_R \cdot Q + d_R$$

Pode-se também traçar uma reta partindo da vazão de trabalho e encontrar os pontos de interseção nas curvas de NPSH_r e Rendimento.



Potência: A potência de Trabalho da bomba é encontrada a partir da seguinte equação:

$$P = \frac{\gamma \times Q \times H_m}{270 \times \eta}$$

→ Peso específico do fluido (kgf/dm^3)
→ Vazão de Trabalho (m^3/h)
→ Altura Manométrica (m)
→ Rendimento (%)

Com os dados do exemplo, temos:

$$P = \frac{100 \times 43,214 \times 60,22}{270 \times 65,341} = 14,72 \text{ CV}$$

Dados finais de trabalho da bomba:

$$\begin{aligned} \text{Vazão} &= 43,214 \text{ m}^3/\text{h} \\ H_m &= 60,22 \text{ m} \\ \text{NPSH}_R &= 4,347 \text{ m} \\ \text{Rendimento} &= 65,341\% \\ \text{Potência} &= 14,72 \text{ CV} \end{aligned}$$

6- Calcular o NPSH disponível no sistema

Fator de segurança

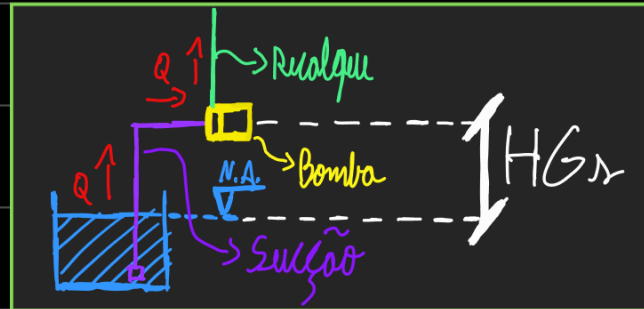
$$NPSH_d = [P_{atm} - (HG_s + P_v + \Delta H_s)] \times 0,8$$

Altitude do local em relação ao nível do mar (m)

P_{atm} = Pressão atmosférica (m)
 ↳ Varia com a altitude do local

$$P_{atm} = 13,6 \times \left(760 - \frac{0,081 \times Z}{1000} \right)$$

HG_s = Altura geométrica da sucção (m) → Diferença entre o nível da bomba e o N.A. mín do RT



P_v = Pressão do vapor d'água (m) → Varia com a temperatura

T (°C)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
p_v/γ (m)	0,09	0,13	0,17	0,24	0,32	0,43	0,57	0,75	0,98	1,25
T (°C)	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
p_v/γ (m)	1,61	2,03	2,56	3,20	3,96	4,86	5,93	7,18	8,62	10,33

ΔH_s = Perda de carga no trecho de sucção (m)

Para que não ocorra cavitação na bomba:

$$NPSH_d > NPSH_m$$