

DIMENSIONAMENTO HIDRÁULICO DE INSTALAÇÕES DE BOMBEAMENTO COM ÊNFASE EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA ATRAVÉS DE INVERSOR DE FREQUÊNCIA.

Pedro Alves Silva – SABESP MLI, UNINOVE, FAAP.
Francis Valter Pêpe França – UFRBA;
Gilmar da Silva – UNINOVE.



Objetivo

O objetivo deste estudo é o dimensionamento de bombas antes de consultar o catálogos de fabricantes, com base nas formulações teóricas obtidas pelo Teorema de Buckingham determinar para a vazão de projeto “ $Q(\text{m}^3/\text{s})$ e Carga “AMT(m)”:

qDiâmetro do rotor “ $D(\text{mm})$ ”;

qNPSHr - Net Positive Suction Head required;

qA altura de sucção positiva ou negativa;

qAs famílias de bombas: Radial, Francis, Semi axial e Axial;

qTipo de rotor: simples, duplo ou múltiplo;

qRendimento máximo correspondente “ $\eta_{\text{máx}} (\%)$ ”.

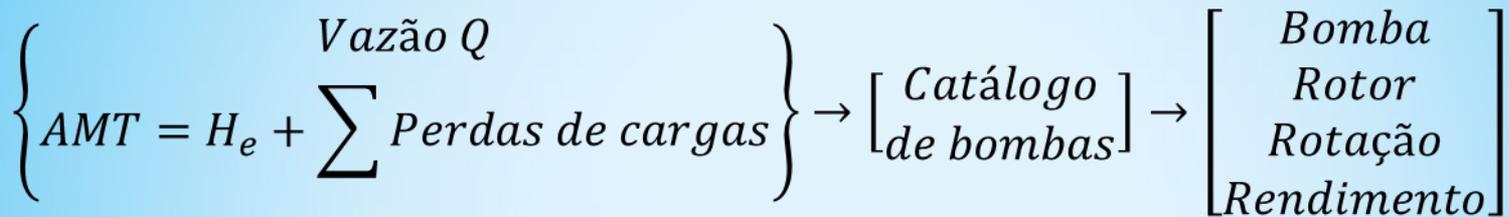
de tal forma que se possa escolher entre vários catálogos de fabricantes, a bomba que melhor atenda a especificação proposta com máximo rendimento.



MÉTODO

Dimensionamento de Estações elevatórias e Boosteres (ESPECIFICAÇÃO DA BOMBA)

q Procedimento comum



q Procedimento proposto

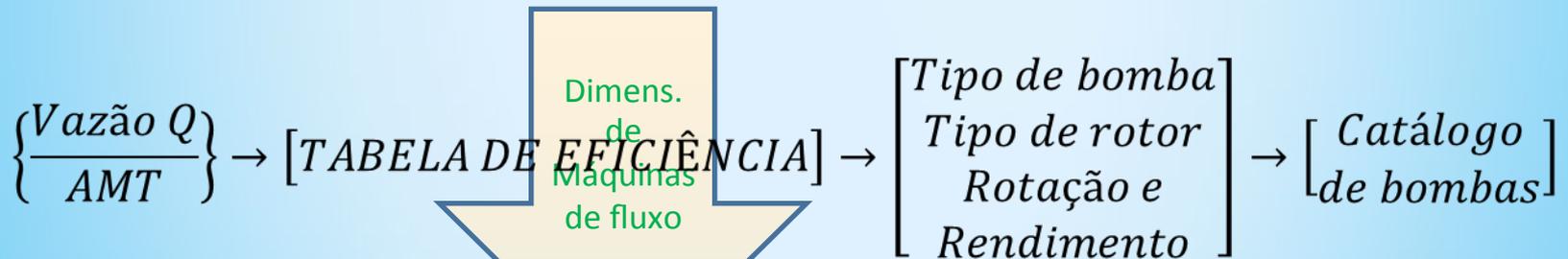


TABELA DE EFICIÊNCIA

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
No(rpm)	Wo(rad/s)	CN	CD	Drot. (m)	Ns	σ_{Thoma}	NPSH	hs(m)	Nq	$\eta_b\%$	Tipo	Obs.
3500	366,508	1,482	2,21	0,165	286,303	0,3693	12,927	3,50	78,44	80	Francis	hs<0 bomba afogada
1750	183,254	0,741	3,81	0,285	143,152	0,1466	5,130	-4,30	39,22	83	Francis	
1160	121,471	0,491	5,27	0,395	94,889	0,0847	2,965	-6,46	26,00	80	Radial	
880	92,151	0,373	6,55	0,491	71,985	0,0586	2,051	-7,38	19,72	70	Radial	

MÉTODO

Dimensionamento de Estações elevatórias e Boosteres (PREPARAÇÃO DA TABELA)

TABELA DE EFICIÊNCIA

I. Rotação n(rpm)	II. Veloc. Esp. CN.	III. Diâm. do rotor Dr(m)	IV. Veloc. esp. Unit. Ns(rpm)	V. Veloc.esp. Nq(rpm)	VI. Fator de cavitação	VII. NPSHr	VIII. Rend.	IX. Altura de sucção h(m)	X. Tipo de Bomba	XI. OBS.
3500										hs<0 afogada.
1750										
1160										
880										

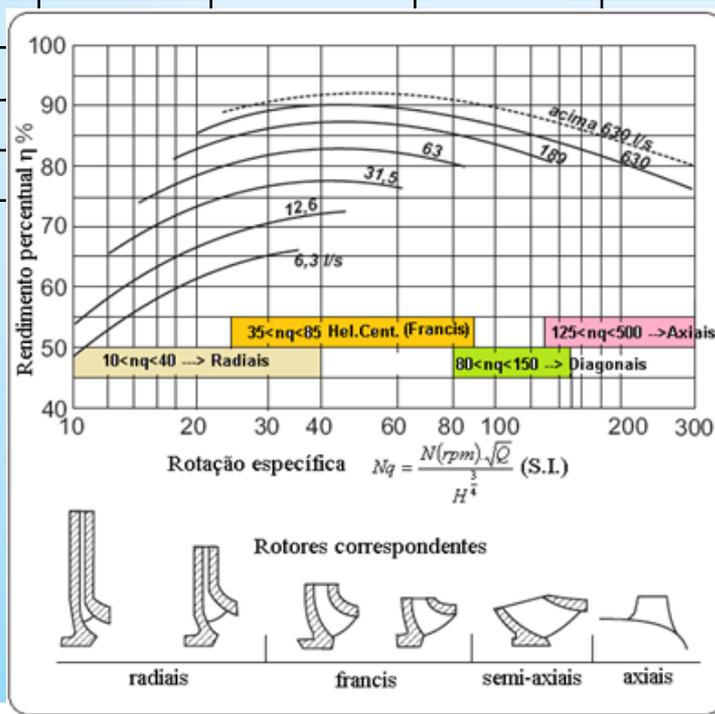


FIGURA 6





MÉTODO

TABELA DE EFICIÊNCIA

Dimensionamento de Estações elevatórias e Boosteres (CÁLCULOS DA TABELA)

I. Rotação em RPM;

II. Velocidade específica em radiano/segundo: $CN = \frac{N_0 \frac{\pi}{30} (rad / s) \sqrt{Q_0}}{(gH_0)^{\frac{3}{4}}} (rad / s)$

III. Diâmetro do rotor: $= 3,0078 \frac{Q_0}{(CN)^4}^{-0,7879} (. .);$

IV. Velocidade específica unitária: $= 3,65 \frac{Q_0}{CN^4} (.);$

V. Velocidade específica normal: $= \frac{Q_0}{CN^4} (.);$

VI. Fator de cavitação de Thoma: $= \frac{H_0}{CN^4} (.);$

VII. “Net Positive Suction Head”: $= . (.);$

VIII. Rendimento com base na Figura 6, entrada com vazão e a velocidade específica norma Nq.

IX. Altura mínima de secção: $hs = H_{atm} - NPSHd - \Delta H_{suc} - H_{Vapor} ;$

X. O tipo de bomba poderá ser obtido pela faixa de rotação específica obtida e o tipo de rotor correspondente, conforme a indicação da Figura 6, sendo que para o rotor de dupla sucção, deve-se dividir a vazão por dois rotores.





MÉTODO

Dimensionamento hidráulico do Inversor de frequência

Com

Q=104 l/s

AMT=35 m

TABELA DE EFICIÊNCIA

[PELA TABELA OBTEVE – SE:] →

[Tipo de bomba
Tipo de rotor
Rotação e
Rendimento]

→ [Com estas informações
pede – se escolher o
Catálogo de fabricante
que melhor atende às
especificações da Tabela.]

KDS RDL 150 – 280 A 1750

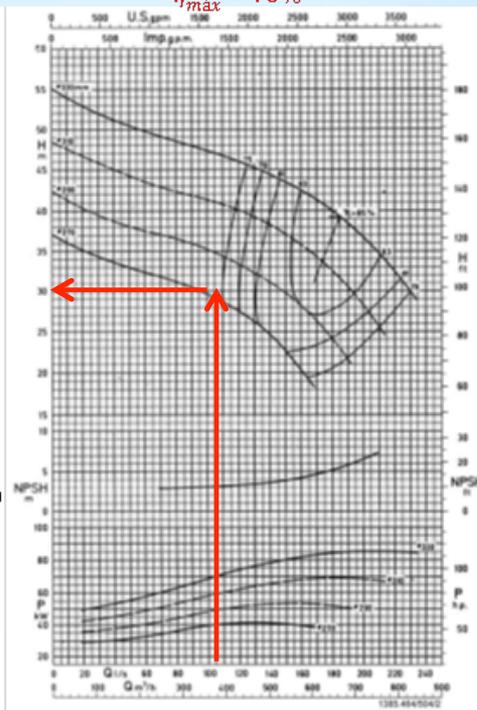
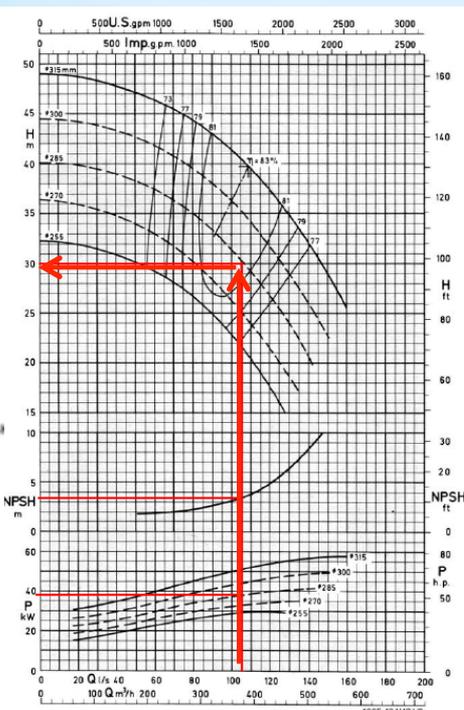
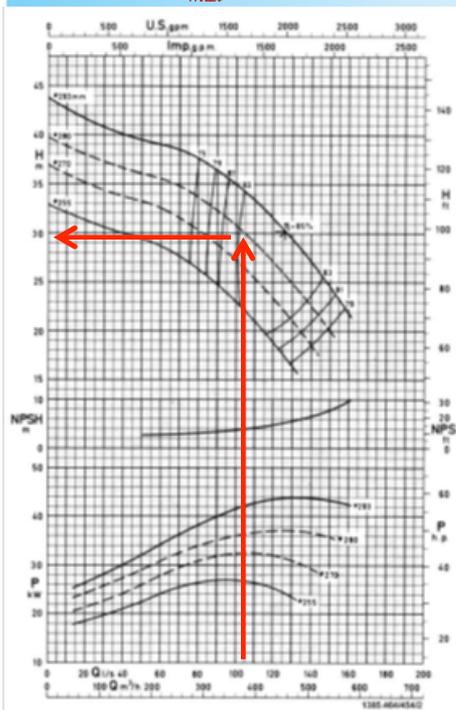
$\eta_{m\acute{a}x} = 83\%$

KDS RDL 150 – 340 B 1750

$\eta_{m\acute{a}x} = 81\%$

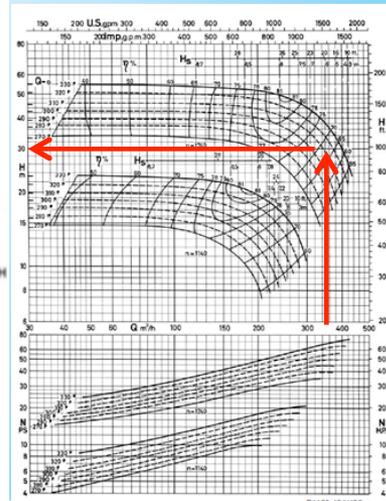
KDS RDL 200 – 340 B 1750

$\eta_{m\acute{a}x} = 75\%$



KDS ETA 125-33 1740

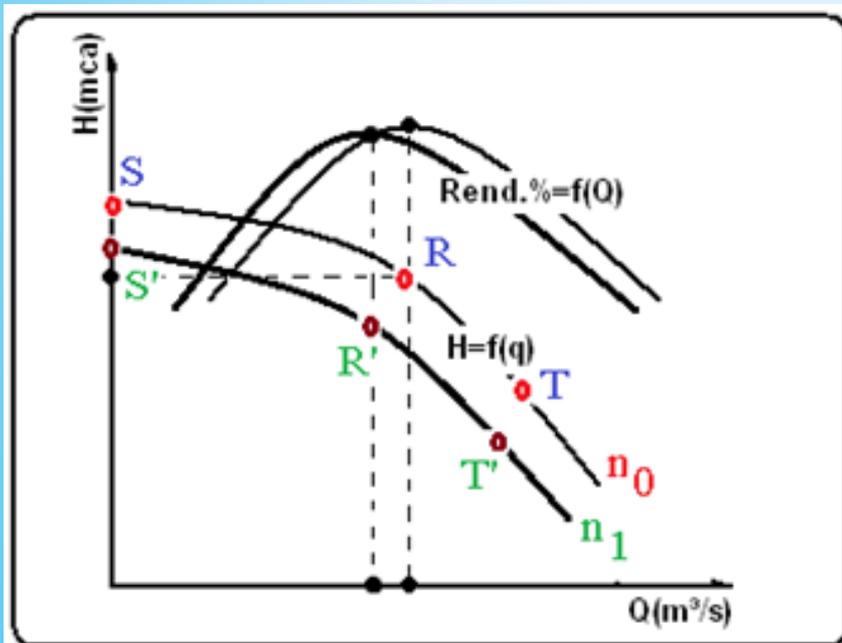
$\eta_{m\acute{a}x} = 68\%$



Inversor de frequência

O inversor de frequência é uma solução eficiente para resolver os problemas de variação de pressão e consumo energético.

Com a altura manométrica **AMT** e a vazão de projeto **Q**, pode-se montar a Tabela de eficiência e especificar a bomba de melhor rendimento, escolhe-se o catálogo que atenda às especificações da Tabela. Tomando-se três pontos da curva do rotor escolhido, determina-se a **Equação do rotor**. A Figura mostra os pontos R, S, T da curva do rotor na rotação nominal n_0 e a sua equação.



$$\text{Do catálogo} \rightarrow \begin{cases} S(Q_s; H_s) \\ R(Q_r; H_r) \\ T(Q_t; H_t) \end{cases}$$

$$A = H_s$$

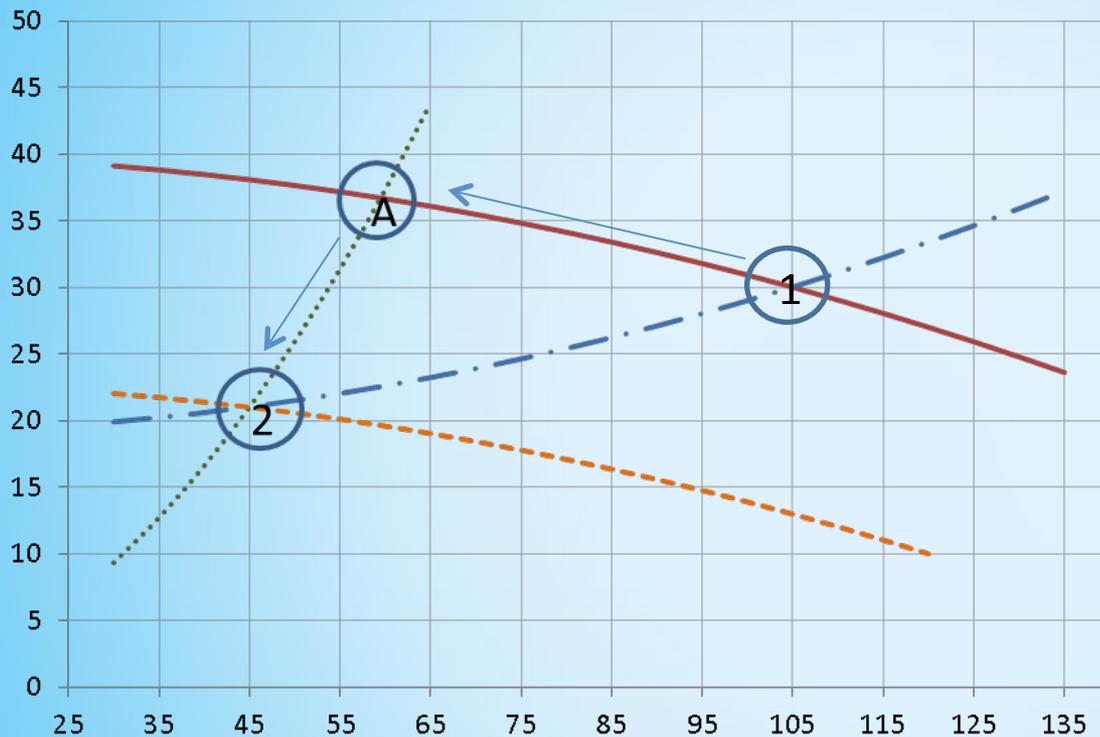
$$B = \frac{(H_s - H_r) \cdot Q_t^2 - (H_s - H_t) \cdot Q_r^2}{Q_t \cdot Q_r^2 - Q_r \cdot Q_t^2};$$

$$C = \frac{(H_s - H_t) \cdot Q_r - (H_s - H_r) \cdot Q_t}{Q_r \cdot Q_t^2 - Q_t \cdot Q_r^2}$$

$$H_0 = A + B \cdot Q - C \cdot Q^2 \quad \text{Equação do rotor}$$

MÉTODO

EEAT: Conjuntos motor – bomba



- H(rotor 285 mm a 1750 rpm, Carga máx 105 l/s.)
- · - Curva do sistema
- H'(Curva dos vértices de rendimento semelhante a 105 l/s)
- - - H(rotor 285 mm a 1324 rpm - inversor, Q = 45 l/s)

SISTEMA_Demanda

CARMO _ Vazão (l/s) - 14/03/2013



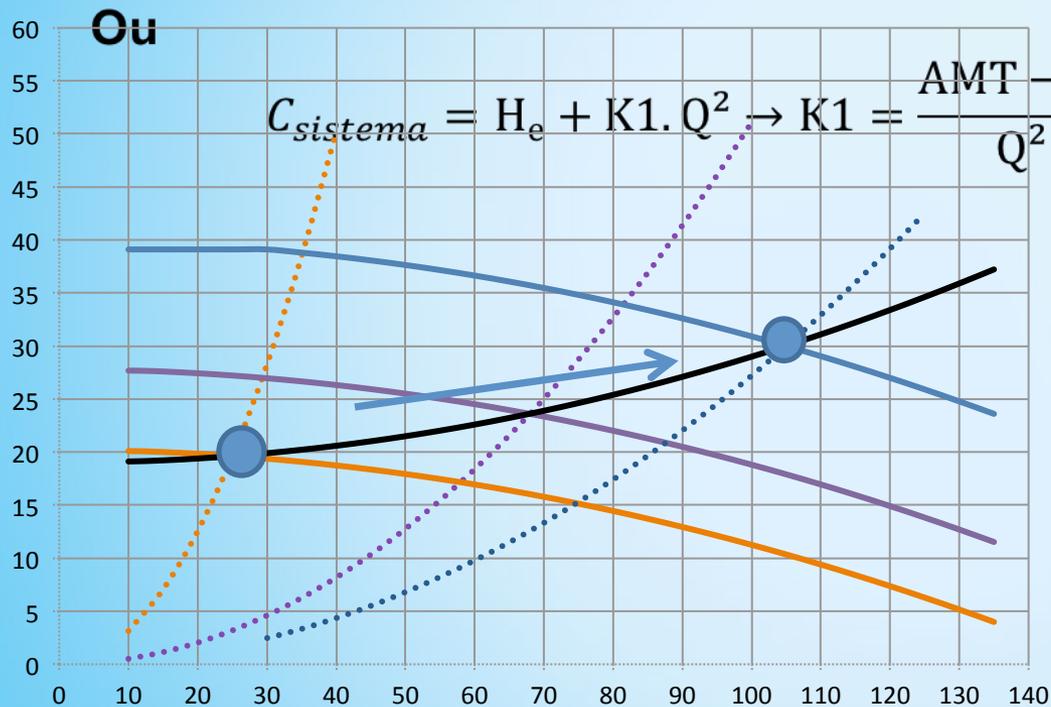
ROTAÇÃO

$$n_2 = n_1 \left(\frac{Q_2}{Q_A} \right)$$

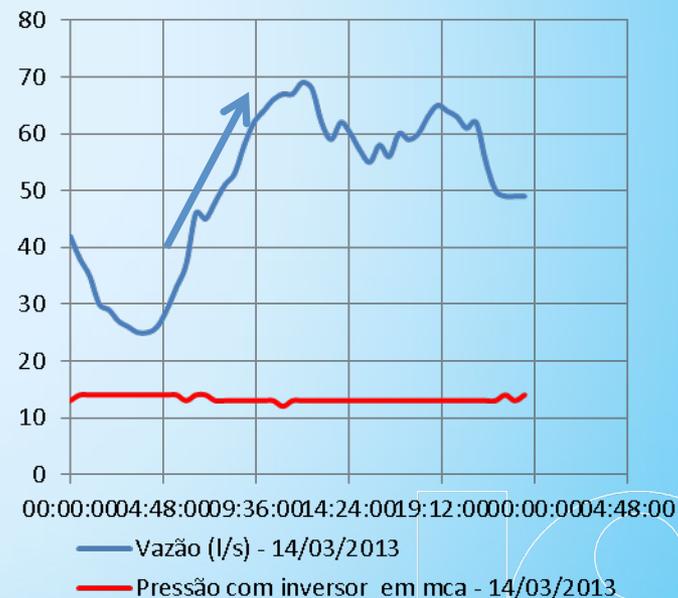
MÉTODO

A elevatória está vinculada ao sistema de abastecimento, portanto deve-se obter a curva do sistema:

$$C_{Sistema} = (\Delta Cota + Pres. do pto. crítico) + \frac{8}{\pi^2 \cdot g} \left(\frac{\sum K}{D^4} + \frac{fL}{D^5} \right) Q^2 [Proj. novo]$$



- H' 68 l/s máxima diurna
- H' 25 l/s mínima noturna
- H(rotor 285 mm a 1750 rpm, Carga máx 105 l/s - final de plano.)
- H(1460 rpm - início de plano, máxima diurna)
- H(1245 rpm - início de plano, mínima noturna)
- Sistema
- H'(Curva dos vértices de rendimento semelhante a 45 l/s)



As equações de semelhança

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Vazão: } Q_2 = Q_1 \left(\frac{n_1}{n_2} \right) \\ \text{Carga: } H_2 = H_1 \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 \\ \text{Rendimento: } \eta_1 = \eta_2 \end{array} \right\} \text{Parábola de func. semelhante: } H_2 = \left[\frac{H_1}{(Q_1)^2} \right] (Q_2)^2$$

$$\text{Fator de rotação: } \alpha = \frac{n_1}{n_2}$$

$$\text{ROTOR VARIANDO: } H_1 = A. \alpha^2 + B. \alpha. Q - C. Q^2 \dots (01) \rightarrow (\text{KOELLE. E.})$$

$$\text{INVERSOR VARIANDO: } H_1 = A \left(\frac{f}{60} \right)^2 + B \left(\frac{f}{60} \right) Q - C. Q^2 \dots (02) \rightarrow (\text{LUVISOTO. E.})$$

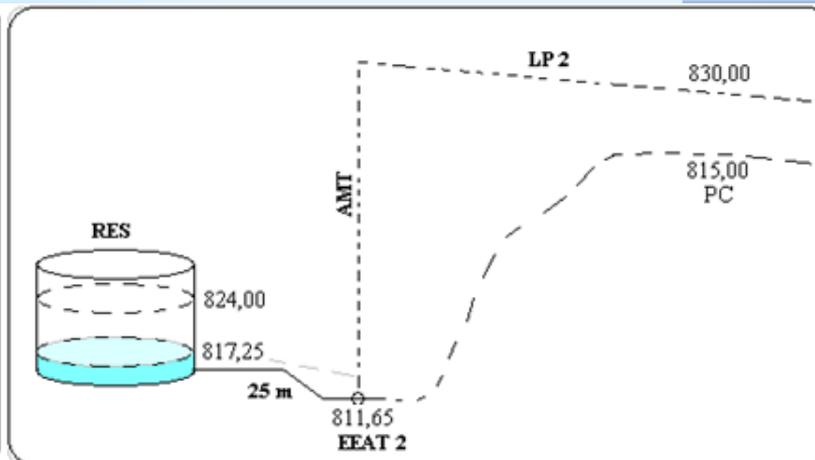
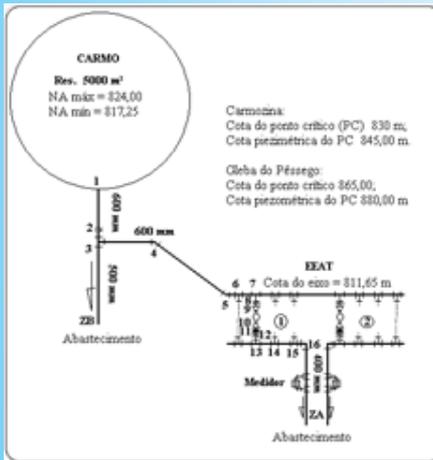
Igualando (01) com (02), tem-se: f [Hz] \rightarrow frequência do inversor





Aplicação em estudo de caso real - SABESP

O novo setor de abastecimento Carmo é composto por um reservatório metálico de 5.000 m³ e uma estação elevatória. A estação elevatória, por sua vez, está dividida em duas, com sistemas de bombeamento por alças de cotas de abastecimento diferentes; AMT1 de 30 mca para a vazão de 104 litros por segundos; e AMT2 de 75 mca para a vazão 94 litros por segundo. Existe, ainda, uma zona baixa com consumo de 60 litros por segundo, a Figura 4 mostra as características básicas do projeto original.



Aplicação em estudo de caso real - SABESP

EEAT CARMO: Vazão máx. = 104 lit. / seg. \boxtimes rotação: $n_1 = 1750 \text{ rpm (60 Hz)}$

Vazão mín. = 45 lit. / seg. \boxtimes rotação: ?

Curva do sistema: $C = 18 + 1000Q^2$ (03)

Curva do rotor: $H = 40 - 3,57Q - 873 Q^2$ (04)

$Q_2 = 45 \frac{l}{s}$ na Equação (01) $\rightarrow H_2 = 21 \text{ mca}$

$\rightarrow H_A = \left[\frac{H_2}{(Q_2)^2} \right] (Q_A)^2 = 10370,37 (Q_A)^2$ (05)

Igualando as Equações (04) e (05), tem-se $Q_A = 59,5 \text{ l/s}$

A nova rotação corresp. a vazão mínima de $45 \frac{l}{s}$ é: $n_2 = n_1 \frac{Q_1}{Q_A} = 1324 \text{ rpm (46 Hz)}$

Fator de rotação: $\alpha = \frac{1324}{1750} = 0,7566$



Resultados

Para a vazão mínima de 45 l/s, tem-se:

$$\begin{cases} \alpha = 0,7655 \\ H_1 = 40\alpha^2 + 3,57\alpha \cdot Q - 873Q^2 = 22,89 - 2,7Q - 873Q^2 \dots (06) \\ H_1 = 40\left(\frac{f}{60}\right)^2 - 3,57\left(\frac{f}{60}\right)Q - 873Q^2 \dots (07) \end{cases}$$

Igualando as equações (06) e (07), tem-se a frequência de 46 Hz, correspondente a vazão mínima de 45 l/s.

A eficiência energética pode ser calculada por $\xi = 0,002725 \left(\frac{AMT}{\eta_g}\right) [kWh/m^3]$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Para a faixa de vazão operação do sistema:} \\ 45 \text{ l/s} < Q < 104 \text{ l/s} \\ \text{Potencia } P = \xi \cdot Q \left(\frac{m^3}{h}\right) [kWh] \\ 11,34 \text{ kWh} < Pot. < 41,18 \text{ kWh} \end{array} \right.$$



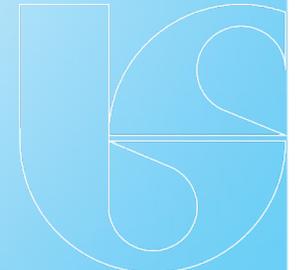
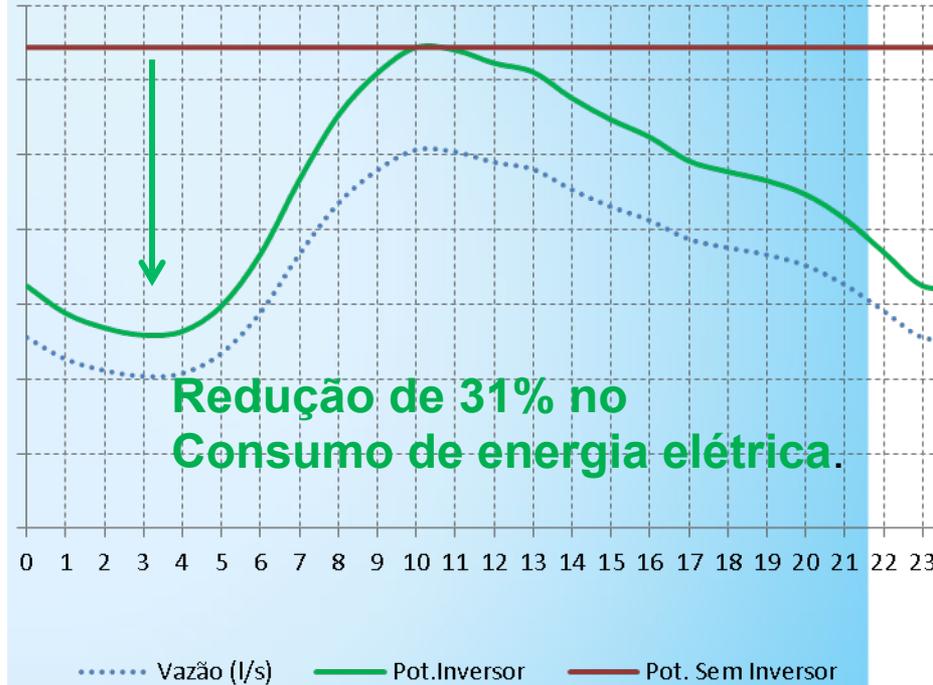
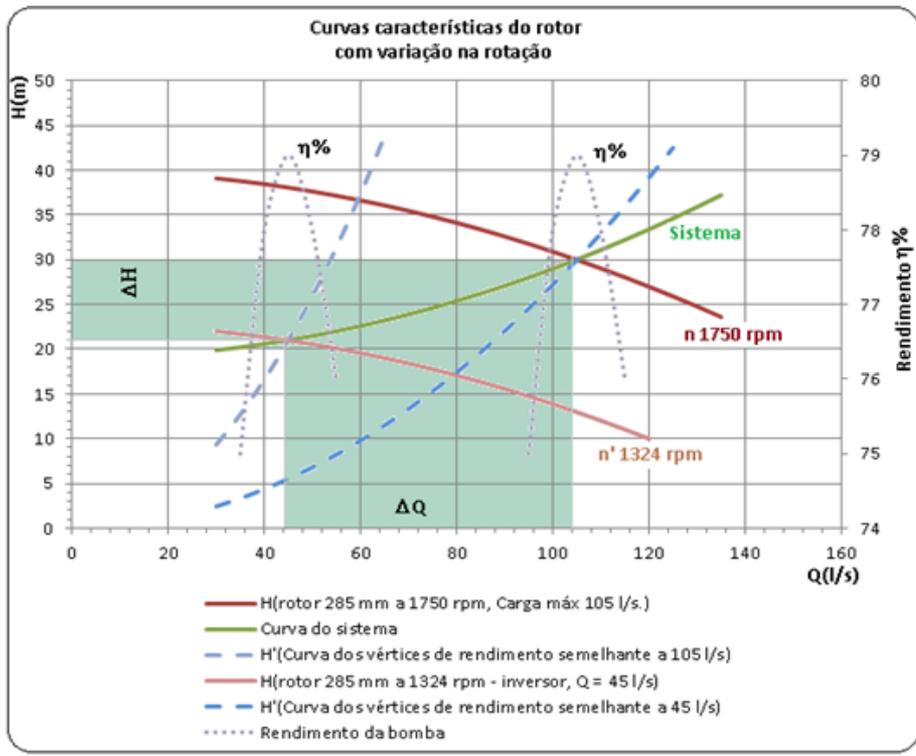


Resultados

Inversor de frequência

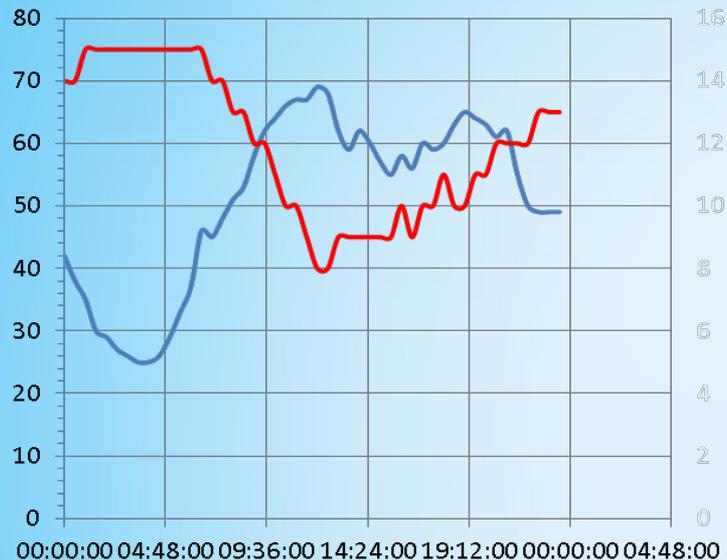
Variação na rotação da bomba

Redução no consumo elétrico



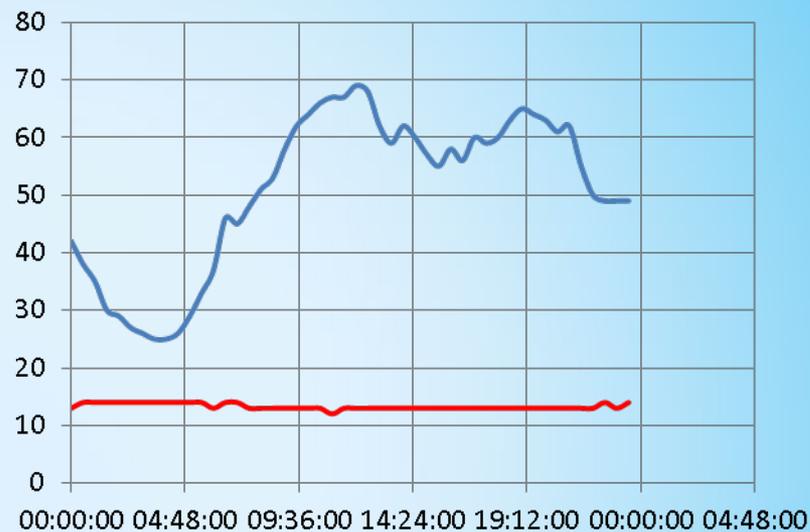
Resultados

Pressão e vazão ANTES



— CARMO: Vazão (l/s) - 14/03/2013

Pressão e vazão DEPOIS



— CARMO: Vazão (l/s) - 14/03/2013

— CARMO: Pressão com inversor em mca - 14/03/2013



Obrigado

Pedro Alves Silva

MLI

pedroasilva@sabesp.com.br

2681.3750

