Algumas considerações sobre sucção em sistemas de bombeamento.

Engº Luiz Camargo

O presente texto tem por objetivo a análise de alguns aspectos da sucção a serem considerados no dimensionamento de tubulações de recalque, que aqui serão examinados através do cálculo da vazão no conduto, utilizando para tal as equações de Darcy-Weisbach e Colebrook-White e o emprego do método iterativo da bisseção, onde são previamente conhecidos o comprimento, diâmetro e rugosidade dos tubos, a viscosidade cinemática do líquido em escoamento, o desnível geométrico entre os reservatórios, e a potência e rendimento (ou curva) da bomba. Ao final é apresentado um código em linguagem Basic para cálculo automático.

A perda de carga em tubulações, pela equação de Darcy-Weisbach, pode ser expressa como:

$$h_f = \frac{8fLQ^2}{g\pi^2 D^5} \tag{1}$$

onde a grandeza f é obtida com a equação de Colebrook-White,

$$f = 1,325\left[-\ln\left(0,27\frac{k}{D} + \frac{1,971D\nu}{Q\sqrt{f}}\right)\right]^{-2} \tag{2}$$

Em sistemas de recalque, se o líquido for água, a vazão está relacionada com a altura manométrica através da equação:

$$P = \frac{QH_m}{0,075\eta} \tag{3}$$

onde:

Q = vazão (m^3/s)
D = diâmetro do tubo (m)
L = comprimento do tubo (m)
f = fator de atrito de Darcy-Weisbach (adimensional)
h_f = perda de carga distribuída ao longo do tubo (m)
k = rugosidade absoluta da parede do tubo (m)
ν = viscosidade cinemática do líquido em escoamento (m^2/s)
g = aceleração da gravidade local (m/s^2)
P = potência do conjunto motobomba (CV) (nota: 1 kW ≈ 1,36 CV)
η = rendimento do conjunto motobomba (%)
H_m = altura manométrica total na bomba (m)

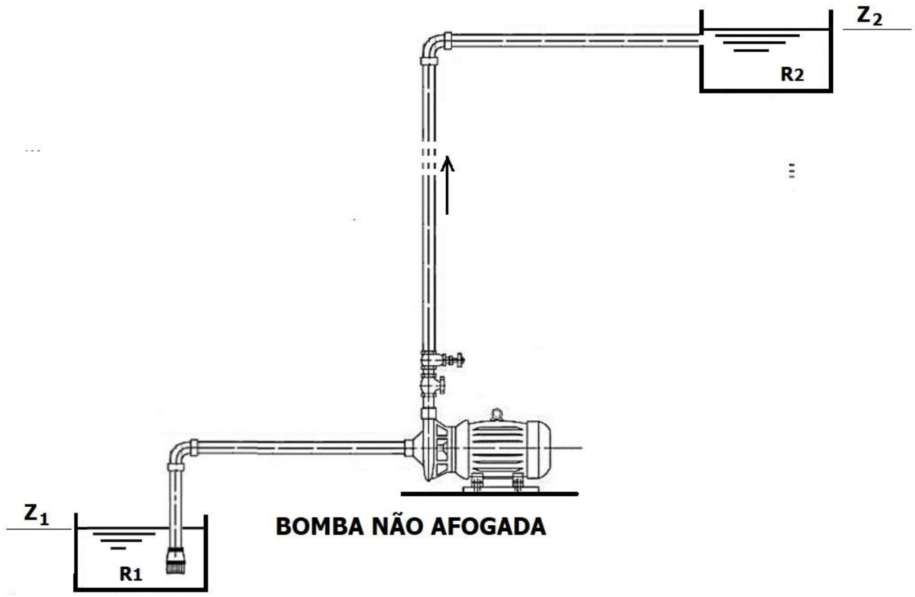
Tipicamente um sistema elevatório, ou de recalque, é composto pelo conjunto de tubulações, intermediados por bombas e acessórios, necessário ao transporte de certa vazão de algum líquido de um reservatório R_1, via de regra situado num nível inferior, para outro reservatório R_2, via de regra situado num nível superior conforme mostra a figura a seguir. Frequentemente, nos sistemas de abastecimento de água esses reservatórios são abertos à atmosfera e com níveis constantes, fato este que permite o escoamento ser tratado como permanente.

Então, as partes básicas que compõem um sistema de recalque são:

a) Conduto de sucção: constituído de tubos e acessórios destinados a conduzir o líquido do reservatório R_1 até a bomba. É o trecho da tubulação à montante da bomba.

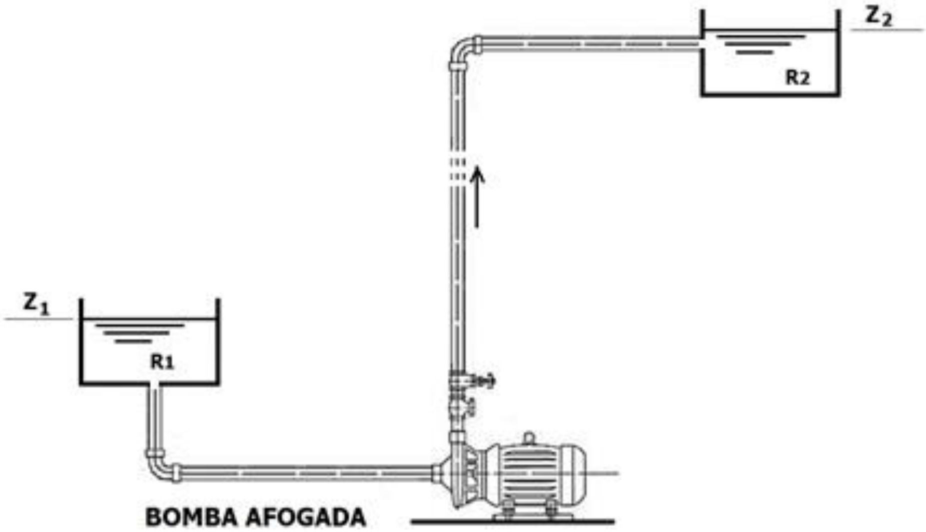
b) Conjunto elevatório: constituído de uma ou mais bombas e seus respectivos motores, destinado a adicionar energia de pressão ao escoamento do líquido.

c) Conduto de recalque: constituído de tubos e acessórios destinados a conduzir o líquido da bomba até o reservatório R_2. É o trecho da tubulação à jusante da bomba.



Para os fins do presente texto, com relação ao trecho de sucção, onde o conduto conduz o líquido do reservatório inferior até a bomba, o conjunto elevatório se configura de duas maneiras:

1 - Bomba afogada: assim chamada quando o eixo da bomba está situado numa cota abaixo da cota do nível de água do reservatório inferior.
2 - Bomba não afogada: quando o eixo da bomba está situado numa cota acima da cota do nível de água do reservatório inferior.



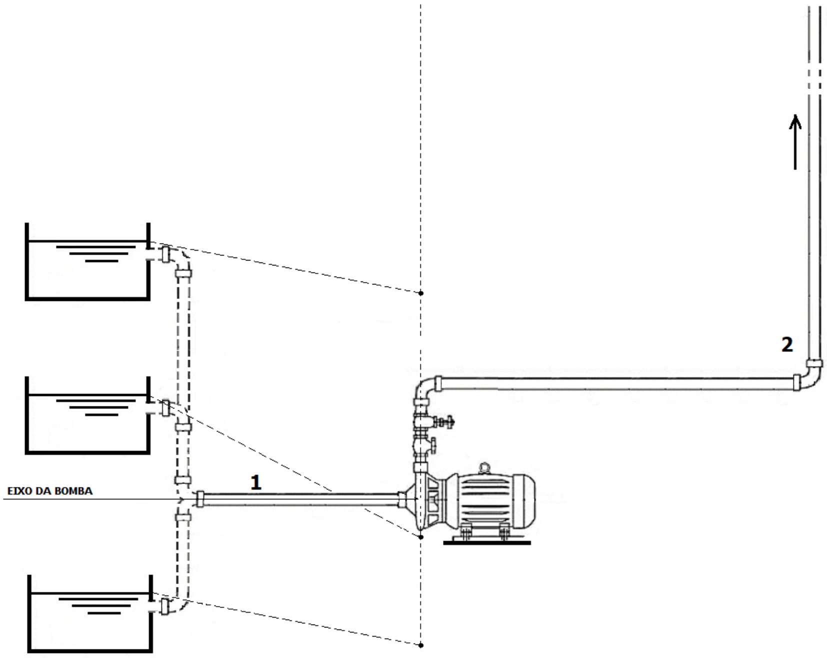
Em qualquer dos casos a altura manométrica na bomba será:

$$H_m = Z_2 - Z_1 + h_S + h_R \quad (4)$$

onde,

Z_1 = cota topográfica do reservatório inferior (m)
Z_2 = cota topográfica do reservatório superior (m)
h_S = perda de carga na tubulação 1 de sucção incluindo os acessórios (m)
h_R = perda de carga na tubulação 2 de recalque incluindo os acessórios (m)

Cabe ressaltar que a perda de carga no conduto de sucção sempre será somada, e nunca subtraída, independente da bomba estar afogada ou não. Na figura a seguir a linha tracejada representa as diferentes posições que a linha piezométrica pode assumir na sucção, dependendo do comprimento, diâmetro e rugosidade do tubo de sucção, da viscosidade e velocidade do líquido bombeado, das singularidades presentes e da posição topográfica da superfície do reservatório de sucção em relação ao eixo da bomba.



Além disso, pela equação da continuidade a vazão que chega na bomba é igual à vazão que sai, qual seja, a vazão no trecho 1 é igual à vazão no trecho 2, isto é:

$$Q = Q_1 = Q_2$$

Então, considerando as perdas de carga singulares como comprimentos equivalentes já adicionados aos comprimentos dos condutos, da Eq. (1) tem-se:

$$h_S = \frac{8 f_1 L_1 Q^2}{g\pi^2 D_1^5} \tag{5}$$

$$h_R = \frac{8 f_2 L_2 Q^2}{g\pi^2 D_2^5} \tag{6}$$

Levando as Eqs. (5) e (6) na Eq. (4):

$$H_m = Z_2 - Z_1 + \frac{8 f_1 L_1 Q^2}{g\pi^2 D_1^5} + \frac{8 f_2 L_2 Q^2}{g\pi^2 D_2^5} \tag{7}$$

Substituindo a Eq. (7) na Eq. (3) obtém-se:

$$\frac{8Q^3}{g\pi^2}\left(\frac{f_1 L_1}{D_1^5} + \frac{f_2 L_2}{D_2^5}\right) + Q\left(Z_2 - Z_1\right) - 0,075\eta P = 0 \tag{8}$$

que pode ser escrita na forma de função:

$$\varphi(Q) = \frac{8Q^3}{g\pi^2}\left(\frac{f_1 L_1}{D_1^5} + \frac{f_2 L_2}{D_2^5}\right) + Q\left(Z_2 - Z_1\right) - 0,075\eta P \tag{9}$$

onde f_1 e f_2 são obtidos iterativamente com a Eq. (2).

Então, aqui está deduzida uma equação para a vazão. Contudo a Eq. (8) é implícita em Q e, portanto, não possui solução expressa de forma explícita. De um modo geral para equações desta natureza é necessário recorrer ao cálculo numérico para obter solução.

Um procedimento viável na solução desse tipo de problema envolve um processo iterativo de aproximações sucessivas. Um roteiro básico de cálculo, com as simplificações mencionadas, consiste de:

a) Estimar um valor inicial para a vazão Q na bomba;
b) Este valor é experimentado na Eq. (9);
c) Se resultar em $\varphi(Q)$=0 o problema está resolvido, caso contrário atribuir à vazão da bomba Q um novo valor mais adequado e repetir sucessivamente esse procedimento até obter $\varphi(Q)$=0 ou $\varphi(Q)$<tol, onde tol é a tolerância máxima admissível. Com isso obtém-se o valor de Q.

Resolução desta natureza quando realizada manualmente torna-se tarefa tediosa e enfadonha. O mais apropriado é utilizar o cálculo automatizado, por processo informático, com o emprego do recurso iterativo. O método da bisseção é uma maneira prática de obter a raiz de uma equação quando se sabe que ela está contida entre os limites de uma faixa de valores. Esse método tem a vantagem da simplicidade operacional e convergência garantida. Exige dois valores iniciais limites, $Q_{\min}$ e $Q_{\max}$, cuja solução (raiz) esteja na faixa entre ambos, para os quais pode-se adotar, digamos, 0 e 50 m^3/s, uma vez que, numa estação de bombeamento dificilmente a vazão no conduto estará fora desses limites.

Note-se que a solução de $\varphi(Q)$ é obtida atribuindo-se sucessivos valores iniciais para Q, conforme roteiro básico indicado, que possibilitarão encontrar os subsequentes e sucessivos valores de Q, até que seja satisfeita a Eq. (8).

O método iterativo da bisseção consiste em, primeiro, dividir ao meio o intervalo entre os valores iniciais, encontrando:

$$Q_{med} = \frac{Q_{\max} + Q_{\min}}{2}$$

Este é o valor inicial estimado. Ao final do roteiro mencionado anteriormente, se $\varphi(Q_{med})>0$, atribui-se o valor de Q_{med} a $Q_{\max}$. Senão, atribui-se o valor de Q_{med} a $Q_{\min}$. E o processo se reinicia.

A cada novo intervalo, que é reduzido à metade do anterior, vai-se repetindo o procedimento e calculando novos valores de Q até que se atinja a precisão desejada, com abs($Q_{\max}$ - $Q_{\min}$) ≤ tol e abs($\varphi(Q_{med})$) ≤ tol.

Como o intervalo é sempre dividido ao meio, é possível estabelecer uma estimativa do número de iterações a serem realizadas, para determinado intervalo [$Q_{\min}$, $Q_{\max}$] e tolerância de erro **tol**, para que se atinja o resultado desejado.

E como parar o processo iterativo? Digamos que seja k o número de iterações. Na iteração de ordem k, o intervalo [$Q_{\min k}$, $Q_{\max k}$] terá um valor igual a

$$\frac{Q_{max} - Q_{\min}}{2^k}$$

Para que k seja a última iteração, é necessário que este intervalo seja menor ou igual à tolerância especificada. Portanto o processo iterativo pode ser interrompido pelo número de iterações:

$$\frac{Q_{max} - Q_{\min}}{2^k} \le tol$$

$$k > \frac{\log\left(Q_{\max} - Q_{\min}\right) - \log\left(tol\right)}{\log\left(2\right)} \qquad (10)$$

Qual seja, o processo iterativo pode ser interrompido quando o número de iterações satisfizer a inequação (10).

Deve-se ter em conta, no entanto, que o dimensionamento cuidadoso de um sistema de bombeamento envolve atenção especial ao trecho de sucção da bomba, visto ser nesta parte da tubulação onde os maiores problemas podem ocorrer. Os inconvenientes mais importantes são aqueles causados pelo fenômeno conhecido como cavitação que pode gerar ruídos, vibrações, queda de rendimento e até modificar características da bomba.

Se um líquido no interior do conduto de sucção de uma bomba escoa numa região em que sua pressão cai até atingir a pressão do vapor, na temperatura do escoamento, tem início a sua vaporização, que faz com que gere bolhas de vapor na massa líquida. Arrastadas pela corrente líquida, essas bolhas ao alcançarem uma zona de pressão mais elevada, entram em colapso, por implosão, quase que instantaneamente, fenômeno este ao qual dá-se o nome de cavitação. Quando o colapso das bolhas ocorre nas proximidades ou em contato com a superfície do rotor, as forças exercidas pelo líquido ao retomar os espaços antes ocupados pelo vapor, acabam por gerar sobrepressões elevadíssimas e em curtíssimos intervalos de tempo. Conforme ressalta Jardim (1992), as sobrepressões podem chegar a 10.000 atm em espaços de tempo de 0,003 segundo. Esses colapsos ocorrendo em sequência junto à superfície metálica do rotor causam um processo danoso ao mesmo, desagregando e arrancando partículas superficiais, tendo como consequência a sua erosão e, por fim, a falha da bomba. Segundo Streeter & Wylie*, o fenômeno é acompanhado de ruído e vibrações que se assemelham a passagem de pedregulhos por uma bomba centrífuga.

Decorrente dos inconvenientes citados, a cavitação acaba por se tornar em motivo para manutenção frequente e dispendiosa dos equipamentos. Para evitar que ocorra a cavitação, ou pelo menos para prevenir que seus efeitos não sejam importantes, cuidados são requeridos no dimensionamento.

Uma recomendação corriqueira e bastante óbvia é a de que a tubulação de sucção deva ter um diâmetro comercial imediatamente maior que o da tubulação de recalque, com vistas a diminuir a velocidade e, com isto, obter menores perdas de carga.

O $NPSH$ (Net Positive Suction Head) é a grandeza mais importante e mais utilizado para caracterizar a cavitação. De forma suscinta pode ser definido como a quantidade de energia contida no líquido suficiente para que a pressão interna seja superior à pressão do vapor, ao alcançar o bocal de sucção da bomba, para que não ocorra cavitação.

NPSH requerido é o $NPSH$ mínimo exigido pelo fabricante da bomba como garantia de operação sem cavitação:

$$NPSH_r = \frac{p_a - p_v}{\gamma} + Z - \Delta\mathrm{H}_S \qquad (11)$$

NPSH disponível é a energia no bocal de sucção da bomba do sistema projetado que irá depender dos níveis dos reservatórios de sucção e recalque, perdas de carga, temperatura, pressão atmosférica e do desnível geométrico de sucção, portanto determinado pelo projetista:

$$NPSH_d = \frac{p_a - p_v}{\gamma} - Z - \Delta\mathrm{H}_S \qquad (12)$$

Condição de não cavitação: $NPSH_d > NPSH_r$

Segundo Porto (2004), "Os dois termos em que há possibilidade de o projetista interferir para aumentar o $NPSH_d$ da instalação são a altura estática de sucção, que define a cota de assentamento do grupo motobomba em relação ao nível de água do reservatório inferior, e a perda de carga total. Destas duas, a altura estática de sucção é a variável mais sensível, assumindo-se como limite, para propósitos práticos, um valor não maior que 4 a 5 m. Conhecendo-se a curva do $NPSH_r$ fornecida pelo fabricante, para a vazão de recalque, a altura de sucção máxima pode ser determinada, na condição limite, igualando o $NPSH$ disponível e requerido e utilizando-se as duas últimas equações, na forma":

$$Z_{\max} = \pm\left(NPSH_r - \frac{p_a - p_v}{\gamma} + \Delta\mathrm{H}_S \right) \qquad (13)$$

em que o sinal positivo corresponde à bomba afogada, e

* Streeter, V.L. & Wylie, E.B.; "Fluid Mechanics", McGraw-Hill, NY, 1982.

$$\frac{p_a}{\gamma} = 13,6\left(\frac{760 - 0,81h}{1000}\right) \tag{14}$$

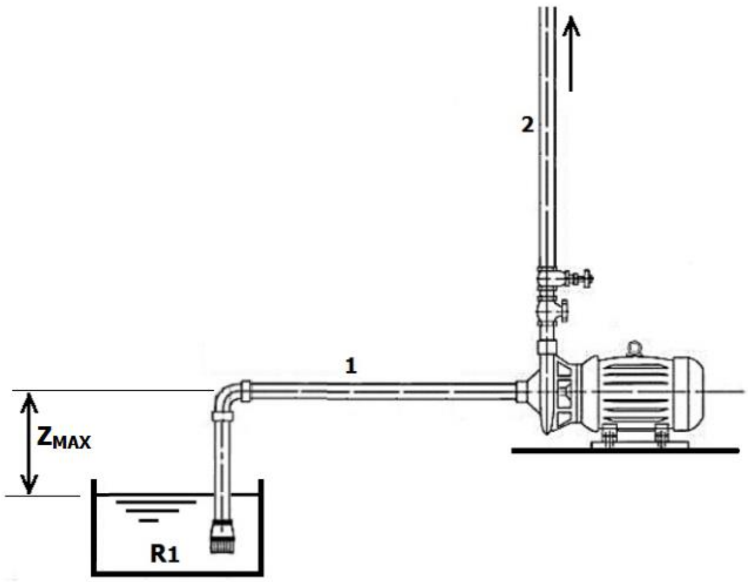
sendo h a altitude local e p_v/γ, em função da temperatura, é dado pela tabela a seguir:

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

Fonte: Porto, 2004.

onde,

p_v/γ = pressão de vapor da água (mH_2O)
p_a/γ = pressão atmosférica (mH_2O)
h = altitude local (m)
ΔH_S = somatório de todas as perdas até o bocal de entrada da bomba (m)
Z_{max} = máxima altura estática de sucção (m)



Ainda segundo este autor, "o critério do $NPSH_r$, por utilizar uma característica da bomba fornecida pelo fabricante, é o que oferece maior segurança ao projetista".

Em termos de cálculo automático o critério aqui apresentado é mostrado no Apêndice, no código fonte para um programa computacional denominado SERBOMDW.BAS, bem compacto, porém plenamente funcional, escrito em linguagem Turbo Basic, mas que pode facilmente, querendo, ser adaptado para outras versões Basic ou para outras linguagens computacionais, ou ainda para Excel, MatLab, Mathematica, etc. Aqui os dados de entrada são introduzidos no próprio código através dos comandos *READ* e *DATA*, com D_1 sempre maior que zero.

Referências bibliográficas:

- Dieguez, J.P.P.; "Métodos Numéricos Computacionais para a Engenharia", Ed. Interciência, Rio, 1992.
- Jardim, S.B.; "Sistemas de Bombeamento", Sagra-DC Luzzatto, Porto Alegre, 1992.
- Porto, R.M.; "Hidráulica Básica", EESC-USP, São Carlos, 2004.

LC, Vitória, 27/09/2020.

APÊNDICE

```
010 'SERBOMDW.BAS - SISTEMA TUBULACOES EM SERIE C/BOMBEAMENTO INTERMEDIARIO - EQS. DARCY E COLEBROOK
020 'USO DO METODO DA BISSECAO - DADOS INTRODUZIDOS COM COMANDOS READ e DATA (SI).
030 CLEAR:DEFINT I:G=9.806:VISC=0.000001
040 DEF FN F(Q) = 0.81057*Q^3/G*(f1*L1/D1^5+f2*L2/D2^5)+Q*(Z2-Z1)-0.075*REND*P
050 READ L1,D1,Z1,k1,L2,D2,Z2,k2:DATA 1300,0.2042,0,0.00006,1300,0.2042,67,0.00006
060 READ P,REND:DATA 50,0.69 'POT EM CV
070 QMIN=0:QMAX=50:TOL=0.000001:ITER=(LOG(QMAX-QMIN)-LOG(TOL))/LOG(2)
080 FOR I=1 TO ITER
090 QMED=(QMAX+QMIN)/2
100 f1=0.01:DO:f01=f1:f1=1.325*(-LOG(0.27*k1/D1+1.971*D1*VISC/QMED/SQR(f01)))^(-2):LOOP WHILE ABS(f1-f01)/f1>TOL
110 f2=0.01:DO:f02=f2:f2=1.325*(-LOG(0.27*k2/D2+1.971*D2*VISC/QMED/SQR(f02)))^(-2):LOOP WHILE ABS(f2-f02)/f2>TOL
120 IF FN F(QMIN)*FN F(QMED)=<0 THEN QMAX=QMED ELSE QMIN=QMED
130 NEXT I
140 COLOR 15,1,1:CLS:PRINT:PRINT" EXIBICAO DE DADOS (SI).":PRINT:PRINT" ENTRADA:":PRINT
150 PRINT" TUBO 1: L, D, Z, k = ";L1;:PRINT USING"##.###";D1;:PRINT" ";Z1;" ";:PRINT USING"#.######";k1
160 PRINT" TUBO 2: L, D, Z, k = ";L2;:PRINT USING"##.###";D2;:PRINT" ";Z2;" ";:PRINT USING"#.######";k2
170 PRINT" BOMBA: POT. =";CINT(P);"CV =";CINT(0.745*P);"KW / REND. = ";:PRINT USING"#.###";REND
180 PRINT:PRINT" VAZAO RESULTANTE = ";:PRINT USING"###.####";QMED
190 END
```

A numeração das linhas do código acima é meramente orientativa e, querendo, pode ser removida. Algumas versões Basic, como GW-Basic, exigem a numeração.

Exemplo de aplicação:

```
EXIBICAO DE DADOS (SI).

ENTRADA:

TUBO 1: L, D, Z, K =  1300  0.204  0  0.000060
TUBO 2: L, D, Z, K =  1300  0.204  67  0.000060
BOMBA: POT = 50 CV = 37 KW / REND = 0.690

VAZAO RESULTANTE =   0.0329
```

$$Z_{\max} = \pm\left(NPSH_r - \frac{p_a - p_v}{\gamma} + \Delta H_S\right)$$

$$\frac{p_a}{\gamma} = 13{,}6\left(\frac{760 - 0{,}81h}{1000}\right)$$ = 13,6 x (760 – 0,81 x 80) /1000 = 10,23 m

p_v/γ = 0,24 m

ΔH_S = 5,49 m

$NPSH_r$ = 4 m

$\therefore Z_{max}$ = - (4 - (10,23-0,24) + 5,49) = 0,5 m

Bomba Tipo Pump Type Tipo de Bomba	KSB ETANORM KSB MEGANORM KSB MEGACHEM	Tamanho Size Tamaño	80-200	KSB
Oferta nº Project - No. Oferta - nº	Item nº Item - No. Pos - nº	Velocidade Nominal Nom. Rotative Speed Velocidad Nominal	3500 rpm	

ADUTORA INQUINOR - 1989 - VINILFER DN 200 - TIGRE

(ROTOR MODIFICADO PARA 200 MM)

Altura Manométrica
Head
Altura Manométrica

Potência Necessária
Shaft Power
Potencia Necesaria