

Departamento de Engenharia Mecânica

Pós-Graduação em Engenharia de Dutos

Desenvolvimento de uma Ferramenta Computacional para Modelagem de
Sistemas de Bombeamento para Fins de Simulação

Rafael Paes de Oliveira Alves

Luis Fernando A. Azevedo

Luis Fernando Pires

RAFAEL PAES DE OLIVEIRA ALVES

DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA
MODELAGEM DE SISTEMAS DE BOMBEAMENTO PARA FINS DE SIMULAÇÃO DE
DUTOS

MONOGRAFIA APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA DA PUC-RIO COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ESPECIALISTA EM ENGENHARIA DE DUTOS.
APROVADA PELA COMISSÃO EXAMINADORA ABAIXO ASSINADA.

LUIS FERNANDO A. AZEVEDO

LUIS FERNANDO G. PIRES

RIO DE JANEIRO

13 DE JULHO DE 2012

Agradecimentos

Primeiramente quero agradecer a Deus e ao Nosso Senhor Jesus Cristo, por toda obra feita na minha vida. Sem eles não podemos fazer nada. E assim consagro todo este curso a Ele.

Por ter sido usada como ferramenta dEle eu agradeço a toda minha família especialmente a minha esposa e a minha mãe por existirem na minha vida e tornarem tudo que faço melhor.

A toda equipe do SIMDUT da PUC Rio pelas inúmeras contribuições técnicas para que eu viesse a amadurecer como profissional e pessoa em especial a Fernando Luiz que me motivou a desenvolver este trabalho como monografia. A equipe do EDUT da PETROBRAS por motivarem o desenvolvimento deste trabalho em especial aos amigos que contribuíram diretamente para esta conclusão.

Aos meus orientadores Luis Fernando Pires e Luis Fernando Azevedo pelo tanto que aprendi com vocês e pelo apoio. Agradeço também aos professores que fizeram parte deste curso em especial a Reinaldo de Falco que desde a graduação como meu orientador me desperta a vontade de aprender cada vez mais sobre bombas.

E a todos aqueles que colaboraram para que todas essas idéias saíssem da minha mente e fossem impressas no papel, o meu muito obrigado!

Sumário

Dentre as diversas atividades associadas ao projeto de um novo oleoduto ou, a ampliação de um existente, as simulações termo-hidráulicas constituem um elemento crucial de auxílio ao projeto. Nesta etapa são definidos os principais elementos pertencentes ao oleoduto, bem como as características estruturais do sistema.

O projeto do sistema de bombeamento constitui uma fase de suma importância nessas etapas. A modelagem adequada para uso nos *softwares* de simulação proporciona uma segurança para a correta previsão da operação, atendimento a demanda de vazão, dimensionamento mecânico do oleoduto e a determinação do sistema de segurança.

Este trabalho apresenta uma metodologia para modelagem e dimensionamento de bombas centrífugas monofásicas. Como a modelagem proposta visa fornecer dados para as simulações termo-hidráulicas, são desenvolvidas curvas teóricas de performance bem como os demais dados para inserção em simuladores, em especial no Stoner Pipeline Simulator™. Todo o procedimento foi sistematizado numa planilha eletrônica para ser utilizada em ambiente Microsoft Windows™.

Índice

1.0	Introdução e Objetivo	11
2.0	Revisão Bibliográfica	13
3.0	Método de Cálculo	15
3.1	Perda de carga tubulações	15
3.2	Bombas Auxiliares	17
3.3	Bombas Principais.....	18
3.4	Cálculo da estimativa do $NPSH_R$	19
3.5	Método para estimativa da quantidade de estágios.....	20
3.6	Método de correção das curvas características em função da viscosidade	24
3.6.1	Método A.....	25
3.6.2	Método B.....	29
3.7	Definição das curvas características de <i>head</i> e eficiência vs vazão.....	33
4.0	Dados de entrada do aplicativo	35
4.1	Dados do produto.....	36
4.2	Informações da instalação e operação	37
4.3	Dados característicos do sistema de bombeamento	41
5.0	Dados de saída do aplicativo	42
5.1	Perda de carga tubulações	42
5.2	Bombas auxiliares	42
5.3	Bombas principais.....	43
5.4	Modelo Stoner Pipeline Simulator™	45
6.0	Resultados	46
6.1	Validação dos métodos de estimativa de $NPSH$ requerido e da quantidade de estágios 46	
6.2	Dados operacionais obtidos pelo aplicativo comparados com os valores obtidos no Stoner Pipeline Simulator™	48
6.3	Cálculo da estimativa da quantidade de estágios.....	50
7.0	Conclusões.....	52
8.0	Bibliografia.....	53

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Comparativo entre os valores gráficos e os obtidos pelas equações para os fatores de correção da vazão e do <i>head</i> pelo método A	27
Tabela 2 – Comparativo entre os valores gráficos e os obtidos pela equação para o fator de correção da eficiência pelo método A	28
Tabela 3 – Casos gerados para validação	46
Tabela 4 – Validação dos métodos.....	46
Tabela 5 – Características da bomba Sulzer SBC/GSG 151-330/4	47
Tabela 6 – Resultados para o Caso Claros	49
Tabela 7 – Resultados para o Caso Petróleo 1 modelados pelo perfil.....	49
Tabela 8 – Resultados para o Caso Petróleo 2 modelados pelo perfil modelados pela pressão do tanque.....	50

Índice de Figuras

Figura 1 – Eficiência em função da velocidade específica.....	21
Figura 2 – Velocidade específica em função da eficiência e da vazão obtidas pelas equações..	24
Figura 3 – Gráfico para obtenção dos fatores de correção do <i>head</i> e da vazão	27
Figura 4 – Gráfico para obtenção dos fatores de correção da eficiência	28
Figura 5 – Carta para correção de viscosidade para vazões inferiores a 100 GPM.....	29
Figura 6 – Carta para correção de viscosidade para vazões superiores a 100 GPM.....	30
Figura 7 – Dados de entrada	36
Figura 8 – Dados de entrada do fluido.....	37
Figura 9 – Dados das linhas de sucção e descarga.....	37
Figura 10 – Gradiente Hidráulico e Pressão	38
Figura 11 – Dados das linhas de sucção e descarga	40
Figura 12 – Dados de entrada da instalação e operação	40
Figura 13 – Dados de entrada das bombas	41
Figura 14 – Dados de saída das tubulações	42
Figura 15 – Dados de saída das bombas auxiliares.....	43
Figura 16 – Curvas de performance para as bombas auxiliares	43
Figura 17 – Dados de saída das bombas principais.....	44
Figura 18 – Curvas de performance para as bombas principais.....	44
Figura 19 – Modelo Stoner Pipeline Simulator™	45
Figura 20 – Sistema de Bombeamento para o Caso Claros.....	48
Figura 21 – Sistema de Bombeamento para o Caso Petróleo	48

Índice de Equações

Equação 1 – Darcy-Weisbach	15
Equação 2 – Sousa, Cunha, Marques, 1999.....	15
Equação 3 – Pressão de Sucção das Bombas Auxiliares	16
Equação 4 – Pressão de Sucção das Bombas Principais	16
Equação 5 – Pressão a Montante do <i>Scraper</i>	16
Equação 6 – Pressão de Descarga das Bombas Principais	18
Equação 7 – Velocidade Específica de Sucção	19
Equação 8 – Velocidade Específica	20
Equação 9 – Rotação específica em função da eficiência para vazão acima de 10000 GPM e $\eta < 71,63\%$	22
Equação 10 – Rotação específica em função da eficiência para vazão acima de 10000 GPM e $\eta > 71,63\%$	22
Equação 11 – Rotação específica em função da eficiência para vazão de 10000 GPM e $\eta < 88,93\%$	22
Equação 12 – Rotação específica em função da eficiência para vazão de 3000 GPM e $\eta < 84,78\%$	22
Equação 13 – Rotação específica em função da eficiência para vazão de 3000 GPM e $\eta > 84,78\%$	22
Equação 14 – Rotação específica em função da eficiência para vazão de 1000 GPM e $\eta < 83,30\%$	22
Equação 15 – Rotação específica em função da eficiência para vazão de 500 GPM e $\eta < 80\%$..	22
Equação 16 – Rotação específica em função da eficiência para vazão de 300 GPM e $\eta < 77,16\%$	23
Equação 17 – Rotação específica em função da eficiência para vazão de 300 GPM e $\eta > 77,16\%$	23
Equação 18 – Rotação específica em função da eficiência para vazão de 200 GPM e $\eta > 75,09\%$	23
Equação 19 – Rotação específica em função da eficiência para vazão de 100 GPM e $\eta > 70,24\%$	23
Equação 20 – Rotação específica em função da eficiência para vazão de 100 GPM e $\eta < 70,24\%$	23
Equação 21 – Fator de Performance B	25
Equação 22 – Fator de Correção CH no BEP e CQ para $B < 30$	26
Equação 23 – Fator de Correção CH em uma vazão 120% do BEP e CQ para $B < 30$	26
Equação 24 – Fator de Correção CH em uma vazão 80% do BEP e CQ para $B < 30$	26
Equação 25 – Fator de Correção CH em uma vazão 60% do BEP e CQ para $B < 30$	26
Equação 26 – Fator de Correção CH no BEP e CQ para $B > 30$	26
Equação 27 – Fator de Correção CH em uma vazão 120% do BEP e CQ para $B > 30$	26
Equação 28 – Fator de Correção CH em uma vazão 80% do BEP e CQ para $B > 30$	26
Equação 29 – Fator de Correção CH em uma vazão 60% do BEP e CQ para $B > 30$	26
Equação 30 – Fator de Correção C_{η} para a eficiência.....	28
Equação 31 – Coeficiente de Correção.....	31
Equação 32 – Fator de Correção CQ para $Q < 100$ GPM.....	31
Equação 33 – Fator de Correção C_{η} para $Q < 100$ GPM	31
Equação 34 – Fator de Correção C_H para $Q < 100$ GPM.....	31
Equação 35 – Fator de Correção CQ para $Q > 100$ GPM.....	32

Equação 36 – Fator de Correção C_{η} para $Q > 100$ GPM	32
Equação 37 – Fator de Correção $C_{H-0,6 \text{ BEP}}$ para $Q > 100$ GPM	32
Equação 38 – Fator de Correção $C_{H-0,8 \text{ BEP}}$ para $Q > 100$ GPM	32
Equação 39 – Fator de Correção $C_{H-1,0 \text{ BEP}}$ para $Q > 100$ GPM	32
Equação 40 – Fator de Correção $C_{H-1,2 \text{ BEP}}$ para $Q > 100$ GPM	32
Equação 41 – Função da curva eficiência vs vazão	33
Equação 42 – Função da curva <i>head</i> vs vazão	34

Lista de Termos e Definições

NPSH – *Net Positive Suction Head* – Altura manométrica de Sucção

BEP – *Best Efficiency Point* – Ponto de Melhor Eficiência

N_{ss} – Velocidade específica de sucção

N_s – Velocidade específica

Head – Pressão convertida em metros de coluna de líquido

Shut off – Ponto de *head* máximo e vazão nula

1.0

Introdução e Objetivo

O presente trabalho tem como objetivo apresentar elementos com o intuito de servir de suporte a modelagem de sistemas de bombeamento para *softwares* de simulação em especial ao Stoner Pipeline Simulator. Serão apresentadas duas metodologias desenvolvidas para este trabalho com o objetivo de modelar com maior precisão o sistema.

A primeira se propõe a apresentar um método para estimativa do NPSH (*Net positive suction head*) requerido para bombas centrífugas aplicando a velocidade específica de sucção. O segundo método consiste em estimar a quantidade de estágios de uma bomba centrífuga a partir do rendimento e da velocidade específica.

Os cálculos e métodos foram implementados em uma planilha de dimensionamento de bombas para uso em ambiente Microsoft Windows™. Esta planilha se propõe a modelar bombas ou sistemas de bombeamento para aplicações em simulações termo-hidráulica de escoamentos monofásicos de fluidos incompressíveis.

Dentre as funções disponíveis na planilha é possível destacar:

- Determinação da perda de carga nas linhas de sucção e descarga das bombas auxiliares e principais;
- Determinação da pressão de sucção e descarga das bombas auxiliares e principais;
- Estimar o NPSH requerido para as bombas principais;
- Exportar um modelo automático pronto para uso no Stoner Pipeline Simulator™ (um modelo para as auxiliares e um para as principais, é necessário eventuais customizações referentes à quantidade e aos nós);

- Customizar a quantidade de bombas do sistema bom como o arranjo a ser utilizado;

- Inserção (opcional) do perfil do duto para cálculo hidráulico e definição do ponto crítico de operação (ponto de pressão mínima), da pressão de envio necessária, da pressão de recebimento mínima (para atender a condição de coluna fechada), entre outros aspectos;

- Estimar a quantidade de estágios da bomba principal e;

- Dimensionar a bomba para fluidos viscosos e obter as curvas corrigidas para água.

2.0

Revisão Bibliográfica

Os sistemas de bombeamento se constituem num elemento primordial para operação e projeto de oleodutos. As características operacionais destes equipamentos são fundamentais para a previsão de operações normais e incidentais.

A maioria dos dutos existentes e de projetos de novos dutos utilizam bombas centrífugas para a movimentação do fluido. As curvas de performance destas bombas centrífugas devem ser inseridas no simulador para com isto dar continuidade ao projeto. Porém, a escolha desses equipamentos não é algo trivial. A referência bibliográfica 8.6 apresenta um aplicativo online para dimensionamento de bombas a partir de condições de operação. Entretanto este aplicativo apenas disponibiliza curvas de equipamentos de um fabricante, não representando necessariamente a bomba mais indicada. Ainda existem outras limitações como a possibilidade da bomba a ser utilizada não exista em catálogo e assim, não esteja disponível neste aplicativo.

O conceito de velocidade específica e velocidade específica de sucção será amplamente utilizado neste trabalho e fica definido como sendo um índice adimensional de projeto. Independentemente do tamanho e capacidade de diversas bombas, caso estas tenham a mesma rotação específica, estas são geometricamente semelhantes. Podemos considerar uma bomba como sendo de um tamanho múltiplo do outro.

A referência bibliográfica 8.1 apresenta a definição de velocidade específica de sucção. A equação para definição desta grandeza está apresentada na Equação 7. O método a ser apresentado no item 3.5 utiliza este valor como referência para estimativa do NPSH requerido.

O segundo método apresentado neste trabalho utiliza o conceito de velocidade específica de acordo com a referência bibliográfica 8.1. A Equação 8 apresenta a forma de obtenção deste valor. Com base nesta informação será apresentado o método desenvolvido para estimativa da quantidade de estágios de uma bomba centrífuga.

A quantidade de estágios de uma bomba centrífuga  de suma importância no cálculo da correção das curvas de performance em função de viscosidade. As referências 8.2 e 8.3 do Hydraulic Institute apresentam métodos para realizar esta correção e serão apresentados no item 3.6.

3.0

Método de Cálculo

3.1

Perda de carga tubulações

A perda de carga na tubulação de sucção e descarga é obtida com o uso da equação de Darcy–Weisbach apresentada na Equação 1.

$$\Delta P = f \cdot \rho \cdot \frac{L_{Total} \cdot V^2}{2 \cdot D} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

ΔP = Perda de carga na tubulação e nos acessórios em Pa;

L_{Total} = Soma do comprimento de trecho reto da tubulação e do comprimento equivalente dos acessórios de acordo com o item 4.2 – Figura 11 – em metros;

D = Diâmetro interno da tubulação em metros;

V = Velocidade de escoamento em m/s;

ρ = Massa específica do fluido (kg/m³);

f = Fator de atrito obtido pela Equação 2 – Sousa-Cunha-Marques, 1999.

$$f = \frac{1}{\{-2 \cdot \log_{10}[\frac{k}{3,7 \cdot D} - \frac{5,16}{Re} \cdot \log_{10}(\frac{k}{3,7 \cdot D} + \frac{5,09}{Re^{0,87}})]\}}^2 \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

k = Rugosidade equivalente da parede do tubo em metros.

De acordo com o exposto, a pressão de sucção das bombas auxiliares é definida de acordo com a Equação 3.

$$P_{suc-aux} = P_{Tanque} - \Delta P_{linha-sucção} \quad \text{Equação 3}$$

A determinação da pressão de sucção da bomba principal é feita de forma análoga de acordo com a Equação 4.

$$P_{suc-pri} = P_{des-aux} + P_{suc-aux} - \Delta P_{linha-intermediária} \quad \text{Equação 4}$$

Utilizando o mesmo método de cálculo pode-se determinar a pressão de envio no *scraper* pela Equação 5.

$$P_{scraper} = P_{des-pri} + P_{suc-pri} - \Delta P_{linha-descarga} \quad \text{Equação 5}$$

Em todas as fases de cálculo estão previstas as seguintes premissas:

- No caso de arranjos em série a pressão de sucção informada nas equações consiste na pressão da primeira bomba do arranjo;
- No caso de arranjos em série a pressão de descarga informada nas equações consiste da pressão da última bomba do arranjo;
- No caso de arranjos em série a pressão de descarga de uma bomba é a pressão de sucção da seguinte;
- No caso de arranjos em paralelo a pressão de sucção e de descarga é a mesma em todas as bombas.

3.2

Bombas Auxiliares

As bombas auxiliares podem ou não estar presentes nestes sistemas. Existem duas formas para avaliação se o sistema de bombeamento necessita ou não. Uma é através da informação do NPSH requerido pela bomba principal e a outra consiste em um cálculo para estimativa deste valor. Este cálculo será apresentado no item 3.1. O NPSH requerido consiste na quantidade de metros de coluna de líquido necessária acima da pressão de vapor do fluido para que não haja cavitação nas bombas principais.

O método de cálculo compara o NPSH requerido total, ou seja, a soma entre o NPSH requerido com o *head* equivalente à pressão de vapor do fluido (absoluta), com o NPSH disponível. Este é a pressão de sucção absoluta no flange de sucção da bomba principal convertida em metros de coluna de líquido. A pressão de sucção foi obtida de acordo com a Equação 4.

Desta forma o cálculo ocorre da seguinte forma:

- Se $NPSH_{\text{Requerido total}} > NPSH_{\text{Disponível}} \rightarrow$ Necessita bomba auxiliar
- Se $NPSH_{\text{Requerido total}} < NPSH_{\text{Disponível}} \rightarrow$ Não necessita bomba auxiliar

Assim, as bombas auxiliares são modeladas de acordo com a pressão necessária de sucção da principal. Independentemente do arranjo escolhido para as auxiliares a pressão de descarga na última em série ou em qualquer uma no caso do arranjo em paralelo será o NPSH requerido da principal somado a perda de carga na tubulação intermediária.

A decisão do melhor arranjo e a quantidade destas bombas fica a escolha do projetista e sua forma de escolha está apresentada na Figura 7.

A vazão por bomba é função do arranjo escolhido. Caso a opção tenha sido por um arranjo em série a vazão será a mesma de operação. No arranjo em paralelo a vazão de cada bomba será a vazão de operação dividida pela quantidade de bombas.

O *head* no *shut-off* é definido como um percentual acima do *head* no BEP. Este valor foi definido no item 4.3 bem como a vazão máxima. A inserção das curvas de performance no modelo Stoner Pipeline Simulator™ devem ser feitas com as curvas ajustadas para água. Entretanto para o dimensionamento da potência máxima do acionador deve ser considerado o uso para o produto de uso. A planilha apresenta os valores de potência no BEP para água e para o produto a ser bombeado. A potência máxima do acionador é calculada utilizando-se a potência máxima (vazão máxima) com o produto selecionado multiplicada por 0,95 devido ao escorregamento.

3.3

Bombas Principais

As bombas principais constituem o objeto de maior importância deste trabalho. A definição da pressão de sucção destas bombas é dependente da existência ou não de bombas auxiliares. A necessidade ou não destas bombas foi discutido brevemente no item 5.2. A Equação 4 apresenta o cálculo para definição deste valor. Evidentemente, caso não exista algum dos elementos da Equação 4 o valor correspondente a este receberá valor nulo.

A pressão de descarga das bombas principais é definida em função da pressão necessária de envio a montante do scraper conforme apresentado em 4.2. Desta forma a pressão de descarga das bombas principais é definida conforme apresentado na **Equação 6**.

$$P_{des-pri} = P_{scraper} - P_{suc-pri} + \Delta P_{linha-descarga} \quad \text{Equação 6}$$

A decisão do melhor arranjo e a quantidade destas bombas fica a escolha do projetista e sua forma de escolha está apresentada Figura 7.

A vazão por bomba é função do arranjo escolhido. Caso a opção tenha sido por um arranjo em série a vazão será a mesma de operação. No arranjo em paralelo a vazão de cada bomba será a vazão de operação dividida pela quantidade de bombas.

O *head* no *shut-off* é definido como um percentual acima do *head* no BEP. Este valor foi definido no item 4.3 bem como a vazão máxima. A inserção das curvas de performance no modelo Stoner Pipeline Simulator™ devem ser feitas com as curvas ajustadas para água. Entretanto para o dimensionamento da potência máxima do acionador deve ser considerado o uso para o produto de uso. A planilha apresenta os valores de potência no BEP para água e para o produto a ser bombeado. A potência máxima do acionador é calculada utilizando-se a potência máxima (vazão máxima) com o produto selecionado multiplicada por 0,95 devido ao escorregamento.

3.4

Cálculo da estimativa do NPSH_R

Conforme introduzido no item 5.2, existem duas formas de analisar a necessidade ou não de bombas auxiliares. De acordo com o apresentado anteriormente, o usuário pode introduzir o NPSH (*Net positive suction head*) requerido no flange de sucção, porém, existem casos que este valor não está disponível.

A definição da velocidade específica de sucção está apresentada na Equação 7. A faixa de usual desta grandeza varia de 8.000 a 11.000. Quanto menor for o N_{ss} maior será o NPSH_R. Assim, para estimativa do NPSH_R, considera-se o N_{ss} 8000 para a velocidade específica de sucção de acordo com a referência 8.1.

$$N_{ss} = \frac{RPM \cdot \sqrt{Q}}{NPSH_R^{3/4}} \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

N_{ss} = Velocidade específica de sucção;

RPM = Rotação da bomba (RPM);

Q = vazão (em gpm) no BEP e;

NPSH_R = NPSH requerido (ft) no BEP (*Best efficiency point* – ponto de melhor eficiência).

3.5

Método para estimativa da quantidade de estágios

O bombeamento de produtos de alta viscosidade implica em fatores que não são avaliados quando este ocorre com claros por exemplo. A viscosidade do produto bombeado influencia na forma das curvas características das bombas. Os métodos para determinação desta influência necessitam de diversas informações dentre elas o *head* por estágio da bomba.

Evidentemente durante o processo de projeto do oleoduto não é possível ter em mãos algumas características da bomba, dentre eles a quantidade de estágios. Porém, é possível realizar uma estimativa da quantidade de estágios de uma bomba centrífuga partindo da análise da velocidade específica de rotação da bomba apresentada na Equação 8.

$$N_s = \frac{RPM \cdot \sqrt{Q}}{H^{3/4}} \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

N_s = Velocidade específica de rotação;

RPM = Rotação da bomba (RPM);

Q = vazão (gpm) no BEP e;

H = *Head* por estágio (ft) no BEP.

Assim, fica claro que a variação do número de estágios da bomba centrífuga exercerá uma influência considerável na velocidade específica de rotação. Na referência 8.1, é apresentada a Figura 1. Percebe-se desta forma que para cada vazão existe uma faixa de rotações específicas que implica em um intervalo de eficiência. Por exemplo, para a vazão de 3.000 gpm, a velocidade específica varia de 500 a 3.000 e a eficiência de 0,70 a aproximadamente 0,87.

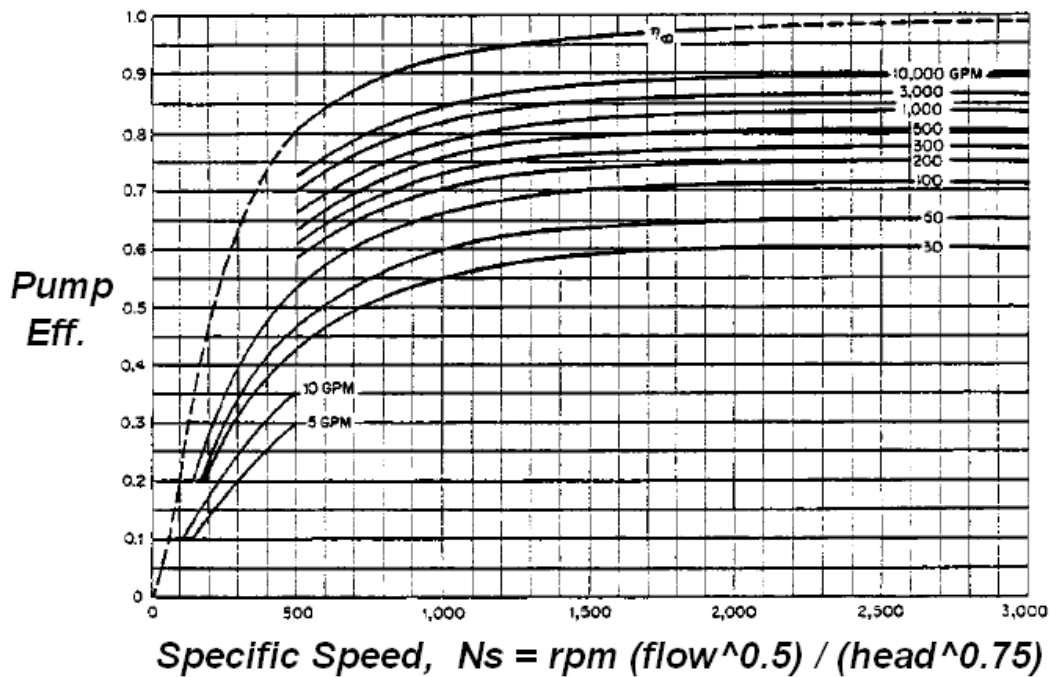


Figura 1 – Eficiência em função da velocidade específica

Existe ainda segundo a referência 8.1 uma outra carta (Wisliceus) de eixos iguais aos da Figura 1 porém, mais antiga e com variação de velocidade específica de 500 a 15.000. Neste trabalho a Figura 1 foi preferida pelo fato das rotações específicas estarem na faixa de bombas centrífugas que é o objetivo deste trabalho.

De acordo com a vazão e *head* informados para dimensionamento da bomba, a planilha retorna ao usuário uma faixa de rendimentos usual para a condição de operação. Com a seleção do rendimento da bomba a ser modelada para o BEP, ou seja, para o ponto de operação, é calculada através das equações a seguir, a rotação específica para a condição informada. Com o valor da rotação específica é possível o cálculo do *head* por estágio pela Equação 8. Através da velocidade específica de rotação, calcula-se o *head* por estágio desta bomba. Com o *head* por estágio e o *head* total da bomba estima-se a quantidade de estágios necessária.

As curvas da Figura 1 foram modeladas de acordo com equações para cada vazão acima de 100 GPM e estão apresentadas na Equação 9, Equação 10, Equação 11, Equação 12, Equação 13, Equação 14, Equação 15, Equação 16, Equação 17, Equação 18, Equação 19 e Equação 20.

$$N_S = 589,407791067115. \eta^2 + 13,3243456465223. \eta + 64,0708485481853 \quad \text{Equação 9}$$

$$N_S = 14262289,0650635. \eta^5 - 58990560,307643. \eta^4 + 97441732,6763433. \eta^3 - 80334106,1889282. \eta^2 + 33051821,0133839. \eta - 5428246,43625935 \quad \text{Equação 10}$$

$$N_S = 3164034260,5. \eta^6 - 15233251049,5446. \eta^5 + 30536143059,6065. \eta^4 - 32622020039,2443. \eta^3 + 19588535167,2364. \eta^2 - 6268441286,32545. \eta + 835160427,415425 \quad \text{Equação 11}$$

$$N_S = 241606,554595619. \eta^3 - 528971,037550411. \eta^2 + 389118,130096241. \eta - 95568,4500114923 \quad \text{Equação 12}$$

$$N_S = 335722545,215668. \eta^3 - 861418430,506876. \eta^2 + 736777496,983082. \eta - 210060190,901422 \quad \text{Equação 13}$$

$$N_S = 136360633,473145. \eta^5 - 501005125,396723. \eta^4 + 735459161,447832. \eta^3 - 539173037,301458. \eta^2 + 197397270,535831. \eta - 28871992,0822613 \quad \text{Equação 14}$$

De acordo com a Figura 1 o rendimento máximo para 1000 GPM é de aproximadamente 83% e, a menor velocidade específica de rotação para este valor é de aproximadamente 2011. Acima desta velocidade específica o rendimento fica constante.

$$N_S = 335722545,215668. \eta^3 - 861418430,506876. \eta^2 + 736777496,983082. \eta - 210060190,901422 \quad \text{Equação 15}$$

$$\begin{aligned}
N_s = & 153545349,931641.\eta^5 - 524015196,242041.\eta^4 & \text{Equação 16} \\
& + 714703193,203632.\eta^3 \\
& - 486921416,037924.\eta^2 \\
& + 165699462,353533.\eta \\
& - 22530811,9997098
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
N_s = & 15991007479,2852.\eta^3 - 37176435881,1466.\eta^2 & \text{Equação 17} \\
& + 28809608184,0629.\eta \\
& - 7441911446,25913
\end{aligned}$$

De acordo com a Figura 1 o rendimento máximo para 300 GPM é de aproximadamente 78% e, a menor velocidade específica de rotação para este valor é de aproximadamente 2687. Acima desta velocidade específica o rendimento fica constante.

$$\begin{aligned}
N_s = & 137065712,526123.\eta^5 - 446959821,32531.\eta^4 & \text{Equação 18} \\
& + 582315122,754137.\eta^3 \\
& - 378860008,696947.\eta^2 \\
& + 123088581,985616.\eta \\
& - 15975283,5239834
\end{aligned}$$

De acordo com a Figura 1 o rendimento máximo para 200 GPM é de aproximadamente 75% e, a menor velocidade específica de rotação para este valor é de aproximadamente 2094. Acima desta velocidade específica o rendimento fica constante.

$$\begin{aligned}
N_s = & 1696941,29528809.\eta^6 - 4322631,02394802.\eta^5 & \text{Equação 19} \\
& + 4489619,71437951.\eta^4 \\
& - 2416532,09542283.\eta^3 \\
& + 708224,26086729.\eta^2 \\
& - 106072,575505751.\eta \\
& + 6454,11728356262
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
N_s = & 9593382,43694973.\eta^2 - 13450083,388567.\eta & \text{Equação 20} \\
& + 4715801,5119968
\end{aligned}$$

De acordo com a Figura 1 o rendimento máximo para 100 GPM é de aproximadamente 71% e, a menor velocidade específica de rotação para este valor é de aproximadamente 2266. Acima desta velocidade específica o rendimento fica constante.

A Figura 2 apresenta as curvas de velocidade específica em função da eficiência e da vazão obtidas com a Equação 9, Equação 10, Equação 11, Equação 12, Equação 13,

Equação 14, Equação 15, Equação 16, Equação 17, Equação 18, Equação 19 e Equação 20.

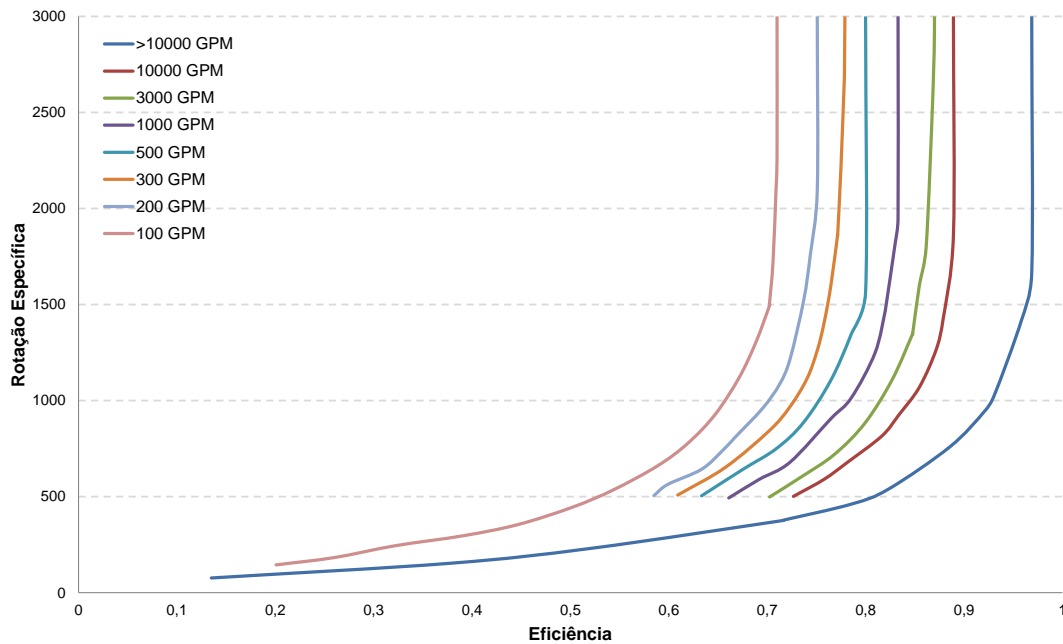


Figura 2 – Velocidade específica em função da eficiência e da vazão obtidas pelas equações

É importante salientar que as características obtidas por esse método servem para fornecer uma primeira base para escolha do equipamento e para permitir que o projeto possa avançar. Cada fabricante, de acordo com seus métodos e forma de construção e projeto, irá determinar a melhor quantidade de estágios.

3.6 Método de correção das curvas características em função da viscosidade

Bombas centrífugas submetidas à operação com fluidos viscosos estão sujeitas a alterações nas suas curvas de performance. Atualmente, dois métodos desenvolvidos pelo Hydraulic Institute são amplamente utilizados. Na referência 8.3 é apresentado o método mais novo chamado na planilha de Método A, na referência 8.2 o método mais antigo chamado de método B.

O Stoner Pipeline Simulator™ utiliza como sua forma de cálculo o método B. Na planilha desenvolvida o usuário pode optar por um dos dois métodos ou preferir que a programação selecione. Caso esta última seja a opção, a planilha irá optar

preferencialmente pelo Método B, visto que, este método é utilizado pelo Stoner Pipeline Simulator™ que é o *software* o qual a modelagem desenvolvida será aplicada.

Conforme será apresentado no item 3.6.2, o método B possui limitantes. Desta forma, quando selecionado “automático” a planilha irá avaliar se é possível ou não utilizar o método B. Caso não seja possível, ela realizará os cálculos utilizando o método A. Sempre que selecionado o “automático” a célula ao lado irá informar que método está sendo aplicado. A seguir será apresentada uma rápida descrição do funcionamento de ambos os métodos.

3.6.1

Método A

Este método propõe o cálculo de um fator de performance B conforme apresentado na Equação 21.

$$B = K \frac{(v_{VIS})^{0,5} \cdot (H_{BEP-W})^{0,0625}}{(Q_{BEP-W})^{0,375} \cdot (N)^{0,25}} \quad \text{Equação 21}$$

Onde:

B = Fator de Performance;

K = 16,5 para demais grandezas em unidades do SI ou 26,5 para unidades americanas (USCS);

Q = Vazão para água no BEP em m³/h (GPM);

V_{VIS} = Viscosidade cinemática em cSt;

H_{BEP-W} = *Head* por estágio para água em m (ft) no BEP e;

N = Rotação do impelidor em RPM.

Este parâmetro serve de entrada para a Figura 3 para obtenção dos coeficientes:

- C_H e C_Q coeficientes de correção do *head* no BEP e da vazão, respectivamente –
Curva 1;

- $C_{H-1,2\ BEP}$ coeficiente de correção do *head* numa vazão 120% da vazão do BEP –
Curva 2;

- $C_{H-0,8\ BEP}$ coeficiente de correção do *head* numa vazão 80% da vazão do BEP –
Curva 3 e;

- $C_{H-0,6\ BEP}$ coeficiente de correção do *head* numa vazão 60% da vazão do BEP –
Curva 4.

O ponto de *shut-off* não se altera em virtude da viscosidade dos produtos.

As curvas citadas foram modeladas como equações. A Equação 22, Equação 23, Equação 24 e a Equação 25 apresenta essas curvas para o fator B menor que 30. A Equação 26, Equação 27, Equação 28 e a Equação 29.

$$C_H \text{ e } C_Q = -6.10^{-7}.B^4 + 5.10^{-5}.B^3 - 1,2.10^{-3}.B^2 - 9,4.10^{-3}.B + 1,0154 \quad \text{Equação 22}$$

$$C_{H-1,2\ BEP} = -2.10^{-7}.B^4 + 2.10^{-5}.B^3 - 4.10^{-4}.B^2 - 1,78.10^{-2}.B + 1,0265 \quad \text{Equação 23}$$

$$C_{H-0,8\ BEP} = -2.10^{-7}.B^4 + 2.10^{-5}.B^3 - 3.10^{-4}.B^2 - 1,44.10^{-2}.B + 1,0216 \quad \text{Equação 24}$$

$$C_{H-0,6\ BEP} = -3.10^{-7}.B^4 + 3.10^{-5}.B^3 - 6.10^{-4}.B^2 - 7,5.10^{-3}.B + 1,0124 \quad \text{Equação 25}$$

$$C_H \text{ e } C_Q = -8.10^{-3}.B + 0,81 \quad \text{Equação 26}$$

$$C_{H-1,2\ BEP} = -1.10^{-2}.B + 0,81 \quad \text{Equação 27}$$

$$C_{H-0,8\ BEP} = -6.10^{-3}.B + 0,81 \quad \text{Equação 28}$$

$$C_{H-0,6\ BEP} = -5.10^{-3}.B + 0,86 \quad \text{Equação 29}$$

Segundo a referência bibliográfica 8.4, para os casos onde B for menor ou igual a um, C_H e C_Q assumem um valor unitário. Ainda segundo a mesma referência, nos casos onde $B > 40$, as curvas podem ser extrapoladas, porém, com uma grande incerteza e deve ser evitado.

A Tabela 1 apresenta o comparativo entre os valores do gráfico e os obtidos pelas equações apresentadas anteriormente para os coeficientes de correção do *head* e da vazão.

Tabela 1 – Comparativo entre os valores gráficos e os obtidos pelas equações para os fatores de correção da vazão e do *head* pelo método A

CH - CQ BEP	Equação 22 Equação 26	Erro	CH 1.2 BEP	Equação 23 Equação 27	Erro	CH 0.8 BEP	Equação 24 Equação 28	Erro	CH 0.6 BEP	Equação 25 Equação 29	Erro
1,00	1,00	0%	1,00	1,01	-1%	1,00	1,01	-1%	1,00	1,00	0%
0,99	0,99	0%	0,99	0,99	0%	0,99	0,99	0%	0,99	1,00	-1%
0,98	0,98	0%	0,98	0,97	1%	0,98	0,98	0%	0,99	0,99	0%
0,97	0,96	1%	0,96	0,95	1%	0,97	0,96	1%	0,98	0,97	1%
0,95	0,94	1%	0,93	0,93	0%	0,95	0,94	1%	0,97	0,96	1%
0,93	0,93	0%	0,91	0,91	0%	0,93	0,93	0%	0,96	0,95	1%
0,91	0,91	0%	0,89	0,89	0%	0,91	0,91	0%	0,94	0,94	0%
0,89	0,89	0%	0,87	0,87	0%	0,89	0,90	-1%	0,92	0,93	-1%
0,87	0,87	0%	0,85	0,85	0%	0,88	0,88	-1%	0,90	0,92	-1%
0,84	0,85	-1%	0,82	0,83	-1%	0,86	0,87	-1%	0,89	0,90	-2%
0,68	0,65	4%	0,65	0,64	2%	0,73	0,74	-2%	0,79	0,81	-3%
0,57	0,57	0%	0,51	0,51	0%	0,63	0,63	0%	0,71	0,71	0%
0,49	0,49	0%	0,41	0,41	0%	0,57	0,57	0%	0,66	0,66	0%

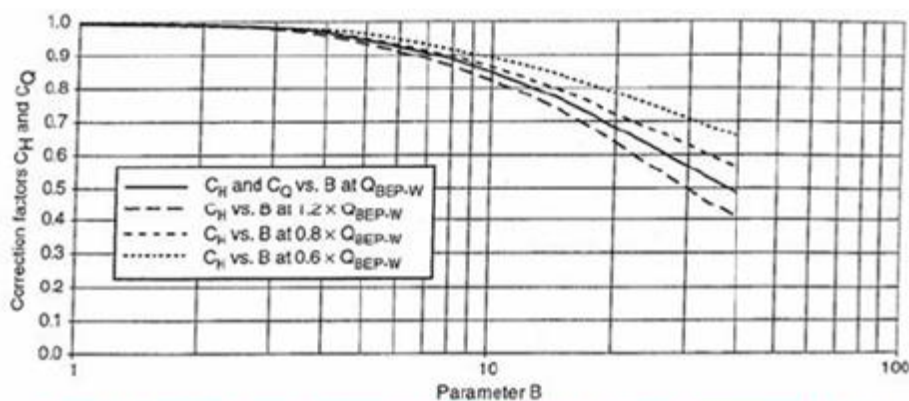


Figura 3 – Gráfico para obtenção dos fatores de correção do *head* e da vazão

A Figura 4 apresenta o fator de correção para a eficiência em função do fator B obtido na Equação 21.

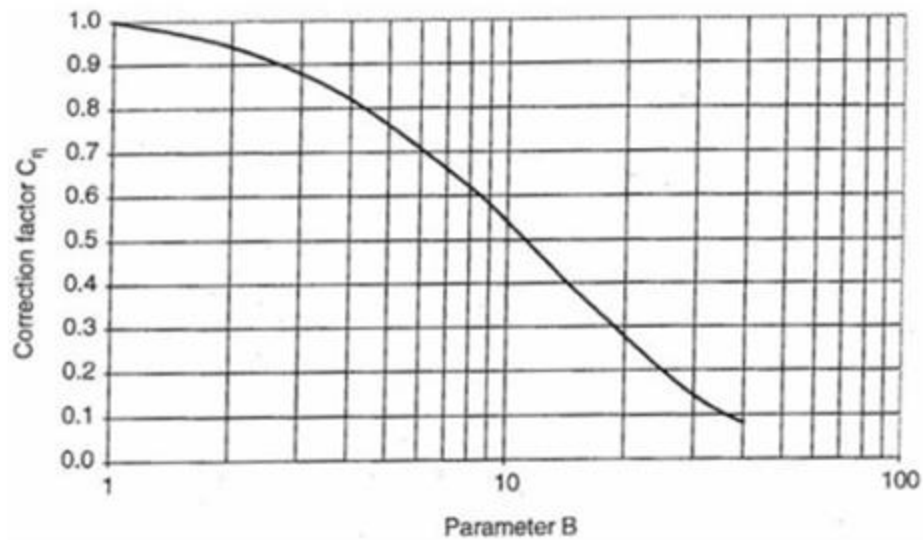


Figura 4 – Gráfico para obtenção dos fatores de correção da eficiência

Assim como feito para as equações anteriores, esta curva foi modelada como uma equação e apresentada na Equação 30.

$$C_{\eta} = 1,0507 \cdot e^{-0,066 \cdot B} \quad \text{Equação 30}$$

A Tabela 2 apresenta o comparativo entre os valores do gráfico e os obtidos pela equação apresentadas anteriormente.

Tabela 2 – Comparativo entre os valores gráficos e os obtidos pela equação para o fator de correção da eficiência pelo método A

C _η	Equação 30	Erro
1,00	0,98	2%
0,94	0,92	2%
0,87	0,86	1%
0,81	0,81	0%
0,76	0,76	1%
0,71	0,71	0%
0,66	0,66	0%
0,62	0,62	0%
0,58	0,58	0%
0,54	0,54	-1%
0,28	0,28	0%
0,15	0,15	3%
0,08	0,07	6%

3.6.2

Método B

Este método propõe uma forma de cálculo distinta para duas faixas de vazão. Os coeficientes citados no item 3.6.1 são obtidos através de um gráfico. A Figura 5 apresenta esta carta para correção de viscosidade para vazões até 100 GPM e, a Figura 6 para valores superiores a 100 GPM.

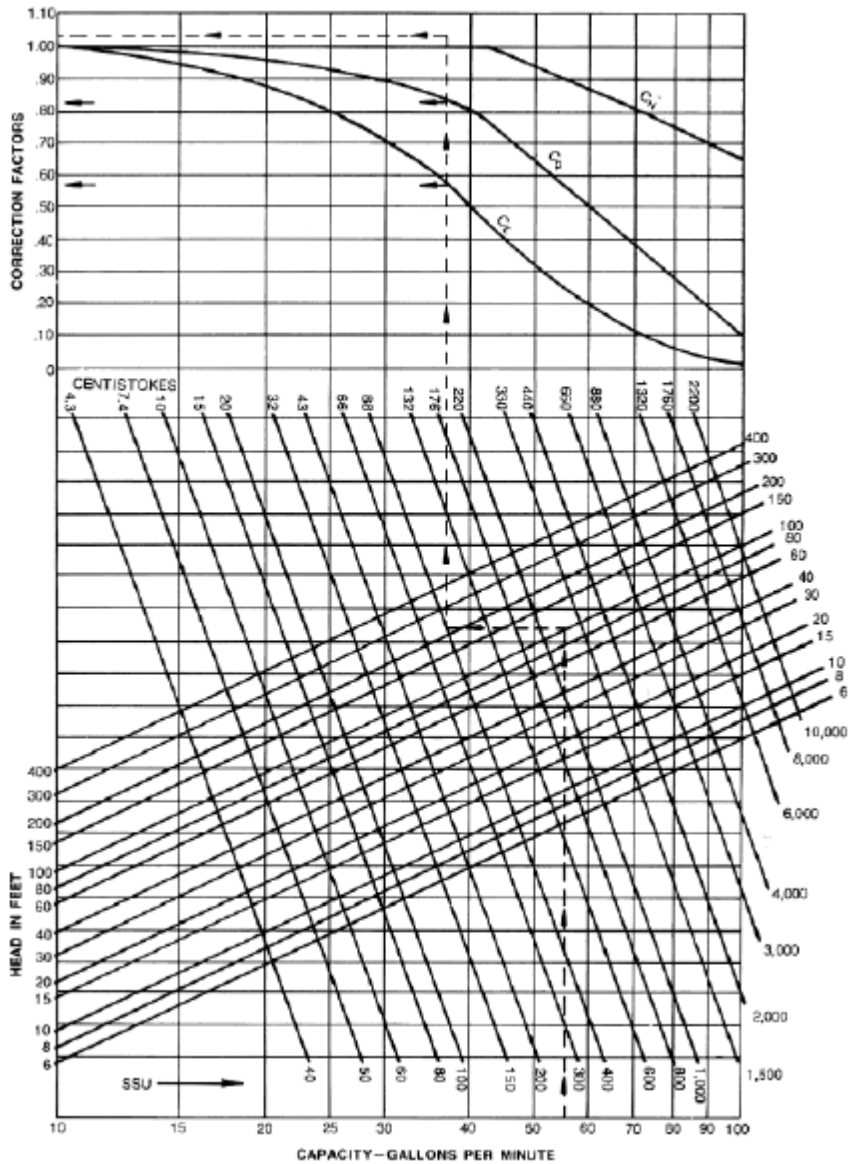


Figura 5 – Carta para correção de viscosidade para vazões inferiores a 100 GPM

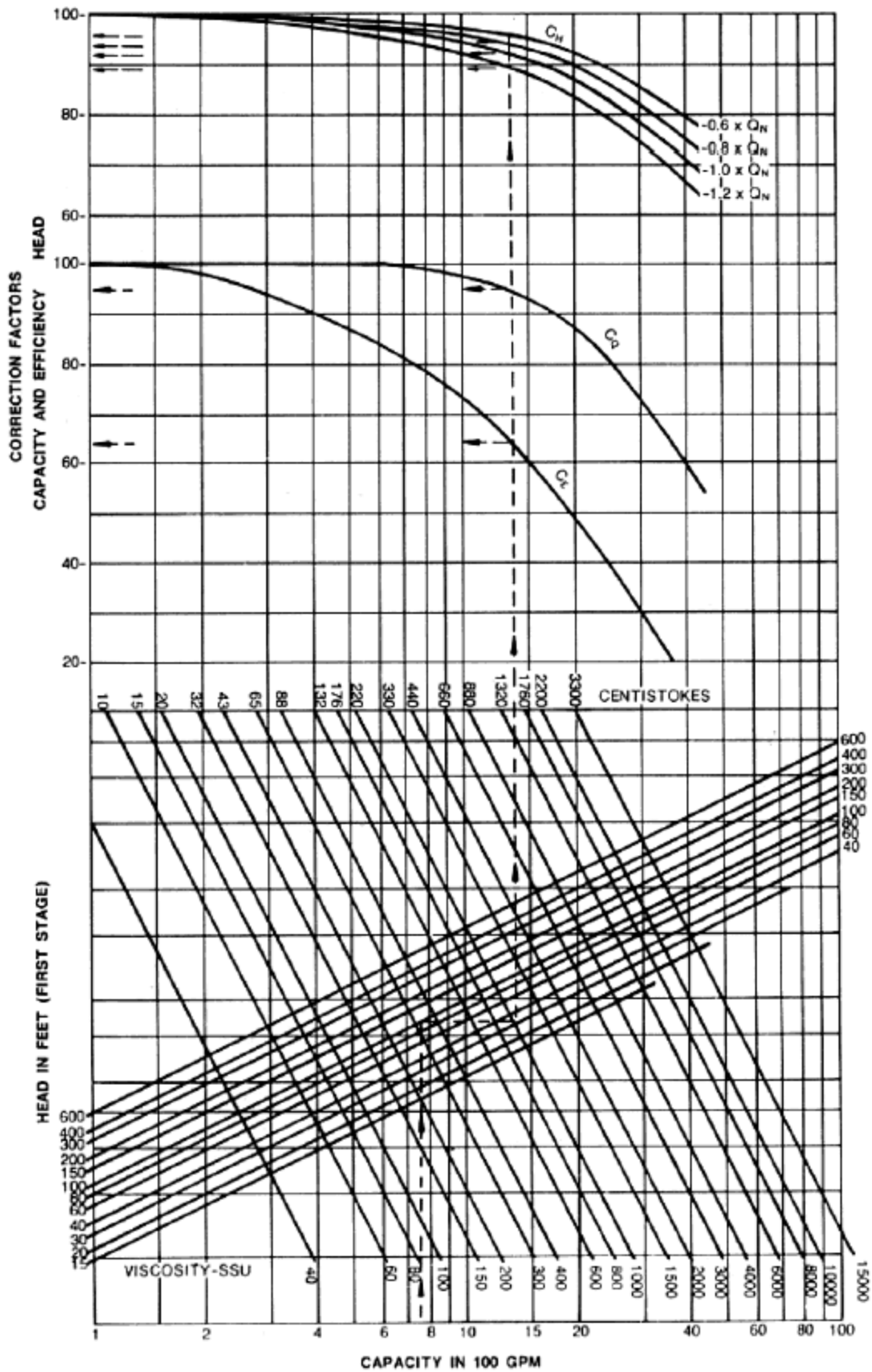


Figura 6 – Carta para correção de viscosidade para vazões superiores a 100 GPM

O procedimento é bastante simples devendo o usuário iniciar o processo no eixo horizontal inferior com a vazão do BEP em GPM. A partir desse ponto deve-se traçar

uma reta vertical até a intersecção com a reta diagonal referente ao *head* por estágio correspondente. Neste ponto traça-se uma reta horizontal até o ponto de intersecção com a reta diagonal referente à viscosidade do fluido em cSt. Traçando-se uma reta vertical a partir do ponto encontrado tem-se os valores de C_H , $C_{H-1.2 \text{ BEP}}$, $C_{H-0.8 \text{ BEP}}$, $C_{H-0.6 \text{ BEP}}$, C_η e C_Q para vazões superiores a 100 GPM e C_H (apenas um fator de correção para todos os pontos), C_η e C_Q para vazões inferiores a 100 GPM.

A referência bibliográfica 8.5 propõe assim como este trabalho equações que representam os valores propostos pela Figura 5 e Figura 6. A Equação 32, Equação 33 e Equação 34 apresenta essas equações para vazões inferiores a 100 GPM e a Equação 26, Equação 27, Equação 28 e a Equação 29 para vazões superiores a 100 GPM. Nestas equações é utilizado um termo chamado de coeficiente de correção definido pela Equação 31.

$$CC = \frac{8 \cdot v^{1/2}}{H^{1/8} \cdot Q^{1/4}} \quad \text{Equação 31}$$

Onde:

v = viscosidade em cSt;

H = *Head* no BEP em ft e;

Q = Vazão no BEP em GPM.

$$C_Q = 1,016147 - 4,256395 \cdot 10^{-3} \cdot CC - 8,609936 \cdot 10^{-4} \cdot CC^2 + 1,866053 \cdot 10^{-5} \cdot CC^3 - 1,174946 \cdot 10^{-7} \cdot CC^4 \quad \text{Equação 32}$$

Limite de $C_Q = 0,10 \leq C_Q \leq 1$

$$C_\eta = 1,079527 - 3,413289 \cdot 10^{-2} \cdot CC - 2,747891 \cdot 10^{-4} \cdot CC^2 + 1,927002 \cdot 10^{-5} \cdot CC^3 - 1,649636 \cdot 10^{-7} \cdot CC^4 \quad \text{Equação 33}$$

Limite de $C_\eta = 0,03 \leq C_\eta \leq 1$

$$C_H = 0,9724525 + 8,957773 \cdot 10^{-3} \cdot CC - 6,784939 \cdot 10^{-4} \cdot CC^2 + 1,085695 \cdot 10^{-5} \cdot CC^3 - 5,587139 \cdot 10^{-8} \cdot CC^4 \quad \text{Equação 34}$$

Limite de $C_H = 0,67 \leq C_H \leq 1$

O limite para utilização da Equação 32, Equação 33 e Equação 34 é:

- Viscosidade entre 4,3 e 2200 cSt;
- *Head* por estágio entre 6 e 400 ft e;
- Vazão de operação entre 10 e 100 GPM.

$$C_Q = 0,9949888 + 4,000308 \cdot 10^{-3} \cdot CC - 7,056285 \cdot 10^{-4} \cdot CC^2 + 8,27823 \cdot 10^{-6} \cdot CC^3 \quad \text{Equação 35}$$

Limite de $C_Q = 0,53 \leq C_Q \leq 1$

$$C_n = 1,03884 - 3,450184 \cdot 10^{-2} \cdot CC + 2,726508 \cdot 10^{-4} \cdot CC^2 + 5,229687 \cdot 10^{-7} \cdot CC^3 \quad \text{Equação 36}$$

Limite de $C_n = 0,19 \leq C_n \leq 1$

$$C_{H-0,6 \text{ BEP}} = 1,003993 - 1,927655 \cdot 10^{-3} \cdot CC - 9,839067 \cdot 10^{-5} \cdot CC^2 - 1,012695 \cdot 10^{-6} \cdot CC^3 \quad \text{Equação 37}$$

Limite de $C_{H-0,6 \text{ BEP}} = 0,78 \leq C_H \leq 1$

$$C_{H-0,8 \text{ BEP}} = 1,004737 - 2,562881 \cdot 10^{-3} \cdot CC - 2,03951 \cdot 10^{-4} \cdot CC^2 + 2,132138 \cdot 10^{-6} \cdot CC^3 \quad \text{Equação 38}$$

Limite de $C_{H-0,8 \text{ BEP}} = 0,72 \leq C_H \leq 1$

$$C_{H-1,0 \text{ BEP}} = 1,011042 - 5,992841 \cdot 10^{-3} \cdot CC - 1,053868 \cdot 10^{-4} \cdot CC^2 + 9,923402 \cdot 10^{-7} \cdot CC^3 \quad \text{Equação 39}$$

Limite de $C_{H-1,0 \text{ BEP}} = 0,68 \leq C_H \leq 1$

$$C_{H-1,2 \text{ BEP}} = 1,010846 - 9,467801 \cdot 10^{-3} \cdot CC + 1,715598 \cdot 10^{-5} \cdot CC^2 - 7,677713 \cdot 10^{-7} \cdot CC^3 \quad \text{Equação 40}$$

Limite de $C_{H-1,2 \text{ BEP}} = 0,63 \leq C_H \leq 1$

O limite para utilização da Equação 37, Equação 38, Equação 39 e Equação 40 é:

- Viscosidade entre 4,3 e 3.300 cSt;
- *Head* por estágio entre 15 e 600 ft e;
- Vazão de operação entre 100 e 10.000 GPM podendo valer 100 GPM.

3.7

Definição das curvas características de *head* e eficiência vs vazão

A planilha tem como objetivo exportar um sistema de bombeamento para uso no Stoner Pipeline Simulator™. Este *software* permite que o usuário entre com as curvas características da bomba.

Na etapa de projeto do oleoduto o projetista deseja que a bomba possua o maior rendimento possível para a sua operação. A planilha através das faixas de rendimento em função da rotação específica e da vazão conforme ilustrado na Figura 1 indica ao usuário qual faixa de eficiência a bomba principal deve operar conforme apresentado na Figura 13.

A planilha gera uma curva eficiência vs vazão para água. Esta curva ao receber os cálculos de correção de viscosidade (caso seja necessário) tem seus valores alterados e apresentados ao usuário. A eficiência corrigida pela viscosidade é utilizada para o dimensionamento do acionador.

A curva de eficiência vs vazão foi modelada de acordo com uma equação de quadrática conforme apresentado na Equação 41. Cada ponto na curva eficiência vs vazão será um ponto de coordenadas ($Q_{\text{ponto}}, \eta_{\text{ponto}}$), logo, para Q_{ponto} nulo o rendimento é nulo.

$$\eta_{\text{ponto-H}_2\text{O}} = \left(\frac{2 \cdot \eta_{\text{máx-H}_2\text{O}}}{Q_{\text{dim bomba}}} \right) \cdot Q_{\text{ponto}} - \left(\frac{\eta_{\text{máx-H}_2\text{O}}}{Q_{\text{dim bomba}}} \right) \cdot Q_{\text{ponto}}^2 \quad \text{Equação 41}$$

A curva de *head* vs vazão foi modelada para atender essas condições com o produto desejado. Assim sendo, com a curva traçada de acordo com a Equação 42, ela é convertida para água, ou seja, seus valores de *head* em cada ponto (BEP, 0,60 BEP, 0,80 BEP e 1,20 BEP) são divididos pelos fatores C_H , $C_{H-1.2 \text{ BEP}}$, $C_{H-0.8 \text{ BEP}}$ e $C_{H-0.6 \text{ BEP}}$.

Cada ponto na curva *head vs vazão* será um ponto de coordenadas ($Q_{\text{ponto-produto}}, H_{\text{ponto-produto}}$), logo, para Q_{ponto} nulo o *head* vale o *head* do *shut-off*.

$$H_{\text{ponto-produto}} = H_{\text{shut-off}} - \left(\frac{H_{\text{shut-off}} - H_{\text{BEP-produto}}}{Q_{\text{dim bomba}}} \right)^2 \cdot Q_{\text{dim bomba}}^2 \quad \text{Equação 42}$$

A bomba é dimensionada para atender a demanda de vazão para o produto desejado. Desta forma, para obter a vazão da curva para água é necessário dividir os valores de vazão para o produto pelo coeficiente C_Q e assim, obter os dados para água.

De maneira resumida pode-se dizer que a curva eficiência vs vazão é definida para água e seus valores são multiplicados por C_η para obtermos os valores de rendimento para o produto a ser bombeado. A curva *head vs vazão* é definida para o produto e seus valores são divididos por C_H , $C_{H-1.2 \text{ BEP}}$, $C_{H-0.8 \text{ BEP}}$ e $C_{H-0.6 \text{ BEP}}$ para obtermos os valores de *head* para água.

4.0

Dados de entrada do aplicativo

As abas em azul da planilha apresentam campos que devem ser preenchidos pelo usuário com as informações inerentes ao sistema a ser estudado. Esses campos (células) também estão na cor azul. As células de cor coral são respostas da planilha.

O usuário pode optar usar ou não a estimativa da quantidade de estágios da bomba e a estimativa do NPSH requerido pela mesma. Caso não seja necessário pode-se optar por informar ambos os dados. No dimensionamento de bombas para operação com fluidos viscosos pode-se ou não, corrigir as curvas para estes fluidos. O usuário dispõe de três opções para a correção: método A, método B e automático (onde o aplicativo irá escolher qual método usar). Pode-se ainda optar pela não utilização da correção de viscosidade marcando a opção “nenhum”. No entanto alguns métodos podem não ser aplicáveis para a condição desejada. Nestas ocasiões o aplicativo irá informar se é necessária a alteração. No item 3.6 será apresentada a forma de cálculo de cada método. É ainda possível o dimensionamento com ou sem dupla sucção nas bombas principais. Nesta área é ainda possível definir se é desejado ou não a estimativa do NPSH requerido, verificar se de acordo com a operação é ou não necessário o uso de bombas auxiliares e escolher se deseja apresentar uma pressão de envio ou incluir um perfil para que seja calculado.

A Figura 7 apresenta a área da planilha para preenchimento destas informações.

Bombas Auxiliares	
Arranjo	Paralelo
Quantidade	0
Bombas Principais	
Arranjo	Paralelo
Quantidade	2
Deseja que a planilha estime a quantidade de estágios da bomba principal?	NÃO
Caso a resposta anterior seja não, qual a quantidade de estágios que deseja?	1
Escolha o método para realizar os cálculos de correção de viscosidade	Nenhum
Usar dupla sucção nas bombas principais?	NÃO
Deseja que a planilha estime o NPSH requerido?	NÃO
Caso a resposta anterior seja não, qual o NPSH requerido para a (s) bomba (s) principal (is)?	15.00
Deseja informar a pressão no scraper de envio ou calcular através da inclusão do perfil?	Inserir Perfil
Necessita Auxiliar?	SIM
NPSH REQUERIDO ESTIMADO EM	
	16.85 m

SEM CORREÇÃO DE VISCOSIDADE

CLIQUE EM INSERIR PERFIL

Figura 7 – Dados de entrada

A seguir serão apresentados os dados de entrada para a correta determinação da(s) bomba(s) desejada(s).

4.1

Dados do produto

O fluido a ser bombeado consiste importante fator para o dimensionamento das bombas. São três os campos a serem preenchidos: viscosidade, densidade e pressão de vapor todos na temperatura de bombeio.

A densidade deve ser informada em kg/m^3 , a viscosidade pode ser informada em cSt, cP ou Pa.s. A unidade para a pressão de vapor do fluido deve ser $\text{kgf/cm}^2\text{A}$.

A Figura 8 apresenta a região da planilha para inserção destas informações.

Dados de Entrada - Fluido		Unidades
Viscosidade @ TO	200.00	cP
Densidade @ TO	1030.00	kg/m ³
Pressão de vapor @ TO	0.06	kgf/cm ² A

Figura 8 – Dados de entrada do fluido

4.2

Informações da instalação e operação

A determinação da curva teórica das bombas do sistema de bombeamento necessita de dados característicos da instalação e da operação. As curvas teóricas serão definidas a partir dos dados operacionais e das instalações.

Um dos dados mais importantes a serem inseridos consiste na pressão de envio a montante do *scraper* de envio. Este dado pode ser obtido no Stoner Pipeline Simulator™ inserindo-se no nó a montante do *scraper* um tanque de vazão constante (vazão de operação) e obtendo-se assim, a pressão necessária para envio de tal produto a determinada vazão pelo sistema. Na hipótese disto não ser possível, pode-se incluir o perfil do oleoduto selecionando-se “Inserir Perfil” e clicando em “Inserir Perfil”. Desta forma é possível a inclusão de uma tabela de pontos da forma comprimento desenvolvido em função da cota, ambos em metro. Na aba de inclusão de perfil ao clicar em “Cálculo Hidráulico” a Figura 9 será apresentada.

Método	Calcular através da	Pressão Recebimento Desejada	
Características Estruturais	Diâmetro Externo	16	pol
	Espessura	0.25	pol
Características Escoamento	Velocidade Esc.	2.74	m/s
	Reynolds	5552	
	Fator de Atrito	0.04	
	Escoamento	TURBULENTO	
	ΔP	7260492	Pa
	ΔP	74.06	kgf/cm ²
Dados Ponto Crítico	Posição Pto. Crítico	21959.478	m
	Cota Ponto Crítico	640.000	m
	P. Mín. Duto	1.00	kgf/cm ² G
Dados Recebimento	P. Mín. Rec.	5.55	kgf/cm ² G
	P. Rec. Desejada	7.00	kgf/cm ² G
Dados Envio	Pressão Envio	15.72	kgf/cm ² G
	Head Envio	780.78	m

Figura 9 – Dados das linhas de sucção e descarga

Nesta aba pode-se customizar as células de cor azul. Existem duas formas de cálculo do gradiente hidráulico. A primeira consiste em definir as pressões com base na pressão mínima de operação em regime permanente. O usuário pode inserir a pressão mínima aceita na célula ao lado direito de “P. Mín. Duto”. Com base nesta informação é retornada abaixo a pressão mínima de recebimento para que esta condição seja atendida. O segundo método consiste em sabendo a pressão mínima de recebimento para atender a condição definida anteriormente é possível que seja inserido na célula a direita de “P. Rec. Desejada” o valor desejado. O método de cálculo escolhido é definido na primeira linha em “Método”.

A planilha gera um gráfico de gradiente hidráulico e pressão em função do comprimento desenvolvido. A Figura 11 apresenta esta saída. Todos estes cálculos em função do perfil consideram uma operação isotérmica, em regime permanente, fluido incompressível e sem rebombeio. Caso seja necessário algum alinhamento com rebombeio é recomendável que o duto seja segmentado em trechos entre os envios e os recebimentos e analisado individualmente em uma planilha individual.

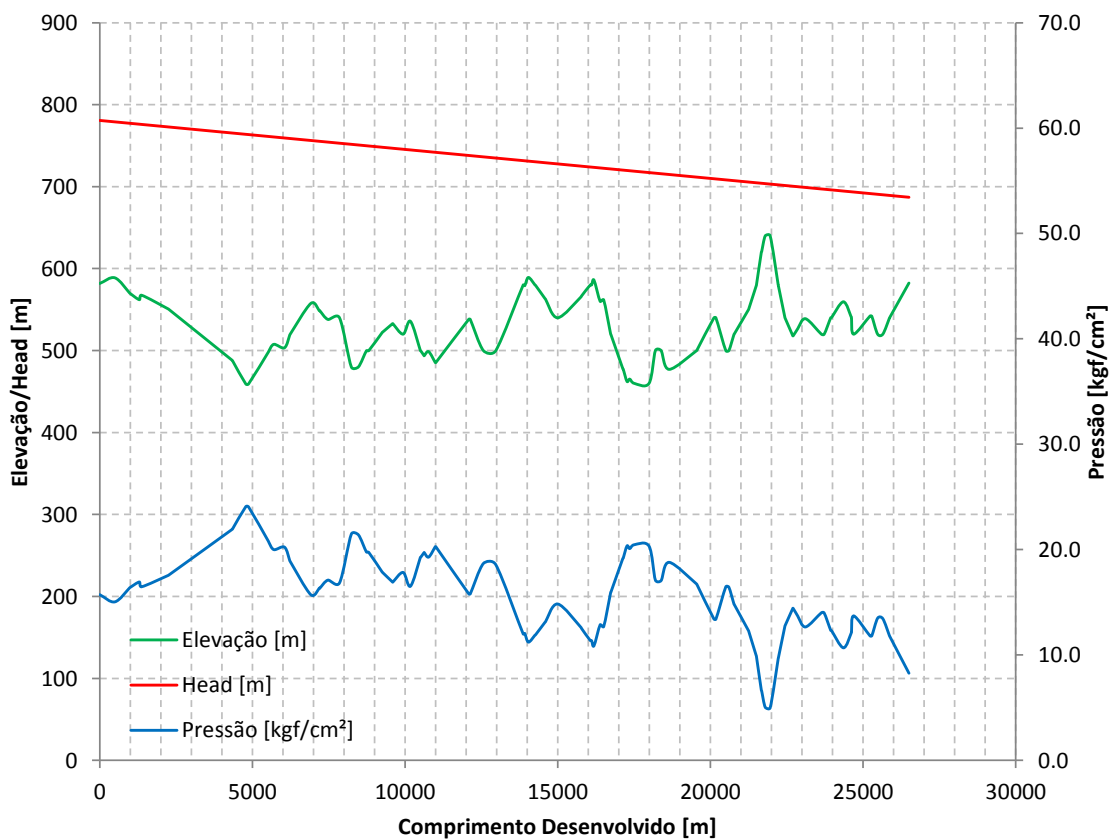


Figura 10 – Gradiente Hidráulico e Pressão

O dimensionamento da bomba é na maioria dos casos realizado para atender a uma vazão de operação. Conservativamente, esta vazão deve ser obtida na condição mais crítica de operação, ou seja, com o produto mais viscoso (no caso da operação ocorrer com diversos produtos) e com a menor pressão de sucção. A menor pressão de sucção pode ser obtida pelo tanque vazio. Este dado pode ser considerado inserindo-se pressão do tanque como 0 kgf/cm²G. Caso não seja este o objetivo qualquer valor pode ser considerado no dimensionamento.

As linhas internas foram divididas em três trechos:

- Linha de sucção: linha interligando o tanque à sucção das bombas auxiliares ou principais. No caso da não existência das auxiliares;

-Linha intermediária: linha interligando a descarga das bombas auxiliares a sucção das principais. No caso da não existência das auxiliares esta linha iniciará a jusante da linha de sucção;

- Linha de descarga: Linha interligando a descarga das bombas principais ao *scraper* de envio. Esta linha conecta-se a montante do *scraper*.

Os dados de espessura, diâmetro e rugosidade também devem ser informados. Caso seja necessário um maior detalhamento dessas linhas é possível a inclusão de dados para cálculo da perda de carga clicando-se no botão “Dados das linhas de Sucção e Descarga”. A tela disponível ao clicar neste botão é apresentada na Figura 11.

ACIDENTES	L/D	SUCÇÃO	INTERMEDIÁRIA	DESCARGA
		Quantidade	Quantidade	Quantidade
V.GLOBO	340	0	0	0
V.GAVETA	8	0	0	0
V.ESFERA	3	0	0	0
V.RET.PORT.	135	0	0	0
V.MACHO	18	0	0	0
CURVA 90	20	0	0	0
CURVA 45	16	0	0	0
REDUÇÃO 3/4	7	0	0	0
REDUÇÃO 1/2	11	0	0	0
REDUÇÃO 1/4	15	0	0	0
EXPANSÃO 3/4	20	0	0	0
EXPANSÃO 1/2	22	0	0	0
EXPANSÃO 1/4	32	0	0	0
TÊ LATERAL	60	0	0	0
TÊ DIRETO	20	0	0	0
ENTRADA	38	0	0	0
SAÍDA	67	0	0	0
L/D (total):		0	0	0
L acidentes (m)		0	0	0
TUBO (m)		750	0	2200
L equivalente (m)		750	0	2200

Modelo Stoner	Dados Saída - Bombas
Entrada	Dados Saída - Linhas
Cálculo Hidráulico	Inserir Perfil

Figura 11 – Dados das linhas de sucção e descarga

As células em azul são os dados que devem ser inseridos pelo usuário. A razão L/D considerada para cada elemento no sistema pode ser editada e a quantidade inserida.

A Figura 12 apresenta a região da planilha para inserção dos dados de operação e da instalação.

Dados de Entrada - Instalação e operação		Unidades
Pressão Tanque	0.00	kgf/cm ² G
Elevação Tanque - Sucção Auxiliar	8.00	m
Vazão Operação	1200	m ³ /h
Rug. Eq. Parede Tubo	0.0018	pol
Esp. Linha Sucção	0.500	pol
Diâmetro Linha Sucção	14.00	pol
Esp. Linha Desc. Aux - Suc. Pri.	0.250	pol
Diâmetro Linha Desc. Aux - Suc. Pri.	10.75	pol
Esp. Linha Desc.	0.250	pol
Diâmetro Linha Descarga	14.00	pol
Cota <i>Scraper</i> Envio	13.57	m
Pressão Envio Montante <i>Scraper</i>	33.00	kgf/cm ² G

Figura 12 – Dados de entrada da instalação e operação

Caso não haja um valor definido para o NPSH requerido das bombas principais, é possível utilizar um cálculo para estimativa. Este cálculo é apresentado no item 3.1.

4.3

Dados característicos do sistema de bombeamento

Nesta etapa é importante definir os limites e características das bombas a ser modeladas. Pela possibilidade da planilha avaliar a necessidade de bombas auxiliares deve-se inserir o NPSH requerido da bomba principal. Como resultado e usando como cálculo os dados anteriores a planilha informa se é ou não necessário o uso de bombas auxiliares conforme metodologia apresentada no item 3.2.

Um dos resultados apresentados é a curva de eficiência em função da vazão. Assim, necessita-se que seja informado qual a eficiência máxima da bomba para água. Pelos dados inseridos a planilha retorna uma faixa possível de eficiência para a operação das bombas principais.

Os limites de *head* e vazão das bombas auxiliares e principais podem ser customizados. A variação do *head* entre o BEP (*Best efficiency point* – Ponto de melhor eficiência) e o *shut-off*. Segundo a API 610 este valor no máximo pode ser 120% do *head* no BEP. O limite de vazão ainda segundo a mesma norma deve ser de no mínimo 120% da vazão do BEP.

A Figura 13 apresenta a região da planilha para inserção desses dados.

Dados de Entrada - Bombas		Unidades
Eficiência Máxima - Água - Auxiliar	80%	
Eficiência Máxima - Água - Principal	80%	
EFICIÊNCIA DA PRINCIPAL ESTIMADA ENTRE 70% - 87%		
Rotação Auxiliar	3550	RPM
Rotação Principal	3550	RPM
$\Delta Head Shut Off$ - BEP Aux.	20%	
$\Delta Head Shut Off$ - BEP Princ.	20%	
$\Delta Vazão$ BEP - Máx. Aux.	20%	
$\Delta Vazão$ BEP - Máx. Princ.	20%	

Figura 13 – Dados de entrada das bombas

5.0

Dados de saída do aplicativo

5.1

Perda de carga tubulações

A forma de saída dos valores obtidos para as tubulações está apresentada na Figura 14.

Dados de Saída - Linha de descarga			Unidades
Cálculo da Perda de Carga - Descarga	Velocidade de Escoamento	2,92	m/s
	Número de Reynolds	5,05E+04	
	Fator de Atrito	0,021890	
	Escoamento	TURBULENTO	
	ΔP Linha Descarga	322853,18	Pa
	ΔP Linha Descarga	3,29	kgf/cm ²
Dados de Saída - Linha intermediária			Unidades
Cálculo da Perda de Carga - Intermediária	Velocidade de Escoamento	1,04	m/s
	Número de Reynolds	3,02E+04	
	Fator de Atrito	0,023949	
	Escoamento	TURBULENTO	
	ΔP Linha Intermediária	4507,99	Pa
	ΔP Linha Intermediária	0,05	kgf/cm ²
Dados de Saída - Linha sucção			Unidades
Cálculo da Perda de Carga - Sucção	Velocidade de Escoamento	0,73	m/s
	Número de Reynolds	2,53E+04	
	Fator de Atrito	0,024849	
	Escoamento	TURBULENTO	
	ΔP Linha Sucção	3568,32	Pa
	ΔP Linha Sucção	0,04	kgf/cm ²

Figura 14 – Dados de saída das tubulações

5.2

Bombas auxiliares

A saída da planilha para os dados dimensionados das bombas auxiliares está apresentada na Figura 15.

Dados de Saída - Bombas Auxiliares			Unidades
Dados Saída das Bombas Auxiliares	Pressão Sucção	0.19	kgf/cm ² G
	Pressão Descarga	1.61	kgf/cm ² G
	P. de Des. - Sistema Auxiliar	1.61	kgf/cm ² G
	<i>Head</i>	13.76	m
	<i>Head Shut Off</i>	16.51	m
	Vazão por Bomba	500.00	m ³ /h
	Vazão Máxima por Bomba	600.00	m ³ /h
	Potência - BEP / Água	31.34	HP
Potência - BEP / Produto	32.35	HP	

Figura 15 – Dados de saída das bombas auxiliares

Para fins de avaliação visual a planilha exporta as curvas de performance plotadas como apresentado na Figura 16. Esta figura apresenta as curvas de performance para água e para um produto de viscosidade alta efetuando os cálculos de correção.

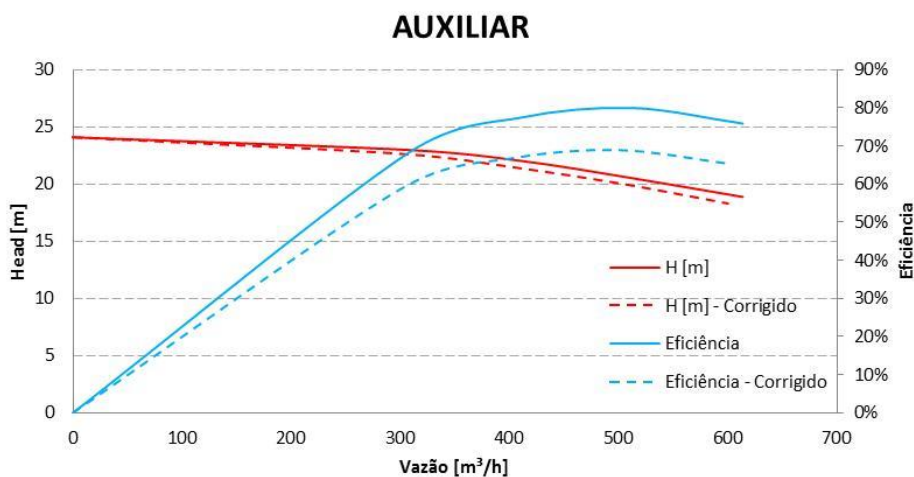


Figura 16 – Curvas de performance para as bombas auxiliares

O procedimento para elaboração das curvas será melhor explicado no item 3.6.

5.3

Bombas principais

A saída da planilha para os dados dimensionados das bombas principais está apresentada na Figura 17.

Dados de Saída - Bombas Principais			Unidades
Dados Saída das Bombas Principais	Pressão Sucção	1.61	kgf/cm ² G
	Pressão Descarga	37.56	kgf/cm ² G
	Pressão Diferencial	35.95	kgf/cm ² G
	P. de Des. - Sistema Principal	37.56	kgf/cm ² G
	<i>Head</i>	349.04	m
	<i>Head Shut Off</i>	440.41	m
	<i>Head por estágio</i>	349.04	
	Vazão por Bomba	250.00	m ³ /h
	Vazão Máxima por Bomba	300.00	m ³ /h
	Eficiência BEP / Produto	62%	
Potência - BEP / Água	440.79	HP	
Potência - BEP / Produto	531.17	HP	
Quantidade de Estágios	1		
Rotação Específica	598		

Figura 17 – Dados de saída das bombas principais

Para fins de avaliação visual a planilha exporta as curvas de performance plotadas como apresentado na Figura 18. A figura apresenta as curvas de performance para água e para um produto de viscosidade alta efetuando os cálculos de correção.

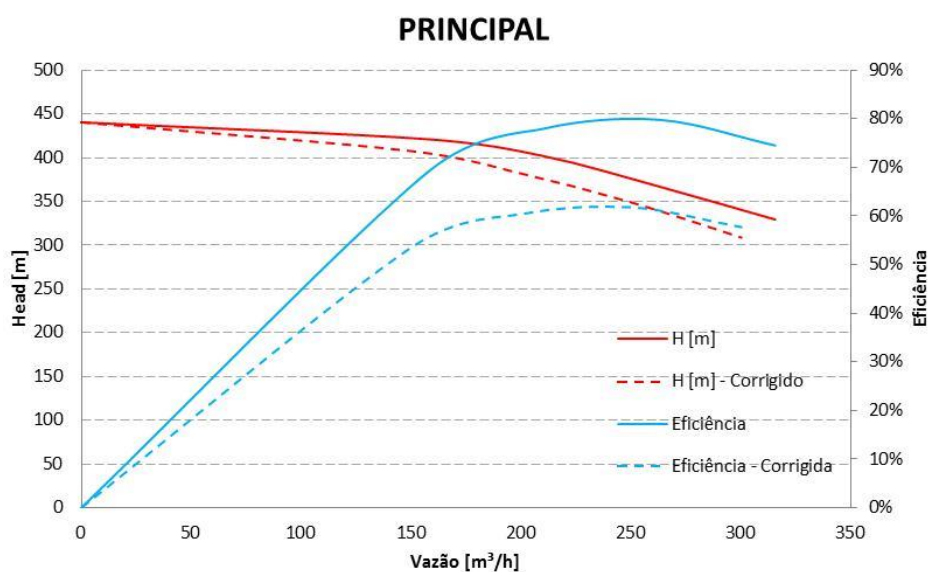


Figura 18 – Curvas de performance para as bombas principais

O procedimento para elaboração das curvas será melhor explicado no item 3.6.

5.4

Modelo Stoner Pipeline Simulator™

Na aba Entrada, existe um botão “Modelo Stoner”. Ao clicar neste botão o usuário encontrará o modelo pronto com a sintaxe padrão do *software* para inclusão no arquivo.inprep. Um exemplo do modelo para ser exportado encontra-se na Figura 19.

```
/*BOMBA AUXILIAR
P      B1      NO_10      NO_100      3550      1
-      3550      0.00      1.00      1.00
+      HEADB1      1      1      3550
+      EFFB1      1      1      3550
+      STAGES      1
+      DISCHARGE CHECK      0.0001      1.00
/*BOMBA PRINCIPAL
P      PR_01      NODE24      NODE10      3550      185
-      3550      183.55      634.41      50.00
+      HEADB2      1      1      3550
+      EFFB2      1      1      3550
+      STAGES      6
+      DISCHARGE CHECK      0.0001      50.00

) /*FIM DA MACRO

D      HEADB1      HEAD
1.0      1.0      1.0      1.0      1.0      0.0
0      1      1      1      1      2

D      EFFB1      EFFI
0.00      0.67      0.77      0.80      0.77
0      1      1      1      1

D      HEADB2      HEAD
761.3      715.6      680.1      634.41      578.6      0.0
0      30      40      50      60      61

D      EFFB2      EFFI
0.00      0.53      0.60      0.63      0.60
0      30      40      50      60
```

Figura 19 – Modelo Stoner Pipeline Simulator™

6.0

Resultados

6.1 Validação dos métodos de estimativa de NPSH requerido e da quantidade de estágios

Com o objetivo de validar os métodos desenvolvidos no item 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5 e 3.6 foram gerados três casos conforme apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Casos gerados para validação

Caso	ΔP na bomba principal [kgf/cm ²]	Vazão [m ³ /h]	Massa Específica [kg/m ³]	Viscosidade [cP]	Rotação [RPM]	Eficiência
Caso 1	70	400	930	8,40	2960	81 %
Caso 2	50	200	997	250	2960	78%/54% ¹
Caso 3	20	100	710	0,40	2980	46%

Para atender os casos foram obtidas bombas no site da Sulzer na referência 8.6. A Tabela 4 disponibiliza os valores obtidos no site da Sulzer e os obtidos pela planilha.

Tabela 4 – Validação dos métodos

Caso	Estágios		NPSH requerido [m]		Modelo Bomba Sulzer
	Referência 8.6	Planilha	Referência 8.6	Planilha	
Caso 1	5	5	8,99	10,09	CP-10x10x13.5A
Caso 2 – Método A	5	5	2,89	6,36 ²	GSG 100-300 (C)(Bd)
Caso 3	2	2	2,77	4,04	BBT 3x6x16-1

¹ Eficiência após a correção para a viscosidade do produto

² Não foi desenvolvido nenhum método para correção do NPSH requerido em função da viscosidade

Para avaliar a eficiência dessa formulação, foi realizada uma comparação entre o teórico e uma bomba centrífuga real da Sulzer utilizada para bombeio de claros com as características de acordo com a Tabela 5.

Tabela 5 – Características da bomba Sulzer SBC/GSG 151-330/4

Dados	Bomba
Fabricante da bomba	Sulzer do Brasil
Tipo	Centrífuga
Modelo	GSG151-330/4
Produto	Claros
Estágios	4
Diâmetro do Rotor (mm)	324
Rotação da Bomba (RPM)	3550
NPSH (m)	12,5
Vazão Nominal (m³/h)	350
Vazão Mínima (m³/h)	*
Fabricante do motor	TOSHIBA
Modelo	MIRK
Potência Nominal (cv)	1019
Potência Máxima (cv)	1200
Rotação (RPM)	3550
Frequência (HZ)	60
Tensão (V)	4000
Fator de Serviço	1
Corrente nominal do motor (A)	153

Conforme apresentado o NPSH_R vale 12,5 metros. Segundo o método utilizado pela planilha o valor obtido foi de 13,76 metros um erro de aproximadamente 10%.

6.2 Dados operacionais obtidos pelo aplicativo comparados com os valores obtidos no Stoner Pipeline Simulator™

Foram dimensionados dois casos para comparação dos valores obtidos pelo aplicativo em comparação com os determinados pelo Stoner Pipeline Simulator™. O primeiro caso consiste no dimensionamento do sistema de bombeamento conforme apresentado na Figura 20. Este sistema irá enviar um produto com característica semelhante a diesel com viscosidade de 8,4 cP e massa específica de 890 kg/m³ e será chamado neste trabalho de Caso Claros. No segundo caso foi elaborado um sistema de bombeamento de acordo com a Figura 21 para envio de um produto de viscosidade 200 cP e massa específica 930 kg/m³ e será chamado neste trabalho de Caso Petróleo. Ambos os casos irão enviar os produtos por um perfil idêntico ao da Figura 10.

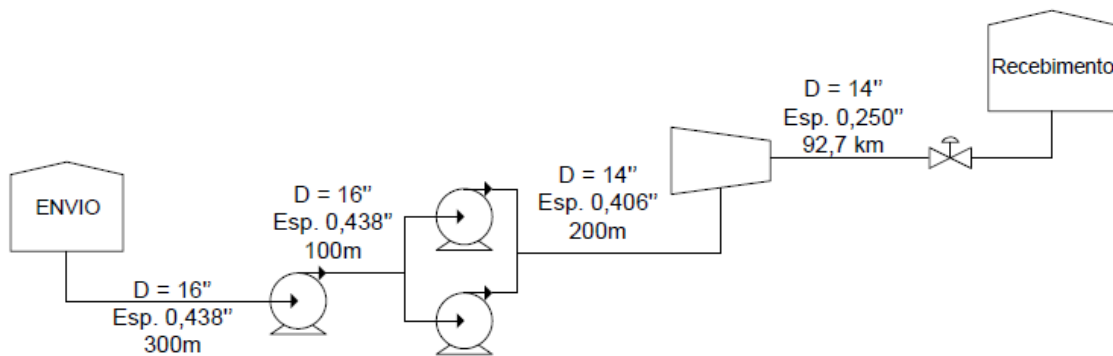


Figura 20 – Sistema de Bombeamento para o Caso Claros

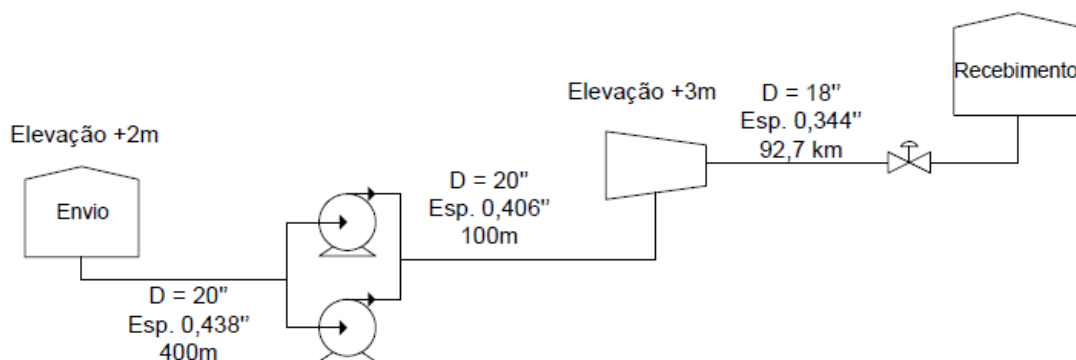


Figura 21 – Sistema de Bombeamento para o Caso Petróleo

O dimensionamento do Caso Claros foi feito utilizando o método apresentado no item 4.2 pela inclusão de perfil. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 6 sendo estes confrontados com os resultados da simulação no Stoner Pipeline Simulator™.

Tabela 6 – Resultados para o Caso Claros

Caso Claros	Pressão Tanque Envio	Auxiliar		Principal		Pressão Envio	Pressão Rec.	Vazão
		Pressão Sucção	Pressão Descarga	Pressão Sucção	Pressão Descarga			
[kgf/cm ²]								[m ³ /h]
Simulação	0,00	-0,27	1,45	1,36	148,93	148,60	4,0	802
Planilha	0,00	-0,25	1,48	1,40	149,22	148,89	4,0	800
Diferença	0,00%	7,30%	1,91%	2,50%	0,20%	0,20%	0,00%	0,25%

Os valores obtidos pela planilha encontram uma divergência baixa em relação ao modelo Stoner variando entre 0,20% e 7,30%. A vazão que é o valor mais importante nesta etapa de projeto apresentou um valor satisfatório sendo apenas 0,25% diferente do resultado obtido no simulador.

O dimensionamento do Caso Petróleo foi feito primeiramente utilizando o método apresentado no item 4.2 pela inclusão de perfil. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 6 sendo estes confrontados com os resultados da simulação no Stoner Pipeline Simulator™. A bomba dimensionada neste caso possui cinco estágios.

Tabela 7 – Resultados para o Caso Petróleo 1 modelados pelo perfil

Caso Petróleo	Pressão Tanque Envio	Pressão Sucção	Pressão Descarga	Pressão Envio	Pressão Rec.	Vazão
Simulação	0,00	-0,14	42,02	41,72	8,5	423
Planilha	0,00	-0,11	44,25	43,93	8,5	400
Diferença	0,00%	20,49%	5,31%	5,30%	0,00%	5,44%

As diferenças obtidas neste caso foi mais expressiva na pressão de sucção da bomba. Percentualmente este valor é alto, porém, numericamente não possui grande importância estando em 0,03 kgf/cm² aproximadamente.

A título de análise, foi refeita a simulação acima, porém, utilizando o método apresentado no item 4.2 com a inserção de um tanque de vazão definida no envio. Assim, com os valores de pressão de envio obtidos pela simulação, foi remodelada uma bomba e os resultados apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Resultados para o Caso Petróleo 2 modelados pelo perfil modelados pela pressão do tanque

Caso Petróleo	Pressão Tanque Envio	Pressão Sucção	Pressão Descarga	Pressão Envio	Pressão Rec.	Vazão
	[kgf/cm ²]					[m ³ /h]
Simulação	0,00	-0,15	40,07	39,77	8,5	390
Planilha	0,00	-0,11	40,15	39,84	8,5	400
Diferença	0,00%	22,11%	0,20%	0,17%	0,00%	2,56%

Os valores obtidos de forma geral são mais próximos dos simulados. Isto deve-se a maior precisão da pressão de envio neste caso, fornecida pelo simulador.

6.3 Cálculo da estimativa da quantidade de estágios

Com objetivo de ilustrar melhor as etapas de cálculo do método para estimativa da quantidade de estágios, será apresentado neste item um descritivo das operações. Será utilizada a condição de modelagem definida no primeiro Caso Petróleo.

A bomba deverá entregar no *scraper* de envio uma pressão de 43,93 kgf/cm² a uma vazão de 400 m³/h. Como o sistema de bombeamento dispõe de duas bombas em paralelo, a vazão em cada uma é de 200 m³/h. Nesta condição de operação é informado pela planilha que a eficiência para esta bomba está entre 66% e 83%. A eficiência será estimada em 80% no BEP para água. A rotação da bomba foi considerada 3550 RPM.

A vazão de 200 m³/h equivale a aproximadamente 880 GPM. De acordo com a Figura 2, as vazões mais próximas são 500 GPM e 1000 GPM. Com o rendimento de 80% o valor da rotação específica utilizando a Equação 15 e a Equação 14 para 500 GPM e 1000 GPM vale, respectivamente, 1562,74 e 1124,14. Para obter o valor da rotação específica para 880 GPM os valores serão interpolados e assim, é obtido 1229,91 para a vazão desejada.

De acordo com a condição operacional prevista, e devido ao produto ser viscoso e assim, tendo suas curvas corrigidas, o *head* total deve ser de 474,53 m. Utilizando a Equação 8 determina-se o *head* por estágio para que esta bomba atenda a condição de vazão necessária. Neste caso este valor foi de 115,20 m. Dividindo-se o *head* total pelo *head* por estágio obtém-se a quantidade de estágios. Nesta operação, cinco estágios. A

planilha automaticamente aproxima a quantidade de estágios obtida, caso não seja um número inteiro, para o primeiro inteiro acima.

7.0

Conclusões

Este trabalho apresentou uma metodologia completa para modelagem de sistemas de bombeamento para fins de simulação. Foram elaborados métodos para estimativa do $NPSH_R$ e da quantidade de estágios de uma bomba centrífuga. Além destas metodologias também foram apresentados métodos e formas matemáticas para o cálculo da perda de carga nas tubulações, cálculo da pressão de descarga e sucção das bombas, correção das curvas de performance em função da viscosidade do fluido, inclusão do perfil do oleoduto para determinação da condição operacional em regime permanente e determinação da pressão de recebimento.

Os métodos foram comparados e validados com três parâmetros diferentes. Primeiramente, a estimativa do $NPSH_R$ foi validada na comparação com uma bomba existente no item 6.1 apresentando erro satisfatório de 10%. Através do site de um renomado fabricante (referência 8.6) foram validados três casos de operação onde comparou-se o valor estimado de $NPSH_R$ e a quantidade de estágios obtendo-se valores satisfatórios e próximos do real. No caso da quantidade de estágios, para a condição operacional determinada e rendimento estimado da bomba, os valores foram exatos. Por último, os valores obtidos pelos métodos foram comparados com os valores simulados no Stoner Pipeline Simulator™. Os métodos apresentados neste trabalho foram muito próximos dos obtidos no simulador. Atribui-se estas pequenas diferenças a métodos de cálculo diferentes. A planilha aqui apresentada não contempla as deformações no tubo devido a pressão, considera o fluido completamente incompressível e não considera variações na densidade e na viscosidade devido a pressão.

Conclui-se que os métodos e cálculos aqui apresentados e, validados, agregam conhecimento a comunidade de dutos e contribuem como uma ferramenta para auxílio e apoio as etapas de simulação. Os resultados se apresentam de forma confiável e próxima dos dados reais e simulados.

8.0 Bibliografia

- 8.1 EDSON EZEQUIEL DE MATTOS E REINALDO DE FALCO - **Bombas Industriais**, 2ª Ed., Editora Interciência, Rio de Janeiro, 1998.
- 8.2 HYDRAULIC INSTITUTE – **Hydraulic Institute Standards for Centrifugal, Rotary & Reciprocating Pumps**, 14th edition, 1983.
- 8.3 HYDRAULIC INSTITUTE – **Effects of liquid viscosity on rotodynamic (Centrifugal and vertical) pump performance ANSI HI 9.6.7**, 2004.
- 8.4 SULZER PUMPS LTD. – **Centrifugal Pump Handbook** , Third Edition, Winterthur, Switzerland, 2010.
- 8.5 Pump Flo Method of Solution. Disponível em <http://www.eng-software.com/file/docs/mos/pump_MOS7.pdf>. Acesso em: 10/06/2012.
- 8.6 Sulzer Select. Disponível em <<http://www.sulzer.com.br>>. Acesso em: 20/06/2012.