

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

ROANA D'ÁVILA SOUZA MONTEIRO

**DIMENSIONAMENTO DE BOMBAS UTILIZADAS NO SETOR DE
PETRÓLEO E GÁS PARA O AUMENTO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**

CAMPINA GRANDE – PB

2012

ROANA D'ÁVILA SOUZA MONTEIRO

DIMENSIONAMENTO DE BOMBAS UTILIZADAS NO SETOR DE
PETRÓLEO E GÁS PARA O AUMENTO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Campina Grande, em
cumprimento parcial às exigências para
Obtenção do Grau de Engenheiro Eletricista.

CAMPINA GRANDE – PB

2012

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Campina Grande,
apresentado por Roana d'Ávila Souza
Monteiro em cumprimento parcial às
exigências para Obtenção do Grau de
Engenheiro Eletricista.

APROVADO EM ____/____/____

BANCA EXAMINADORA:

Maurício Beltrão de Rossiter Corrêa
Doutor em Engenharia Elétrica – UFCG

Karcus Marcelus Colaço Dantas
Doutor em Engenharia Elétrica - UFCG

Dedico este trabalho aos meus pais, Hélio e Sidony, meus exemplos de vida e que sempre estiveram ao meu lado nos momentos mais difíceis, sempre me dando forças para continuar. Aos quais sinto um amor incondicional.

AGRADECIMENTOS

À Deus, em primeiro lugar, pelo dom da vida, pela minha família e amigos.

Aos meus pais, Hélio e Sidony, por todo amor, carinho, incentivo, força e coragem que sempre me deram. Pela eterna dedicação e paciência. Por nunca medirem esforços para que eu chegasse até aqui. Por serem meu porto seguro e estarem inquestionavelmente me apoiando em todas as etapas da minha vida.

À minha irmã, Radharany, e ao meu cunhado-irmão, Mateus, por todo amor, apoio, força e incentivo.

Aos meus avós paternos, Hélio e Risonete, à minha avó materna, Nancy, aos meus tios e primos, por todo carinho, apoio e incentivo.

Ao meu namorado, Juliano, pelo apoio, incentivo e por está sempre ao meu lado.

À todos meus amigos e companheiros do curso, em especial à Karenine, Camila, Pollyana, Juliano, João Marcelo, Felipe e Marconni, os quais tive uma maior aproximação.

À minhas amigas, Mayara, Emanuela, Carolina, Vanessa, Julie e Julianne, que sempre me apoiaram e me deram força para concluir esse curso.

Ao professor Maurício, por ser meu orientador, pela paciência e dedicação.

Ao professor Marcelo Grilo, pela paciência e dedicação.

À Adail e Tchai pela paciência e dedicação que sempre tiveram para resolver qualquer problema.

Enfim, à todas as pessoas que passaram por minha vida e contribuíram, de alguma forma, para a construção de quem sou.

RESUMO

A utilização da energia elétrica de uma forma racional nem sempre foi uma prioridade das indústrias. Com o aumento da necessidade global por eficiência energética as empresas necessitaram analisar formas de melhorar o rendimento destes equipamentos industriais, eliminando os desperdícios e reduzindo as perdas de energia.

O objetivo geral deste trabalho é enfatizar a importância do correto dimensionamento de bombas elétricas para melhoria da eficiência energética na indústria do petróleo. Possui também o objetivo do conhecimento de alguns tipos de bombas, das suas curvas características e do ponto ótimo de operação.

Primeiramente serão mostradas as características das bombas e do sistema no qual estão inseridas, com suas respectivas curvas características, os tipos utilizados nas indústrias petrolíferas e o ponto de operação ideal. Serão apresentadas medidas para tornar o sistema mais eficiente, bem como a importância da simulação computacional utilizada nas indústrias químicas e petroquímicas para fazer o dimensionamento dos equipamentos e análise de funcionamento.

O correto dimensionamento de sistemas de bombeamento deve ser considerado para a escolha da bomba, com a melhor eficiência global. Diversos fatores influenciam para a melhoria da eficiência energética do sistema, além da escolha da bomba, tais como tubulações com diâmetros bem dimensionados e em um bom estado de conservação.

Palavras-chave: Bombas, Eficiência Energética.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Fluido na carcaça.....	14
Figura 2 - Aspecto da curva da bomba KSB WKL 125.	25
Figura 3 - Curva potência x vazão.....	25
Figura 4 - Curvas Características.	26
Figura 5: Curva altura x vazão para diferentes valores de rotação	27
Figura 6: Curva da bomba x curva do sistema - IMBIL - ITA 65.200.....	28
Figura 7: Sistema Gas-Lift.....	32
Figura 8: Curva da bomba x curva do sistema (diâmetro da linha = 150 mm).....	36
Figura 9: Curva da bomba x curva do sistema (diâmetro da linha = 200 mm).....	36
Figura 10- Curva do sistema.	43
Figura 11 - Curva da bomba e curva do sistema.	44
Figura 12 - Curva da bomba com rendimentos.....	45
Figura 13: Análise do efeito da variação de rotação da bomba sobre o sistema.....	46
Figura 14 - Efeito do uso de válvulas de estrangulamento.	47
Figura 15: Diagrama de um sistema de elevação de um fluido no Simulink.	47
Figura 16 - Parâmetros do bloco: Bomba Centrífuga.....	48
Figura 17 - Potência x Vazão a partir da curva apresentada no catálogo da KSB.	49
Figura 18: Curva do sistema simulado no simulink.	51
Figura 19 - Curvas do sistema original e do sistema simulado.....	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Potências dos motores elétricos	20
Tabela 2: Potência do motor	20
Tabela 3: Valores de C usuais	21
Tabela 4- Valores aproximados de k para diferentes acessórios.....	22
Tabela 5: Dados para traçar a curva do sistema.	43
Tabela 6 - Dados da curva altura x vazão	44

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	12
2.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DA BOMBA CENTRÍFUGA	13
2.2 NOÇÕES DE HIDRÁULICA	14
2.3 PRINCIPAIS PROBLEMAS EM BOMBAS	15
2.4 RENDIMENTOS E POTÊNCIAS	17
2.4.1 Rendimento da Bomba e do Motor	17
2.4.2 Potência da Bomba e do Motor	18
2.5 Perdas de cargas	20
2.5.1 Perda de Carga Distribuída	21
2.5.2 Perdas de Carga Localizada	22
3 CURVAS CARACTERÍSTICAS DE BOMBAS E DO SISTEMA DE BOMBEAMENTO	24
3.1 CURVAS DA BOMBA	24
3.2 CURVA DO SISTEMA DE BOMBEAMENTO	28
4 APLICAÇÕES DE BOMBAS NA INDÚSTRIA PETROLÍFERA	29
4.1 PERFURAÇÃO DE POÇOS	29
4.2 PRODUÇÃO DE POÇOS	30
4.3 TRANSPORTE DE PETRÓLEO E SEUS DERIVADOS	32
4.4 REFINARIAS	34
4.5 RECUPERAÇÃO DE ÓLEO ESPALHADO NO MAR	34
5 MEDIDAS PARA MELHORIA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	35
6 SIMULAÇÃO DE PROCESSOS	38
7 METODOLOGIA E RESULTADOS	40
7.1 DIMENSIONAMENTO E SELEÇÃO DE BOMBAS	40
7.2 ESTUDO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM APLICAÇÕES DE BOMBAS CENTRÍFUGAS	42

7.3 USO DA FERRAMENTA SIMULINK COMO ELEMENTO COMPLEMENTAR PARA ANÁLISE DO PROCESSAMENTO DE ENERGIA.....	47
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	52
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	53
ANEXOS.....	54
ANEXO A – Comprimentos Equivalentes a Perdas Localizadas	54
ANEXO B - Gráfico de Pré-seleção da KSB	55
ANEXO C - Gráfico de Pré-seleção da MEGANORM KSB.....	56
ANEXO D - Bombas 65-250, de 3500 rpm, e 220 mm de rotor da KSB	57

1 INTRODUÇÃO

Com o avanço industrial e o crescimento populacional devemos cada dia mais nos preocupar com economia de energia e conseqüentemente com eficiência energética. Buscar eficácia no dimensionamento de equipamentos e na operação de sistemas de bombeamento é uma maneira de eliminar o desperdício, reduzir as perdas de energia elétrica e, portanto, ajudar na preservação do meio ambiente.

Na indústria do petróleo há um número elevado de bombas, que nem sempre são dimensionadas corretamente e apresentam um baixo rendimento, contrariando a ideia de eficiência energética.

O transporte de fluidos por meio de bombas elétricas se tornou uma atividade usual em inúmeros setores da sociedade, estando presente desde residências até as mais complexas plantas industriais. Estes equipamentos quando bem dimensionados para o sistema em que irão operar, funcionam perto do seu ponto de trabalho e assim de uma forma mais eficaz.

Primeiramente é importante ter o conhecimento sobre bombas e suas características, bem como sobre suas diversas aplicações na indústria petrolífera. Posteriormente, será feito um estudo de caso, onde se enfatiza a importância do dimensionamento de uma bomba para determinada etapa de produção de petróleo, com o objetivo de melhorar a eficiência energética do sistema.

Algumas formas para melhoria da eficiência energética em sistemas de bombeamento serão analisadas, incluindo o correto dimensionamento destes equipamentos, bem como a utilização de softwares, em especial no ambiente Simulink, para modelagem e simulação de processos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo será introduzido o conceito de bombas, bem como alguns conceitos importantes para seu entendimento, e também para a compreensão do dimensionamento e seleção de bombas para o sistema para o qual ela irá operar.

Bombas são máquinas hidráulicas que concedem energia ao fluido com a finalidade de transportá-lo de um ponto para outro. Estas recebem energia de uma fonte motora qualquer e cedem parte dessa energia ao fluido sob forma de energia de pressão, cinética ou ambas. Isto é, elas aumentarão a pressão do líquido, sua velocidade ou ambas grandezas.

A escolha da bomba para uma determinada operação é influenciada pelos seguintes fatores:

- a) Quantidade de líquido a transportar.
- b) Carga contra a qual a bomba irá bombear o líquido.
- c) Natureza do líquido que será bombeado.
- d) Natureza da fonte de energia.
- e) Bombeamento temporário ou bombeamento ininterrupto.

São diversos os tipos de bombas que são utilizadas nas indústrias, dentre elas podemos citar:

- a) Bombas de deslocamento positivo: nestas o volume de líquido remetido está diretamente relacionado com o deslocamento do elemento pistão e, portanto, aumenta diretamente com a velocidade e não é sensivelmente afetado pela pressão. São usadas para bombeamento contra altas pressões e quando requerem vazões de saída quase constantes. As bombas de deslocamento positivo se dividem em dois tipos:
 - Alternativas: a taxa de fornecimento do líquido é uma função do volume varrido pelo pistão no cilindro e do número de golpes do pistão;
 - Rotativas: o rotor da bomba provoca uma pressão reduzida do lado da entrada, o que possibilita a admissão do líquido à bomba, pelo efeito da pressão externa. À medida que o elemento gira o líquido fica retido entre os componentes do rotor e

a carcaça da bomba, depois de uma determinada rotação, o líquido é ejetado pelo lado da descarga da bomba.

b) Bomba centrífuga: São aquelas em que a energia fornecida ao líquido é primordialmente do tipo cinética, sendo posteriormente, grande parte convertida em energia de pressão. Nas bombas centrífugas a movimentação do líquido é produzida por forças desenvolvidas na massa líquida de um rotor. Estas bombas caracterizam-se por operarem com altas vazões, pressões moderadas e fluxo contínuo. Para uma bomba centrífuga funcionar é preciso que a carcaça esteja completamente cheia de líquido que, recebendo através das pás o movimento de rotação do rotor, fica sujeito à força centrífuga que faz com que o líquido se desloque para a periferia do rotor causando uma baixa pressão no centro o que faz com que mais líquido seja admitido na bomba. O fluido a alta velocidade (energia cinética elevada) é lançado para a periferia do rotor onde o aumento progressivo da área de escoamento faz com que a velocidade diminua, transformando energia cinética em energia de pressão.

c) Bomba diafragma: depende do movimento de um diafragma para conseguir pulsação. São usadas para suspensões abrasivas e líquidos muito viscosos.

d) Bomba à jato: usam o movimento de uma corrente de fluido a alta velocidade para imprimir movimento a outra corrente, misturando as duas.

e) Bomba eletromagnética: princípio igual ao motor de indução usada com líquidos de alta condutividade elétrica (metais líquidos) não tem partes mecânicas móveis.

No tópico seguinte será descrito apenas o princípio de funcionamento da bomba centrífuga, já que este tipo é o mais utilizado nas indústrias em geral.

2.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DA BOMBA CENTRÍFUGA

Uma bomba centrífuga é, na maioria das vezes, o equipamento mais simples em qualquer planta de processo. Seu propósito é converter a energia de uma fonte motriz principal (um motor elétrico ou turbina), a princípio, em velocidade ou energia cinética, e então, em energia de pressão do fluido que está sendo bombeado.

O líquido flui através do rotor gerando uma energia cinética, devido à força centrífuga, chegando até a carcaça. A carcaça possui formato e ranhuras que fazem com

que o líquido se dirija para o pórtico de saída, onde uma parcela da energia cinética é convertida em energia de pressão, como ilustrado na Figura 1.

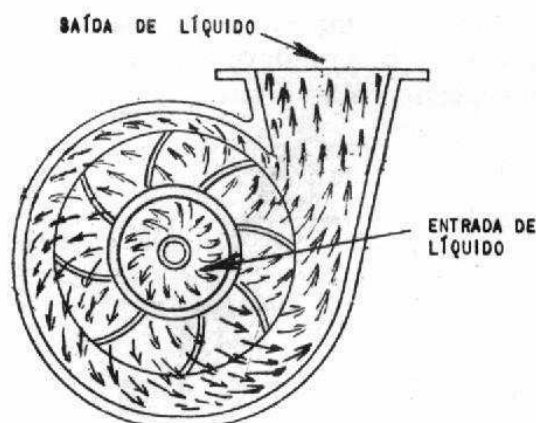


Figura 1: Fluido na carcaça.

(Fonte: Apostila de Bombas. Professor Manoel Cordeiro de Barros M. Sc).

A energia criada pela força centrífuga é energia cinética. A quantidade de energia fornecida ao líquido é proporcional à velocidade na extremidade, ou periferia, da hélice do rotor. Quanto mais rápido o rotor se move, ou quanto maior é o rotor, maior será a velocidade do líquido na hélice, e tanto maior será a energia fornecida ao líquido.

Esta energia cinética do líquido, provocada pelo rotor, tende a diminuir pelas resistências que se opõem ao fluxo. A primeira resistência é criada pela carcaça da bomba, que reduz a velocidade do líquido. No bocal de descarga, o líquido sofre desaceleração e sua velocidade é convertida em pressão. Então, a carga desenvolvida (pressão, em termos de altura de líquido) é aproximadamente igual à energia de velocidade na periferia do rotor.

2.2 NOÇÕES DE HIDRÁULICA

É importante o conhecimento de alguns conceitos básicos para o entendimento, controle, manuseio, seleção e instalação de bombas. São eles:

- a) **Peso específico (γ):** é definido como o peso por unidade de volume de uma substância. É calculado pelo produto da massa específica pela aceleração da gravidade. No SI sua unidade é: N/m^3 .

- b) Massa específica : a massa específica de um fluido, designada pela letra ρ , é a sua massa por unidade de volume. A massa específica é altamente variável em gases e aumenta quase proporcionalmente ao nível de pressão. A massa específica em líquidos é quase constante. No SI sua unidade é: kg/m^3
- c) Densidade (d): é a relação entre a massa específica de um fluido e a massa específica de um fluido padrão de referência, a água (para líquidos) e ar (para gases).
- d) Viscosidade (μ): é a resistência imposta pelas camadas ao escoamento recíproco. Assim sendo, sempre que temos fluidos em movimentos, o deslocamento recíproco das partículas acarreta um esforço de atrito.
- e) Pressão (P): nos fluidos, só é possível aplicar forças através de superfícies, ao contrário do que ocorre com os sólidos, nos quais se pode considerar a ação de uma força pontual. Por isso, é conveniente estudar as forças que atuam nos líquidos a partir do conceito de pressão, que pode ser entendida como uma força, por unidade de superfície, aplicada perpendicularmente a essa superfície por um fluido com o qual está em contato.
- f) Vazão (Q): chama-se vazão ou descarga o volume de fluido que atravessa uma determinada seção em determinado tempo, sua unidade no SI é o m^3/s . A vazão medida pela maioria dos medidores de pressão diferencial ou, mesmo, por medidores eletromagnéticos ou de ultra-som leva em conta a velocidade média da seção transversal do tubo.

2.3 PRINCIPAIS PROBLEMAS EM BOMBAS

Alguns problemas apresentados pelas bombas são a cavitação, aeração e recirculação.

I. Cavitação:

O fenômeno da cavitação ocorre devido à baixa pressão por meio da aceleração do fluido escoado. Quando a pressão absoluta em algum ponto de um sistema de bombeamento é inferior à pressão de vapor do líquido, na temperatura em que este se encontra, inicia-se o processo de vaporização nestes locais específicos. Inicialmente formam-se pequenas bolhas no interior das quais o líquido se vaporiza em seguida essas

bolhas são deslocadas com a corrente líquida devido ao movimento do rotor e em regiões de alta pressão sofrem um colapso com a condensação do vapor e retorno ao estado líquido. Os principais inconvenientes da cavitação são: ruídos devido à implosão das bolhas, a vibração gerada pelas ondas de choque provocadas pelo colapso das bolhas no metal, as possíveis alterações nas características estruturais do rotor, além da queda de rendimento da bomba.

As regiões atingidas não são aquelas em que as pressões são menores, isto é, nas costas das pás, e sim aquelas em que se produziram condensação de partículas. O fenômeno de supercavitação ocorre quando a condensação se processa no início do pórtico de entrada da bomba e em geral se origina de um fluxo em sentido contrário à sucção devido à deficiência do projeto ou instalação.

Para minimizar a cavitação é necessário que exista no pórtico de entrada da bomba um saldo positivo de pressão sobre a pressão de vapor líquido na temperatura de bombeamento. Para atingir esse objetivo algumas medidas são necessárias, tais como: diminuir a perda de carga na linha de sucção, aumentar a pressão na superfície livre do líquido na fonte de suprimento, esfriar o líquido na sucção, reduzir a velocidade da bomba, diminuir a distância vertical entre a bomba e o nível do líquido no reservatório de suprimento.

II. Aeração:

A aeração, por sua vez, é a penetração de fluxo de ar no sistema de transferência de massa fluida. O ar pode ser introduzido no sistema, de modo livre, no qual o ar é aprisionado na superfície do líquido.

Pode ser arrastado pelo líquido sob a forma de pequenas bolhas, podendo ser removido com filtros ou telas. Por ultimo, o ar pode ser dissolvido em solução no líquido, e pode ser removido de duas maneiras: submetendo-se o fluido a uma pressão reduzida ou elevando-se a temperatura do mesmo. As principais inconveniências da aeração estão listadas a seguir:

- a) A bomba não bombeia;
- b) A vazão da bomba é insuficiente;
- c) A pressão da bomba é insuficiente;
- d) A bomba perde a escorva após a partida;

- e) A bomba superaquece;
- f) Há perda de potência;
- g) Há formação de espuma, que afeta o desempenho do sistema;
- h) Há erosão das partes internas da bomba.

III. Recirculação:

O fenômeno de recirculação se inicia quando a bomba opera com baixa vazão, geralmente entre 60 e 80% da vazão ideal e torna-se mais severo entre 20 e 40%.

Com a vazão baixa e constante a recirculação pode se tornar muito danosa, causando ruídos e vibrações em baixa frequência, tanto na bomba como nas tubulações.

2.4 RENDIMENTOS E POTÊNCIAS

2.4.1 Rendimento da Bomba e do Motor

O rendimento de uma bomba é a relação entre a energia oferecida pela máquina motriz (motor) e a absorvida pela máquina operatriz (bomba). Isto é evidenciado uma vez que o motor não transmite para o eixo toda a potência que gera, assim como a bomba, que necessita de uma energia maior do que consome, devido a suas perdas passivas na parte interna. Recomenda-se a utilização de motores de alto rendimento, que embora mais caros, podem compensar o investimento incremental inicial com um menor custo operacional.

O rendimento global de uma bomba se divide em:

- a) Rendimento Hidráulico: leva em consideração o acabamento interno superficial do rotor e da carcaça da bomba. Varia também de acordo com o tamanho da bomba, de 20 a 90%.

$$\eta_h = \frac{H}{H_q} \quad (1)$$

Onde, H: é a energia absorvida por 1 kg de fluido que atravessa a bomba;
 H_q: é a energia cedida a cada um dos kg de fluido que atravessa a bomba.

b) **Rendimento Volumétrico:** leva em consideração os vazamentos externos pelas vedações e a recirculação interna da bomba.

Nas bombas cinéticas o rendimento volumétrico é expresso da seguinte maneira:

$$\eta_V = \frac{Q}{Q+q} \quad (2)$$

Onde, Q : é a vazão real, em m³/s ou l/s;

q : é a vazão recirculada, em m³/s ou l/s.

Nas bombas de deslocamento positivo não há realmente uma recirculação de fluido, mas sim uma perda por vazamento interno da bomba. O rendimento é definido da seguinte maneira:

$$\eta_V = \frac{\delta_{real}}{\delta_{real} + \Delta h_{vaz}} \quad (3)$$

Onde, δ_{real} : deslocamento real;

Δh_{vaz} : perdas por vazamento.

c) **Rendimento Mecânico:** leva em consideração que apenas uma parte da potência necessária ao acionamento de uma bomba é usada para bombear. O restante é perdido por atrito.

Por definição temos:

$$\eta_m = \frac{N - \Delta N}{N} \quad (4)$$

Onde, N : potência necessária para o acionamento da bomba;

ΔN : potência dissipada.

2.4.2 Potência da Bomba e do Motor

A potência absorvida pela bomba é a energia que ela consome para transportar o fluido na vazão desejada, altura estabelecida, com o rendimento esperado.

Segundo Barros, pode-se deduzir a potência necessária ao acionamento de uma bomba a partir da equação de rendimento mecânico, lembrando que:

H_q : é a energia cedida a cada um dos kg de fluido que atravessa a bomba;

$N - \Delta N$: é a energia cedida por 1 segundo, a todos os quilogramas de fluido que atravessam a bomba;

$\gamma (Q+q)$: expressa a quantidade de quilogramas de fluidos que atravessam a bomba em 1 segundo. Sendo γ o peso específico do fluido e $(Q+q)$ a vazão volumétrica da bomba.

Podemos armar a seguinte regra de três:

$$\text{Para } 1 \text{ kg} \implies H_q$$

$$\text{Para } \gamma (Q+q) \implies (N - \Delta N) \text{ em } 1 \text{ segundo}$$

Logo, $N - \Delta N = \gamma (Q+q) \cdot H_q$, assim sendo, teremos:

$$N = \frac{\gamma(Q+q) \cdot H_q}{\eta_m} \quad (5)$$

Da expressão de rendimento hidráulico temos: $H_q = H/\eta_h$, logo a expressão ficará:

$$N = \frac{\gamma(Q+q) \cdot H}{\eta_m \eta_h} \quad (6)$$

Multiplicando-se o numerador e denominador pela vazão recalçada (Q) , a expressão ficará:

$$N = \frac{\gamma \cdot (Q+q) \cdot H \cdot Q}{Q \cdot \eta_m \cdot \eta_h} \quad (7)$$

Tomando o inverso do rendimento volumétrico:

$$\frac{1}{\eta_v} = \frac{Q+q}{Q} \quad (8)$$

A equação da potência será:

$$N = \frac{\gamma \cdot H \cdot Q}{\eta_m \cdot \eta_h \cdot \eta_v} \quad (9)$$

Como o rendimento global é dado pelo produto entre os rendimentos, logo a potência consumida ou requerida pela bomba poderá ser escrita da seguinte maneira:

$$N = \frac{\gamma \cdot H \cdot Q}{\eta} \quad (10)$$

Onde, N : potência necessária para o acionamento da bomba, em watt;

γ : peso específico do fluido, N/m^3 ;

Q : vazão da bomba, m^3/s ;

H : altura manométrica total em m.

η : rendimento global.

Para se obter a potência necessária para o acionamento da bomba em cv, utiliza-se a expressão:

$$N = \frac{\gamma \cdot H \cdot Q}{75 \cdot \eta} \quad (11)$$

O acionamento das bombas pode ser realizado por motores elétricos, motores de combustão interna e energia eólica. Esses motores são fabricados para diversas potências padronizadas de maior uso comercial. Normalmente, as potências nominais desses motores elétricos em cv estão na Tabela 1.

Tabela 1: Potências dos motores elétricos

Potências Padronizadas de Motores Elétricos (cv)
1/4, 1/3, 1/2, 3/4, 1, 1.1/2, 2, 3, 4, 5, 6, 7.1/2, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 60, 80, 100, 150, 200, 250, 300, 350.

Para se saber qual a potência nominal do motor (N_m) que acionará a bomba, é necessário inicialmente conhecer a potência consumida ou requerida pela bomba (N) e dá um acréscimo conforme a Tabela 2.

Tabela 2: Potência do motor

Potência da Bomba	Acréscimo	Potência do Motor
$N \leq 2 \text{ cv}$	50%	$N_m = 1,50.N$
$2 < N \leq 5 \text{ cv}$	30%	$N_m = 1,30.N$
$5 < N \leq 10 \text{ cv}$	20%	$N_m = 1,20.N$
$10 < N \leq 20 \text{ cv}$	15%	$N_m = 1,15.N$
$N > 20 \text{ cv}$	10%	$N_m = 1,10.N$

2.5 PERDAS DE CARGAS

Consiste na resistência que o fluido encontra ao escoar no interior das tubulações e acessórios, devido a sua viscosidade e expressa em metros de coluna de líquido. A perda de carga pode ser distribuída ou localizada.

Alguns fatores contribuem diretamente na perda de carga, tais como:

- Natureza do fluido;
- Material dos tubos e acessórios;
- Diâmetro da tubulação;

- d) Comprimento da tubulação;
- e) Regime de escoamento.

2.5.1 Perda de Carga Distribuída

As perdas de carga distribuídas correspondem às perdas nos trechos retos da tubulação. Existe uma grande quantidade de fórmulas para a determinação das perdas de carga distribuídas nos condutos forçados. Neste trabalho será mencionada apenas a fórmula de Hazen-Williams, que é a mais usada. Sua expressão é:

$$h = \frac{10,65 \cdot Q^{1,852} \cdot L}{C^{1,852} \cdot D^{4,87}} \quad (12)$$

Onde,

h: é a perda de carga distribuída ao longo do trecho, em m;

L: é comprimento da tubulação, em m;

D: é o diâmetro da tubulação, em m;

Q: é a vazão da tubulação, m³/s;

C: índice de polidez da superfície interna de uma tubulação (quanto mais polido, maior será o valor de “C”, como mostrado na Tabela 3).

Tabela 3: Valores de C usuais.

TIPO DE TUBO	25 mm	75 mm	150 mm	300 mm
ferro fundido novo cimentado	-	129	133	138
Água moderadamente agressiva - 30 anos	-	83	90	97
Água moderadamente agressiva - 60 anos	-	69	79	85
Água moderadamente agressiva - 100 anos	-	61	70	78
Condições severas - 30 anos	-	41	50	58
Condições severas - 60 anos	-	30	39	48
Condições severas - 100 anos	-	21	30	39
Aço galvanizado novo	120	129	133	-
PVC novo	134	142	145	147

Fonte: Eficiência energética em sistemas de bombeamento. ELETROBRAS.

2.5.2 Perdas de Carga Localizada

A perda de carga localizada verifica-se nos acessórios (*válvulas, tês, curvas, etc.*), devido à distribuição local do escoamento.

Tal procedimento consiste em substituir os acessórios por perda de carga equivalente a um comprimento de tubulação reta de mesmo diâmetro e material. A fórmula utilizada para o cálculo de perda de carga localizada é a seguinte:

$$\Delta h_L = k \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (13)$$

Onde,

v: é a velocidade média de escoamento, em m;

k: é o fator que depende da característica dos acessórios;

g: é a aceleração da gravidade, em m/s².

Na Tabela 4 estão catalogados os valores aproximados de K para diferentes tipos de acessórios.

Tabela 4- Valores aproximados de k para diferentes acessórios.

PEÇA	K
Cotovelo 90°	0,90
Cotovelo 45°	0,40
Crivo	0,75
Curva 90°	0,40
Curva 45°	0,20
Curva 22,5°	0,10
Entrada normal em canalização	0,50
Entrada de borda	1,00
Existência de pequena derivação	0,03
Junção	0,40
Medidor de Venturi	2,50
Redução gradual	0,15
Registro de ângulo aberto	5,00
Registro de gaveta aberto	0,20
Registro de globo aberto	10,00
Saída de canalização	1,00
Válvula de pé	1,75
Válvula de retenção	2,50

Fonte: Instalações Elevatórias. Bombas, pg. 46. (1977)

As perdas de cargas localizadas também podem ser calculadas pelo método dos comprimentos equivalentes, este método consiste em substituir o acessório por um comprimento equivalente de um tubo reto com o mesmo diâmetro e material, onde ocorra uma perda de carga igual àquela que realizará no acessório.

Esse comprimento equivalente (L_{ac}) encontra-se no Anexo A em função do diâmetro da tubulação.

Tendo-se o comprimento equivalente do acessório, o cálculo da perda de carga poderá ser feito utilizando a fórmula de Perda de Carga Normal, sendo:

$$L = L_{tubo} + L_{ac} \quad (14)$$

Onde,

L_{tubo} : é a soma dos comprimentos dos tubos, em m;

L_{ac} : é a soma dos comprimentos equivalentes dos acessórios, em m.

3 CURVAS CARACTERÍSTICAS DE BOMBAS E DO SISTEMA DE BOMBEAMENTO

3.1 CURVAS DA BOMBA

As curvas características de bombas representam seu funcionamento, são resultantes dos testes experimentais realizados pelos seus fabricantes. Estas curvas são fornecidas pelos fabricantes das bombas em seus catálogos e variam para cada modelo e fabricante.

São curvas fixadas para valores de rotação, diâmetro do rotor e viscosidade do líquido. Elas traduzem o desempenho esperado de cada bomba. Embora possam ser estimadas quando da fase de projeto da bomba, somente em casos muito especiais de bombas de grandes dimensões, fabricadas especialmente para um determinado projeto, é que isso é feito. Em alguns casos, o fabricante disponibiliza um software próprio para a escolha da bomba que melhor se adapta à situação desejada.

São basicamente três as curvas características tradicionais de uma bomba:

a) Curva da altura x vazão: é obtida a partir de ensaios de pressão e vazão da bomba. Representa a relação entre a vazão que a bomba é capaz de recalcar e a altura manométrica total “contra” a qual essa vazão pode ser recalcada. É importante notar que a curva da bomba nada tem a ver com a curva do sistema. Ela é uma característica da bomba, assim como a curva do sistema nada tem a ver com a curva da bomba. É uma característica da hidráulica do sistema de tubulações, reservatórios e cotas dos níveis de água de onde e para onde se quer recalcar. O aspecto da curva da bomba é apresentado na Figura 2.

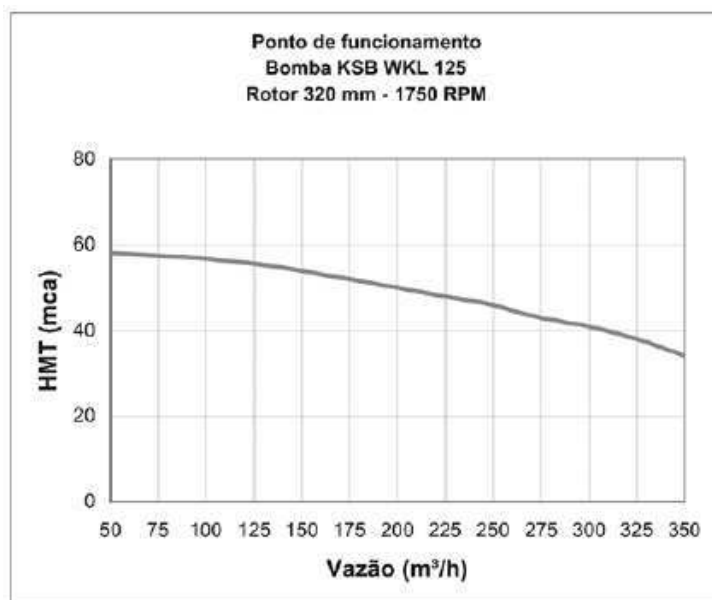


Figura 2 - Aspecto da curva da bomba KSB WKL 125.

(Fonte: Eficiência energética em sistemas de bombeamento. ELETROBRAS).

b) Curva de potência x vazão: também é obtida dos ensaios no laboratório de hidráulica do fabricante. Representa a relação entre a vazão bombeada e a potência para tal. Esta curva está ilustrada na Figura 3.

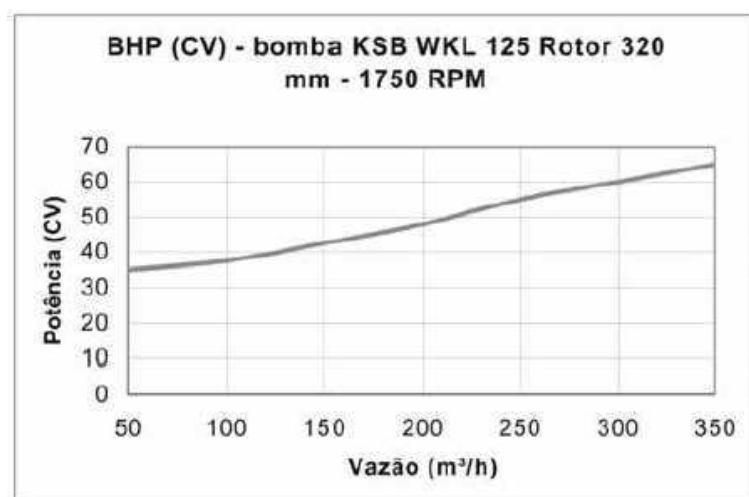


Figura 3 - Curva potência x vazão.

(Fonte: Eficiência energética em sistemas de bombeamento. ELETROBRAS).

c) Curva de rendimento x vazão: é a curva que mostra a “região” do intervalo de vazões possível para a bomba, onde se dá o melhor rendimento (máximo da curva) e seu valor. A

d) Figura 4 mostra as curvas características juntas, incluindo a de rendimento x vazão.

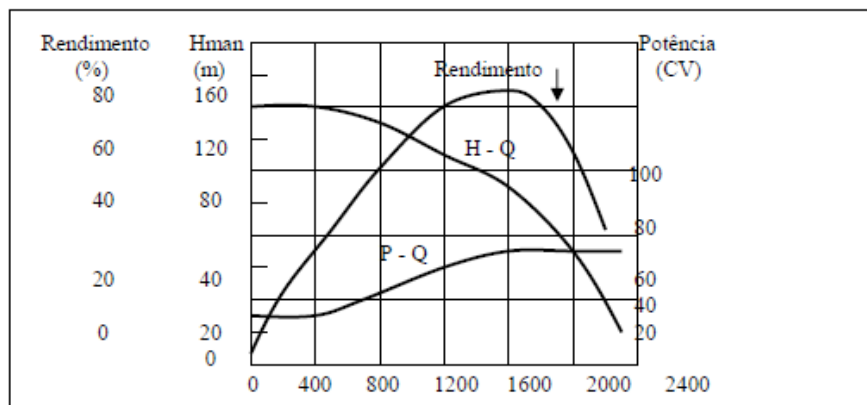


Figura 4 - Curvas Características.

(Fonte: Eficiência energética em sistemas de bombeamento. ELETROBRAS).

As curvas características podem variar com o diâmetro do rotor, com a rotação ou ainda com a forma do rotor.

Se a forma do rotor e a rotação se mantiverem constantes, a variação do diâmetro do rotor dá origem a curvas características paralelas, com as curvas superiores referentes aos diâmetros maiores. Assim, se o diâmetro de certa bomba for modificado, as curvas características da máquina apresentam relações bem definidas com características originais, expressas pelas equações:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{D_2}{D_1} \quad (15)$$

$$\frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^2 \quad (16)$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^3 \quad (17)$$

Nas quais as grandezas que apresentam índice 1 referem-se às características primitivas do rotor e as de índice 2, as características do rotor com o novo diâmetro.

Conservando a forma e o diâmetro do rotor, a energia transferida ao fluido circulante varia com a rotação. A curva característica da bomba também se modifica porque a altura manométrica cresce com o número de rotações do rotor. Podemos

analisar os efeitos da rotação por meio do princípio da comparatividade, mencionada por Guo et al, 2006, e chamada de lei da afinidade em Sanks et al., 1998, que tem as seguintes relações:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{\eta_2}{\eta_1} \quad (18)$$

$$\frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{\eta_2}{\eta_1} \right)^2 \quad (19)$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{\eta_2}{\eta_1} \right)^3 \quad (20)$$

Assim, como no caso anterior, as grandezas que apresentam índice 1 referem-se às características originais e as do índice 2 são as da bomba com nova rotação.

Tendo a curva altura x vazão de uma bomba para uma rotação de 3500 rpm é possível achar a curva correspondente para qualquer outra rotação utilizando as equações 18 e 19, o gráfico para outros valores de rotação está ilustrado na Figura 5.

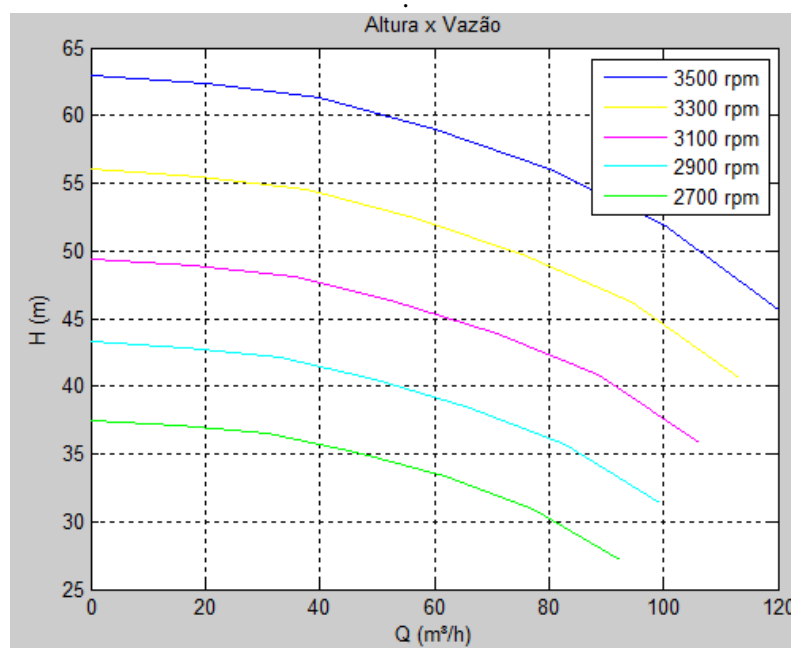


Figura 5: Curva altura x vazão para diferentes valores de rotação

3.2 CURVA DO SISTEMA DE BOMBEAMENTO

A curva de uma instalação representa a energia por unidade de peso que deve ser fornecida ao fluido, em função da vazão desejada, para que o mesmo possa escoar nessa instalação em regime permanente. É representada por $H_s = f(Q)$, onde H_s representa a energia que deve ser fornecida ao fluido, para cada vazão de escoamento.

Como os pontos de funcionamento das bombas normalmente são dados por curvas nos catálogos, a curva do sistema tem um significado especial quando se deseja mostrar graficamente os pontos de funcionamento das diversas bombas possíveis para um determinado sistema. Basta sobrepor as duas curvas, desde que utilizada a mesma escala em ambas, e todos os aspectos do funcionamento do sistema com a bomba estarão aparentes no gráfico obtido, como ilustrado na Figura 6.

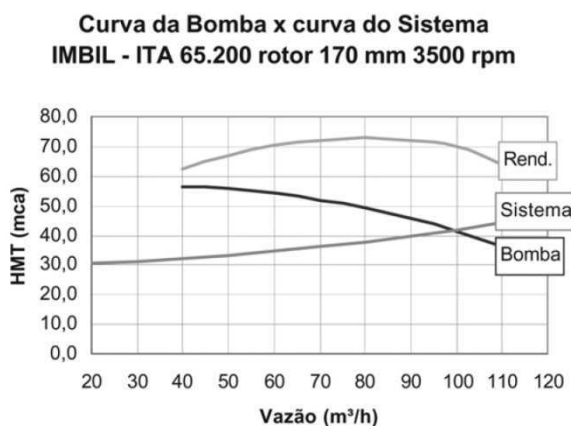


Figura 6: Curva da bomba x curva do sistema - IMBIL - ITA 65.200
(Fonte: Eficiência energética em sistemas de bombeamento. ELETROBRAS).

4 APLICAÇÕES DE BOMBAS NA INDÚSTRIA PETROLÍFERA

A API (American Petroleum Institute), em suas normas técnicas, especifica os materiais construtivos de bombas de acordo com o serviço e o fluido a ser bombeado. A maioria das bombas utilizadas nessas indústrias é do tipo centrífuga, sendo diversas as variações destas.

Embora as bombas centrífugas sejam as mais utilizadas não podemos generalizar o seu uso, pois quando utilizadas para transportar fluidos com viscosidade moderada ou alta a sua eficiência diminui consideravelmente. As bombas de deslocamento positivo são frequentemente empregadas no bombeamento de fluidos viscosos. Assim como nas bombas centrífugas, o desempenho de bombas de deslocamento positivo pode ser significativamente alterado por diferentes viscosidades.

À velocidades constantes, alterações na viscosidade geralmente causam pouco ou nenhum efeito na capacidade da bomba de deslocamento positivo. A pressão diferencial ao longo da bomba normalmente sofre aumento proporcional ao aumento da viscosidade do fluido devido à maior resistência ao escoamento. A potência necessária para frenagem da bomba aumentaria, embora a eficiência não sofra de forma brusca como numa bomba centrífuga.

4.1 PERFURAÇÃO DE POÇOS

A etapa de produção de petróleo tem como objetivo localizar estruturas geológicas favoráveis à formação e acumulação de petróleo.

O primeiro passo é perfurar as rochas por meio de uma broca existente na extremidade de uma coluna de perfuração. É necessário que os equipamentos coloquem peso sobre a broca para forçar os dentes da broca a penetrarem na formação. Os detritos da rocha (cascalhos) são removidos por meio de um fluido de perfuração, também conhecido como lama de perfuração. A lama é injetada por bombas para o interior da coluna de perfuração e retorna à superfície, pelo espaço anular, trazendo os detritos. Ao atingir determinada profundidade, retira-se a coluna de perfuração e uma coluna de revestimento é descida no poço. O espaço entre os tubos de revestimento e as paredes do poço é cimentado. Após a cimentação, a coluna de perfuração é novamente descida no poço, dando continuidade à perfuração.

A densidade da lama de perfuração, que é bombeada neste processo, varia entre 1000 e 2000 kg/m³. Esta lama apresenta diversas finalidades:

- a) Remove as partículas de rochas desagregadas, conduzindo-as pelo espaço anular até a superfície, onde é separada da lama por peneiramento e decantação, sendo a lama reaproveitada em sucessivos bombeamentos.
- b) Forma um “enchimento” no poço antes de ser feito o revestimento metálico evitando, com o peso da coluna, o colapso e obstrução do poço, que poderia ocorrer devido à elevada pressão a que as camadas rochosas profundas são submetidas.
- c) Contém, até certo ponto, o petróleo, impedindo que esguiche, caso haja pressão interna no lençol, isto é, caso o poço se apresente “surgente”.

Operações como esta são bem complexas já que a profundidade dos poços muitas vezes atinge mais de 4000 metros.

As bombas de lama geralmente são do tipo alternativo duplex ou triplex, eixo horizontal ou vertical, acionadas por motores diesel através de correias ou diretamente pela haste do êmbolo de uma máquina a vapor. As pressões são da ordem de 3.000 psi, e as descargas chegam a 100 litros por segundo.

Existem instalações onde são empregadas bombas centrífugas ao invés de bombas alternativas para o bombeamento da lama, porém não é usual.

4.2 PRODUÇÃO DE POÇOS

O objetivo da etapa de produção dos poços é a produção de petróleo proveniente de reservatórios localizados em terra ou sob o leito marinho. A elevação do petróleo pode ser de forma natural, quando o poço possui pressão interna de gás suficiente para elevar o petróleo, ou de forma artificial, por uma das seguintes formas:

- a) Sistema com bomba alternativa submersa: uma bomba alternativa triplex, colocada na superfície do solo ou em uma plataforma marítima, bombeia óleo através de tubulação especial, de modo a acionar outra bomba alternativa localizada no fundo do poço (funcionando como motor hidráulico), a qual retira o petróleo do lençol e o eleva até a superfície. São usadas para poços com até ou mais de 3.000 metros. A produção diminui com a profundidade do poço. Assim, por exemplo, uma bomba com um poço de 1.000 metros pode bombear 4.500 barris diários e, funcionando com um poço de

5.000 metros, poderá vir a bombear apenas cerca de 100 barris diários. Essas bombas apresentam rendimento melhor que os do sistema de haste de sucção.

b) Sistema com Bomba Centrífuga Submersa: usam-se bombas centrífugas de múltiplos estágios com motor blindado, preso na parte inferior das mesmas, para poços não muito profundos, com cerca de 300 a 500 metros. As bombas são de rotores hélico-centrífugos e possuem pás-diretrizes e, de certo modo, são semelhantes às utilizadas para bombear água de poços. Podem ser usados para descargas que vão desde 20 até 15.000 barris por dia, depende da produção: a profundidade do poço e da capacidade da bomba. O rendimento é da ordem de 50%.

c) Bombeamento por Injeção de Água: para o bombeamento por injeção de água, furam-se dois tipos de poços: um tipo para injeção de água, mais profundo, e outro para o recolhimento da mistura de água e petróleo, mais raso. A água injetada comprime o óleo do lençol para os poços de produção e a mistura é levada imediatamente a uma instalação de tratamento, onde o óleo é separado da água, seguindo para a estocagem. Dos tanques de estocagem o óleo é bombeado para oleodutos no sentido das refinarias ou dos terminais de embarque. Bombas de injeção de água para poços com produção de mais de 10.000 barris diários são de múltiplos estágios e fabricadas em aços especiais para fornecer pressões superiores a 200 bar.

d) Bombeamento por Injeção de Gás: um sistema de compressores injeta gás no poço de bombeamento, o qual, comprimindo o óleo do lençol produtor, eleva-o pelo poço de produção até uma instalação de separação, onde o gás é separado do petróleo. O petróleo separado é conduzido aos reservatórios de estocagem. O gás natural vai até as instalações de gasolina natural, que são unidades especiais onde é retirada certa quantidade de “gasolina natural” – contida no gás, sob a forma de pequenas gotículas. O restante do gás, chamado “gás seco”, é usado como combustível industrial, como matéria-prima para a indústria petroquímica e para reinjeção nos reservatórios de produção, conforme este processo de bombeamento ou como o processo de *gas lift*.

e) Bombeamento Pneumático (gas lift): o gás da própria jazida ou de uma jazida vizinha é injetado por um tubo no poço produzindo uma mistura de óleo e gás. Esta mistura, que contém óleo emulsionado pelo gás e, portanto, de menor peso específico que o óleo, sobe à estação de bombeamento por um tubo concêntrico interno ao tubo de

gás ou paralelo a este. A vazão de óleo é ajustada por meio da vazão de gás. A

Figura 7 representa um sistema simplificado de bombeamento pneumático.

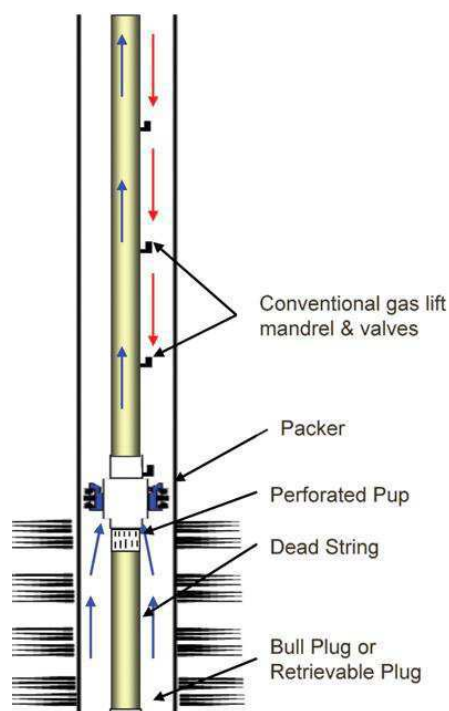


Figura 7: Sistema Gas-Lift.

(Fonte: <http://www.epmag.com/Magazine/2008/11/item16952.php>
Acesso em julho 2012).

4.3 TRANSPORTE DE PETRÓLEO E SEUS DERIVADOS

O petróleo e seus derivados são bombeados para seu destino através de oleodutos (*pipelines*, em inglês).

Além das bombas próximas aos grandes tanques de petróleo e seus derivados, intercalam-se estações intermediárias (estações *booster*) para o fornecimento da energia necessária à compensação da que foi perdida ao longo das extensas linhas de recalque, mantendo a velocidade de escoamento desejável.

Embora existam muitos oleodutos com bombas alternativas, atualmente em oleodutos de certa extensão só se empregam bombas centrífugas.

A necessidade de variar a descarga ou de atender à variação na viscosidade, devido a variações da temperatura, requer a possibilidade da associação das bombas em série ou de utilizá-las variando a velocidade.

A maior parte das bombas de pipelines é centrífuga com rotor de entrada bilateral e carcaça bipartida horizontalmente, a fim de permitir rápidos reparos e substituições.

Quando a pressão é elevada, usam-se bombas de mesmo tipo, de múltiplos estágios, com os rotores com entrada bilateral (disposição *back to back*), que permitem receber o líquido por dois sentidos opostos, paralelamente ao eixo de rotação. Equivale a dois rotores em paralelo que, teoricamente, são capazes de elevar uma descarga dupla da que se obteria com o rotor simples. As tubulações de entrada e de saída são solidárias com a parte inferior da carcaça da bomba de modo que, na operação e reparos, não haja necessidade de desparafusar os flanges.

O acionamento pode ser por motores elétricos, turbinas a gás, ou por engrenagens redutoras, como é o caso do oleoduto de Idris a Zueitina, na Líbia, para descarga de 7.600 m³/h e a altura manométrica de 132 metros, com três bombas de 4.330 c.v. em série e rotação específica de 1.500 rpm, sendo o equipamento do fabricante Sulzer.

No oleoduto de Serir a Tobruk, na África, a Sulzer forneceu duas bombas de descarga unitária de 3.096 m³/h e altura manométrica de 428 metros. A potência de cada bomba é de 4.450 c.v. e rotação específica de 3.700 rpm. As bombas são de um estágio, aspiração bilateral. Não foram encontradas informações acerca das outras bombas que compõem as demais estações intermediárias deste oleoduto.

As bombas de estações intermediárias num oleoduto são geralmente de eixo vertical, um estágio, sucção única. Podem ser utilizadas bombas rotativas para o transporte de óleo em pequenas e médias capacidades.

Nos terminais de armazenamento de petróleo e derivados há necessidade de bombas para enchimento de petroleiros ou caminhões-tanque. Neste caso se utilizam bombas centrífugas de eixo horizontal e vertical. Para manobras de enchimento e esvaziamento dos reservatórios, têm sido usadas bombas de eixo vertical, múltiplos estágios, colocadas num reservatório hermético. Consegue-se com isso atender às características de aspiração extremamente desfavoráveis para líquidos bombeados em temperaturas superiores às correspondentes à pressão de vaporização e às pressões de recalque exigidas.

4.4 REFINARIAS

As bombas para as refinarias (bombas de processo), como, aliás, todas as que se destinam a bombeamento de petróleo e derivados, obedecem a rigorosas exigências do API, dadas as características próprias dos produtos bombeados, que requerem precauções capazes de oferecer a indispensável segurança.

A variedade de bombas é muito grande, pois as condições de operação são muito diversificadas. Assim, há produtos de destilação do petróleo com densidade igual a 600 kg/m^3 e outros produtos de densidade maior que a da água. A viscosidade varia de valores inferiores aos da água até valores que caracterizam líquidos que não convém ser bombeados com bombas centrífugas, exigindo bombas rotativas. As temperaturas atingem até 450°C e as pressões podem ultrapassar 100 kgf/cm^2 . Os produtos bombeados podem ser inertes como água pura ou extremamente corrosivos, exigindo aços inoxidáveis especiais.

4.5 RECUPERAÇÃO DE ÓLEO ESPALHADO NO MAR

O óleo espalhado no mar devido a vazamentos, acidentes em navios-tanque, operações de bombeamento para enchimento ou esvaziamento de navios petroleiros ou ruptura de oleodutos submarinos pode ser recolhido da superfície por meio de embarcações dotadas de dispositivos especiais de captação, separação e armazenagem.

As embarcações tradicionais para a recuperação de petróleo no mar normalmente são barcos de dois cascos e contam com uma correia transportadora para recolher o óleo mais viscoso e uma barragem feita de material leve que recupera o óleo emulsionado e menos denso. Uma bomba de engrenagens faz então o transporte da mistura de óleo e água recuperados até um reservatório, de onde a mistura deverá seguir a uma unidade de separação destes líquidos.

5 MEDIDAS PARA MELHORIA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Uma forma de se melhorar o custo da energia elétrica no funcionamento dos motores que impulsionam as bombas consiste em utilizar instalações adequadas do ponto de vista da hidráulica, isto é:

- a) Utilizar tubulações com diâmetros bem dimensionados

Como já visto anteriormente, o diâmetro da tubulação tem forte influência no valor da perda de carga. Dessa forma, cabe analisar o arranjo mais econômico, pois um diâmetro menor (de menor custo) corresponderá a uma perda de carga maior, uma bomba maior (de maior custo) e um custo operacional maior, já que a potência necessária para vencer essa perda de carga será maior.

Escolhendo-se um diâmetro maior, tem-se a menor perda de carga, custos de aquisição do conjunto moto-bomba menor (menor potência, em função da menor perda de carga a ser “vencida”) e, igualmente, menor consumo de energia ao longo do alcance do projeto, que deverá compensar o maior custo da tubulação de maior diâmetro.

As Figura 8 e Figura 9 exemplificam o que foi dito, para um mesmo sistema nota-se que para um diâmetro maior (200 mm) é possível uma seleção de outra bomba com potência significativamente menor do que no caso de uma tubulação com diâmetro de 150 mm.

Uma vez que a perda de carga para o diâmetro de 200 mm é significativamente menor, a altura manométrica total também ficou reduzida ao valor de 31 m.c.a, o que permite a seleção de outro conjunto.

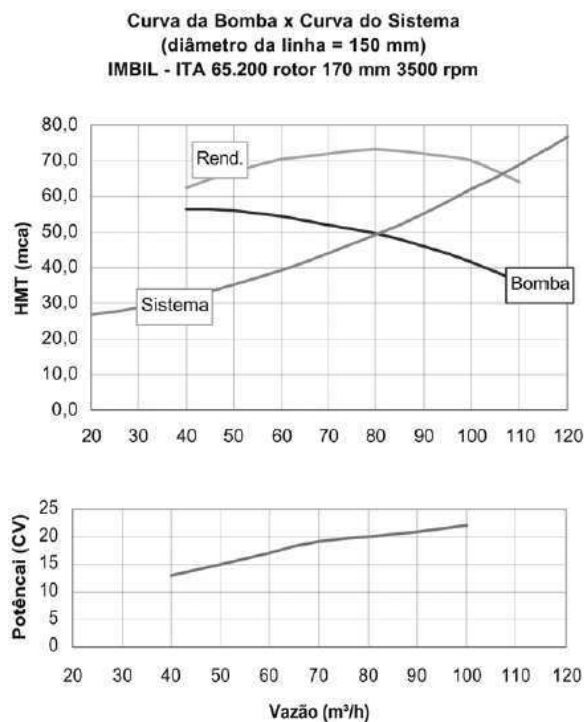


Figura 8: Curva da bomba x curva do sistema (diâmetro da linha = 150 mm).
(Fonte: Eficiência energética em sistemas de bombeamento. ELETROBRAS).

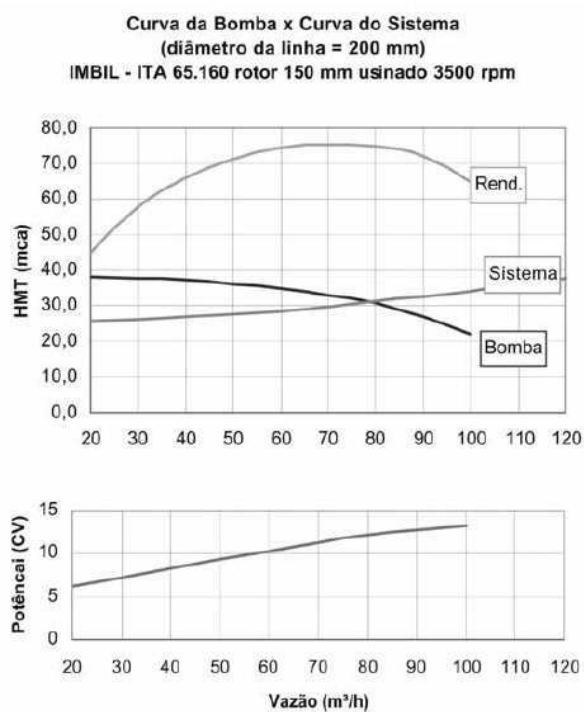


Figura 9: Curva da bomba x curva do sistema (diâmetro da linha = 200 mm).
(Fonte: Eficiência energética em sistemas de bombeamento. ELETROBRAS).

Deve-se sempre verificar o custo adicional da tubulação com diâmetro maior, comparando com o menor custo do equipamento de menor potência e o custo operacional também menor, dependendo do tempo médio diário de funcionamento previsto ao longo da vida útil do conjunto ou do alcance do projeto.

- b) Manter a tubulação em um bom estado de conservação quanto à rugosidade interna
- c) Variar a velocidade dos motores elétricos de modo a adequar o ponto de funcionamento da bomba ao seu máximo rendimento
- d) Escolher o conjunto moto-bomba com o melhor rendimento para o ponto de trabalho desejado

O fator principal do ponto de vista da otimização energética, é a potência dos motores, cujo modo de funcionamento gerará consumo de energia elétrica.

A partir da expressão para o cálculo da potência necessária para o acionamento de uma bomba centrífuga, verifica-se que os rendimentos da bomba e do motor influem de forma inversamente proporcional, e o peso específico, a vazão e a altura manométrica afetam diretamente no resultado da potência.

$$P = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H}{\eta_b \eta_M} \quad (21)$$

6 SIMULAÇÃO DE PROCESSOS

A modelagem e simulação de processos é cada vez mais utilizada pelas indústrias químicas e petroquímicas para fazer dimensionamento dos equipamentos e análise de funcionamento.

Suryanarayana (2003) define simulação como a predição de uma ou mais variáveis de um componente ou sistema sob diferentes condições de operação. Nascimento (2005) diz que a simulação computacional é um processo de experimentos em sistemas ou fenômenos físicos, realizados através de modelos matematicamente computadorizados, os quais representam características observadas em sistemas reais.

É possível, através da simulação computacional, analisar diferentes tipos de sistemas, o que possibilita:

- a) Analisar a implementação de novas tecnologias sem a necessidade da construção física;
- b) Conhecer melhor e dominar as várias etapas de um determinado processo;
- c) Melhorar o desempenho de um sistema;
- d) Obter informações do processo em tempo real sem precisar parar a operação da planta;

A maioria dos eventos físicos, caso fossem analisados de forma real, levaria dias, meses ou até anos para serem realizados. A simulação computacional desses eventos pode ser realizada em poucos minutos, o que permite diminuir o tempo na fase de análise de projeto.

Com a simulação computacional, análises são feitas de forma visual através da interface gráfica que existe nos simuladores, permitindo uma melhor compreensão e consequentemente melhores resultados. Sem os simuladores estas análises eram feitas através de tabelas e números, o qual acarretava resultados longe do resultado correto, devido aos complexos cálculos matemáticos e probabilísticos, e suas simplificações e aproximações, segundo Nascimento (2005).

Neste trabalho, vamos nos limitar ao uso do simulador do software MATLAB – *Simulink*. Este simulador se aplica a sistemas contínuos, discretos no tempo e/ou sistemas híbridos. Utiliza uma interface gráfica baseado na construção de modelos

usando diagramas de blocos. Em cada bloco do Simulink existem pacotes de programas que executam uma função específica da característica do mesmo.

Estes blocos estão localizados na biblioteca de blocos e são agrupados por tipo de característica, tais como: contínuos, discretos, fontes, saídas e muitos outros. Uma vantagem adicional é que o Simulink pode interagir com o MATLAB, logo a execução e a escolha de algoritmos de resolução para a simulação do modelo construído pode ser oriunda de menus do Simulink ou de comandos do MATLAB.

Além disso, os resultados obtidos da simulação podem ser exportados para o MATLAB para futuro processamento ou visualização.

7 METODOLOGIA E RESULTADOS

Devido à falta de informações sobre os sistemas de bombeamento nas indústrias petrolíferas, não foi possível realizar o estudo de caso, com o correto dimensionamento de bombas e posteriormente com a análise da melhoria da eficiência do sistema para determinada etapa de produção do petróleo. Isto ocorreu, pois tais empresas não puderam fornecer dados sobre o sistema nem os dados de placa das bombas utilizadas.

Portanto, nesta seção serão apresentadas as etapas necessárias para o dimensionamento de bombas, um exemplo prático de como pode ser realizada a escolha de uma bomba para determinado sistema, bem como análises do efeito da variação de rotação da bomba e do uso de válvulas de estrangulamento sobre o sistema. No Simulink, foi modelado o sistema do exemplo prático descrito anteriormente.

7.1 DIMENSIONAMENTO E SELEÇÃO DE BOMBAS

O correto dimensionamento de uma bomba é de grande importância para que a mesma opere o mais próximo possível do seu ponto ótimo. Este ponto é determinado avaliando-se a velocidade de rotação da bomba e sua máxima potência desenvolvida.

Para selecionar uma bomba, é necessário fazer o levantamento de todos os dados, que estão ligados, direta ou indiretamente, a sua aplicação. É preciso considerar o fluido que será transportado, levando em consideração sua densidade, viscosidade, entre outras características. E também deve-se considerar as condições de operação como vazão, pressão de bombeamento, entre outras. A seguir será mostrado um roteiro com os passos que devem ser seguidos para o dimensionamento de uma bomba.

- a) 1º Passo - Determinação da vazão
- b) 2º Passo - Determinação dos diâmetros das tubulações:

O critério a ser utilizado para escolha de diâmetros de tubulações é o critério de velocidade econômica, por ser simples e eficiente, e segundo muitos autores, seu valor pode variar de 0,5 a 2,0 m/s. Para determinar o diâmetro a partir deste critério, procede-se da seguinte forma, utilizando-se a relação abaixo:

$$V = \frac{Q}{A} \quad (22)$$

Onde V é a velocidade (m/s);

Q é a vazão (m³/s);

A é a área da seção do tubo, sendo determinada por:

$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (23)$$

Substitui-se a velocidade por um valor entre 0,5 e 2,0 m/s, isola-se matematicamente a expressão da área em função do diâmetro. A partir do valor calculado, usa-se o diâmetro comercial imediatamente acima para a tubulação de sucção, e o diâmetro comercial imediatamente abaixo no recalque.

c) 3º Passo - Determinação das perdas de carga.

d) 4º Passo - Determinação da altura manométrica:

O conjunto elevatório deverá vencer a diferença de nível entre os dois pontos mais as perdas de carga em todo o percurso, que correspondem as perdas de cargas normais e localizadas, explicadas na seção 2.5. A altura manométrica é a soma da altura geométrica com as perdas de carga totais.

e) 5º Passo - Escolha da família de bombas:

Considerando os intervalos da altura manométrica e da vazão presentes na curva do sistema, utiliza-se o gráfico de pré-seleção para se encontrar a família de bombas, o gráfico de pré-seleção da KSB BLOC encontra-se no Anexo B.

f) 6º Passo – Cálculo da potência:

Para se calcular a potência da bomba utiliza-se a seguinte fórmula:

$$P = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H}{75 \cdot \eta} \quad (24)$$

Onde: P = potência (CV);

γ = peso específico do fluido (kg/m³);

Q = vazão (m³/s);

H = altura manométrica (m);

η = rendimento (decimal).

Alguns fatores de ordem técnica ou econômica influenciam na seleção e especificação de bombas, são estes:

a) Normas aplicadas;

- b) Disponibilidade de mercado;
- c) Custo;
- d) Idoneidade dos fabricantes;
- e) Existência de documentação técnica;
- f) Existência de assistência técnica do fabricante;
- g) Vida útil desejada;
- h) Grau de responsabilidade da aplicação.

7.2 ESTUDO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM APLICAÇÕES DE BOMBAS CENTRÍFUGAS

Neste item será analisado um exemplo prático que tem por objetivo mostrar como pode ser feita a escolha de uma bomba centrífuga para determinado sistema. E posteriormente são feitas análises da eficiência da bomba quando há variação na rotação da bomba.

- a) Traçando a curva do sistema:

Considerando um sistema formado por uma tubulação de 300 mm de diâmetro e 2,5 km de comprimento cujo coeficiente “C” de Hazen-Williams é de 130, e sendo o desnível geométrico igual a 60 metros.

Temos que a perda de carga é dada pela Equação 12 , logo substituindo os valores do exemplo encontramos a expressão:

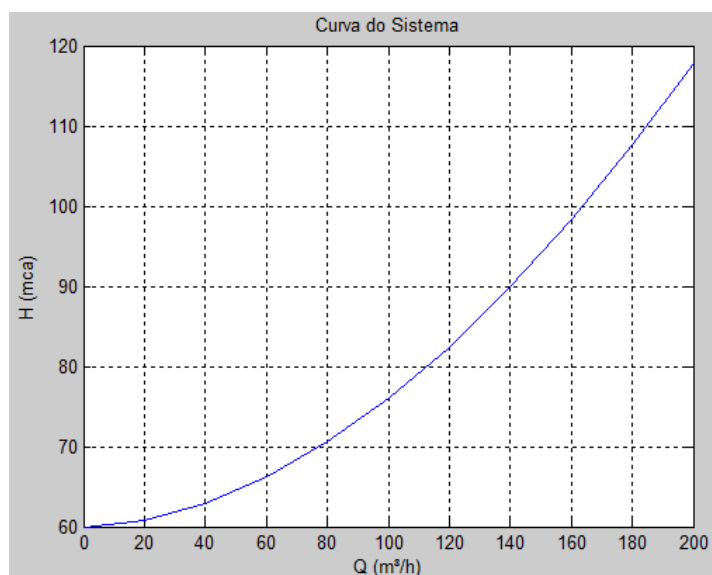
$$h = 1139,42 \cdot Q^{1,852}$$

Para traçar a curva basta atribuir valores a vazão (em m³/s) e obter os valores da perda de carga. Depois plotar o gráfico, lembrando que para cada valor da perda de carga deve ser acrescentado o desnível geométrico, já que a altura manométrica é a soma da altura geométrica, da perda de carga distribuída, e da perda de carga localizada. Neste caso estamos desconsiderando as perdas localizadas. A Tabela 5 apresenta os valores das vazões e suas respectivas perdas de cargas.

Tabela 5: Dados para traçar a curva do sistema.

Vazão	Perda de carga	Perda de carga do sistema
0	0	60.00
20	0.81	60.81
40	2.93	62.93
60	6.22	66.22
80	10.60	70.60
100	16.02	76.02
120	22.45	82.45
140	29.87	89.87
160	38.26	98.26
180	47.58	107.58
200	57.83	117.83

A Figura 10 representa a curva do sistema, traçada utilizando o Matlab.

**Figura 10- Curva do sistema.**

Com os dados da curva do sistema utiliza-se o gráfico de pré-seleção da Meganorm KSB, apresentado no Anexo C, encontrando a família de bombas 65-250, de 3500 rpm. Analisando as curvas características, a que melhor satisfaz essas condições é

a de 220 mm de rotor da KSB, apresentada no Anexo D. Os valores obtidos através da curva da bomba estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Dados da curva altura x vazão.

Vazão	Altura Manométrica
0	96
20	96
40	95.5
60	94
80	92
100	88
120	82
140	76
160	67

A curva da bomba e a curva do sistema estão representadas na Figura 11. E podemos perceber que seu ponto de operação é $H = 82$ m e $Q = 119$ m³/h.

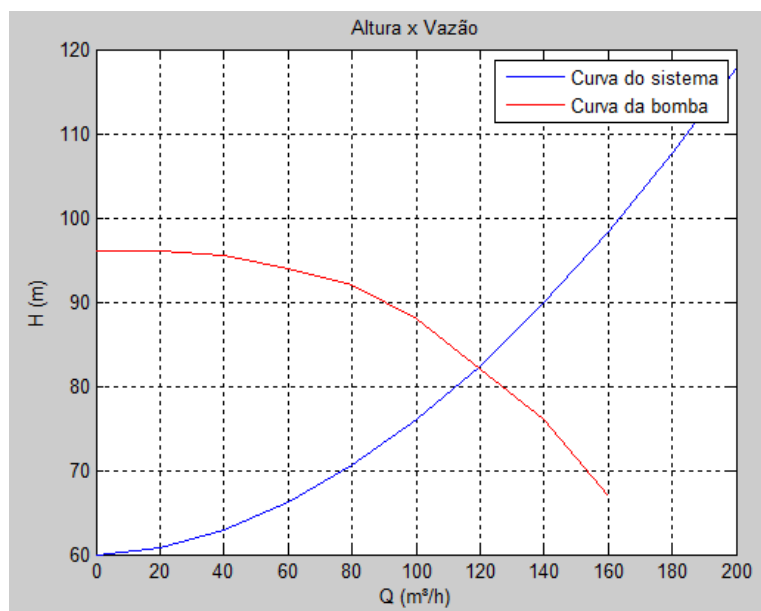


Figura 11 - Curva da bomba e curva do sistema.

Observando a curva característica da bomba, ilustrada na Figura 12, obtida do seu catálogo, nota-se que seu rendimento é aproximadamente 71,5%.

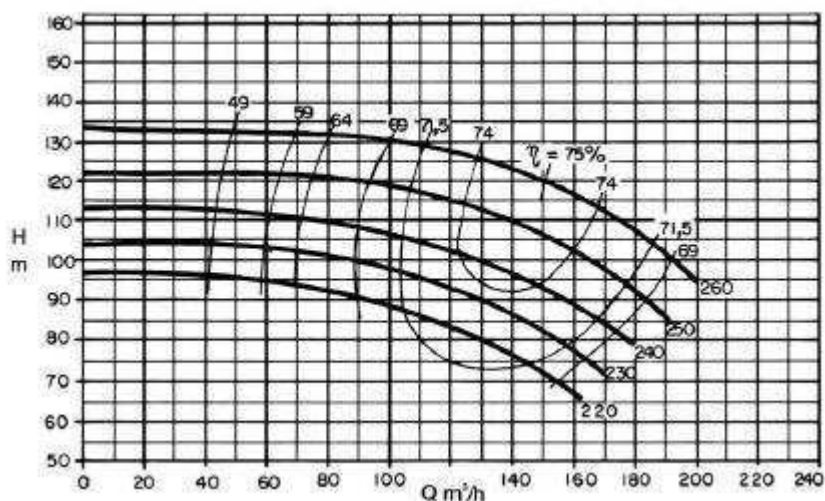


Figura 12 - Curva da bomba com rendimentos.
(Fonte: Catálogo KSB).

Logo, a potência necessária para o acionamento desta bomba se dá pela expressão:

$$N = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H}{75 \cdot \eta} \quad (25)$$

Onde, N = potência (CV);

γ = peso específico da água (1000 kg/m³);

Q = vazão (m³/s);

H = altura manométrica (m);

η = rendimento (decimal).

Então,

$$N = \frac{1000 \times \left(\frac{119}{3600}\right) \times 82}{75 \times 0.715} = 50,55 \text{ CV} = 49,85 \text{ HP}$$

b) Análise do efeito da variação de rotação da bomba sobre o sistema:

Caso a rotação da bomba fosse variada de 3500 para 3100 rpm, através das Equações 18 e 19, pode-se traçar a curva característica para a nova rotação, apresentado na Figura 13: **Análise do efeito da variação de rotação da bomba sobre o sistema.** Analisando este gráfico percebe-se que o ponto de operação muda de H = 82 m e Q =

119 m³/h para H = 70 m e Q = 80 m³/h, e seu rendimento passa de 71,5% para aproximadamente 66,5%, como ilustrado na Figura 12.

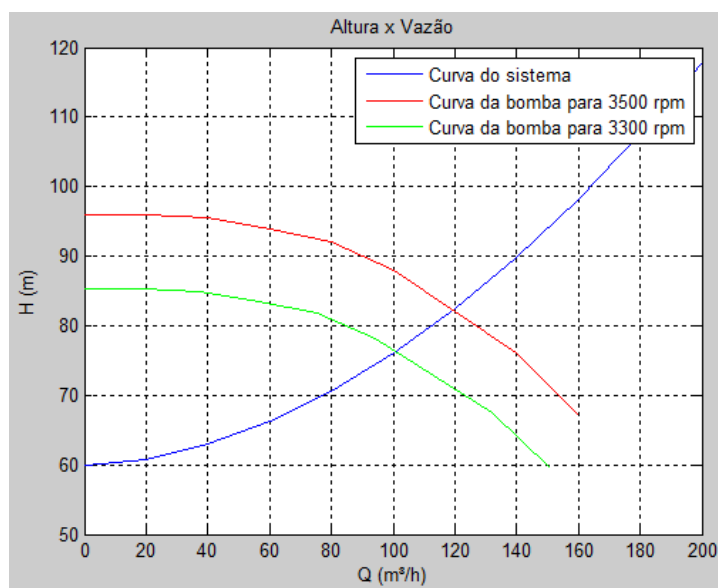


Figura 13: Análise do efeito da variação de rotação da bomba sobre o sistema

c) Efeito do uso de válvulas de estrangulamento: o uso de válvulas de estrangulamento em série com uma bomba centrífuga tem a finalidade de controlar a vazão do sistema através da sua abertura ou fechamento parcial. A Figura 14 mostra uma sucessão de pontos de operação gerados pelo fechamento progressivo da válvula de estrangulamento. Nota-se que à medida que se faz o fechamento da válvula, a vazão do sistema vai sendo reduzida, enquanto a pressão vai gradualmente aumentando e se transformando em perda de carga adicional. Neste processo, a rotação da bomba fica inalterada e a potência consumida aumenta para suprir o aumento de carga (DUTRA, 2005).

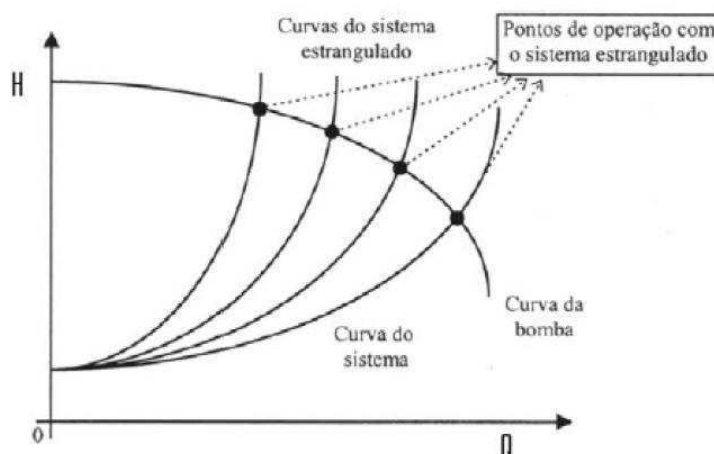


Figura 14 - Efeito do uso de válvulas de estrangulamento.

7.3 USO DA FERRAMENTA SIMULINK COMO ELEMENTO COMPLEMENTAR PARA ANÁLISE DO PROCESSAMENTO DE ENERGIA

O mesmo sistema mostrado no exemplo do item 7.2 foi simulado utilizando o *simulink*.

O seu diagrama está ilustrado na Figura 15: Diagrama de um sistema de elevação de um fluido no Simulink. Figura 15.

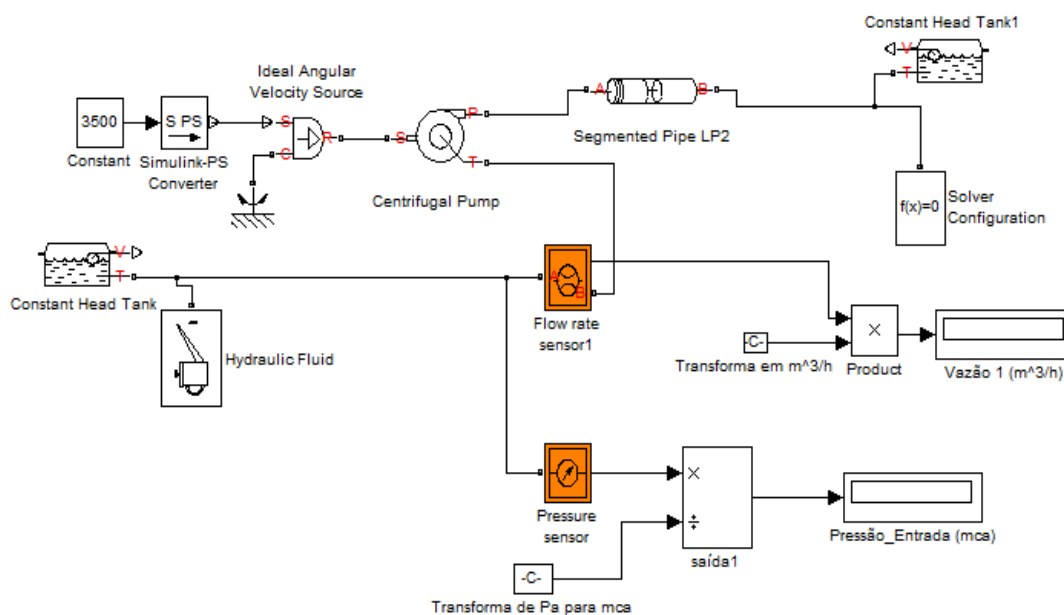


Figura 15: Diagrama de um sistema de elevação de um fluido no Simulink.

No *Simulink*, a bomba centrífuga tem três opções de parametrização, são elas:

- a) *Parameterizing the Pump by Approximating Polynomial*
- b) *Parameterizing the Pump by Pressure Differential and Brake Power Versus Pump Delivery*
- c) *Parameterizing the Pump by Pressure Differential and Brake Power Versus Pump Delivery at Different Angular Velocities*

Para a simulação em questão foi utilizada a segunda opção: “*Parameterizing the Pump by Pressure Differential and Brake Power Versus Pump Delivery*”, já que dispúnhamos das curvas de altura manométrica versus vazão e potência necessária versus vazão. Está ilustrado na Figura 16 os parâmetros do bloco da bomba centrífuga.

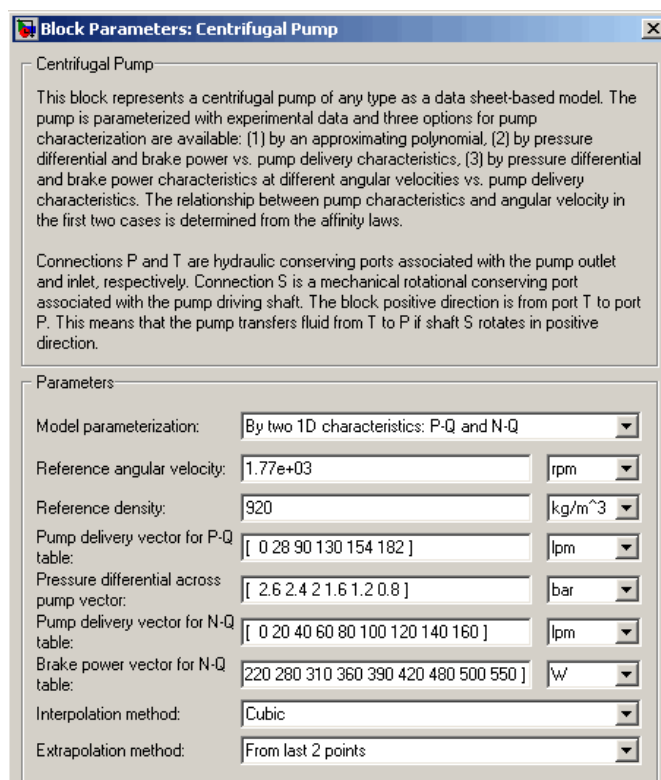


Figura 16 - Parâmetros do bloco: Bomba Centrífuga.

Os dados das curvas características do anexo D apresentam seus dados válidos para densidade de 1000 Kg/m^3 e viscosidade cinemática de até $20 \text{ mm}^2/\text{s}$, portanto o fluido escolhido para realizar a simulação foi a água.

No campo “*Pump delivery vector for P-Q table*” foram inseridos os valores de vazão, retirados da curva Altura x Vazão, dividido por 3600 para que a unidade de vazão fosse m^3/s , ao invés de m^3/h , como no gráfico.

Para o campo “*Pressure differential across pump vector*” foram colocados os valores equivalentes a altura manométrica em mca.

Tomando alguns valores da curva do catálogo Potência x Vazão foi obtido o gráfico da Figura 17.

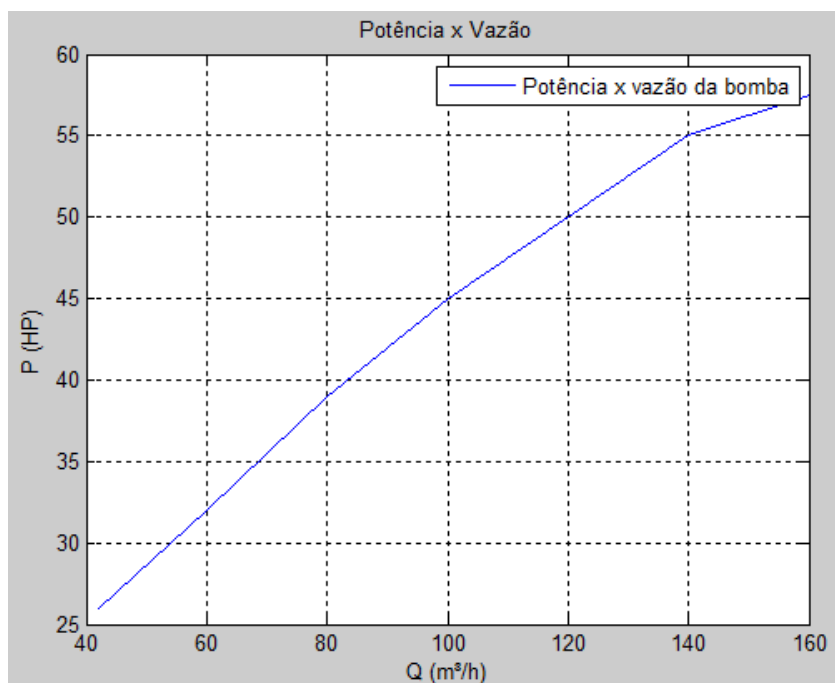


Figura 17 - Potência x Vazão a partir da curva apresentada no catálogo da KSB.

No campo “*Pump delivery vector for N-Q table*” foram inseridos os valores de vazão, retirados da curva Potência x Vazão, dividido por 3600 para que a unidade de vazão fosse m^3/s , ao invés de m^3/h , como no gráfico.

No campo “*Brake power vector for N-Q table*” foram inseridos os valores da potência retirados da curva Potência x Vazão.

Nos outros parâmetros foram utilizadas as opções default do programa.

A bomba centrífuga apresenta as seguintes portas:

- a) T : que é a porta de conservação hidráulica associada com a bomba de sucção, ou entrada;
- b) P: Porta de conservação hidráulica associada com a saída da bomba;

- c) Porta de conservação da rotação mecânica associada com o eixo da bomba.

Na porta de entrada (T) foram conectados os seguintes blocos:

- a) *Constant Head Tank*: que representa um reservatório hidráulico pressurizado, em que o líquido é armazenado sob uma pressão especificada;
- b) *Hydraulic Fluid*: este bloco fornece as propriedades dos fluidos hidráulicos, tais como a viscosidade cinemática, densidade e módulo volumétrico, para todos os blocos do circuito hidráulico;
- c) *Flow rate sensor*: mede a vazão do fluido;
- d) *Pressure sensor*: mede a pressão do fluido.

Na porta de saída da bomba (P) foram conectados os seguintes blocos:

- a) *Constant Head Tank*: que representa um reservatório hidráulico pressurizado, em que o líquido é armazenado sob uma pressão especificada;
- b) *Solver Configuration*: especifica informações e fornece os parâmetros que o modelo precisa antes de começar a simulação.
- c) *Segmented Pipe LP2*: neste bloco fornecemos alguns parâmetros do tubo, como: diâmetro, comprimento, perdas equivalentes e posição vertical;

Na porta de conservação da rotação mecânica associada com o eixo da bomba (S), foram conectados os seguintes blocos:

- a) *Simulink-PS Converter*: converte o sinal de entrada em sinal físico, neste caso, converte o valor da constante 3500 em rpm.
- b) *Ideal Angular Velocity Source*: simula uma fonte de velocidade ideal angular em sistemas de rotação mecânica.

Variando o diâmetro do rotor foram anotados os valores da pressão e da vazão, para assim ser traçada a curva do sistema. A Figura 18 apresenta esse gráfico.

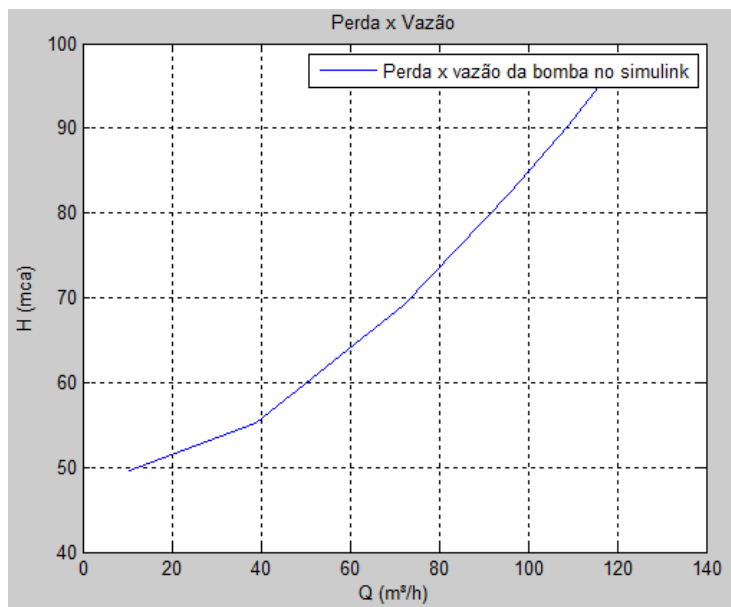
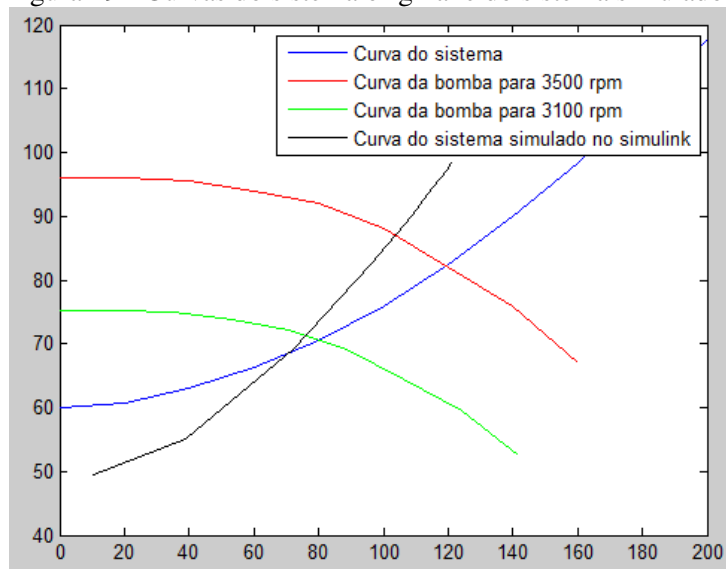


Figura 18: Curva do sistema simulado no simulink.

Na Figura 19 foi traçado em um mesmo gráfico a curva do sistema original, a curva do sistema que foi gerado no Simulink e as curvas das bombas para as rotações de 3100 e 3500 rpm.

Figura 19 - Curvas do sistema original e do sistema simulado.



Verifica-se pelo gráfico que o ponto de operação da bomba é $H = 87,0$ m e $Q = 103$ m³/h e a partir da análise da curva característica da bomba no catálogo tem-se um rendimento de aproximadamente 70%, esta diferença é proveniente da quantidade de variáveis e condições a serem consideradas no *Simulink*, comparado com os dados do exemplo prático.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A complexidade da indústria em seus vários setores a torna um interessante caso para o estudo especial de bombas e escoamentos. Suas mais diversas características de fluidos e escoamentos permitem encontrar aplicação para a maioria dos tipos de bombas industriais disponíveis no mercado.

Como foi discutido no trabalho, o correto dimensionamento de sistemas de bombeamento deve ser considerado para a escolha da bomba, de modo a atuar no ponto ótimo de operação, com a melhor eficiência global.

A escolha correta da bomba a ser utilizada e o estudo da eficiência energética em sistemas de bombeamento, por meio de suas curvas características, devem ser feitas considerando a intersecção entre a curva do sistema e a curva da bomba, determinando o seu ponto de operação com um rendimento específico.

Ao decorrer do trabalho foi solicitado à diversas empresas petrolíferas dados sobre alguma etapa do sistema de produção de petróleo. Com a finalidade de fazer o dimensionamento de bombas para um sistema real, e após isso comparar a eficiência energética do sistema antes do correto dimensionamento das bombas e após este.

Nenhuma das empresas solicitadas forneceu esses dados, o que dificultou o desenvolver da pesquisa. Deste modo, não foi possível realizar o estudo de caso, para um sistema real. Então, foi analisado um exemplo prático que teve como objetivo traçar a curva de um sistema e escolher a bomba ideal, assim como analisar os efeitos da variação de rotação da bomba e do uso de válvulas de estrangulamento no sistema. Além disso, no Simulink, foi simulado esse sistema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DUTRA, J. B. A. **Eficiência energética no controle da vazão em sistemas de bombeamento de água**: uso de válvula e controle de velocidade. Paraíba do Sul: [s. l], 2005.

ELETOBRAS. **Bombas Hidráulicas**. Centro de Treinamento e Eficiência Energética em Sistemas de Bombeamento.

ELETOBRÁS. **Eficiência de Aplicações para Grupos Geradores Arrefecidos a Água**.

ELETOBRAS. **Eficiência Energética em Sistemas de Bombeamento. PROCEL, Sanear: Eficiência Energética no Saneamento Ambiental**.

F. SILVA, Bernardo S. **Apostila: Curso de Simulink 2.0 Modelagem, Simulação e Análise de Sistemas Dinâmico**. Laboratorio de Engenharia Elétrica da Universidade do Estado do rio de Janeiro (UERJ).

GUIMARAES, RONALDO. **Comportamento elétrico, mecânico e hidráulico de um sistema de bombeamento sob o enfoque da eficiência energética, 2008**.

HICKS, Tyler G.; EDWARDS, T. W. **Pump Application Engineering**. McGraw-HILL. United States of America, 1971.

KSB. **Manual de Curvas Características**.

BARROS, MANOEL CORDEIRO. **Apostila de Bombas**.

MHF. **Análise de Vibrações em Bombas Centrífugas**.

NASCIMENTO, J. M. A., 2005, **Simulador computacional para poços de petróleo com método de elevação artificial por bombeio mecânico**, Dissertação de mestrado, UFRN, Natal.

ROBERTO OENNING. **Análise da Vialidade Econômica de um Projeto de Implantação de Variadores de Velocidade em Bombas Centrífugas**.

SCHNEIDER, **Manual Técnico: Motobombas**.

SURYANARAYANA, N. V., ARICI, Ö., 2003, **Design and simulation of hermal systems**, McGraw-Hill, Boston, EUA.

ANEXOS

ANEXO A – Comprimentos Equivalentes a Perdas Localizadas

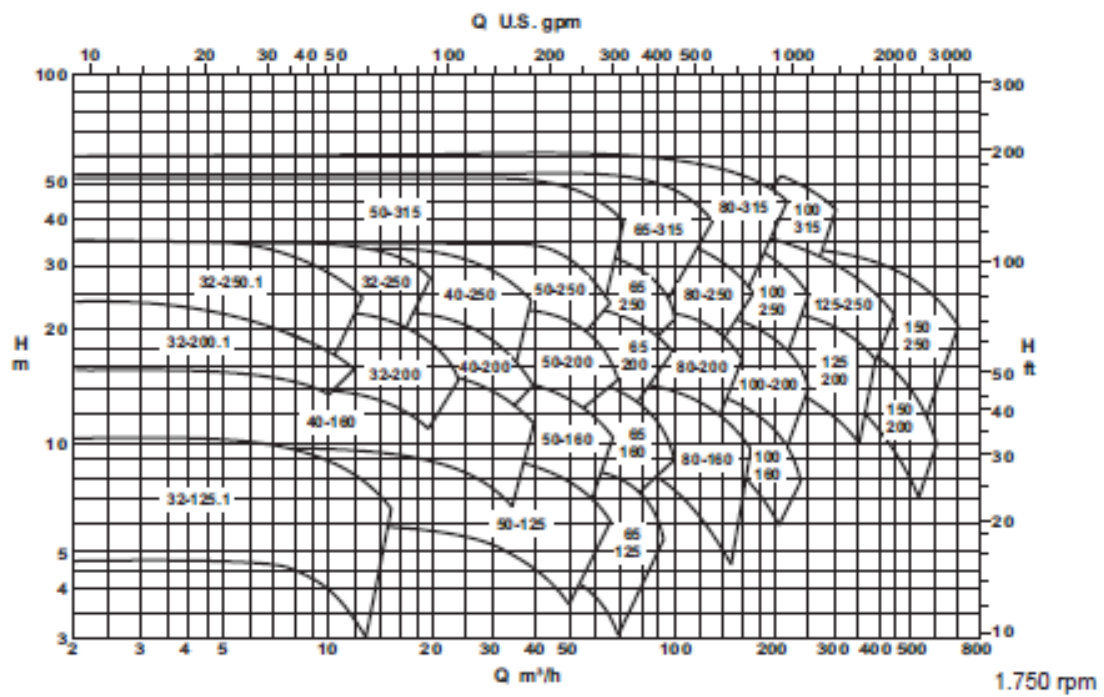
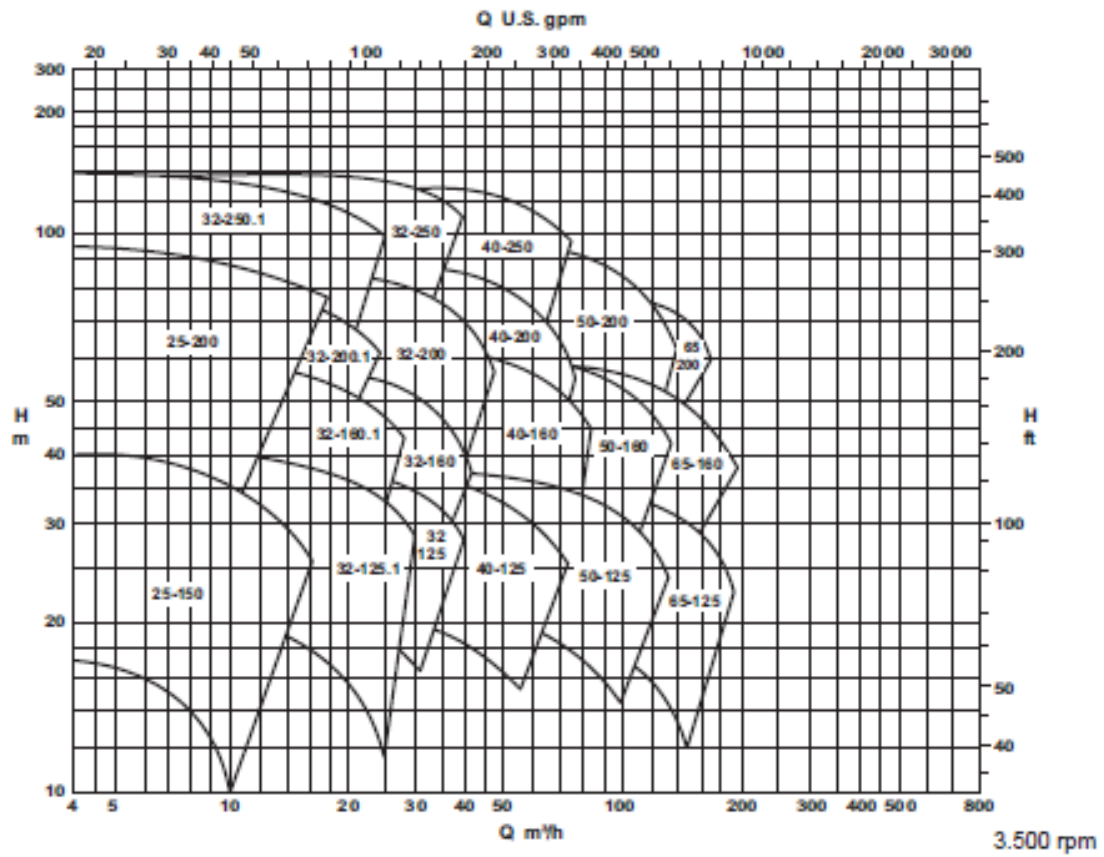
Comprimentos Equivalentes a Perdas Localizadas (em metros de canalização retilínea)

DIAMETRO mm	COTOVELO 90°			CURVAS - 90°		ENTRADAS		REGISTROS		TES		VALV. PE E CRIVO	SAIDA CANALIZAÇ.	VALV. RETENÇÃO	
	R.L	R.M	R.C	R/D-1/2	R/D-1	Normal	borda	gaveta	globo	ângulo	lado			b-lateral	Leve
13	0,3	0,4	0,5	0,2	0,3	0,2	0,4	0,1	4,9	2,6	0,3	1,0	0,4	1,1	1,6
19	0,4	0,6	0,7	0,3	0,4	0,2	0,5	0,1	6,7	3,6	0,4	1,4	0,5	1,6	2,4
25	0,5	0,7	0,8	0,4	0,5	0,3	0,7	0,2	8,2	4,6	0,5	1,7	0,7	2,1	3,2
32	0,7	0,9	1,1	0,5	0,6	0,4	0,9	0,2	11,3	5,6	0,7	2,3	10,0	1,7	4,0
38	0,9	1,1	1,3	0,6	0,7	0,5	1,0	0,3	13,4	6,7	0,9	2,8	11,6	3,2	4,8
50	1,1	1,4	1,7	0,8	0,9	0,7	1,5	0,4	17,4	8,5	1,1	3,5	14,0	4,2	6,4
63	1,4	1,7	2,0	0,9	1,0	0,9	1,9	0,4	21,0	10,0	1,3	4,3	17,0	5,2	8,1
75	1,3	2,1	2,5	1,2	1,3	1,1	2,2	0,5	26,0	13,0	1,6	5,2	20,0	6,3	9,7
100	1,6	2,8	3,0	1,5	1,6	1,6	3,2	0,7	34,0	17,0	2,1	6,7	23,0	8,4	12,9
125	2,1	3,7	3,4	1,9	2,1	2,0	4,0	0,9	43,0	21,0	2,7	8,4	30,0	10,4	16,1
150	2,7	4,3	4,2	2,3	2,5	2,5	5,0	1,1	51,0	26,0	3,4	10,0	39,0	12,5	19,3
200	3,4	5,5	6,4	3,0	3,3	3,5	6,0	1,4	67,0	34,0	4,3	13,0	52,0	16,0	25,0
250	5,5	6,7	7,9	3,8	4,1	4,5	7,5	1,7	85,0	43,0	5,5	16,0	65,0	20,0	32,0
300	6,1	7,9	9,5	4,6	4,8	5,5	9,0	2,1	102,0	51,0	6,1	19,0	78,0	24,0	38,0
350	7,3	9,5	10,5	5,3	5,4	6,2	11,0	2,4	120,0	60,0	7,3	22,0	90,0	28,0	45,0

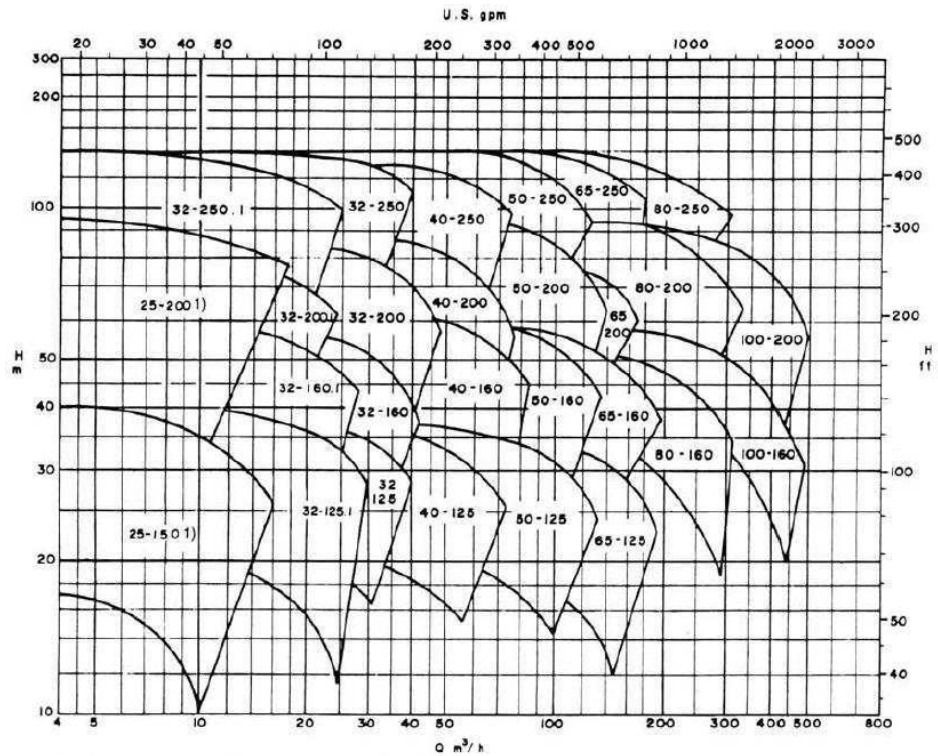
FONTE - Bomba e Instalações de Bombeamento, pg 566 - 1980

R.L - raio longo, R.M - raio médio, R.C - raio curto

ANEXO B - Gráfico de Pré-seleção da KSB

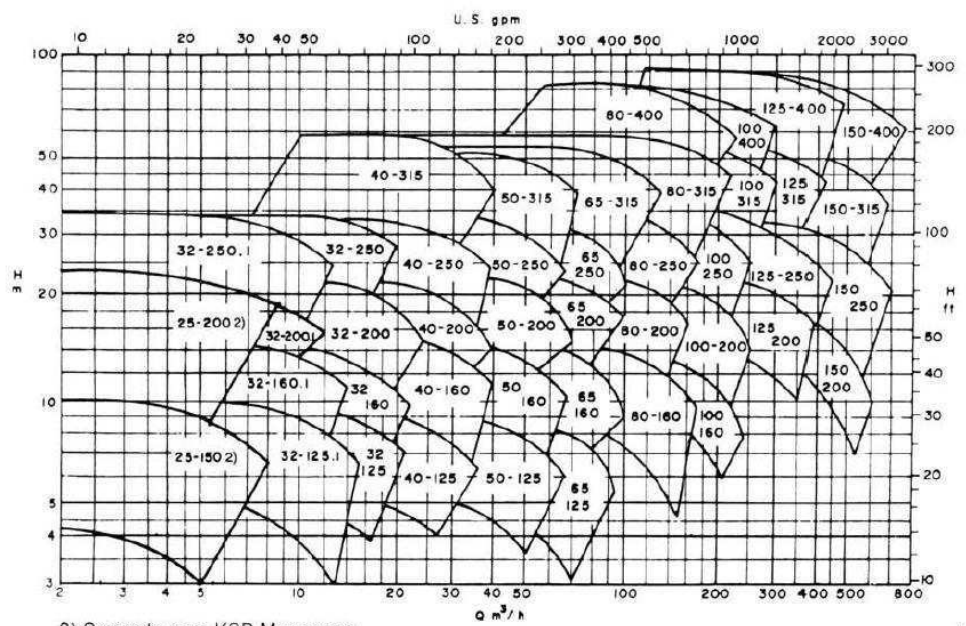


ANEXO C - Gráfico de Pré-seleção da MEGANORM KSB



1) Somente para KSB Meganorm e MegaBloc
 1) Used only for KSB Meganorm and MegaBloc
 1) Aplicable sólo para las bombas KSB Meganorm y MegaBloc


3500 rpm



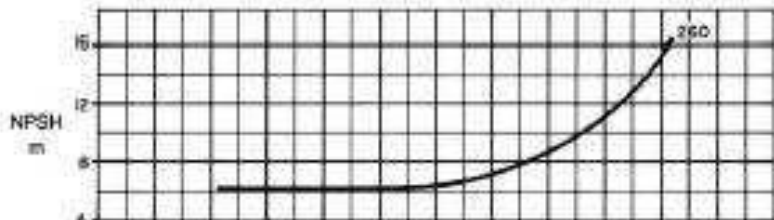
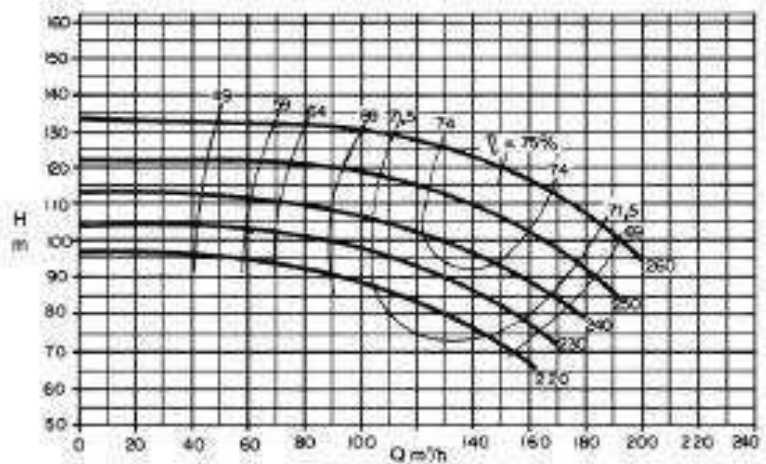
2) Somente para KSB Meganorm
 2) Used only for KSB Meganorm
 2) Aplicable sólo para las bombas KSB Meganorm

1750 rpm

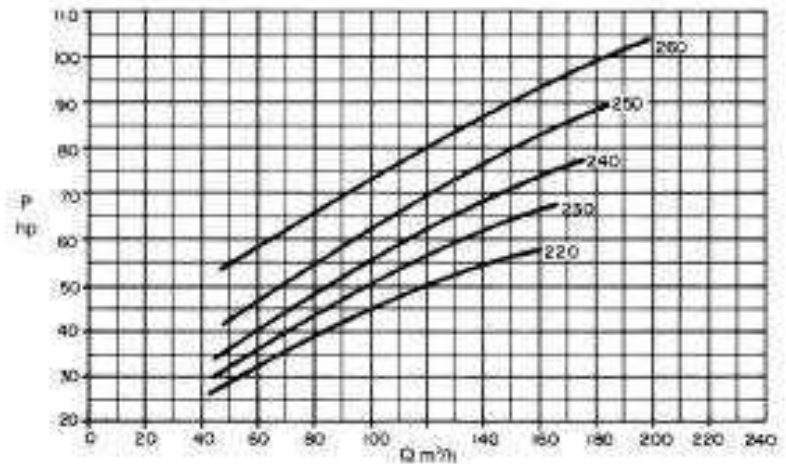
ANEXO D - Bombas 65-250, de 3500 rpm, e 220 mm de rotor da KSB

Bomba Tipo Pump Type Tipo de Bomba	KSB MEGANORM KSB MEGACHEM	Tamanho Size Tamaño	65-250	
Classe nº Project - No. Classe - nº		Item nº Item - No. Pos. - nº		
			3500 rpm	

Altura Manométrica
Head
Altura Manométrica



Potência Necessária
Shaft Power
Potencia Necesaria



Dados válidos para densidade de 1 kg/dm³ e velocidade cinética até 20 m/s
Data aplica to a density of 1 kg/dm³ and kinematical velocity up to 20 m/s
Datos válidos para densidad 1 kg/dm³ y viscosidad cinética hasta 20 m/s

Garantia das características de funcionamento conforme ISO 9906 Anexo A
Operating data according to ISO 9906 Annex A
Garantía de las características de funcionamiento según ISO 9906 suplemento A