

unesp  **UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

PRISCILA JESUS DE ARAUJO

SELEÇÃO DE MOTOBOMBAS PARA O SETOR
SUCROALCOOLEIRO

Guaratinguetá
2013

PRISCILA JESUS DE ARAUJO

SELEÇÃO DE MOTOBOMBAS PARA O SETOR SUCROALCOOLEIRO

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Eugênio Filippo Fernandes Filho

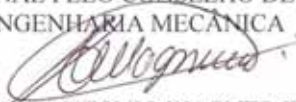
Guaratinguetá
2013

A663s	<p>Araujo, Priscila Jesus de Seleção de motobombas para o setor sucroalcooleiro / Priscila Jesus de Araujo – Guaratinguetá : [s.n], 2013. 101 f : il. Bibliografia: f. 99-100</p> <p>Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2013. Orientador: Prof. Dr. Guilherme Eugênio Filippo Fernandes Filho</p> <p>1. Energia elétrica – conservação 2. Açúcar – usinas I. Título</p> <p style="text-align: right;">CDU 620.9</p>
-------	---

PRISCILA JESUS DE ARAUJO


ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA


Prof. Dr. ANTONIO WAGNER FORTI
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. GUILHERME EUGÊNIO FILIPPO
FERNANDES FILHO
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. MAURICIO ARAUJO ZANARDI
UNESP-FEG


Prof. Dr. CELSO EDUARDO TUNA
UNESP-FEG

Dezembro de 2013

Dedico este trabalho ao meu namorado Raphael Camara Theophilo de Almeida, pelo apoio e compreensão nos momentos mais difíceis e a todos aqueles que tornaram esse trabalho possível.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus pela oportunidade de poder estudar e me formar, sempre iluminando meu caminho e não deixando desistir de meus objetivos,

aos meus familiares, pelo apoio de poder estudar e me formar em engenharia,

ao meu namorado Raphael Camara Theophilo de Almeida que sempre me incentivou e me apoiou nesses últimos anos, com paciência e compreensão, e sempre me levantando nos momentos mais difíceis da minha vida.

aos meus sogros por contribuírem com grande parte da minha formação acadêmica e por sempre me apoiarem,

a todos os professores da FEG que participaram do meu crescimento pessoal e intelectual,

ao meu orientador Prof. Dr. Guilherme Eugênio Filippo Fernandes Filho pelo apoio, pelo tempo dedicado a me orientar e pela oportunidade de realizar esse trabalho.

“Os caminhos que conduzem o homem ao saber
são tão maravilhosos quanto o próprio saber”

Johannes Kepler

ARAUJO, P. J. **Seleção de motobombas para o setor sucroalcooleiro**. 2013. 101f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2013.

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo relatar como funciona uma usina sucroalcooleira, assim como detalhar todos os processos que utilizam bombas e auxiliar na seleção e especificação de bombas, acopladas com motores, que irão fazer parte dos processos industriais importantes na fabricação de açúcar e etanol. Uma revisão bibliográfica sobre funcionamento de usinas sucroalcooleiras e sobre bombas foi realizado para poder analisar um estudo de caso. Este teve como objetivo a análise das bombas selecionadas para fazerem parte de um projeto inicial de uma usina que futuramente visava expansão. As bombas que foram selecionadas para fazer parte do projeto estavam superdimensionadas e operando fora do ponto de melhor rendimento, se tornando ineficientes, visto que não houve expansão dessa usina. A solução foi selecionar outra bomba com maior rendimento e menos consumo de potência para que houvesse economia no consumo energético e no custo operacional, contribuindo com a sobra de energia elétrica na usina para venda ou para consumo próprio.

PALAVRAS-CHAVE: Usina sucroalcooleira. Bombas. Eficiência energética.

ARAUJO, P. J. **Selection of motor pumps for the sugar and alcohol sector.** 2013. 101f. Graduate Work (Graduate in Mechanical Engineering) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2013.

ABSTRACT

This work has the purpose to explain how the sugar and alcohol sector works, detail all the processes which uses pumps and assist in the selection and specification of pumps attached with engines, that will make part in important industry processes in the manufacture of sugar and alcohol. A bibliographic revision about the working of sugar and alcohol sector and about pumps were made to help the analysis of a case. This case had the purpose to analyze the selected pumps that were part of a initial project of an industry which aimed a future expansion. The pumps that were selected to made part of the initial project were over dimensioned and were operating out of the best performance point, making the pumps inefficient because the expansion didn't happened. The solution was to select another pump with bigger performance and less power consumption to have a decrease in the energy consumption and in the operational costs of the industry and using the extra electric energy in the industry or selling it.

KEYWORDS: Sugarcane sector. Pumps. Efficient energy use

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Subprodutos produzidos através da cana-de-açúcar	15
FIGURA 2 – Esquema geral da produção de açúcar e etanol	16
FIGURA 3 – Esquema de um terno	18
FIGURA 4 – Fluxograma do sistema de evaporação de múltiplo efeito	20
FIGURA 5 – Esquema geral do ciclo de vapor empregado em usinas	23
FIGURA 6 – Esquema de funcionamento de uma usina sucroalcooleira	24
FIGURA 7 – Oferta interna de energia elétrica	30
FIGURA 8 – Participação de renováveis na matriz energética brasileira	31
FIGURA 9 – Regiões produtoras de cana-de-açúcar	32
FIGURA 10 – Classificação das bombas hidráulicas	37
FIGURA 11 – Tipos e formas de rotores.....	38
FIGURA 12 – Rotores: (a) de simples sucção; (b) de dupla sucção.....	41
FIGURA 13 – Tipos de rotores semi-abertos	42
FIGURA 14 – Carcaça em voluta	42
FIGURA 15 – Luvas: (a) Luva do eixo; (b) Luvas espaçadoras	43
FIGURA 16 – Caixa de gaxetas convencional	44
FIGURA 17 – Tipo de montagem do selo: (a) montagem interna; (b) montagem externa.....	45
FIGURA 18 – Base metálica de uma bomba horizontal	46
FIGURA 19 – Representação de bombas em série	53
FIGURA 20 – Indicação do ponto de operação de bombas diferentes em série	53
FIGURA 21 – Representação de bombas em paralelo.....	54
FIGURA 22 – Obtenção de curvas para associação em paralelo	55
FIGURA 23 – Curvas de potência solicitadas para bombas centrífugas	57
FIGURA 24 – Exemplo de um ciclo de funcionamento de uma centrífuga	60
FIGURA 25 – Ábaco de cobertura de seleção.....	63
FIGURA 26 – Curvas características	63
FIGURA 27 – Esquema de uma instalação para teste.....	67
FIGURA 28 – Curvatura das palhetas do rotor.....	67
FIGURA 29 – Curvas estáveis	68

FIGURA 30 – Curvas instáveis.....	69
FIGURA 31 – Curvas típicas de potência para diferentes tipos de rotores: (a) fluxo radial; (b) fluxo axial; (c) fluxo misto	69
FIGURA 32 – Curva típica de eficiência.....	70
FIGURA 33 - Indicação do caminho percorrido pelo fluido.....	71
FIGURA 34 – Comportamento da curva de NPSH por vazão	72
FIGURA 35 – Curva característica H-P- η -NPSHr	73
FIGURA 36 – Curva característica de isoeffiência	74
FIGURA 37 – Uso de inversor.....	77
FIGURA 38 – Curva KSB LCC-M 150-500	87
FIGURA 39 – Nova bomba selecionada (KSB MEGACHEM 125-315).....	88
FIGURA 40 – Potência consumida pela nova bomba (KSB MEGACHEM 125-315).....	89
FIGURA 41 – Curva KSB MEGACHEM 150-315.....	90
FIGURA 42 – Curva P x Q (KSB MEGACHEM 150-315)	91
FIGURA 43 – Curva KSB MEGACHEM 125-315.....	92
FIGURA 44 – Curva P x Q (KSB MEGACHEM 125-315)	92
FIGURA 45 – Curva KSB MEGACHEM 150-315.....	94
FIGURA 46 – Curva P x Q (KSB MEGACHEM 150-315)	95
FIGURA 47 – Curva KSB MEGACHEM 80-315.....	96
FIGURA 48 – Curva P x Q (KSB MEGACHEM 80-315)	96

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Número de unidades de acordo com a região e o perfil	32
TABELA 2 – Principais estados produtores de cana-de-açúcar.....	33
TABELA 3 – Safra nos últimos anos	33
TABELA 4 – Produção de açúcar (mil toneladas).....	34
TABELA 5 – Produção de etanol (mil m ³).....	34
TABELA 6 – Produção de etanol anidro e hidratado (mil m ³).....	35
TABELA 7 – Estimativa da produção de bagaço de cana-de-açúcar	36
TABELA 8 – Valores de viscosidade e massa específica à temperatura de 20°C ..	75
TABELA 9 – Ponto de operação das bombas de menor e maior potência	78
TABELA 10 – Quantidade de bombas operando com diferentes tipos de fluidos..	79
TABELA 11 – Quantidade de bombas centrífugas lentas.....	80
TABELA 12 – Quantidade de bombas centrífugas normais	81
TABELA 13 – Quantidade de bombas centrífugas rápidas.....	82
TABELA 14 – Bombas selecionadas de acordo com a maior potência consumida	83
TABELA 15 – Valores estimados de consumo energético e de custo operacional.	84
TABELA 16 – Dados do item 4	86
TABELA 17 – Valores de consumo energético e de custo operacional do item 4..	88
TABELA 18 – Resultados para nova bomba selecionada do item 4	89
TABELA 19 – Dados do item 6.....	90
TABELA 20 – Valores de consumo energético e de custo operacional do item 6..	91
TABELA 21 – Resultados para nova bomba selecionada do item 6	93
TABELA 22 – Dados do item 8.....	94
TABELA 23 – Valores de consumo energético e de custo operacional do item 8..	95
TABELA 24 – Resultados para nova bomba selecionada do item 8	97
TABELA 25 – Resultados significativos das bombas antes e depois.....	97

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Considerações gerais e objetivo do trabalho	12
1.2	Metodologia	12
1.3	Resultados e Conclusões	13
1.4	Descrição do trabalho por capítulo	13
2	VISÃO GERAL DE USINAS SUCROALCOOLEIRAS	15
2.1	Funcionamento de uma usina sucroalcooleira	16
2.1.1	Fabricação do açúcar.....	19
2.1.2	Fabricação do etanol	21
2.1.3	Geração de energia e vapor	22
2.2	Processos na usina que utilizam bombas hidráulicas	24
2.3	Perfil do setor sucroalcooleiro	28
3	VISÃO GERAL DE BOMBAS E MOTORES	37
3.1	Bombas hidráulicas	37
3.2	Classificação das bombas em geral	37
3.3	Características das bombas centrífugas	39
3.4	Componentes de uma bomba centrífuga	39
3.5	Normas de projeto.....	48
3.6	Seleção de materiais.....	48
3.7	Instalação Hidráulica	51
3.8	Seleção de motores elétricos	55
3.8.1	Acionamento de bombas hidráulicas	55
3.8.2	Seleção do motor	57
3.8.3	Acionamentos na indústria sucroalcooleira	59
4	SELEÇÃO DE BOMBAS	61
4.1	Curvas características.....	66
4.2	Fatores que modificam as curvas características.....	75
4.2.1	Mudança de fluido	75
4.2.2	Mudança de rotação	76
5	ESTUDO DE CASO	78
5.1	Análise quantitativa de bombas	78
5.2	Tipos de bombas	79
5.3	Eficiência energética	83
5.3.1	Caso 1	85
5.3.2	Caso 2	90
5.3.3	Caso 3	93
6	COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES	98
	REFERÊNCIAS	99

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações gerais e objetivo do trabalho

O setor sucroalcooleiro no Brasil está em crescimento e em destaque, por ser uma fonte considerada renovável. Em 2012, o Brasil teve participação de 42,4% em fontes renováveis sendo reconhecido mundialmente por isso. Além disso, é o maior produtor e exportador de açúcar do mundo e o segundo maior produtor de etanol, perdendo apenas para os Estados Unidos.

O objetivo deste trabalho é descrever como funciona uma usina sucroalcooleira, desde a chegada da cana-de-açúcar até a fabricação de açúcar e etanol, entender a participação do setor sucroalcooleiro na matriz energética brasileira, assim como detalhar todos os processos que utilizam bombas, rever conceitos de bombas para auxiliar na seleção e especificação de bombas, que farão parte dos processos industriais importantes na fabricação de açúcar e álcool.

Os processos industriais do setor sucroalcooleiro demandam um número significativo de bombas centrífugas que consomem uma boa parte da energia elétrica e um estudo de caso irá verificar qual a importância de se operar com bombas eficientes para economizar na energia elétrica.

1.2 Metodologia

Esse trabalho consiste de três etapas principais. O primeiro é a compreensão do funcionamento de usinas, coleta de dados estatísticos sobre o perfil da usina sucroalcooleira e entender quais processos industriais utilizam bombas, o segundo é uma revisão bibliográfica sobre tipos de bombas, seu funcionamento e análise das curvas características das bombas centrífugas e o terceiro é o desenvolvimento de um estudo de caso baseado em dados de uma usina sucroalcooleira.

Inicialmente será feita uma revisão bibliográfica nos livros, publicações e pesquisas na internet de modo a esclarecer o funcionamento de uma usina sucroalcooleira, e dos processos industriais que utilizam bombas.

Em seguida será feito um estudo mais aprofundado sobre eficiência energética e consumo energético de bombas.

1.3 Resultados e Conclusões

Como as bombas consomem um percentual considerável de energia dentro das usinas, foi identificado que quando se opera com bomba de baixo rendimento, cujo ponto de trabalho opera afastado do ponto de melhor rendimento, a bomba consome maior energia, pois sua potência está alta. A intenção foi modificar a bomba de forma que ela irá operar com um alto rendimento, menor potência.

Foi identificado no estudo de caso bombas que estavam operando totalmente fora de seu melhor ponto, consumindo mais e ao alterar essas bombas o resultado foi produtivo, com menos consumo de energia elétrica, sobrando para venda ou consumo próprio.

1.4 Descrição do trabalho por capítulo

O trabalho é estruturado em seis capítulos.

O capítulo 1 apresenta uma introdução, descrevendo as considerações gerais e os objetivos para a realização desse trabalho, a metodologia abordada e um breve comentário sobre os resultados e conclusões observados.

O capítulo 2 mostra como funciona uma usina sucroalcooleira desde a chegada de cana-de-açúcar até a produção de açúcar e etanol, esclarece sobre o processo de geração de energia e vapor conhecido como cogeração, aponta quais são os processos industriais dentro da usina que utilizam bombas centrífugas e interpretam dados sobre o perfil sucroalcooleiro como distribuição geográfica da produção e das unidades no Brasil, dados estatísticos sobre produção de açúcar, etanol e bagaço.

O capítulo 3 detalha o que são e como funcionam as bombas centrífugas, quais são os seus principais componentes e melhores materiais para compor uma bomba. Esse capítulo dá uma breve introdução de motores, principais forma de acionamento das bombas no setor sucroalcooleiro.

O capítulo 4 dá uma explicação sobre como é feita a seleção de uma bomba, como utilizar as curvas características e o que acontece quando o fluido bombeado ou a rotação da bomba são alterados.

O capítulo 5 apresenta um estudo de caso que analisa o consumo energético e o custo operacional de bombas dentro de uma usina sucroalcooleira, verificando também se é possível reduzir esse consumo e custo.

O capítulo 6 apresenta os comentários finais e conclusões.

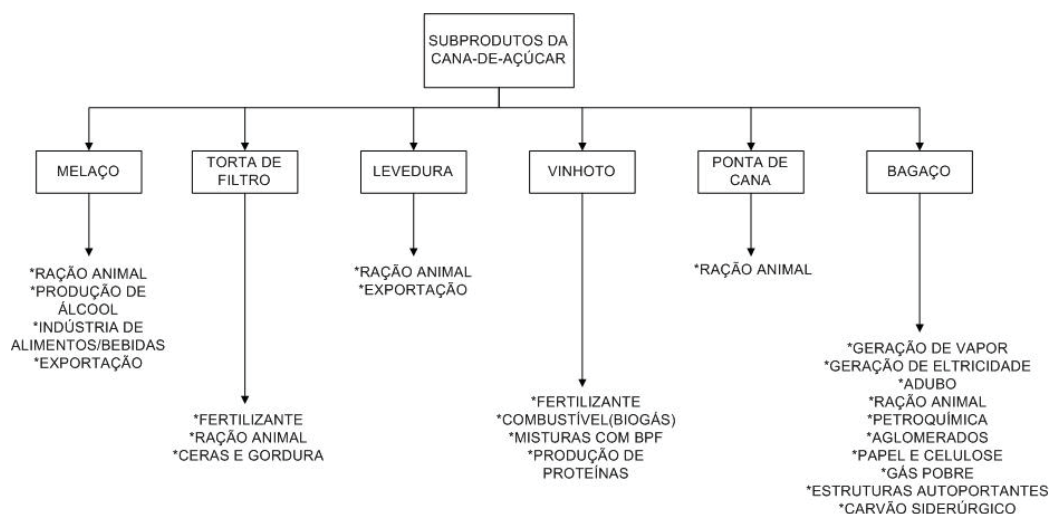
2 VISÃO GERAL DE USINAS SUCROALCOOLEIRAS

O setor industrial sucroalcooleiro engloba todas as unidades que produzem açúcar e etanol a partir da matéria prima cana-de-açúcar sendo atualmente considerado um importante segmento econômico que auxilia no crescimento da economia brasileira. A busca pelo uso de combustíveis alternativos foi devido às várias crises de petróleo que ocorreram nas últimas décadas, que além de agravarem a economia mundial, trouxeram ao Brasil fortes consequências devido à dependência externa de petróleo. O Brasil importava, no final da década de 80, 85% do petróleo consumido (CAMARGO, 1990).

Segundo Daddario (1996), o setor sucroalcooleiro tem despertado interesse em outros países pelo baixo custo de produção de açúcar e etanol, sendo este último exportado para países que visam diminuir a emissão de CO₂ na atmosfera e a dependência dos combustíveis fósseis.

Os resíduos da cana de açúcar como bagaço, folhas e vinhotos (antigamente vistos como lixos) hoje são aproveitados na usina. O bagaço é visto como fonte de combustível alternativo no setor sucroalcooleiro, sendo incinerado nas próprias usinas para geração de vapor e energia. O vinhoto é encaminhado para a plantação de cana-de-açúcar, cuja função é servir como fertilizante (CAMARGO, 1990). A figura 1 mostra o uso de outros subprodutos dos processos que são reaproveitados.

Figura 1 – Subprodutos produzidos através da cana-de-açúcar

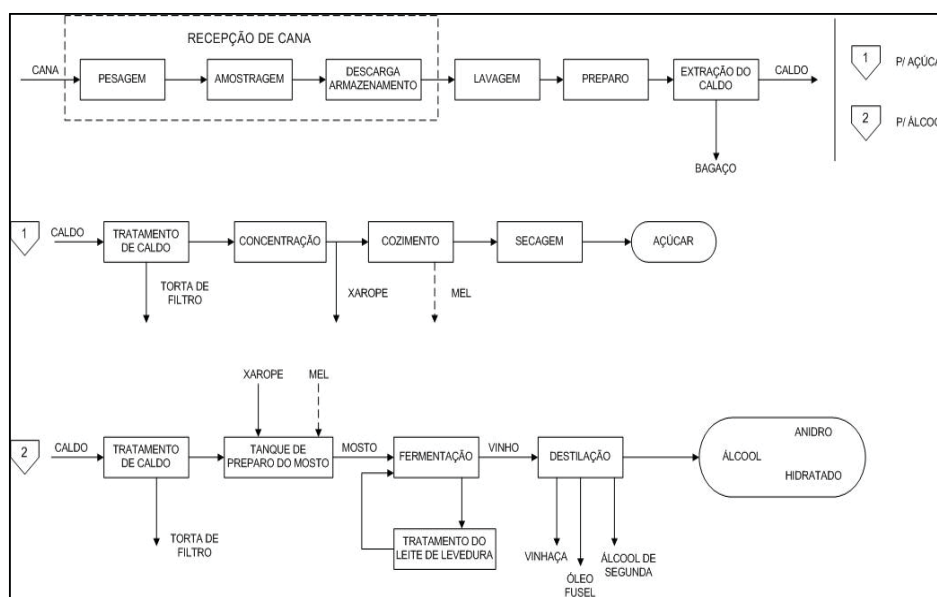


Fonte: (SOUZA, 2003).

2.1 Funcionamento de uma usina sucroalcooleira

A figura 2 representa o esquema geral dos processos fundamentais dentro de uma usina sucroalcooleira para produção de açúcar e etanol.

Figura 2 – Esquema geral da produção de açúcar e etanol a partir da cana-de-açúcar



Fonte: (CAMARGO, 1990).

A cana colhida no campo chega até a usina através de caminhões, estes são pesados para identificar a quantidade de cana que é inserida na usina, esta pesagem é importante, pois é através dela que é feito o controle agrícola e industrial da unidade. Em seguida, uma pequena amostra da cana que ainda está no caminhão é retirada através de uma sonda para avaliação da quantidade de açúcar que a cana possui, essa amostra é levada para um laboratório de sacarose para fazer o teste índice de ATR (açúcares totais recuperáveis), que correspondem à quantidade de açúcar disponível na matéria-prima que é subtraída das perdas no processo industrial. O teste ainda verifica os teores de Pol, Brix e fibra que medem a pureza do caldo extraído na moagem da cana-de-açúcar, influenciando no sistema de pagamento para os fornecedores de cana (CAMARGO, 1990).

A cana-de-açúcar é inserida em uma mesa alimentadora, que é um tapete rolante, que tem a finalidade de introduzi-la para o processo de lavagem ou ventilação de modo a remover as impurezas. A cana introduzida na usina está sujeita a determinada quantidade de impurezas como argila, palha e pedras, essas impurezas acabam desgastando os equipamentos por erosão e até mesmo aumentando o tempo de decantação do caldo nos clarificadores (processo de fabricação de etanol), portanto a lavagem reduz esses inconvenientes (CAMARGO, 1990).

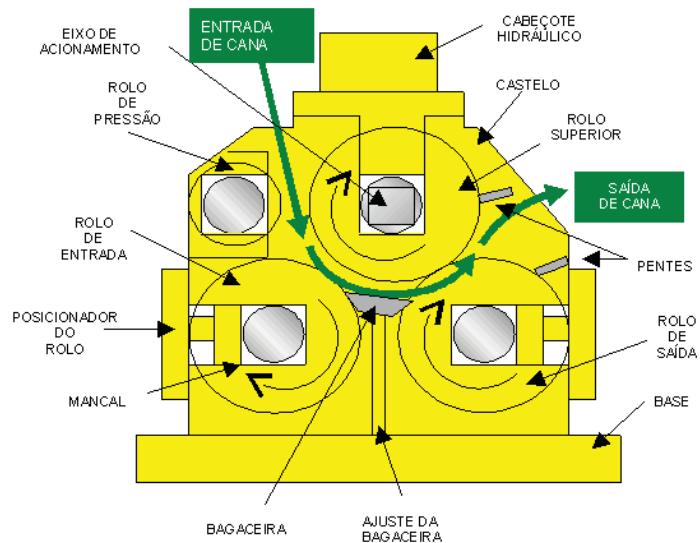
Segundo Rein (2007), o processo de secagem da cana é mais atrativo que o da lavagem, pois a perda de açúcar é menor. Após o processo de lavagem ou secagem a cana segue para a mesa alimentadora, cuja finalidade é a de introduzir a cana para o processo de preparo.

O processo de preparo da cana consiste na liberação de alta porcentagem de caldo através do rompimento da estrutura celular da cana, a cana é constituída de fibra e caldo sendo a fibra o material insolúvel em água e o caldo o conjunto de água de todos os sólidos solúveis, portanto nessa etapa se tem por objetivo a retirada da matéria prima real da cana que é o caldo (CAMARGO, 1990).

Os equipamentos utilizados para o preparo da cana são: niveladores, picadores e desfibradores. As facas niveladoras têm a função de formar uma massa homogênea e uniforme para em seguida passar pelo picador, cuja função é a de quebrar a estrutura dura e romper as células. Em seguida a esteira movimenta essa massa trabalhada para o desfibrador. O desfibrador é um aparelho utilizado para desintegrar a cana, facilitando a extração do caldo para a moenda e completando a fase de preparação (HUGOT, 1969).

O setor de moendas, segundo Camargo (1990), geralmente possui de 4 a 7 unidades de moagem que são conhecidos por ternos. Um terno do tipo convencional possui três rolos dispostos de modo que a união de seu centro forma um triângulo isósceles, figura 3. Os rolos inferiores possuem seus eixos fixos e giram no mesmo sentido, enquanto que o rolo superior tem a posição de seu eixo sendo controlado por um regulador de pressão hidráulico que gira em sentido contrário aos rolos inferiores.

Figura 3 – Esquema de um terno



Fonte: (RIBEIRO, 2003).

A cana preparada que passa pelo primeiro terno, assim como a matéria final que sai deste e passa para o terno seguinte até o último terno através de esteiras intermediárias, será chamada de bagaço, que é um resíduo fibroso (HUGOT, 1969).

Para a composição do caldo misto é utilizado o processo de embebição, que é um processo que adiciona água ao bagaço para formar um diluído que pode ser extraído em um novo processo de moagem, aumentando a extração de sacarose. Nesse processo, água é distribuída transversalmente ao bagaço que se encontra na esteira intermediária para alimentação do último terno. Faz-se retornar a penúltima esteira o último caldo extraído e desse modo até o segundo terno. O caldo do segundo terno é misturado ao caldo proveniente da moagem seca do primeiro terno. (PAYNE, 1989).

Após a seção de extração o processo se divide em três estágios: fabricação de açúcar, fabricação de etanol e geração de energia e vapor. O bagaço que sobra do setor das moendas é direcionado a uma esteira para a seção de geração de vapor e energia, sendo introduzido em uma caldeira onde será queimado e seu vapor transformado em energia ou bioeletricidade. Antes de iniciar os outros dois processos restantes, o caldo deve ser tratado com o objetivo de retirar impurezas solúveis e insolúveis nele encontradas.

Segundo Camargo (1990), o caldo destinado ao processo de fabricação de etanol é peneirado, por peneiras que utilizam a força centrífuga para separar materiais sólidos do

líquido, e depois é enviado diretamente para a seção de fermentação, evitando que esse caldo fique parado para não ocorrer deposição de impurezas. Após isso é feito o processo de pasteurização e conseqüentemente realiza-se o processo de decantação. Para o processo de fabricação de açúcar após o peneiramento, o caldo é bombeado para a torre ou coluna de sulfitação em contracorrente com o SO₂, fazendo-se em seguida alcalinização, para elevar o pH, e aquecimento para separar o precipitado por sedimentação e decantação, em seguida o caldo é enviado para a seção de evaporação e o lodo decantado é filtrado. A torta de filtro resultante é enviada ao campo para ser utilizada como adubo.

Após o processo de tratamento, o caldo pode ser direcionado para os processos de fabricação de açúcar e fabricação de etanol.

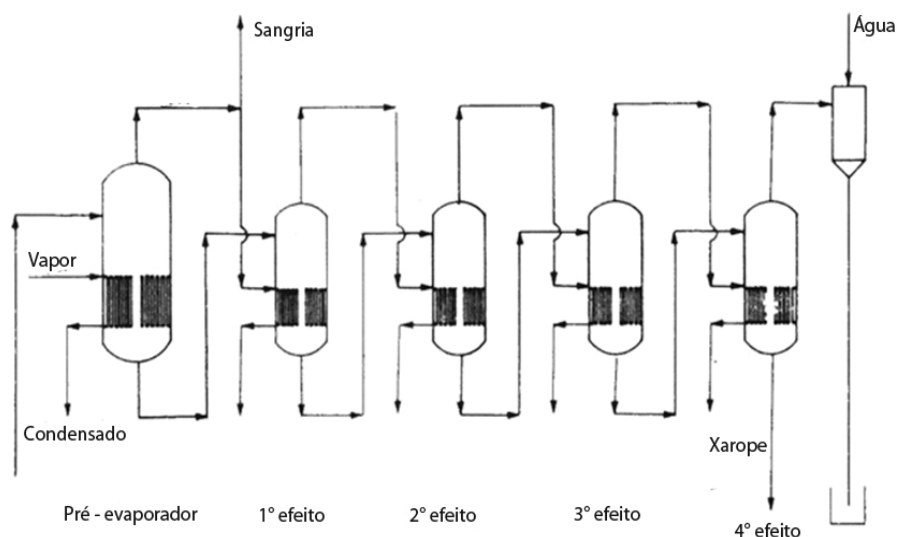
2.1.1 Fabricação do açúcar

No processo de fabricação do açúcar as etapas envolvidas são: evaporação, cozimento e secagem.

- **Evaporação:**

O objetivo dessa etapa é remover grande quantidade de água que fica concentrada no caldo misto que chega da seção de tratamento. O sistema de evaporação mais utilizado no Brasil é o de múltiplo efeito em correntes paralelas. Nesse sistema, tanto o caldo misto quanto o vapor são alimentados num pré-evaporador, passando em seguida paralelamente através do primeiro até o último efeito para formação de um xarope, conforme mostra a figura 4. Os evaporadores utilizados são de tubos verticais, com fluxo ascendente. A parte inferior é composta por um trocador de calor disposto entre duas placas espelhadas que faz com que o vapor se condense entre elas. Geralmente o sistema de evaporação é composto de cinco efeitos sendo o primeiro o pré-evaporador com o dobro da área de troca dos outros quatro efeitos seguintes (CAMARGO, 1990).

Figura 4 – Fluxograma do sistema de evaporação de múltiplo efeito



Fonte: (CAMARGO, 1990).

- **Cozimento:**

A etapa de cozimento permite alcançar maiores concentrações do xarope que provém da seção de evaporação, apresentando elevada viscosidade. Para isto utilizam-se tachos a vácuo conhecidos por cozedores que funcionam por batelada, cuja função é a de permitir que o xarope alcance maiores concentrações. Esse xarope concentrado junto com os cristais formados é denominado de massa cozida (CAMARGO, 1990).

- **Secagem:**

Essa etapa é útil para eliminar a umidade presente no açúcar quando este é eliminado da turbina. Essa umidade é prejudicial para o processo de conservação do açúcar. O secador do processo de secagem é compreendido por um aquecedor de ar com ventilador e a etapa se divide em dois processos: o primeiro de secagem que consiste no aquecimento do ar que aumenta a capacidade de absorção de água, provocando a evaporação da umidade presente no açúcar e o segundo processo é de resfriamento que evita que o açúcar amarele quando atinge determinada temperatura de aquecimento (HUGOT, 1969).

Após esses processos, o açúcar é ensacado, pesado e armazenado para transporte. Algumas usinas fornecem o açúcar direto para consumidores.

2.1.2 Fabricação do etanol

As etapas envolvidas no processo de fabricação do etanol são: fermentação e destilação.

- **Fermentação:**

A etapa de fermentação é onde ocorre a conversão dos açúcares em álcool, essas reações ocorrem em tanques denominados dornas que são construídas preferencialmente em material de aço carbono. A temperatura deve ser controlada em torno de 32 e 35°C, pois temperaturas superiores contribuem para perda do álcool por evaporação, para isso no interior das dornas são instaladas serpentinas com circulação de água para resfriamento (CAMARGO, 1990).

As dornas são fechadas para recuperar o álcool perdido por evaporação ou por arraste da lavagem dos vapores que são liberados no processo fermentativo.

De acordo com Camargo (1990), o processo de fermentação dura de 6 a 10 horas e no final praticamente todo o açúcar deve ser consumido com a consequente redução da liberação de gases e multiplicação do fermento.

Ao final do processo de fermentação ocorre à decantação das células de levedura. O vinho, líquido resultante do processo é encaminhado para o processo de destilação.

- **Destilação**

Segundo Camargo (1990) a destilação é um processo de separação baseada nos diferentes pontos de ebulição das diversas substâncias de uma mistura líquida a ser separada.

Para essa operação utiliza-se uma coluna de destilação, que é um vaso cilíndrico que contém dispositivos que promovem o contato líquido-vapor, cuja finalidade é esgotar a maior quantidade de álcool presente do seu produto de fundo que é conhecido por vinhaça, bastante utilizado como fertilizante nas lavouras cuja constituição é de água, sais sólidos em suspensão e solúveis (CAMARGO, 1990).

O etanol hidratado é o produto final do processo de destilação, podendo ser comercializado dessa forma, mas se passar por um processo de desidratação se transforma em etanol anidro, que é utilizado no Brasil como aditivo a gasolina (CAMARGO, 1990).

Após o final do processo, o etanol é colocado em tanques de volume ou em caminhões tanques para distribuição e comércio.

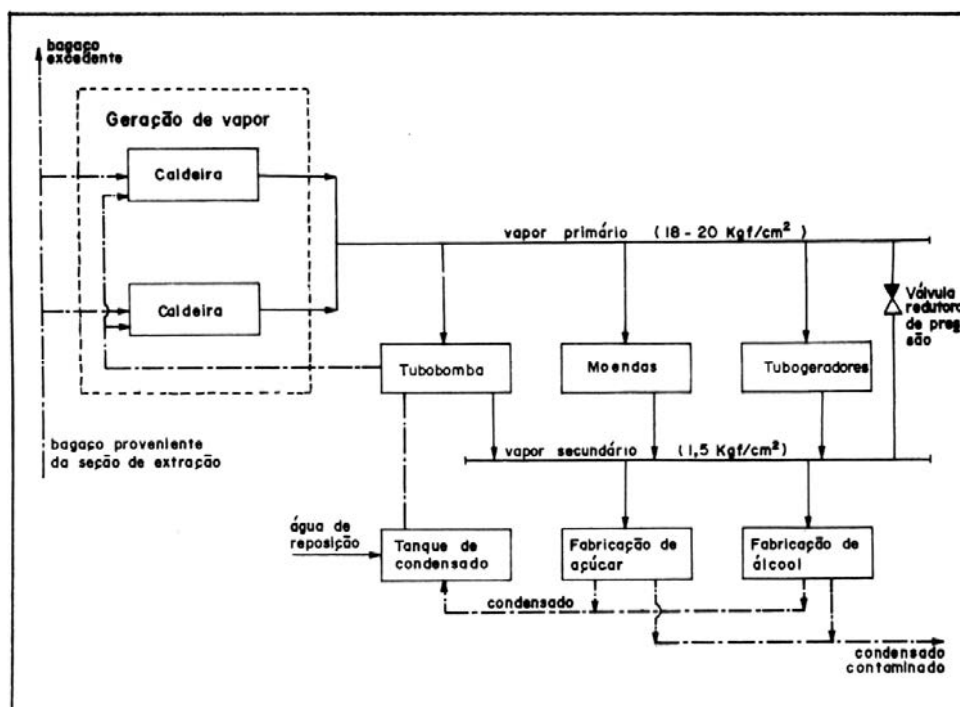
2.1.3 Geração de vapor e energia

O bagaço da cana deixou de ser resíduo para servir como insumo de grande potencial energético, fazendo com que as usinas sucroalcooleiras sejam autossuficientes em energia elétrica. Atualmente as fábricas são projetadas para serem eficientes em energia, produzindo excesso de bagaço e algumas até participam da venda de eletricidade para as concessionárias (PAYNE, 1989).

Vapor e energia elétrica são a forma mais comum de acionamento dos equipamentos dentro de uma usina sucroalcooleira. A maioria das usinas utiliza um ciclo de vapor, representado na figura 5, onde a queima de bagaço, com umidade média em torno de 50%, nas caldeiras gera um vapor primário cuja pressão é em torno de 18kgf/cm^2 para usinas com destilarias anexas e em torno de 20kgf/cm^2 para destilarias autônomas. Esse vapor primário é utilizado para duas finalidades: acionamento de equipamentos realizados através de turbinas a vapor e geração de energia elétrica, a maior parte sendo consumida e a restante adquirida da rede concessionária, porém a relação dessas parcelas depende do balanço energético de cada usina (CAMARGO, 1990).

Os equipamentos que são acionados pelas turbinas a vapor (geralmente de simples estágio e de contrapressão) são picadores, desfibradores, ternos de moenda e bomba de alimentação de água de caldeira (CAMARGO, 1990).

Figura 5 – Esquema geral do ciclo de vapor empregado em usinas



Fonte: (CAMARGO, 1990).

Em média a pressão efetiva do vapor de contrapressão que sai das turbinas é de $1,5\text{kgf/cm}^2$, e esse vapor é utilizado no processo de produção. Caso ocorra uma falta de vapor de escape, uma linha de vapor com válvula redutora de pressão permite que o vapor gerado diretamente nas caldeiras vá para o coletor de vapor secundário (CAMARGO, 1990).

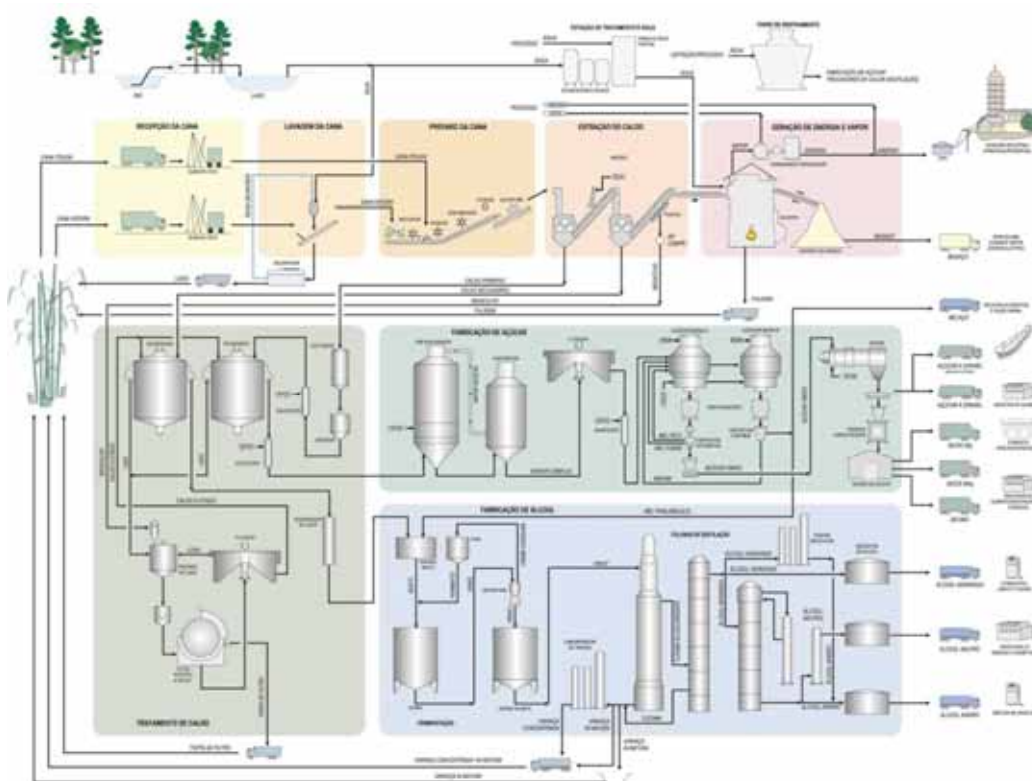
A água de alimentação das caldeiras não deve causar incrustação ou corrosão e o processo de geração de vapor deve gerar um vapor livre de contaminantes, portanto a água da condensação do próprio vapor é a melhor fonte de água capaz de atender as necessidades de água de caldeira. O condensado de vapor constitui a principal fonte de suprimento de água, porém a quantidade não é suficiente devido às perdas, utiliza-se então água fria tratada quando o suprimento de condensados for insuficiente. Os condensados são monitorados caso ocorra contaminação causada por vazamento nos equipamentos e quando um condensado estiver contaminado, ele deve ser desviado para o sistema de água quente na fábrica (aquecimento das águas de lavagem e de embebição) (PAYNE, 1989).

O fornecimento de bagaço para as caldeiras deve ser constante e uniforme, o bagaço deve ser estocado imediatamente quando houver paradas nas moendas (PAYNE, 1989).

2.2 Processos na usina que utilizam bombas hidráulicas.

Uma usina sucroalcooleira demanda um bom número de bombas centrífugas para seu completo funcionamento. A figura 6 mostra o fluxograma completo do funcionamento de uma usina sucroalcooleira, nessa figura também é possível verificar quais são os fluidos que estão sendo bombeados durante e após os processos.

Figura 6 – Esquema de funcionamento de uma usina sucroalcooleira



Fonte: (RIBEIRO, 2013).

Portanto, os processos na usina sucroalcooleira que demandam o uso de bombas centrífugas são:

- **Abastecimento de água**

A água é de grande importância nas usinas sucroalcooleiras, sendo encontrada em diversas fontes como oceanos, lagos ou rios. Através de bombas retiram-se essa água cuja finalidade é a de ser usada no processo de lavagem da cana-de-açúcar (não necessitando de tratamento) e de ser enviada para a estação de tratamento de água, onde irá ser tratada e usada nos processos industriais que exigem água limpa. Atualmente, as usinas reutilizam a água como forma de racionalização e utilizam as águas residuais para irrigar a lavoura.

- **Lavagem da cana-de-açúcar**

A água é utilizada para lavar a cana que foi colhida mecanicamente, visto que a quantidade de impurezas é maior e a lavagem é precedida antes de a cana ser processada (CAMARGO, 1990).

Segundo Rein (2007), para este processo é recomendado utilizar uma mesa alimentadora com um ângulo de 35° a 45° e dependendo da inclinação da mesa alimentadora, o mínimo necessário para uma lavagem razoável é de 5 m³/t de cana chegando até 10 ou 15 m³/t de cana. A água de lavagem retorna para o decantador e o lodo, material que ficou decantado, é transportado por um caminhão e jogado na lavoura de cana.

- **Estação de tratamento de água (para caldeiras)**

De acordo com Trovati, o tratamento de água para o processo industrial de geração de vapor é de extrema importância, pois evita a formação de incrustações na caldeira e evita os processos corrosivos.

A água retirada da fonte de abastecimento é enviada para os decantadores e filtros de uma estação de tratamento de água, onde será feito o processo de tratamento e após ser tratada, a água é armazenada em um tanque para ser enviada para a caldeira.

- **Torre de resfriamento de águas industriais**

Em uma usina sucroalcooleira existe a necessidade de resfriar as turbinas que captam vapor das caldeiras, trocadores de calor usados para resfriar o mosto, dornas de fermentação, condensadores de caldo tratado, etc. A água é utilizada como fluido

refrigerante para remover a carga térmica de forma que após o processo de arrefecimento, essa se encontra a uma temperatura média de 40 a 42°C, por isso torna-se necessário resfriá-la em torres de resfriamento de circuito fechado para serem reaproveitadas e recirculadas novamente.

- **Alimentação de caldeiras**

A qualidade da água de alimentação de uma caldeira é fundamental para uma operação segura e eficiente da mesma. Nesse processo a água que é bombeada para auxiliar no processo de geração de vapor deve estar tratada e com as seguintes características: ausência de oxigênio e de outros gases dissolvidos, sem materiais em suspensão, menor quantidade de sais e óxidos dissolvidos, pH alcalino, temperatura elevada e ausência de materiais orgânicos (TROVATI, 2013).

- **Setor de moendas**

Produção de caldo primário e secundário através do rompimento da estrutura fibrosa da cana. É necessário utilizar nessa etapa a adição de água para o processo de embebição para melhorar a extração do caldo.

- **Transferência do caldo de cana**

Bombeamento do caldo de cana primário e secundário produzido no setor de moendas para o setor de tratamento de caldo.

- **Setor de tratamento do caldo**

Bombeamento de caldo de cana tratado para seus respectivos processos: fabricação de açúcar e fabricação de álcool.

- **Setor de filtros**

Esse setor se encontra na etapa de tratamento do caldo, cujo objetivo é enviar o lodo, que contém de 5 a 10% de sólidos insolúveis, para o filtro rotativo a vácuo para remover grande parte do material insolúvel e lavar o caldo contido nele. A água passa através da torta para remover o caldo e após essa remoção, bombeia-se o caldo filtrado para o tanque de caldo misto, a torta é enviada a lavoura (PAYNE, 1989).

- **Setor de evaporação do caldo**

Etapa de fabricação de açúcar, nesse processo ocorre o movimento de caldo de cana tratado que passa por um pré-evaporador e conseqüentemente por um evaporador para se transformar em xarope simples que é bombeado para o flotador, dando seqüência ao processo de cozimento.

- **Setor de cozimento**

Consiste em bombear o melão produzido para ser utilizado no processo de fermentação para produção de etanol.

- **Setor de fermentação**

Processo de fabricação de etanol, cujo objetivo é bombear o caldo tratado para o processo de filtragem para formação de um mosto. Adicionam-se leveduras, que são bombeadas até as dornas, para iniciar o processo de fermentação alcoólica.

- **Setor de destilação**

O vinho formado no processo de fermentação se encaminha para as colunas de destilação para formação do álcool hidratado. Para obter o álcool anidro, é necessário mais uma etapa de desidratação. Após o processo de produção de álcool, esse é encaminhado para tanques cuja função é de armazenagem.

- **Sistema de combate a incêndio**

Todas as unidades devem possuir um sistema de combate a incêndio. Podendo ser classificadas em: bombas para sistema móveis (geralmente utilizadas em embarcações especiais do corpo de bombeiros) e bombas para sistemas fixos (utilizadas em edifícios industriais, residenciais, comerciais, etc.) (MACINTYRE, 1987).

Utilizam-se bombas centrífugas para operar em unidades de instalações de combate a incêndio, havendo preferência pelo uso de bombas de um único estágio, com carcaça bipartida horizontalmente e rotor de entrada bilateral, acionadas por motores elétricos trifásicos, onde a alimentação desses motores derive do cabo alimentador da unidade industrial, de modo que se houver um corte de energia elétrica, as bombas não serão impedidas de funcionar. Para maior segurança uma outra bomba movida por motor a combustão, normalmente diesel, é utilizada para o caso de falha do

fornecimento de energia elétrica pela rede pública. Portanto é fundamental nos conjuntos de combate a incêndio ter uma bomba acionada por motor elétrico e outra acionada por motor diesel, cuja partida poderá ser efetuada manualmente (MACINTYRE, 1987).

2.3 Perfil do setor sucroalcooleiro

A expansão do setor sucroalcooleiro teve alguns incentivos como a criação do programa nacional do álcool (PROALCOOL) em 1975, que foi a obrigatoriedade da mistura de álcool anidro à gasolina, o lançamento de carros com motores flexíveis, que funcionam a qualquer proporção de mistura de álcool e gasolina. Os aspectos sociais (como a geração de empregos) e os aspectos ambientais (preocupação do ambiente em utilizar combustíveis renováveis e limpos) também foram de grande influência para o crescimento do setor (DADDARIO, 1996).

A indústria açucareira tem características peculiares que as destacam das suas semelhantes em outros países, os principais pontos que as definem são três, sendo: O primeiro ponto é que a grande maioria das indústrias produz elevada proporção de cana-de-açúcar para processamento, enquanto que nas indústrias internacionais, a produção de cana-de-açúcar se encontra separada da produção industrial, esse fator é um ponto positivo para o Brasil por possuir amplo território, enorme disponibilidade de terras férteis e grande conhecimento devido à tradição agrária do país. O segundo ponto está na variedade dos produtos comerciais que são produzidos a partir do caldo de cana-de-açúcar e dos resíduos da moagem dessa cana, assim também como a cogeração de energia elétrica produzida a partir da queima do bagaço. E o terceiro ponto fundamental está na distribuição espacial das unidades do setor (CONAB, 2013).

O potencial energético da cana é muito maior do que a energia contida no álcool combustível, sendo que 1 tonelada de cana-de-açúcar contém uma energia primária equivalente a energia contida em 1,2 barris de petróleo, dentro deste potencial, a sacarose (a partir do qual se produz o etanol) possui 1/3 da energia da cana e os outros 2/3 estão presentes no bagaço e na palha, portanto a energia contida na cana-de-açúcar tem importante participação na matriz elétrica brasileira (CASTRO; DANTAS, 2008).

De acordo com Conab (2013) o álcool etílico compete com a gasolina e a consequente expansão do setor está ligada aos preços dos combustíveis de petróleo e a

criação de tecnologias como o carro elétrico que estão sendo muito utilizados em escala comercial.

De acordo com Castro e Dantas (2008), atualmente as usinas sucroalcooleiras são autossuficientes, devido ao processo de queima do bagaço, considerado o maior dejetivo da agroindústria brasileira, conhecido como cogeração, que é a geração simultânea a partir de um mesmo combustível, de energia térmica e mecânica. Nas usinas, a energia mecânica é utilizada na forma de trabalho (como por exemplo, no acionamento das moendas) ou é convertida em energia elétrica usando um gerador de eletricidade. A energia térmica atua como fonte de calor, tendo utilidade nos processos industriais de fabricação de açúcar e etanol.

Atualmente o bagaço tem seu papel fundamental no processo de cogeração e de acordo com Souza (2003), o setor sucroalcooleiro é o maior utilizador desse processo. A tecnologia utilizada pelas usinas estão diretamente ligada com a geração de energia elétrica, e o fato de queimar o máximo de bagaço excedente nas caldeiras para que não houvessem sobras incentivou o investimento em equipamentos mais eficientes para eficiência energética.

O processo de colheita manual ou mecânica é um assunto bastante abordado, pois entra em questão o assunto necessidade de queima da cana-de-açúcar. Do ponto de vista ambiental, os gases e a fumaça gerada desses incêndios controlados provoca bastante discussão sobre o impacto na saúde da população ao redor dessas áreas. Porém a queima é fundamental para facilitar o corte, reduzindo o esforço físico do trabalhador e aumenta em quase três vezes a quantidade diária de cana-de-açúcar que poderia ser cortada sem o uso da queima, o que aumenta a produção das usinas (CONAB, 2013).

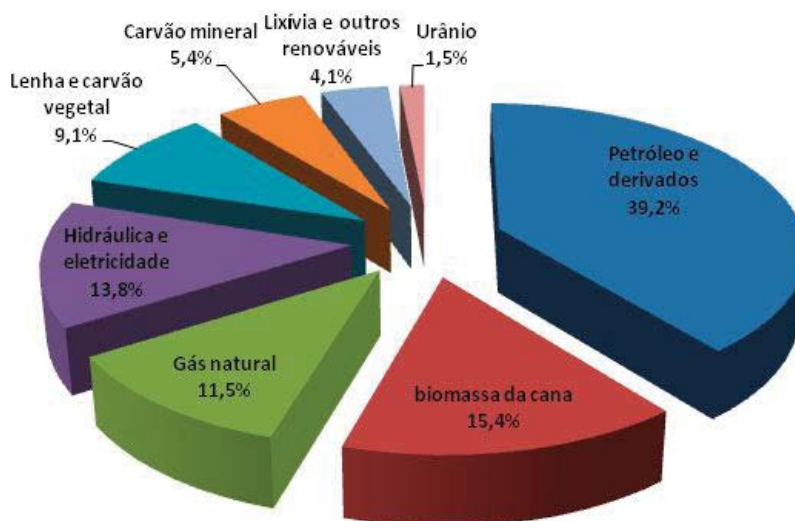
Geralmente utiliza o processo de queima na colheita manual, que elimina cerca de 30% da matéria seca e diminui o teor de matéria orgânica do solo, facilitando o trabalho dos cortadores. Em 11 de março de 2003, por decreto lei estadual que prevalece interesse agrícola e ecológico, determinou prazos para o fim do uso de queima para despalha da cana-de-açúcar no estado de São Paulo (CONAB, 2013). Segundo fonte da união da indústria de cana-de-açúcar (UNICA), foi assinado um acordo entre a indústria sucroalcooleira e o governo do Estado de São Paulo para encerrar a atividade de corte manual até 2017.

A colheita mecanizada, cada vez mais empregada no Brasil, permite que a cana-de-açúcar seja triturada e lançada sobre o solo, formando um tapete de resíduo vegetal conhecido como palha, que é colhida pelas colheitadeiras para ser introduzida na usina.

- **Matriz energética brasileira**

O Brasil possui uma matriz de geração energética predominantemente com recursos renováveis. Dados do balanço energético nacional de 2013 da empresa de pesquisa energética (EPE) mostram que esse valor é 42,4%, sendo que a biomassa da cana corresponde a 15,4%, dessa oferta interna, ultrapassando a fonte hidráulica, conforme mostra figura 7.

Figura 7 - Oferta interna de energia elétrica

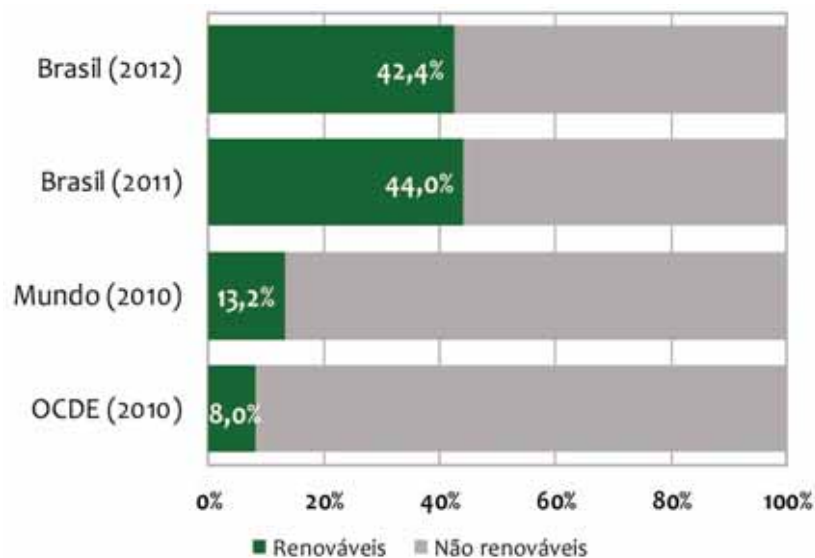


Fonte: (EPE, 2013).

Segundo EPE (2013), a oferta interna de energia aumentou 11,3 milhões de toneladas equivalentes de petróleo. Apesar do aumento na produção de etanol, houve queda na oferta de etanol para o mercado interno, pois o governo determinou redução na proporção de álcool anidro na gasolina de 25% para 20%.

A figura 8 mostra que apesar da participação de renováveis no Brasil decrescer em relação a 2011, o país ainda possui posição privilegiada no uso de renováveis em relação ao mundo e aos países integrantes da OCDE (Organização para a cooperação e desenvolvimento econômico) (EPE, 2013).

Figura 8 - Participação de renováveis na matriz energética brasileira



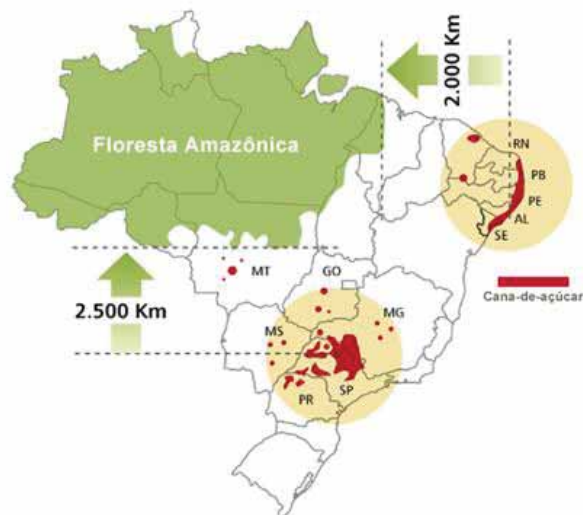
Fonte: (EPE, 2013).

Antigamente notava-se forte presença do uso de derivados do petróleo, atualmente destaca-se que a biomassa de cana assume importância fundamental para sua produção e uso, devido a assuntos como meio ambiente e desenvolvimento do país.

- **Distribuição geográfica da produção e das unidades no Brasil**

A figura 9 mostra que a produção de cana-de-açúcar está concentrada na região Centro-Sul e Nordeste do Brasil, a área destacada por um círculo representa a concentração das plantações e das usinas produtoras de açúcar, etanol e bioeletricidade (UNICA, 2013).

Figura 9 – Regiões produtoras de cana-de-açúcar



Fonte: (UNICA, 2013).

Conforme dados da Conab (2013), atualmente nota-se uma predominância de unidades mistas (usinas que produzem açúcar e etanol anidro e hidratado), podendo ser possível dar preferência a produção de um produto específico, verificando a melhor relação de custo e benefício de acordo com o clima. Em épocas chuvosas e úmidas, o rendimento de sacarose é baixo e a produção de álcool etílico se torna prioridade, com isso a usina não deixa de produzir açúcar, mas diminui a um limite obrigatório a produção, aumentando consideravelmente a produção de etanol. A tabela 1 indica a quantidade de unidades por região e de acordo com o perfil de produção.

Tabela 1 - Número de unidades de acordo com a região e o perfil

Região	Mistas	Destilarias	Usinas	Total de unidades
Região Centro-Sul	207	103	8	318
Região Norte-Nordeste	50	24	10	84
Brasil	257	127	18	402

Fonte: (CONAB, 2013).

As lavouras de cana-de-açúcar no Brasil continuam em crescimento, segundo dados da UNICA (2013) referente à colheita de 2011, a área cultivada com cana-de-açúcar foi de 9.616.615 hectares, distribuídas em todos os estados produtores. Na região Centro-Sul, o estado de São Paulo foi o maior produtor, seguido por Minas Gerais,

Goiás, Paraná e Mato Grosso do Sul, e da região Norte-Nordeste os maiores estados produtores foram Alagoas e Pernambuco, conforme tabela 2. A contribuição dos outros estados produtores é inferior e totalizam juntos uma área cultivada de 953.568 hectares.

Tabela 2 - Principais estados produtores de cana-de-açúcar

Região	Estado	Área cultivada (hectares)	Total usinas
Região Centro-Sul	São Paulo	5.216.491	169
	Minas Gerais	831.329	29
	Goiás	697.541	45
	Paraná	641.765	21
	Mato Grosso do Sul	495.821	34
Região Norte-Nordeste	Alagoas	434.684	24
	Pernambuco	345.416	22

Fonte: (CONAB, 2013).

Em relação à safra passada, houve um crescimento de 452 mil hectares (4,7% da área de cultivo da cana-de-açúcar). O aumento foi respectivo a região Centro-Sul em consequência do crescimento e expansão de novas áreas de plantio em usinas já existentes.

- **Moagem da cana-de-açúcar**

A produção da cana de açúcar na safra atual até o presente momento tem alcançado 588.478 mil toneladas, este valor tem sido quase 5% superior à moagem da safra passada.

A tabela 3 mostra a evolução da moagem da cana-de-açúcar (mil toneladas) por safra nos últimos 5 anos:

Tabela 3 - Safra nos últimos anos

Região	Ano-safra				
	2008/2009	2009/2010	2010/2011	2011/2012	2012/2013
Centro-Sul	504.963	541.962	556.945	493.159	532.758
Norte-Nordeste	64.100	60.231	63.187	66.056	55.719
Brasil	569.063	602.193	620.132	559.215	588.478

Fonte: (UNICA, 2013).

- **Produção de açúcar**

A tabela 4 mostra como foi a produção de açúcar (mil toneladas) nas últimas cinco safras, observa-se que a região Centro-Sul concentra a maior produção do país, totalizando 89,2% dessa produção na safra atual. Houve um aumento de produção de 6% da safra atual em relação à safra passada.

Tabela 4 - Produção de açúcar (mil toneladas)

Safra	Brasil	Centro-Sul	Norte-Nordeste
2008/2009	31.047	26.750	4.298
2009/2010	32.956	28.645	4.312
2010/2011	37.989	33.501	4.488
2011/2012	35.925	31.304	4.621
2012/2013	38.246	34.097	4.149

Fonte: (UNICA, 2013).

- **Produção de etanol total, etanol anidro e etanol hidratado**

Em relação à produção de etanol total (mil m³) no Brasil, nota-se um aumento na produção de 2,3% em relação à safra passada, conforme tabela 5. Estão inclusos nestes valores a produção de etanol hidratado e etanol anidro. Observa-se que o Centro-Sul é responsável pela produção de 89% de etanol no Brasil.

Tabela 5 - Produção de etanol total (mil m³)

Safra	Brasil	Centro-Sul	Norte-Nordeste
2008/2009	27.513	25.102	2.411
2009/2010	25.694	23.689	2.005
2010/2011	27.376	25.385	1.991
2011/2012	22.682	20.542	2.139
2012/2013	23.217	21.362	1.855

Fonte: (UNICA, 2013).

A tabela 6 mostra os valores de produção de etanol anidro e hidratado no Brasil e nas principais regiões.

Tabela 6: Produção de etanol anidro e hidratado (mil m³)

Safr	Brasil		Centro-Sul		Norte-Nordeste	
	Anidro	Hidratado	Anidro	Hidratado	Anidro	Hidratado
2008/2009	9336	18190	8247	16868	1089	1322
2009/2010	7065	18626	6206	17479	859	1146
2010/2011	8323	19053	7413	17971	910	1082
2011/2012	8581	14101	7454	13089	1127	1012
2012/2013	9844	13382	8730	12632	1115	750

Fonte: (UNICA, 2013).

No Brasil, a produção de etanol anidro na safra atual teve um aumento de 13% em relação à safra anterior, já o etanol hidratado teve uma redução de 5% em relação à safra passada.

• Produção de bagaço e geração de eletricidade

Atualmente o bagaço produzido nas usinas é utilizado para gerar energia através da cogeração, fazendo com que as usinas sejam autossuficientes em energia, podendo até vender a energia restante. Para que essa energia seja comercializada, há a necessidade de se investir em equipamentos (CONAB, 2013).

Atualmente existem no Brasil mais de 400 usinas operando, cujo bagaço produzido é considerado um potencial energético adormecido. Um exemplo significativo para tecnologia dominada no país é que uma usina que processa 2 milhões de toneladas de cana por ano e que gera hoje 24GWh/ano para atender suas próprias necessidades poderá vender ao sistema 300GWh/ano (CONAB, 2013).

Segundo CONAB (2013), em análise econômica, é vantajoso utilizar os resíduos de cana-de-açúcar como fonte primária para geração de energia elétrica, pois:

- Complementa a geração hidrelétrica, a safra da cana-de-açúcar na região Centro-Sul coincide com a época de baixa incidência de chuva nos reservatórios de águas das usinas hidroelétricas;
- As plantas de cogeração são anexas as usinas, portanto o custo com a logística do combustível é baixo;
- As plantas tem rápida implementação (em torno de 18 meses);
- A tecnologia dos equipamentos é brasileira, não há risco cambial;
- A energia é limpa, pois o bagaço e a palha da cana-de-açúcar são renováveis.

A tabela 7 mostra o potencial de estimativa de produção de bagaço de cana-de-açúcar.

Tabela 7 - Estimativa da produção de bagaço de cana-de-açúcar

Região	Estimativa da produção de bagaço (mil ton)	Total de cana-de-açúcar moída (mil ton)
Centro-Sul	142.566	494.937,7
Norte-Nordeste	20.838	66.056,1
Brasil	163.404	560.993,8

Fonte: (CONAB, 2013).

Sendo que o estado de São Paulo (maior produtor) tem estimativa de 88.757 de produção de bagaço e o total de cana-de-açúcar moída de 305.636,3, quase 55% de todo o país (CONAB, 2013).

3 VISÃO GERAL DE BOMBAS E MOTORES

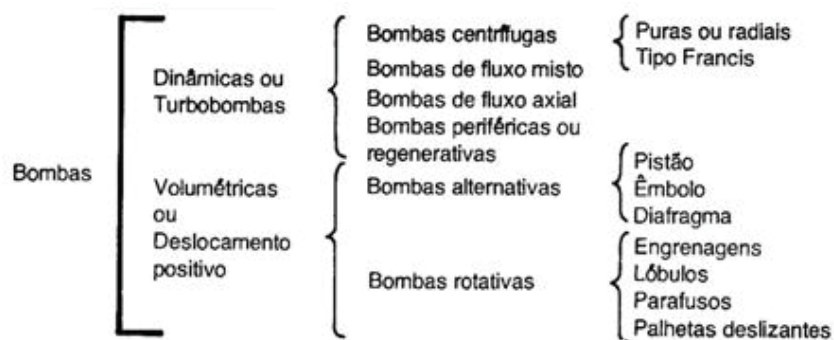
3.1 Bombas hidráulicas

As bombas são responsáveis por transferir energia a um fluido e conseqüentemente transportá-lo de um ponto a outro. São consideradas máquinas geratrizes, pois recebem energia de uma fonte motora transformando trabalho mecânico em energia, que é cedida ao fluido sob a forma de energia cinética e de pressão. Em conseqüência desse processo ocorre um aumento da pressão e/ou da velocidade do fluido (MACINTYRE, 1987).

3.2 Classificação das bombas em geral

Existem vários critérios de classificar uma bomba, para Mattos (1998) uma das formas de classificação é pela forma com que o fluido é transportado quando lhe é fornecido energia. A figura 10 ilustra a forma pela qual as bombas são classificadas, sendo elas divididas em duas categorias: dinâmicas (ou turbobombas) e volumétricas (ou de deslocamento positivo).

Figura 10 – Classificação das bombas hidráulicas



Fonte: (MATTOS, 1998).

O escopo desse trabalho terá como foco o estudo das bombas centrífugas usadas nas usinas sucroalcooleiras que por definição são máquinas hidráulicas que fornecem energia ao fluido promovendo o seu escoamento de um ponto a outro por meio da ação da força centrífuga.

Conforme mostra a figura 10, observa-se que as bombas centrífugas são um caso particular das bombas puras ou radiais. A classificação quanto ao tipo e forma dos rotores, segundo Santos (2007), determina a trajetória do fluido no rotor, são diferenciadas de acordo com os tipos e as formas dos rotores, podendo ser divididas em três tipos:

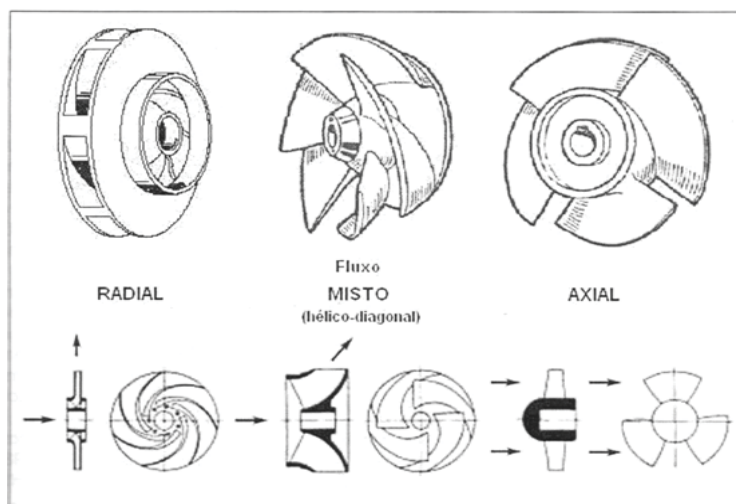
Radiais ou puras: o fluido entra axialmente no rotor e a direção do fluido bombeado é perpendicular ao eixo de rotação. Por causa da rotação, toda a energia recebida pelo fluido é obtida através de forças centrífugas. Esses tipos de bombas são recomendados quando se necessitam de cargas manométricas mais relevantes do que as vazões. As bombas centrífugas se enquadram neste tipo.

Fluxo misto ou semi-axial: o fluido entra axialmente no rotor e devido a uma dupla curvatura que as pás possuem, esse sai inclinado em relação ao eixo de rotação. A energia fornecida ao fluido é uma parte devida a força centrífuga e outra parte devida a força de arrasto. Essas bombas são recomendadas para vazões mais relevantes quando comparadas com as cargas atendidas.

Fluxo axial: o fluido entra axialmente e na saída do rotor o escoamento é paralelo em relação ao eixo de rotação. A energia fornecida ao fluido é devida totalmente as forças de arrasto. Essas bombas são utilizadas quando a preocupação por vazão é mais relevante do que as cargas manométricas.

A figura 11 abaixo ilustra os tipos e formas de rotores.

Figura 11 – Tipos e formas dos rotores



Fonte: (SANTOS, 2007).

As bombas centrífugas recebem energia de uma fonte motora qualquer, transformando o trabalho mecânico proveniente em energia cinética e de pressão, que são cedidas ao fluido (LIMA, 2003). As principais formas de acionamento das bombas centrífugas nas usinas sucroalcooleiras são feitas por motores elétricos.

3.3 Características das bombas centrífugas

Segundo Lima (2003), as bombas centrífugas podem ser classificadas segundo diversos critérios, não existe uma literatura que classifiquem essas bombas do mesmo modo, porém as classificações são similares, sendo as mais relevantes: quanto à posição do eixo, quanto ao número de rotores e quanto a sua localização.

- **Classificação quanto à posição do eixo**

A posição do eixo de uma bomba centrífuga pode ser horizontal, vertical ou inclinada.

- **Classificação quanto ao número de rotores**

As bombas centrífugas também podem ser classificadas quanto ao número de rotores que possuem: simples estágio (um rotor) ou multiestágio (dois ou mais rotores).

- **Classificação segundo a localização da bomba**

Podem ser: submersas (funcionam dentro da fonte de suprimento) ou não submersas (funciona fora da fonte de suprimento).

3.4 Componentes da bomba centrífuga

Segundo Lima (2003), o estudo de uma máquina pode ser dividido em seções e sistemas. As seções são compostas por grupos de peças que são peculiares a própria máquina e os sistemas são formados por grupos de peças suplementares, podendo algumas delas ser acessórios ou componentes auxiliares da máquina.

Portanto a divisão do estudo de uma bomba centrífuga pode ser feita conforme o quadro 1:

Quadro 1 - Divisão facilitada para estudo dos componentes de uma bomba centrífuga

Seções	Hidráulica	As peças responsáveis por essa seção são as que transferem e convertem energia do fluido. Fazem parte dessa seção: rotor (impelidor) e a carcaça. Em projetos mais elaborados ainda há o indutor e os anéis de desgaste.
	Mecânica	Essa seção engloba as peças transmissoras do movimento de rotação, que garantem ao conjunto girante permanecer na posição correta. Fazem parte o eixo, os mancais e as caixas de mancais.
	Vedação	Principal função de impedir a passagem de fluido ou ar na região onde o eixo atravessa a carcaça. As peças que permitem impedir o vazamento são: gaxeta ou selo mecânico.
	Suportação	Função fundamental de apoiar a bomba. Os elementos principais são: pedestais, suportes e base metálica.
Sistemas	Lubrificação	As peças que necessitam de lubrificação são os mancais e alguns tipos de acoplamento.
	Auxiliar de vedação	Esse sistema agrupa acessórios que melhoram o desempenho das peças da seção de vedação.
	Sistema de resfriamento	Esse sistema impede que a temperatura de algumas peças prejudique o funcionamento da máquina.
	Transmissão de potência	Esse sistema é responsável por transferir o movimento da máquina motora para a bomba. A transmissão pode ser: direta (acoplamento) ou indireta (por correia, por corrente ou por redutor de velocidade).

Fonte: (LIMA, 2003).

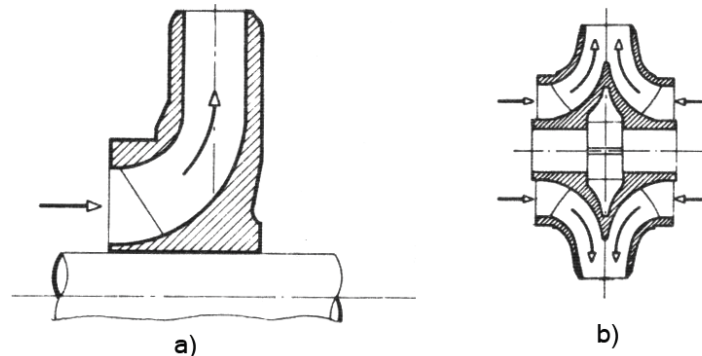
- **Seção - Hidráulica**

Rotor (ou impelidor): o rotor ou impelidor que é dotado de pás (ou palhetas) tem a função de imprimir ao fluido um movimento circulatório, transformando a energia mecânica em energia cinética e de pressão. É através da velocidade específica da bomba que o rotor é classificado em radial, semi-axial ou axial (LIMA, 2003).

Se a bomba possuir somente um rotor, ela é denominada de simples estágio, caso contrário é uma bomba de múltiplos estágios. O sentido de rotação do rotor é fundamental para o desempenho da bomba, sendo o formato das pás do impelidor responsável pelo caminho percorrido pelo fluido desde sua entrada até a sua saída.

Segundo Mattos (1998), a construção dos rotores pode ser de simples sucção (o líquido é succionado por apenas um dos lados do rotor) ou de dupla sucção (ambos os lados do rotor succiona o fluido) conforme ilustrado na figura 12.

Figura 12 – Rotores: (a) de simples sucção; (b) de dupla sucção



Fonte: (MATTOS, 1998).

Em relação à construção das paredes do rotor, as bombas podem ser denominadas como rotor aberto, semi-aberto e fechado. Os rotores abertos são recomendados quando o fluido bombeado for viscoso ou sujo, os semi-abertos são mais resistentes do que os abertos e são recomendados para o bombeamento de líquidos viscosos, sujos e com elevada concentração de sólidos abrasivos em suspensão, os fechados são os mais utilizados nas bombas centrífugas por apresentarem um melhor rendimento em operação. Para o bombeamento de fluidos que contém materiais fibrosos e fluidos que tendem a formar espuma e gás, é recomendado o uso de rotores semi-abertos. No caso das usinas sucroalcooleiras, o uso de rotores semi-abertos seria ideal para o bombeamento de caldo-de-cana com bagaço, a figura 13 mostra alguns tipos de rotores semi-abertos que possuem uma ou duas palhetas, sendo um deles em forma de "S" (LIMA, 2003).

Figura 13 - Tipos de rotores semi-abertos



Fonte: (LIMA, 2003).

Carcaça: responsável pela contenção do fluido bombeado e também por ser responsável por permitir a conversão da energia cinética contida no fluido em energia de pressão (MATTOS, 1998).

As carcaças são munidas de dois bocais, um de sucção ou aspiração (onde o fluido se dirige a parte central do rotor) e o outro de descarga ou recalque (conduz o fluido para fora da bomba). Normalmente o diâmetro do bocal de sucção é maior que o do bocal de descarga. Em bombas de multiestágios introduz-se uma peça conhecida por diafragmas entre os estágios com a finalidade de orientar o fluido para os próximos estágios (LIMA, 2003).

A figura 14 ilustra uma carcaça conhecida como voluta, que é o tipo mais utilizado em bombas de simples estágio, cuja função é coletar o fluido que sai na periferia do rotor e orientar sua direção até a saída da bomba (MATTOS, 1998).

Figura 14 - Carcaça em voluta



Fonte: (MATTOS, 1998).

- **Seção - Mecânica**

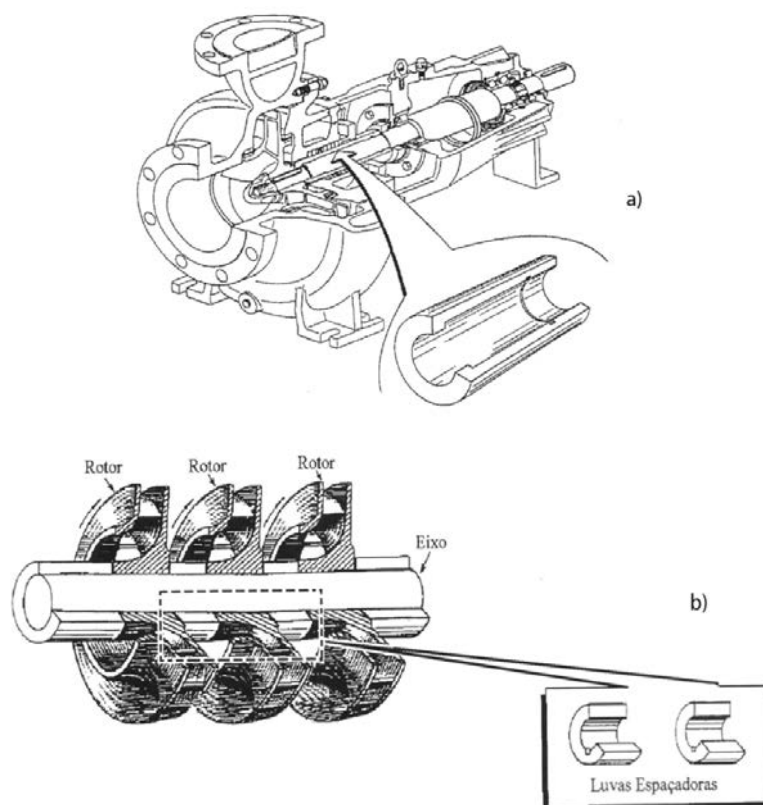
Eixo: o eixo além de suportar o rotor e outras peças girantes, transmite o torque na partida e durante a operação. Para Mattos (1998), o eixo deve sempre trabalhar entre as partes giratórias e estacionárias com uma deflexão menor do que a folga mínima.

As *luvas de eixo* protegem o eixo de possíveis erosões, corrosões ou desgaste, cujo objetivo mais comum é proteger o eixo também na região da caixa de gaxetas. O desgaste do eixo ocorre porque as gaxetas são apertadas para reduzir o vazamento do fluido bombeado, ficando comprimidas entre as paredes da caixa de gaxeta e do eixo, por isso necessita-se do uso de uma luva para suportar esse desgaste (LIMA, 2003).

Nas bombas de multiestágios utilizam-se *luvas espaçadoras*, que são fixadas no meio do eixo, cuja finalidade é evitar que os rotores deslizem sobre o eixo.

A figura 15 mostra essas luvas e sua localização no eixo.

Figura 15 - Luvas: (a) Luva do eixo; (b) Luvas espaçadoras



Fonte: (LIMA, 2003).

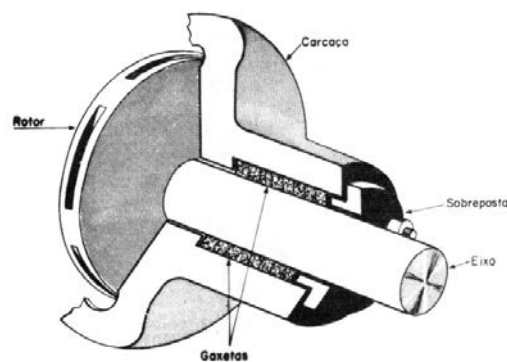
Mancais: os mancais são os elementos responsáveis por apoiar o eixo, outra característica importante dos mancais é a de preservar o conjunto rotativo da bomba na posição correta, preservando durante a operação o peso do conjunto girante e as forças radiais e axiais (LIMA, 2003).

Caixas de mancais: além de conter os mancais da bomba, serve como reservatório lubrificante. A caixa de mancal deve resistir toda a carga do conjunto rotativo que é transmitida a ela através dos mancais. Na caixa de mancal pode conter conexões para respiro, abastecimento e dreno de lubrificante (LIMA, 2003).

- **Seção - Vedação**

Gaxetas: a caixa de gaxetas tem papel importante na montagem de uma bomba, sua principal função é de proteger a bomba contra vazamentos nos pontos em que o eixo ultrapassa a carcaça. A caixa de gaxetas contém certa quantidade de anéis de gaxetas comprimidos em torno do eixo ou da luva do eixo para o ajuste desejado de uma peça conhecida por sobreposta, conforme ilustra a figura 16 (MATTOS, 1998).

Figura 16 – Caixa de gaxetas convencional



Fonte: (MATTOS, 1998).

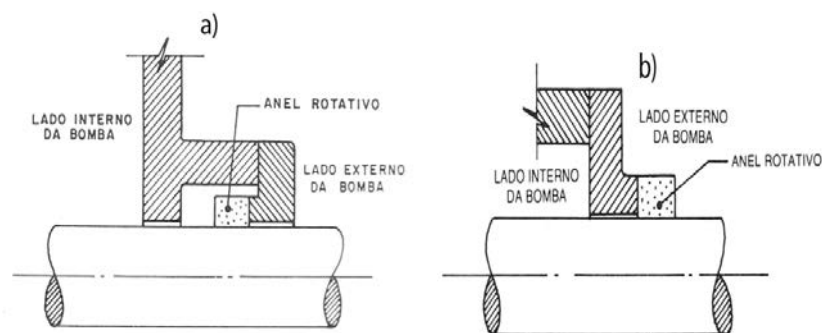
De acordo com Macintyre (1987), as gaxetas são resfriadas com o próprio fluido bombeado, portanto não deve ocorrer reação do fluido com o material da gaxeta. Quando o fluido bombeado for quente, as caixas de gaxeta devem possuir uma câmara para refrigeração com água operando em sistema de recirculação.

Selo Mecânico: Para Mattos (1998), o uso do selo mecânico é geralmente mais aceito nas aplicações de bombeamento onde o uso de gaxetas se torna deficiente. Em casos que as gaxetas desempenham bom serviço, a troca de gaxetas pelo uso de selo mecânico é de preferência pessoal ou de custo inicial, visto que selos mecânicos por serem mais estruturados do que as gaxetas que são feitas de material, são mais caros.

A vedação por selos mecânicos é obtida através do contato de duas superfícies de selagem bem polidas e localizadas em um plano perpendicular ao eixo, esse contato se mantém devido à atuação de uma mola. Uma das superfícies polidas pertence a uma peça do eixo e a outra a carcaça (MACINTYRE, 1987).

Existem dois tipos de selo mecânico: montagem interna (o anel rotativo permanece no interior da caixa e fica em contato com o líquido bombeado) e de montagem externa (o elemento ligado ao eixo é posicionado do lado externo da caixa), conforme ilustra a figura 17 (MACINTYRE, 1987).

Figura 17 – Tipo de montagem do selo: (a) montagem interna; (b) montagem externa



Fonte: (MACINTYRE, 1987).

Quando o selo é novo, forma-se um selo líquido entre a parte estacionária e a girante da bomba e não há presença de vazamento, porém com o uso poderá ocorrer vazamentos, necessitando a troca do dispositivo.

• Seção - Suportação

Pedestais: as bombas centrífugas normalmente são suportadas por pedestais, que são projetados conforme o tipo de bomba, peso, forças externas atuantes, material empregado, entre outros fatores. Os pedestais devem ser rígidos para poder absorver as

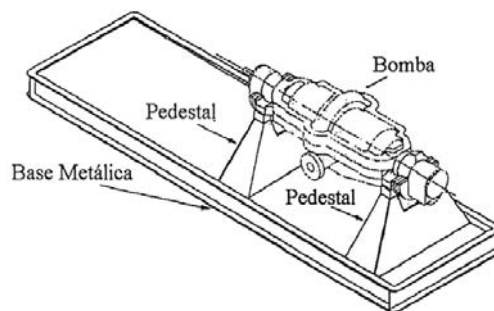
cargas sem nenhum movimento e devem possuir boa capacidade de amortecer a vibração.

Em bombas que operam com fluidos acima de 250°C, os pedestais costumam ser refrigerados para evitar dilatações que desalinham o conjunto motobomba e provocam tensões na carcaça e tubulações (LIMA, 2003).

Base metálica: facilita instalação do conjunto motobomba. Quando o conjunto motobomba for instalado nessa base, o transporte e a instalação podem ser feito em qualquer lugar sem complicações (LIMA, 2003).

A figura 18 ilustra uma bomba instalada em uma base metálica suspensa por pedestais.

Figura 18 – Base metálica de uma bomba horizontal



Fonte: (LIMA, 2003).

• Sistema - Lubrificação

Esse sistema abrange os mancais e em alguns casos o acoplamento. A lubrificação nos mancais tem por objetivo reduzir o atrito, facilitar a dissipação de calor gerado, propiciar proteção anti-corrosiva e dificultar a entrada de partículas estranhas. O lubrificante mais usado são os óleos ou a graxa, sendo que em bombas de elevada rotação utiliza-se o óleo. A graxa é utilizada onde o ambiente de operação da bomba apresentar muita poeira, gases corrosivos ou locais de difícil acesso (MATTOS, 1998).

Nos acoplamentos, que são elementos mecânicos que ligam o eixo da bomba ao eixo do motor, a lubrificação geralmente é feita a graxa que é aplicada manualmente ao acoplamento já instalado no eixo, a lubrificação não deve ser excessiva para não ocorrer deteriorização da graxa por causa do superaquecimento (LIMA, 2003).

- **Sistema - Auxiliar de vedação**

São os acessórios que auxiliam para melhorar o desempenho das peças que fazem parte da seção de vedação. Os sistemas auxiliares de vedação, conhecidos também como planos de selagem, são criados para assegurar condições favoráveis na região da caixa de vedação.

Os planos de selagem podem ser primários ou secundários. Os primários garantem a presença ininterrupta de fluido adequado na caixa de vedação para lubrificar as faces do selo que deslizam e removem o calor que vai ser gerado nessa região, esses planos são de uso obrigatório. Os secundários eliminam as condições adversas que existem na região limite ao selo e evitam o contato direto do fluido com a atmosfera. Os planos de selagem mais utilizados possuem uma referência numérica, que foram padronizadas para melhorar a comunicação técnica (LIMA, 2003).

- **Sistema - Resfriamento**

Esse sistema permite que a temperatura de algumas peças não ultrapasse o valor permitido ao funcionamento apropriado da máquina. Quando ocorre bombeamento de fluidos quentes, as peças da bomba serão aquecidas devido à transferência de calor. As primeiras peças a serem aquecidas são o rotor e a carcaça, então o calor aquece as outras peças da bomba através da condução. Segundo Lima (2003), é necessário um sistema de resfriamento para impedir o aquecimento excessivo da caixa de vedação, caixa de mancais e pedestais. O sistema mais tradicional é o uso de câmaras existentes nessas seções que são projetadas para resfriar. Geralmente as necessidades de resfriamento são deixadas para que o fabricante da bomba adote um critério em função das condições do fluido bombeado e do material das peças.

- **Sistema - Transmissão de torque (potência)**

Responsável por transmitir o movimento da máquina motora para a bomba. A transmissão pode ser realizada diretamente (por acoplamento) ou indiretamente (por correias, por correntes ou por redutor de velocidade).

3.5 Normas de projeto

Segundo Payne (1989), as construções de bombas geralmente devem obedecer à norma API Standard 610, com capacidade de projeto recomendada para 25% maior do que a capacidade de trabalho, cuja seleção deve ser feita tomando as curvas características como base e selecionando o ponto de trabalho próximo ao ponto de máxima eficiência. De acordo com Mattos (1998), as normas existentes para projeto de construção de bombas centrífugas são:

API – 610: São as bombas conhecidas como de serviço pesado de acordo conforme o rigor da norma. São as bombas aplicadas para as indústrias de petróleo, petroquímicas e fertilizantes.

ANSI B73.1: As características fundamentais são designadas pelo alto grau de padronização de dimensões que uma peça de reposição de um fabricante possa ser instalada no equipamento de outro fabricante. Essas bombas são conhecidas como de serviço-médio e são amplamente utilizadas nas indústrias químicas, alimentícias e farmacêuticas.

DIN 24.256: É uma norma alemã equivalente a ANSI B73.1

ISO 2858: É uma versão mais completa da norma DIN 24.256

A norma de acionamentos dessas bombas deve obedecer à norma API Standard 601, e os projetos dos materiais e equipamentos elétricos, considerando operação contínua, devem obedecer às normas ANSI e NEMA (PAYNE, 1989).

3.6 Seleção de materiais

Para Mattos (1998), as escolhas do conjunto de materiais a serem utilizados na fabricação de uma bomba dependem dos fatores apresentados no quadro 2:

Quadro 2 - Fatores determinantes que influenciam na fabricação de uma bomba

Natureza do fluido bombeado	<ul style="list-style-type: none"> - corrosividade - presença ou não de sólidos abrasivos em suspensão - pH - temperatura do fluido - presença de gases
Condições de serviço	<ul style="list-style-type: none"> - pressão ou carga de operação da bomba - velocidade - segurança - temperatura do bombeamento
Características dos materiais	<ul style="list-style-type: none"> - resistência à corrosão - resistência mecânica - soldabilidade - facilidade de fundição - usinabilidade - tendência do material a falhas estruturais - possibilidade de formação de pilha com outro material na presença de algum fluido eletrolítico
Vida esperada e do custo	<ul style="list-style-type: none"> - qualidade do material (influencia no custo e na vida útil)

Fonte: (MATTOS, 1998).

Alguns materiais importantes no emprego de construção das bombas são: ferro fundido, ferro nodular, aço carbono, aço inoxidável, ligas contendo níquel (como o monel, inconel, incoloy, NI-resist e os hastelloys), stellite, bronze, entre outros (LIMA, 2003).

Uma das principais preocupações para seleção de materiais para construção da bomba é os utilizados na carcaça e no impelidor, os demais materiais são definidos tendo como base a compatibilidade desses materiais (MATTOS, 1998).

- **Materiais para carcaça**

De preferência o ferro fundido, devido à elevada resistência mecânica, baixo custo e fácil fundição, porém para operações com pressões maiores que 70 kgf/cm^2 e temperaturas maiores que 175°C não é recomendado o uso de ferro fundido. Para operações com condições severas é recomendado utilizar o aço carbono que pode suportar até 140 kgf/cm^2 . Se for levado em consideração fatores como resistência a corrosão é necessário o uso de materiais mais nobres como aço de baixa liga ou inoxidável, mesmo operando em condições de temperatura e pressão moderadas (MATTOS, 1998).

Carcaças de aço inoxidável geralmente são utilizadas quando o fluido bombeado for corrosivo ou excessivamente abrasivo. O bronze é desejado para fluidos levemente corrosivos (LIMA, 2003).

Para operações de baixa temperatura, usa-se o ferro fundido ligado ou o aço carbono fundido (LIMA, 2003).

- **Materiais do impelidor / rotor:**

Para bombeamento de fluidos normais o bronze tem preferência, pois é um material de fácil fundição para seções complicadas, facilidade em usinar e possibilidade de faces lisas. No entanto bronze não pode ser utilizado com carcaças de ferro fundido quando o fluido for um eletrólito forte que necessita de materiais ferrosos e deve ser raramente usado em temperaturas maiores que 121°C para não sofrer expansão (MATTOS, 1998).

Para substituir o bronze do impelidor e respeitando as condições de temperatura, pressão e corrosividade do fluido utilizam-se ferro fundido, aço fundido ou aço inoxidável (MATTOS, 1998).

- **Materiais do eixo:**

Por estarem sujeitos a elevados esforços, os materiais usados na fabricação do eixo devem: possuir grande resistência mecânica, ter ótima usinabilidade, ser capaz de

receber tratamento térmico, ter boa resistência ao desgaste e apresentar boa resistência à corrosão, portanto torna-se necessário o uso do aço carbono ou o aço liga ou monel. A seleção do material para a fabricação do eixo depende de qual vai ser o fluido bombeado. Se o fluido não for corrosivo, utiliza-se o aço carbono, e caso o fluido seja corrosivo ou for formado por um hidrocarboneto pode-se usar o aço AISI 4140 temperado e revenido. A norma API 610 recomenda usar o aço AISI 410 para temperaturas maiores que 176°C (LIMA, 2003).

Segundo Lima (2003), o processo de têmpera e de revenimento favorecem a usinagem e fornecem maior resistência à fadiga.

- **Material para anéis de desgaste, luvas e sobrepostas:**

Pelo mesmo motivo do impelidor utiliza-se bronze para os *anéis de desgaste* podendo utilizar também ferro fundido, aço inoxidável ou monel (liga a base de níquel) (MATTOS, 1998).

A maior parte das luvas de eixo é feitas de bronze e caso não seja possível utilizar bronze por causa de sua baixa resistência a abrasividade utiliza-se o aço inoxidável (MATTOS, 1998).

As peças sobrepostas geralmente são feitas de bronze, ferro fundido ou aço (MATTOS, 1998).

- **Nas usinas sucroalcooleiras**

No setor sucroalcooleiro as bombas utilizadas nos processos que bombeiam (água, caldo clarificado, xarope e méis), o material dessas bombas consistem em sua maioria em corpo de ferro fundido, rotor de bronze e eixo de aço carbono. Bombas utilizadas nos processos de (caldo de moenda, caldo misto e lodo) devem ser projetadas com materiais resistentes a corrosão e abrasão, utilizando eixos de aço inoxidável (PAYNE, 1989).

3.7 Instalação hidráulica

Segundo Santos (2007), a instalação de um conjunto motobomba requer alguns conhecimentos. Em um projeto de uma instalação, deve-se levar em consideração o local de onde o fluido vai ser retirado, o local de destino e consumo desse fluido. Tudo

isso será feito através de uma planta que vai determinar por onde vai passar os tubos e onde será inserido o conjunto motobomba.

A instalação é dividida em sucção e recalque, onde cada seção possui sua própria tubulação, sendo o projetista responsável por selecionar os componentes para a montagem dessa instalação como: tubos (diâmetros e tipos de materiais), meios de ligação dos tubos, válvulas, conexões e outros (SANTOS 2007).

Quando se faz uma correta instalação de uma bomba, o seu desempenho é melhor e conseqüentemente essas bombas vão permanecer alinhadas por um bom tempo, serão menos sujeitas a vazamentos, vibrarão menos e as manutenções serão reduzidas, assegurando uma vida útil maior para essas bombas. Cuidados como preparar a bomba para o embarque, armazenar a bomba em lugares que sejam cobertos, atentar a correta localização da bomba e ao alinhamento da mesma com seu acionador para garantir boa condição de escoamento também ajudam a melhoram a vida útil, garantindo que ela opere melhor (MATTOS, 1998).

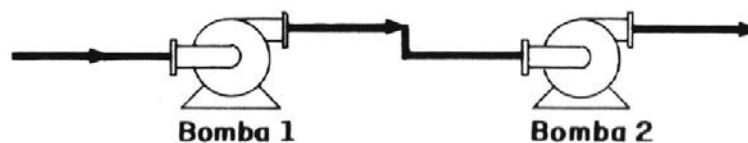
Em usinas sucroalcooleiras a associação de bombas é bastante usada pelo motivo de impossibilidade de uma bomba solitária poder atender a vazão ou altura manométrica proposta no projeto, essas associações também podem ser feitas para reduzir os custos de implantação.

- **Bombas associadas em série**

O objetivo desta associação é almejar uma carga manométrica elevada e desproporcional em relação à vazão, para isso, deve ser analisado se a carcaça da bomba resiste à pressão desenvolvida por este tipo de associação (SANTOS, 2007). A bomba de vários estágios suporta pressões elevadas, portanto o uso de bombas em série só deverá ser usado quando o valor da altura manométrica ultrapassar os valores alcançados pelas bombas multiestágios (MATTOS, 1998).

Nessas associações a descarga de cada bomba é conectada a sucção da seguinte, mantendo a vazão em todas as bombas, enquanto que a pressão de descarga será o somatório de todas as unidades, portanto deve ser notado se as carcaças (principalmente da última bomba) e os flanges de sucção irão suportar a pressão desenvolvida, figura 19 (MATTOS, 1998).

Figura 19 – Representação de bombas em série



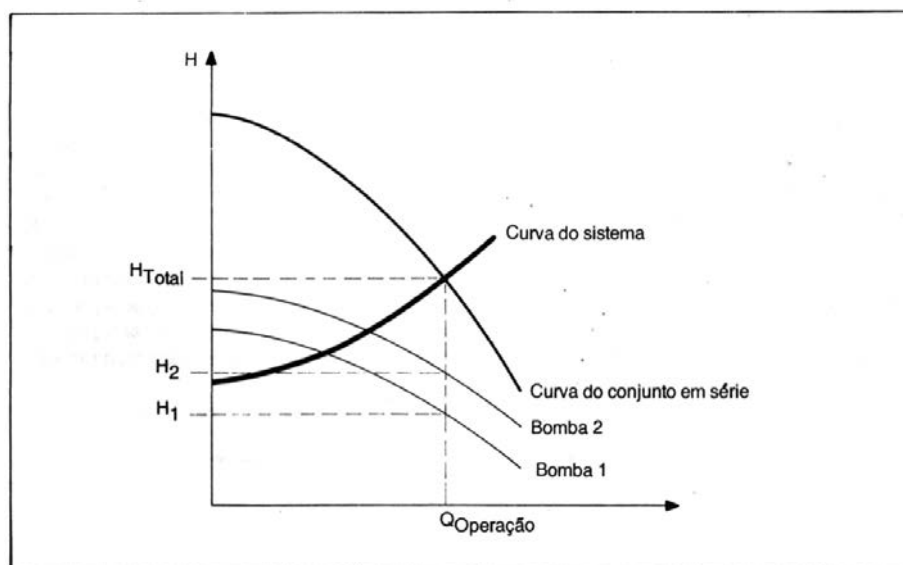
Fonte: (MATTOS, 1998).

O ponto de operação de bombas de uma associação em série é tomado acoplando a curva do sistema a curva do conjunto.

Observando a figura 20 as bombas contribuem com valores diferentes para a aquisição do valor da altura manométrica total em determinada vazão de operação, conforme mostra a equação (1).

$$H_{total} = H_1 + H_2 \quad (1)$$

Figura 20 - Indicação do ponto de operação de bombas diferentes em série



Fonte: (MATTOS, 1998).

Para associação em série de bombas iguais, cada bomba oferece uma carga manométrica total (H) que é dividida pelo número de bombas inseridas na associação, equação (2).

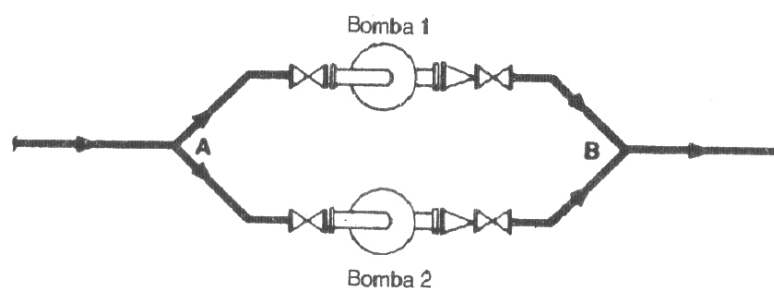
$$H = \frac{H_{total}}{n} \quad (2)$$

Normalmente as instalações procuram utilizar bombas iguais e com curvas estáveis para evitar a possibilidade de instabilidade no funcionamento (MATTOS, 1998).

- **Bombas associadas em paralelo**

Esse tipo de associação é utilizada quando há a necessidade de vazão elevada e desproporcional em relação à carga, ou onde a vazão necessária variar muito em uma instalação. A instalação de bombas em paralelo para vazões elevadas é utilizada para fornecer segurança ao sistema, no caso de surgir falhas com alguma bomba, a instalação opera com as outras bombas, diminuindo apenas a vazão fornecida e não um corte no funcionamento do sistema. A retirada de uma ou mais bombas para uma instalação operando com várias vazões dá flexibilidade ao sistema, fornecendo uma boa eficiência das bombas utilizadas. No caso de uma bomba sozinha, essa teria que operar em pontos de baixa eficiência para fornecer diferentes vazões requeridas (SANTOS, 2007). A figura 21 ilustra como essa associação é representada.

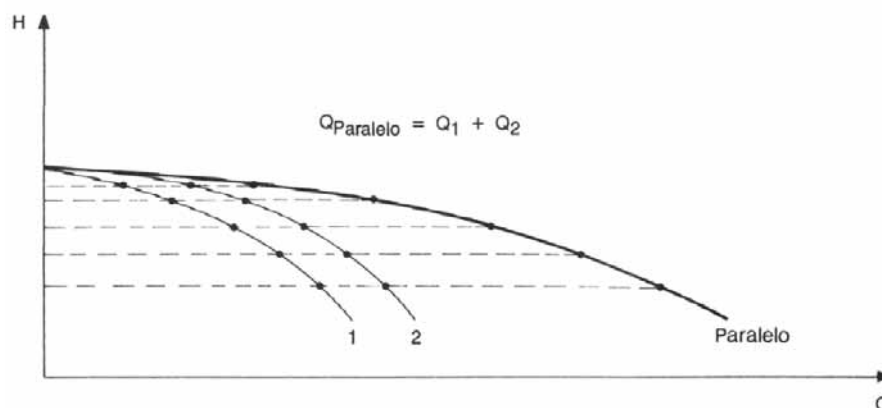
Figura 21 - Representação de bombas em paralelo



Fonte: (MATTOS, 1998).

A partir da figura 21, a determinação da curva do conjunto se dá somando as vazões que correspondem ao mesmo valor de altura manométrica, conforme representa a figura 22 (quando as duas bombas forem diferentes, mas apresentam a mesma carga no ponto em que a vazão é nula).

Figura 22 – Obtenção de curva para associações em paralelo



Fonte: (MATTOS, 1998).

Existem três casos de associações em paralelo: bombas iguais com curvas estáveis, bombas iguais com curvas instáveis e bombas diferentes em paralelo. O princípio do funcionamento é o mesmo, é necessário acoplar a curva do sistema à curva do conjunto de bombas.

Segundo Mattos (1998), algumas recomendações para selecionar bombas operando em paralelo devem ser feitas: optar por utilizar bombas que apresentem curvas estáveis; selecionar bombas cuja altura manométrica máxima do sistema nunca ultrapasse a altura manométrica correspondente à vazão nula de quaisquer umas das bombas; as potências dos motores devem ser suficientes para atender todas as variações de carga que ocorrem no processo quando se necessita retirar ou adicionar alguma unidade, o NPSH disponível deve ser maior do que o NPSH requerido para qualquer valor de carga ocorrida quando se retira ou adiciona alguma unidade.

3.8 Seleção de motores elétricos

3.8.1 Acionamento de bombas hidráulicas

A bomba necessita de energia mecânica para fornecer energia hidráulica para um fluido, para isto é exigido determinada potência para que seu eixo seja acionado por rotação, portanto as principais formas de acionamento de bombas hidráulicas podem ser

feitas por: motor elétrico (acionamento mais comum), motor estacionário, motores de combustão interna (diesel) e turbinas (especialmente as turbinas a vapor), (SANTOS, 2007).

De todos os tipos existentes de motor, os mais utilizados para instalações hidráulicas industriais são os motores elétricos e estacionários. Os motores estacionários são caros e trabalham com rotações entre 2300 a 2600 rpm, restando o uso dos motores elétricos (SANTOS, 2007).

A grande maioria das bombas centrífugas é acionada por motores elétricos em geral de corrente alternada sendo monofásicas em bombas de pequeno porte e trifásicas nas demais bombas. Nas bombas de combate a incêndio, onde não há o uso de energia elétrica, utilizam-se motores a diesel e em centrais geradoras de vapor, utilizam-se bombas que aproveitam o vapor produzido para serem acionados pelas turbinas a vapor (MACINTYRE, 1987).

Em um ensaio de bomba, devido ao escorregamento, a rotação não é constante, pois conforme aumenta a vazão, a potência exigida pelo motor elétrico também aumenta, tornando o serviço mais difícil e aumentando a carga aplicada pela bomba no eixo do motor. Essa carga é a tentativa da bomba de parar o eixo do motor. Portanto o motor deve possuir potência suficiente para vencer essa carga e permanecer girando, cuja consequência será uma diminuição na rotação. (SANTOS, 2007).

Conforme mostra a equação (3) a rotação pode ser calculada como:

$$n = \frac{120.f}{p} \text{ (rpm)} \quad (3)$$

Onde: f é a frequência (60 Hz no Brasil) e p é o número de pólos.

Para Santos (2007), os fabricantes adotaram rotações padronizadas que garantem que todos os pontos apresentados nas curvas características das bombas funcionem em uma rotação constante, mantendo um escorregamento médio. Nos catálogos de fabricantes de bombas as curvas características foram ensaiadas para: 3500 rpm (2 pólos), 1750 rpm (4 pólos) e em alguns catálogos encontram-se bombas ensaiadas para 1200/1150 rpm (6 pólos), porém são mais caras.

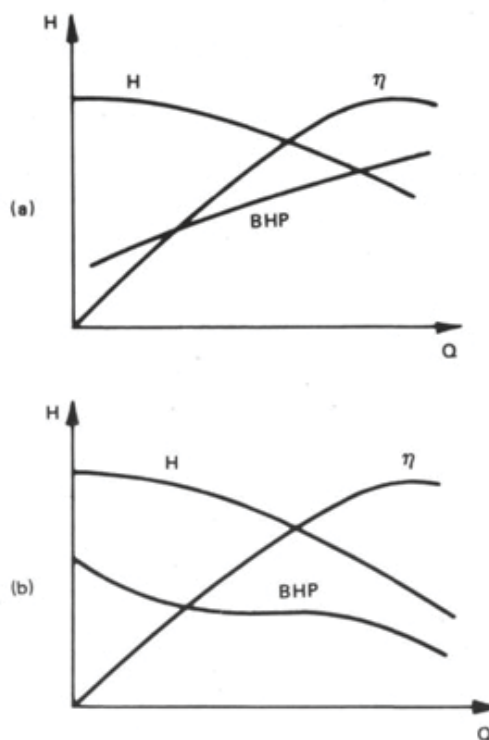
Os motores se dividem de acordo com a natureza da corrente que os alimenta: corrente contínua e corrente alternada. Os motores de corrente alternada (ac) são comumente usados em aplicações estacionárias, o uso de motores de corrente direta (dc) são utilizados quando os de corrente alternada são incompatíveis (HICKS, 1957).

3.8.2 Seleção do motor

Para Hicks (1957), são duas as características importantes para a escolha do motor: a quantidade do conjugado de partida necessário em operação normal (conjugado resistente que é oferecido pelo equipamento a ser acionado pelo motor elétrico) e as exigências da velocidade. A maioria das bombas centrífugas é acionada com velocidade constante, podendo se usar um variador de velocidades em bombas de grande porte para alterar o valor da velocidade.

A potência fornecida pelo motor ao eixo da bomba é representada pela potência motriz (BHP - brake horsepower), a figura 23 indica como varia a curva de potência consumida: na figura 23(a), a BHP aumenta continuamente até determinado valor de vazão, devendo o motor ser selecionado de tal forma que a potência disponível deva cobrir todos os pontos de operação e em seguida, na figura 23(b) mostra a potência consumida decrescendo com o aumento da vazão (LOBOSCO; DIAS, 1988).

Figura 23 – Curvas de potência solicitada para bombas centrífugas



Fonte: (LOBOSCO; DIAS, 1988).

O rendimento da bomba depende da vazão, a potência solicitada ao motor (BHP) varia no início da operação para valores menores, ao atingir a vazão de projeto (ponto de máximo rendimento) e admitindo que a rugosidade da tubulação continue aumentando, ocorrerá aumento da potência solicitada ao motor (LOBOSCO; DIAS, 1988).

Segundo Lobosco e Dias (1988), para otimização do acionamento do ponto de vista de consumo de energia, no ponto de maior rendimento do motor, sua potência nominal deve ser a mais próxima possível da potência solicitada pela bomba em funcionamento, ponto que a bomba também atinge seu máximo valor de rendimento. Portanto, para o acionamento de bombas centrífugas deve se levado em consideração a redução de picos de corrente e maximização do rendimento do sistema.

O uso de motores síncronos em operações constantes com exigência de valores elevados de potência apresenta vantagens, porém quando a potência dos motores solicitados for obrigatória no acionamento de uma bomba em determinada instalação e o fator de potência for maior que o mínimo para penalização, torna-se desnecessário o uso de motores síncronos (LOBOSCO; DIAS, 1988).

Quando necessitar-se do uso de motores que possuem rendimento acima dos padronizados pelo fabricante uma análise de custos deverá ser feita, verificando-se o custo adicional a ser pago visa economia de energia ao longo do sistema de bombeamento a ser considerado. Em analogia, a análise de comparação do custo inicial e de manutenção de um motor síncrono e do custo adicional por um fator de potência acima do padronizado também deverá ser feito (LOBOSCO; DIAS, 1988).

Outra análise a ser feita é sobre o ambiente em que o motor irá operar, deve-se verificar se é limpo, isento de pó e poeira, livre ou não de umidade, fumaças corrosivas, água, etc. Caso o motor não esteja instalado em condições favoráveis, os fatores ambientais irão prejudicar o funcionamento do motor, para isso torna-se necessário o uso de proteções mecânicas do invólucro do motor que serão incorporadas na parte elétrica e mecânica, garantindo vida longa e operação com baixa manutenção (LOBOSCO; DIAS, 1988).

3.8.3 Acionamento na indústria sucroalcooleira

Nos processos industriais de uma usina sucroalcooleira há a utilização extensa de bombas centrífugas que envolvem ampla faixa de potências.

- **Acionamento de picadores e moendas**

As potências envolvidas estão entre 250 e 600cv, o acionamento do setor de moendas sozinho possui a maior potência entre os equipamentos utilizados na usina. Nessa situação é típica a utilização de motores de anéis, como meio de diminuir o impacto da corrente de partida no sistema elétrico, sendo que a utilização destes tipos de motores facilita o acionamento por permitir o ajuste da curva conjugado versus velocidade pela variação da resistência externa.

São utilizados com mais frequência motores de 6 pólos, sendo que motores de 4 e 8 pólos também são aplicáveis. Para reduzir a velocidade do motor na operação do picador ou da moenda utiliza-se uma caixa de engrenagens.

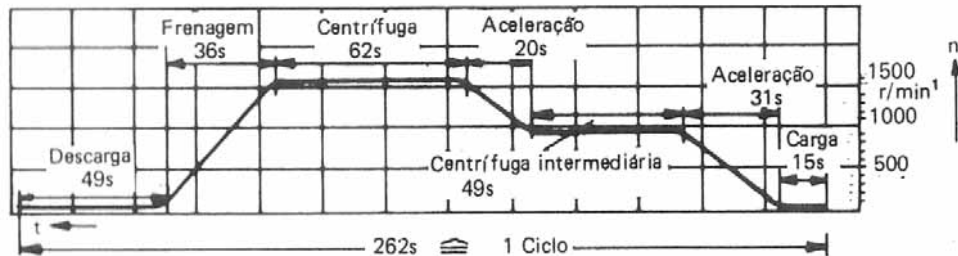
A área de trabalho da moenda apresenta condições ambientais com umidade relativamente alta e presença de partículas de cana em suspensão e o caldo de cana diluído apresenta propriedades corrosivas, por isso deve-se fazer uma completa manutenção do sistema na época fora do corte da cana. Nos períodos de parada da usina, os acionamentos podem ser feitos com motores de grau de proteção mecânica, cuja escolha dessa proteção será determinada por razões econômicas.

- **Acionamento de centrífugas de açúcar**

O processo de centrifugação opera entre 1000 e 1700 rpm e as operações de encher e esvaziar a centrífuga são realizadas com o equipamento girando a velocidade reduzida. O carregamento da centrífuga é realizado entre 50 e 400 rpm e a retirada dos cristais de açúcar entre 50 e 200 rpm.

Considera-se um ciclo de centrifugação os processos de carregamento da cesta (recipiente giratório), aceleração, centrifugação, frenagem e o descarregamento dos cristais. A figura 24 exemplifica um ciclo de funcionamento de uma centrífuga de açúcar.

Figura 24 – Exemplo de um ciclo de funcionamento de uma centrífuga



Fonte: (LOBOSCO; DIAS, 1988).

A cesta possui elevado momento de inércia, pois a aceleração é realizada em várias etapas e o conjugado resistente da centrífuga depende apenas do atrito nos mancais. A potência dos motores é expressa em ciclos por hora (c/h).

A gaiola giratória dos motores apresenta elevada resistência, o que possibilita curva de conjugados versus velocidade sem grandes alterações e em consequência os picos de corrente são reduzido ao se alterar o número de pólos.

O conhecimento do momento de inércia da cesta da centrífuga, os tempos de carga, centrifugação e descarga, a rotação da centrifugação e a variação durante o período de aceleração do momento de inércia da massa dentro da cesta (variação devido ao deslocamento da massa para a borda da cesta) são necessários para uma correta seleção do motor.

Para obter diferentes valores de rotação no processo de centrifugação os motores indicados são: de indução da gaiola normalmente em 440V, 60 Hz e com variação do número de pólos. Os motores devem ser protegidos termicamente e com sistema de ventilação canalizada para minimizar os efeitos ambientais de umidade e corrosão. As centrífugas também podem ser acionadas por motores de corrente contínua, permitindo um ajuste melhor da velocidade, fator necessário para obtenção de grãos e tipos especiais de açúcar.

4 SELEÇÃO DE BOMBAS

Segundo Hicks (1957), a seleção e aplicação de bombas para muitos engenheiros é um assunto vago e rodeado de extensas informações de difícil relação com o problema a ser considerado. Muitos fabricantes desenvolvem porções de catálogos para auxiliar na seleção de bombas. Mas o grande problema a ser encarado é como escolher e selecionar a melhor bomba para um serviço a partir de um conjunto de condições. Em grandes plantas industriais, são necessárias várias bombas para empregar nos processos, e às vezes os engenheiros passam anos desenvolvendo sistemas de bombeamento econômicos e eficientes.

Para selecionar uma bomba, sua aplicação deve estar bem definida. As necessidades das bombas devem coincidir com as características do sistema em que ela vai operar. Para isso é necessário uma análise geral do sistema para poder estabelecer as condições da bomba sendo esta tarefa de responsabilidade do usuário (comprador/utilizador), que inclui rever as configurações do sistema, mudanças na altura de elevação, fornecimento de pressão na bomba e pressão requerida no terminal. Todas essas informações são transmitidas ao fabricante de bombas na forma de uma folha de dados com especificações e é a partir das informações dadas como vazão do fluido, altura manométrica, NPSH disponível, velocidade da bomba, características do fluido (viscosidade, densidade), entre outros fatores que será determinado qual deverá ser a melhor bomba (LOBANOFF; ROSS, 1992).

A partir das informações descritas e fornecidas em uma folha de dados pode-se selecionar uma bomba com base em um catálogo do fabricante. Se algum dos requisitos exigidos pela bomba estiver no catálogo, a seleção será simples, caso contrário, a seleção se torna complexa e torna-se uma responsabilidade do fabricante de bombas projetar uma bomba (LOBANOFF; ROSS, 1992).

Portanto, segundo Mattos (1998), para facilitar o processo de seleção, alguns fatores e dados devem estar disponíveis como por exemplo:

-características do sistema de tubulações como: diâmetros e acessórios da tubulação de sucção e de descarga, altura estática de sucção e altura estática de descarga;

-características do processo como: vazão e possível necessidade de mudanças de vazão (flexibilidade de vazão), pressão do reservatório ou ponto de tomada de sucção, pressão do reservatório ou ponto final de descarga;

-características do fluido bombeado na temperatura de bombeamento tais como: viscosidade, pressão de vapor, densidade, pH, presença de partículas sólidas em suspensão, inflamabilidade, toxicidade, corrosividade, entre outros.

As etapas de seleção e de possível compra de uma bomba para determinado processo industrial devem levar em conta as seguintes fases (MATTOS, 1998):

- **Seleção do tipo de bomba;**

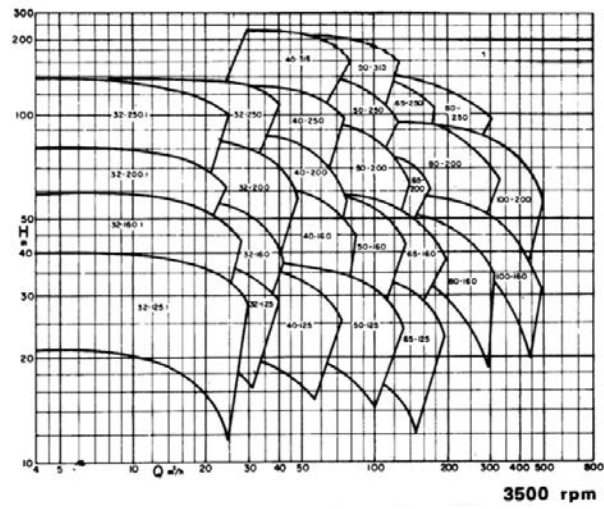
No caso de usinas sucroalcooleiras utilizam-se as turbobombas (bombas centrífugas), mas para outros processos e aplicações podem se utilizar outros tipos de bombas tais como bombas regenerativas ou bombas rotativas.

As bombas centrífugas têm prioridade nos processos por operarem com motores elétricos, trabalharem em regime permanente, englobarem ampla faixa de vazão e por fornecerem flexibilidade operacional (a vazão pode ser alterada através da mudança de diâmetro externo do impelidor ou da rotação, por recirculação ou fechamento parcial da válvula na tubulação de recalque) (MATTOS, 1998).

- **Seleção do modelo da bomba;**

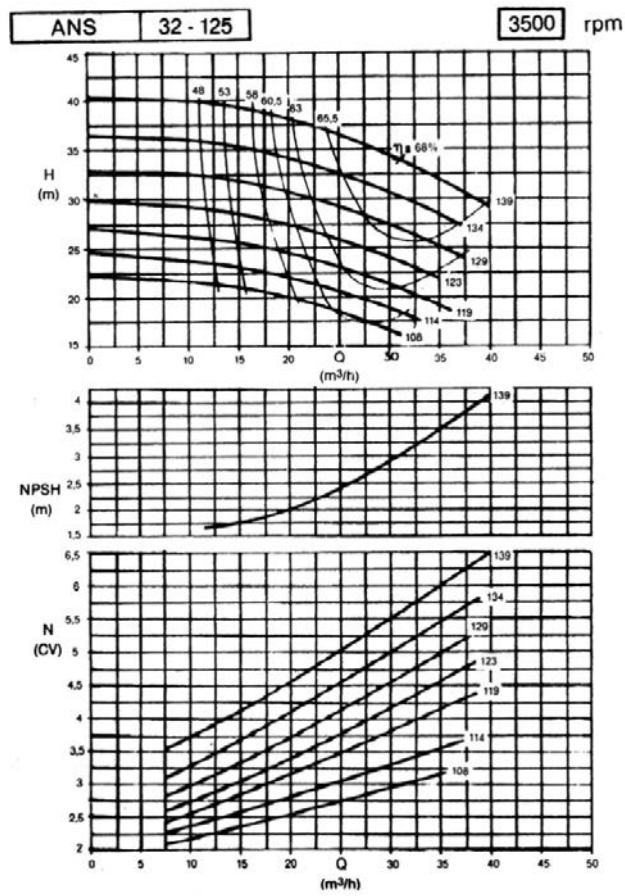
Essa etapa consiste em selecionar por meio de ábacos dos fabricantes (figura 25) o modelo específico de uma bomba a ser ofertada através de dados como rotação, vazão e altura manométrica, em seguida para obter mais informações importantes de fundamental interesse para o andamento do projeto consulta-se o catálogo de curvas para a bomba selecionada (figura 26) e retira-se informações como diâmetro do impelidor, NPSH requerido, vazão mínima contínua, potência consumida, etc.

Figura 25 – Ábaco de cobertura de seleção



Fonte: (MATTOS, 1998).

Figura 26 – Curvas características



Fonte: (MATTOS, 1998).

- **Escolha do material de construção;**

De acordo com Mattos (1998), os materiais são selecionados de acordo com o fluido que está sendo bombeado, porém deve-se levar em consideração também alguns aspectos técnicos para seleção de uma bomba tais como: resistência à corrosão, ação eletroquímica, presença de sólidos abrasivos em suspensão, temperatura de bombeamento, altura manométrica por estágio, pressão de operação, tendência de falhas do material originadas por fundição, fator de carga (porcentagem de utilização da bomba por ano) e vida esperada.

- **Determinação dos detalhes construtivos;**

Nesta parte, fica a compromisso do fabricante a seleção dos componentes de acordo com seus critérios e normas, como por exemplo, (MATTOS, 1998):

- Montagem da carcaça: podem ser feita pela linha de centro, por meio do pé e em balanço.
- Montagem do rotor: pode ser em balanço ou montado entre mancais.
- Tipo de rotor: aberto, semi-aberto ou fechado.
- Selagem do eixo: selo mecânico ou gaxetas.
- Acoplamento com acionador: pode ser direto ou indireto, utilizando polias e correias.
- Mancais: a grande maioria possui mancais de rolamento.
- Simples ou múltiplo estágio: A quantidade de estágios depende da altura manométrica.
- Flanges de sucção e descarga: o usuário deve especificar a norma que os flanges devem seguir (ANSI, DIN ou outra) e deve indicar também qual a orientação necessitada pelos flanges (topo, lateral, axial, entre outros).
- Desmontável por trás: conhecida como back pull out, favorece a retirada do rotor pela parte traseira sem a necessidade de desconectar a bomba das tubulações.
- Conexões da carcaça: o usuário deve especificar se pretende colocar conexões na carcaça como de respiro, de drenagem, manômetro na sucção e na descarga.
- Anéis de desgaste
- Luvas de eixo
- Partição radial ou axial da carcaça

- **Elaboração da requisição de material;**

De acordo com Mattos (1998), essa fase é composta de:

-Requisição de material: compõe a relação de itens a serem fornecidos, lista de normas, documentos anexos e termos de responsabilidade.

-Folhas de dados dos equipamentos: nesta folha são apresentados os dados do processo solicitado, detalhes técnicos de cada equipamento como tipos e características das bombas, materiais auxiliares, acionamento, etc.

Deve ainda conter dados técnicos esclarecedores propostos pelo preponente como potência consumida, eficiência, NPSH requerido, vazão mínima contínua, diâmetro do rotor, etc. Devem ser indicadas também as inspeções que serão feitas durante a fabricação da bomba como testes de desempenho e de NPSH.

As folhas de dados de outros equipamentos também devem ser anexadas.

-Especificações ou normas de engenharia: são detalhadas as normas do projeto, de construção mecânica, testes que devem ser realizados e da construção de projetos.

- **Preparo da lista de fornecedores e respectivas consultas;**

As empresas possuem uma lista de fornecedores qualificados para suprirem materiais que completam o conjunto bomba e não são fabricadas pelo fabricante de bombas, deve conter nessa lista as peculiaridades técnicas de aplicação que está em questão. Após preparada a lista de fornecedores, é preparado o pedido de cotação ou de compra de material constituído da requisição de materiais (RM) e o pedido de compra ou de cotação de material é enviado aos fabricantes que fazem parte da lista de fornecimento para elaboração de suas propostas (MATTOS, 1998).

- **Análise das propostas e parecer técnico conclusivo;**

Nessa fase a análise das propostas e a seleção de um fabricante são determinantes. Para selecionar as propostas, é necessário fazer uma ponderação da relativa vantagem das várias propostas e escolher a que melhor atende as expectativas, sendo que o critério econômico pode ser decisivo na escolha (MATTOS, 1998).

- **Análise de desenhos e documentos de fabricantes;**

Os desenhos e documentos devem ser enviados ao comprador para verificar a aprovação da adequação ao que foi sugerido, e somente após essa aprovação é que o fabricante poderá iniciar a fabricação da bomba (MATTOS, 1998).

- **Inspecões e testes finais (na fábrica e/ou campo).**

A fase de testes tem importância, pois é fase final de aceitação do equipamento, o teste de campo é comum para evitar problemas na fase de pré-operação da unidade de processamento onde irá a bomba operar (MATTOS, 1998).

4.1 Curvas características

De acordo com Mattos (1998), as curvas características são representações gráficas que traduzem o funcionamento das bombas e permitem quantificar as variáveis significativas de desempenho dessa bomba. Essas curvas são obtidas através de ensaios feitos pelos fabricantes, que fazem a bomba atingir diversas alturas manométricas com diferentes valores de vazões, analisando a potência absorvida e a eficiência da bomba.

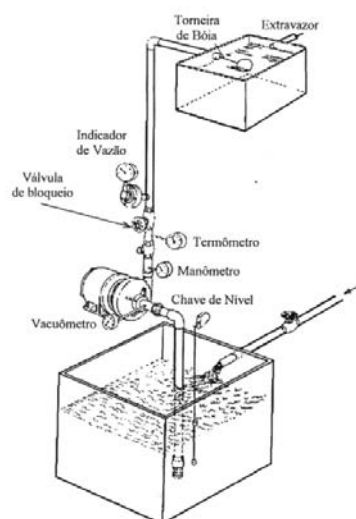
De acordo com Lima (2003), uma bomba é projetada para operar com condições predeterminadas de vazão, altura manométrica e rotação. Para isso a bomba deve consumir uma determinada potência e operar com a melhor eficiência. Se ela operar em uma faixa de condições diferentes daquelas que foram predeterminadas anteriormente, a bomba irá operar com menor eficiência. Por isso deseja-se saber como comportam se os valores de altura manométrica (H), potência (P) e eficiência (η) em função da vazão (Q), e as curvas características são as representações gráficas desses valores. É necessário também conhecer a instalação de bombeamento da qual a bomba pertence, pois a bomba opera em conjunto com a sua instalação.

As curvas características reais são diferentes das teóricas por causa das perdas de energia que ocorrem como, por exemplo, perda de carga devido a turbulências do fluido no rotor e na carcaça, perda mecânica devida ao atrito do eixo nos mancais, perda nos elementos de vedação, entre outros tipos de perdas (LIMA, 2003).

As curvas reais são obtidas em ensaios realizados na bancada de testes do fabricante e geralmente as bombas são testadas com água e numa rotação constante, faz

se variar a vazão colocando uma válvula de bloqueio localizada na tubulação de descarga da bomba, conforme interpreta a figura 27.

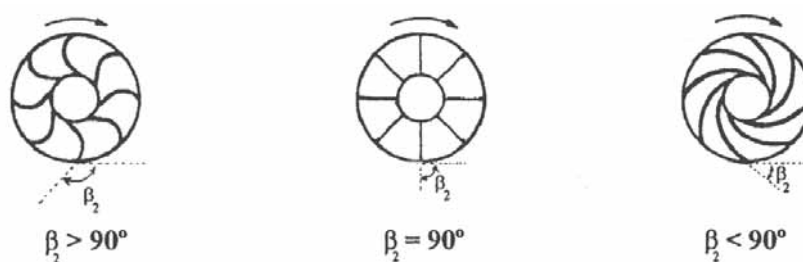
Figura 27 – Esquema de uma instalação para teste



Fonte: (LIMA, 2003).

As curvas são feitas para três tipos de rotores diferentes, cada um apresenta um tipo de saída diferente das pás, conforme mostra a figura 28, sendo o ângulo β_2 formado pela tangente à pá e a tangente à circunferência do rotor.

Figura 28 – Curvatura das pás do rotor



Fonte: (LIMA, 2003).

Os rotores cujo ângulo é $\beta_2 > 90^\circ$ permitem elevadas velocidades na saída do rotor e proporcionam um baixo rendimento devido às perdas por atrito do líquido no rotor, em geral esse projeto não é adotado na prática. Os rotores que possuem pás retas ($\beta_2 = 90^\circ$) são adotados em poucos casos práticos, pois sobre o ponto de vista de

rendimento não são ideais. Já os rotores com pás $\beta_2 < 90^\circ$ (curvadas para trás) apresentam bom rendimento porque as perdas por atrito são menores, e o fluido é energizado sob a forma de pressão e não de velocidade.

De acordo com Lima (2003), as curvas características tradicionais são:

- Curva carga (H) versus vazão (Q);
- Curva de potência (P) versus vazão (Q);
- Curva de rendimento total (η) versus vazão (Q).

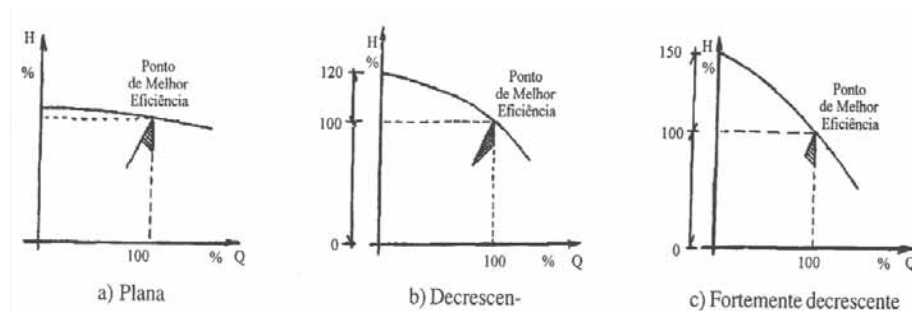
• Curva carga (H) versus vazão (Q)

De acordo com Mattos (1998) a carga de uma bomba é definida como energia por unidade de massa ou energia por unidade de peso que a bomba fornece ao fluido a uma determinada vazão.

A pressão de sucção e descarga, a temperatura do fluido, a tensão e a corrente elétrica no motor é medida para várias condições de vazão. Anexando outros dados como os valores dos diâmetros da tubulação, densidade e viscosidade do fluido, são possíveis calcular a altura manométrica total, a potência e a eficiência da bomba e os resultados são plotados em um diagrama cartesiano para traçar as curvas respectivas (LIMA, 2003).

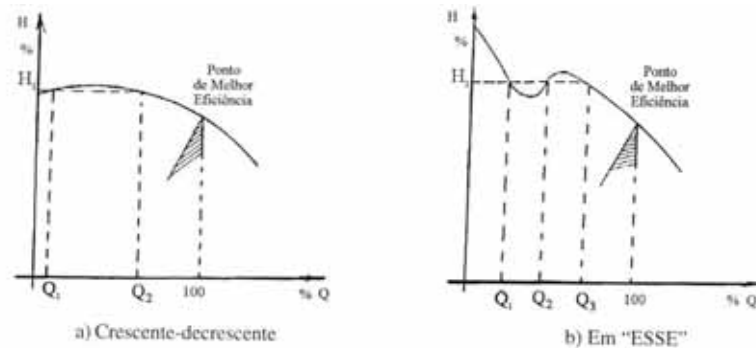
A figura 29 apresenta três formatos de curvas estáveis para altura manométrica. São estáveis porque existe somente um valor de altura manométrica para cada valor de vazão e a figura 30 mostra dois tipos de curvas instáveis de altura manométrica, pois existe uma região em que ocorrem duas ou mais vazões diferentes para apenas um valor de altura manométrica. A bomba não deve operar nessa região por causa da instabilidade da vazão.

Figura 29 – Curvas estáveis



Fonte: (LIMA, 2003).

Figura 30 – Curvas instáveis



Fonte: (LIMA, 2003).

- **Curva de potência absorvida (P) versus vazão (Q)**

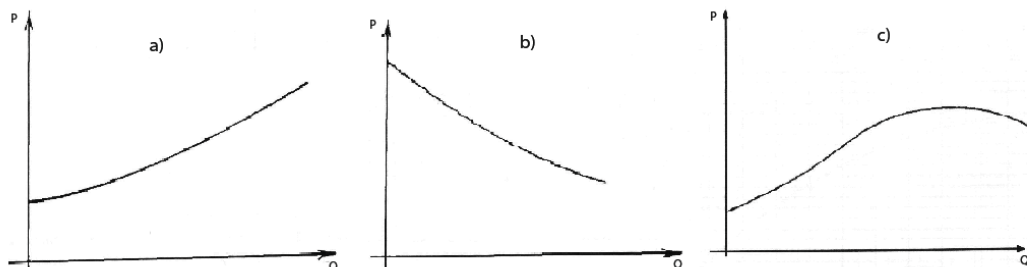
Segundo Lima (2003), existem dois tipos de potência quando se estudam as bombas:

-Potência Hidráulica (P_H): representa a energia por unidade de tempo cedida ao fluido.

-Potência de eixo (P): representa a energia por unidade de tempo que o acionador transmite para o eixo da bomba.

Na prática existem três tipos de curvas de potência que variam em função do tipo de rotor, e normalmente os gráficos dos fabricantes representam a curva de potência no eixo (P), conforme mostra a figura 31.

Figura 31 – Curvas típicas de potência para diferentes tipos de rotores: (a) rotor de fluxo radial; (b) rotor de fluxo axial; (c) rotor de fluxo misto



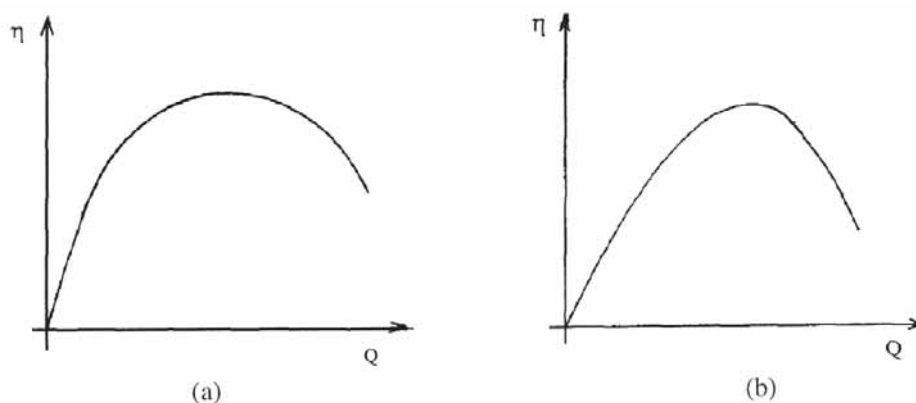
Fonte: (LIMA, 2003).

Na figura 31 (a) conforme aumenta a vazão, a potência consumida pela bomba aumenta continuamente, (b) o aumento da vazão faz com que a potência consumida pela bomba diminua continuamente e (c) a curva apresenta ambos os formatos, crescente e decrescente.

- **Curva de rendimento total (η) versus vazão (Q)**

A eficiência da bomba, ou rendimento, é obtida dividindo-se a potência hidráulica (P_H) pela potência recebida pelo acionador (P) e a figura 32 mostra as curvas típicas de eficiência pela vazão.

Figura 32: Curva típica de eficiência



Fonte: (LIMA, 2003).

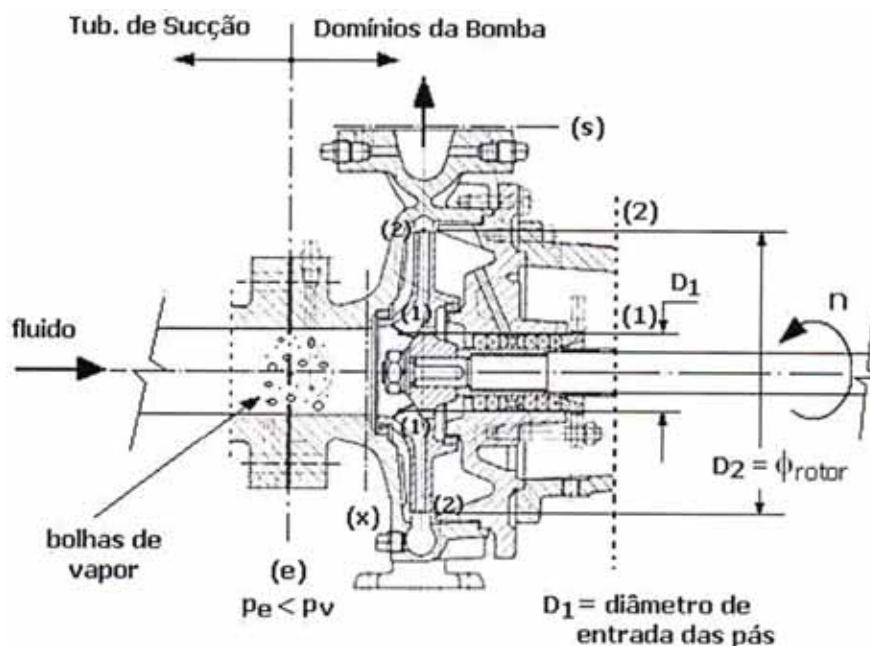
A figura 32 (a) é típica de rotores de fluxo axial (mais achatada) e a (b) de fluxo axial ou misto (mais pontuda).

- **Curva de NPSH (Net Positive Suction Head)**

O conceito de NPSH está ligado ao conceito de cavitação, e é um método seguro para verificar a ocorrência desse fenômeno em uma bomba (SANTOS 2007). Segundo Mattos (1998), esse fenômeno ocorre quando a pressão absoluta em qualquer ponto no sistema de bombeamento for incapaz de garantir a pressão de vapor do líquido, na temperatura de operação. Se atingir a pressão de vapor, ocorrerão surgimento de bolhas devido ao processo de vaporização, e essas bolhas são arrastadas pelo fluxo para uma região de maior pressão, onde se condensarão repentinamente.

A figura 33 mostra o caminho percorrido pelo fluido desde a seção de entrada (e) até a seção de saída (s), se admitirmos uma pressão menor do que a pressão de vapor do fluido na entrada dessa bomba, na mesma temperatura de bombeamento, ocorrerá a formação de bolhas de vapor.

Figura 33 - Indicação do caminho percorrido pelo fluido



Fonte: (SANTOS, 2007).

As seções marcadas na figura 33 são:

- (e) seção de entrada da bomba, no bocal de entrada da mesma
- (x) seção de entrada do rotor (pouco antes das pás)
- (1) seção de entrada das pás (início do canal formado pelas pás do rotor)
- (2) seção de saída das pás (fim do canal / saída do rotor)
- (s) seção de saída da bomba, no bocal de saída da mesma

O fabricante, através do método de NPSH no ensaio de uma bomba, determina o que ocorre entre as seções (e) e (1) da figura 33, informando quanta energia o fluido deve ter na entrada da bomba para chegar ao rotor sem cavitatar (SANTOS, 2007).

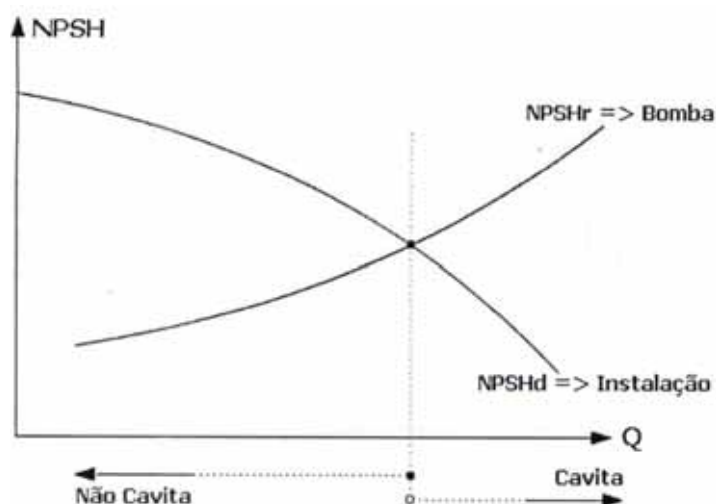
O conceito de NPSH foi introduzido para caracterizar a ocorrência de uma boa sucção do fluido, representando a disponibilidade de energia com que o fluido entra no bocal de entrada da bomba e que permitirá atingir a borda das pás do rotor.

O valor de $NPSH_r$ é um valor requerido pela bomba e fornecido pelo fabricante e o $NPSH_d$ é um valor disponível na instalação e é calculado pelo projetista, que representa a disponibilidade de energia do fluido ao entrar na bomba (SANTOS, 2007).

Portanto o estudo do $NPSH_d$ é importante, pois o outro valor é fornecido, ou seja, o projetista avalia a seção final da tubulação de sucção (até ponto (x) da figura 33) e o fabricante avalia a seção inicial da bomba fabricada (a partir do ponto (x) da figura 33) (SANTOS, 2007).

A figura 34 mostra como se comporta a curva de NPSH por vazão.

Figura 34 - Comportamento da curva de NPSH por vazão

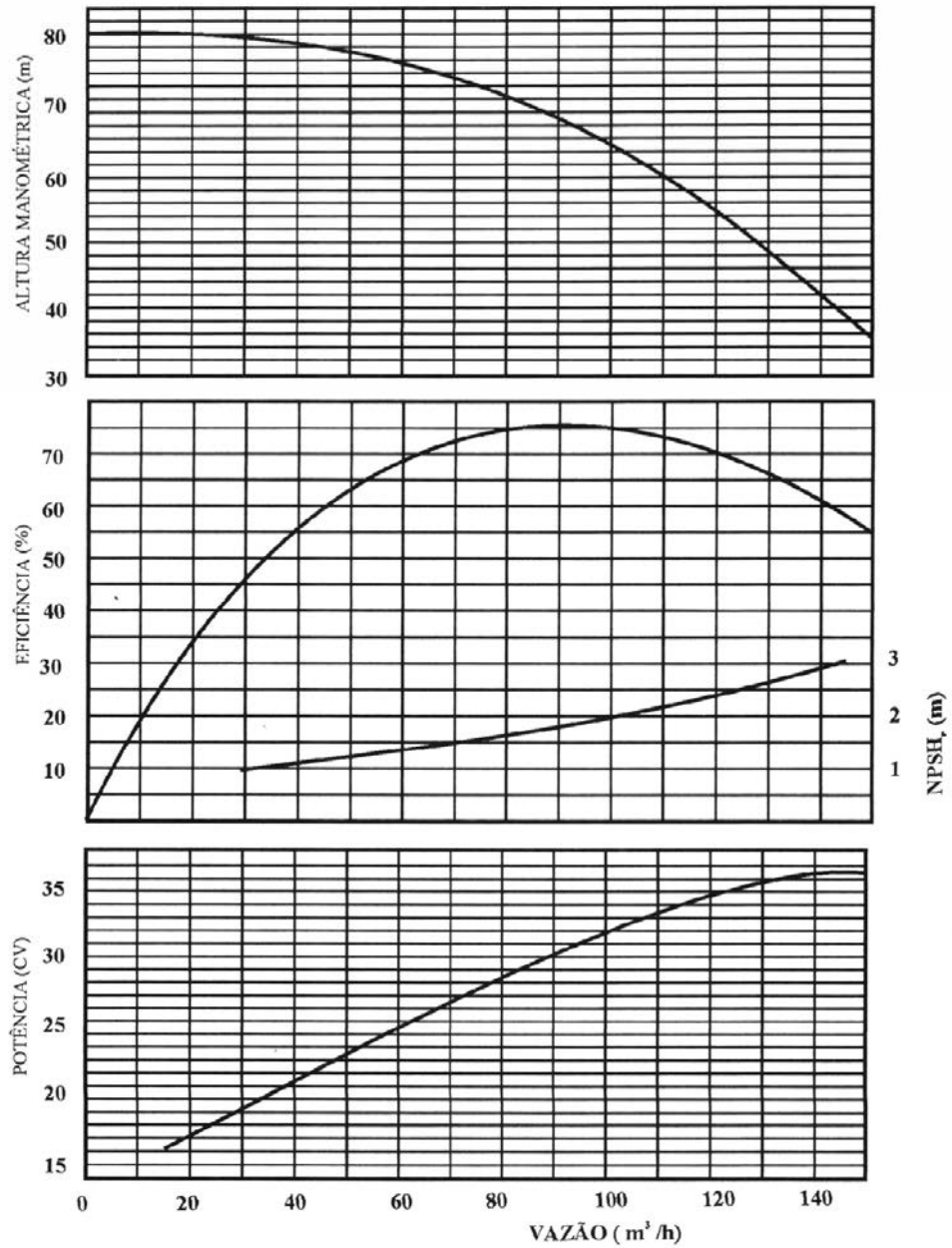


Fonte: (SANTOS, 2007).

A curva de $NPSH_r$ é fornecida junta com as curvas características da bomba e pode se concluir da figura 34 que quanto maior for a vazão, maior será o $NPSH_r$, pois todas as situações que ocorrem entre as seções (e) e (1) da figura 33 serão agravados pelo aumento de vazão, portanto a curva de $NPSH_r$ por Q representa a energia requerida no flange de sucção da bomba (SANTOS, 2007).

Segundo Lima (2003), os fabricantes reúnem em um único gráfico todas as curvas construídas na bancada de teste, como mostra a figura 35.

Figura 35 - Curva característica H-P- η -NPSH_r



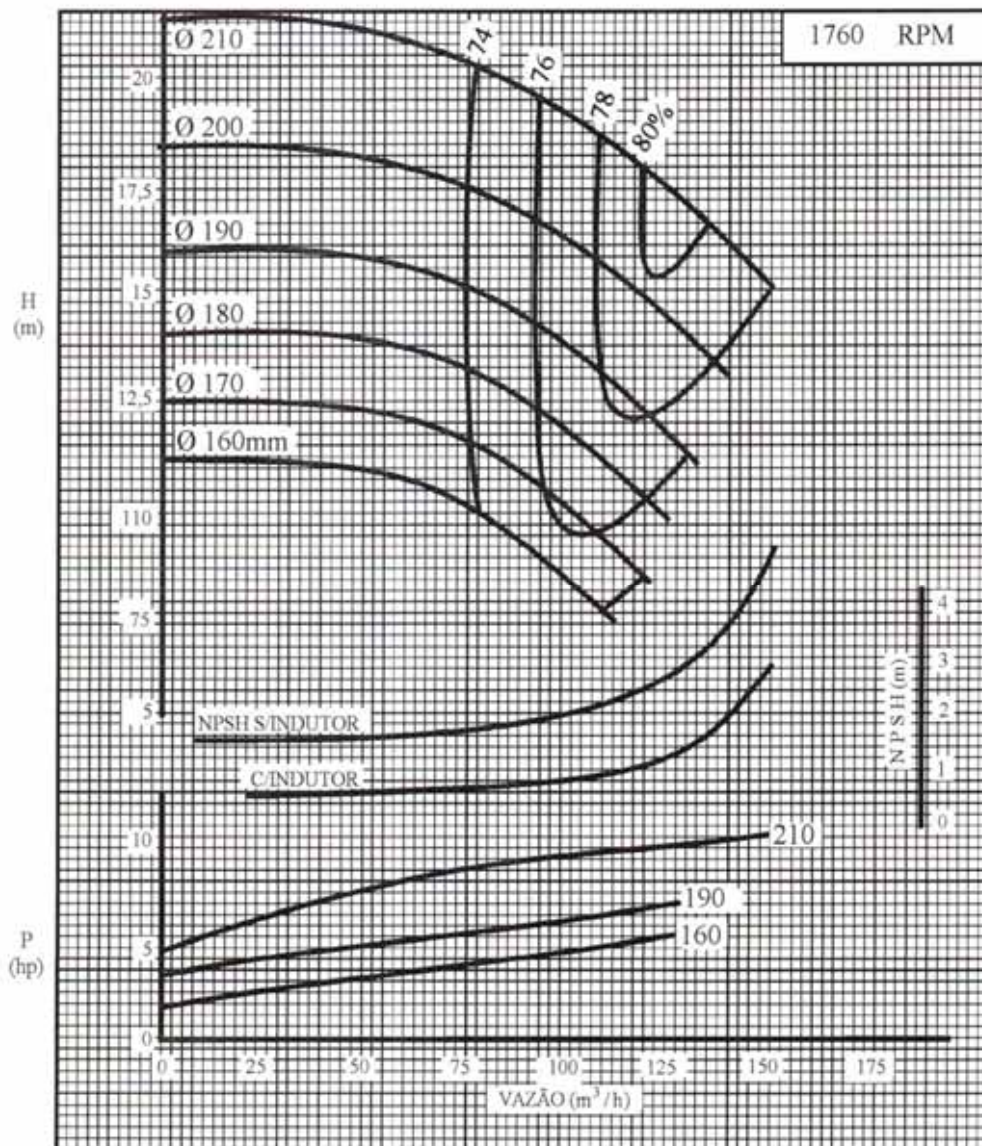
Fonte: (LIMA, 2003).

As curvas de eficiência, conhecidas como curvas de isoeffiência, agrupam em um único gráfico as curvas para diversos diâmetros do rotor. Os fabricantes marcam sobre a curva Q-H de cada rotor todos os pontos de igual eficiência para uni-los posteriormente, mostrando os resultados médios obtidos com um número relativamente grande de

ensaio de um mesmo modelo de bomba, funcionando na mesma rotação e com diversos diâmetros de rotor (LIMA, 2003).

Essas curvas são válidas somente para água e cobrem todos os ensaios feitos desde o tamanho de rotor mínimo até o valor máximo da bomba, conforme mostra a figura 36.

Figura 36 – Curva característica de isoeficiência



Fonte: (LIMA, 2003).

4.2 Fatores que modificam as curvas características

4.2.1 Mudança de fluido

Como em usinas sucroalcooleiras nem sempre o fluido padrão é água, e as curvas características são ensaiadas somente para esse tipo de fluido, deve se alertar a fatores que alterem as curvas características como a viscosidade (μ) e massa específica (γ).

A tabela 8 mostra os valores de viscosidade e massa específica do etanol e da água, fluidos comumente bombeados em usinas sucroalcooleiras.

Tabela 8 - Valores de viscosidade e massa específica à temperatura de 20°C.

Fluido à T=20°C	Viscosidade (cP)	Massa específica (g/cm ³)
Água	1,0	0,99
Etanol	1,2	0,79

- **Influência da massa específica (γ)**

Se duas bombas operarem com o mesmo número de rotações, mas bombeando fluidos de massas específicas diferentes, nota-se que: uma bomba operando com fluido de densidade maior aponta maiores pressões no manômetro do bocal de saída.

Para analisar duas bombas iguais com mesma rotação e operando com fluidos diferentes, deve-se abordar o conhecimento de bombas geometricamente semelhantes. Nesse conceito considera-se que para essas bombas, não há alteração da carga e nem da vazão, o que se altera é a potência, ou seja, ao usar um líquido mais denso que a água a potência solicitada é maior, ou seja, para recalcar um fluido mais denso a bomba tem mais trabalho e solicita uma potência maior (SANTOS, 2007).

Pode se utilizar a curva de rendimento do catálogo, mas não a curva de potência fornecida pelo fabricante.

- **Influência da viscosidade**

Quando ocorre mudança no valor da viscosidade, ocorrem perdas por atrito e o fluido estará sujeito à alteração na trajetória pelas pás do rotor. A temperatura também

afeta o valor da viscosidade. Para uma bomba trabalhando com uma mesma velocidade, só poderá fornecer a mesma descarga (para um líquido mais viscoso), para uma altura manométrica menor e isso exige maior potência motriz devido às perdas ocorridas internamente (SANTOS, 2007).

4.2.2 Mudança de rotação

Neste caso, duas bombas iguais operam com o mesmo tipo de fluido, mas com rotações diferentes que podem ser determinadas por um motor elétrico ou motor estacionário. Por existir proporção entre os valores de vazão, altura manométrica e potência, a nova rotação deverá ser feita a partir das seguintes proporções da lei de semelhança entre bombas (MATTOS, 1998):

-Equação (4): vazão é proporcional à rotação

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{N_2}{N_1} \quad (4)$$

-Equação (5): altura manométrica varia com o quadrado da rotação

$$\frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 \quad (5)$$

-Equação (6): potência absorvida varia com o cubo da rotação

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^3 \quad (6)$$

Isolando o termo comum temos a equação (7):

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{Q_2}{Q_1} = \sqrt{\frac{H_2}{H_1}} = \sqrt[3]{\frac{P_2}{P_1}} \quad (7)$$

Onde:

Q_1 = vazão na rotação conhecida, Q_2 = vazão na nova rotação;

N_1 = rotação conhecida, N_2 = nova rotação;

H_1 = altura manométrica na rotação conhecida, H_2 = altura manométrica na nova rotação;

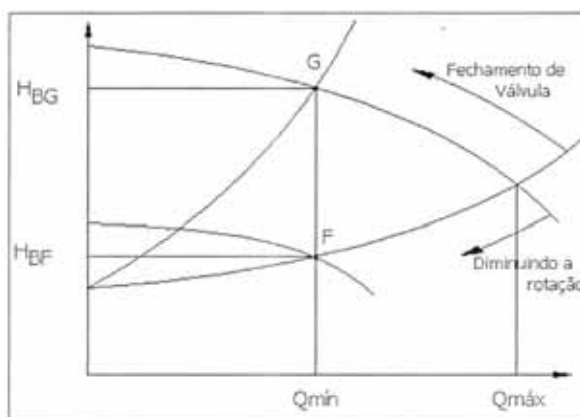
P_1 = potência na rotação conhecida, P_2 = potência na nova rotação.

Portanto, sempre que se altera a rotação, modifica-se as curvas características e para adequar, deve-se utilizar a equação (7) (MATTOS, 1998).

- **Inversor de frequência ou variador de velocidade**

O variador de velocidade ou inversor de frequência é um equipamento instalado entre a rede e o motor elétrico e é por meio de um potenciômetro que se altera a frequência do motor elétrico, para valores menores ou iguais a 60 Hz a fim de reduzir a rotação do motor. Este equipamento é utilizado quando deseja-se atender uma ampla faixa de vazões. Quando diminui a frequência, reduz-se a rotação fazendo com que ocorra uma queda da curva característica da bomba até cruzar a curva de instalação na vazão mínima desejada, sem ser necessário mexer nas válvulas do sistema, conforme mostra o ponto F da figura 37 (SANTOS, 2007).

Figura 37 - Uso de inversor



Fonte: (SANTOS, 2007).

O uso do fechamento de válvulas tem função semelhante, ao se fechar uma válvula, a curva de instalação sobe e alcança vazões inferiores, até chegar na vazão mínima (Ponto G da figura 37).

O uso do inversor objetiva-se em alterar o ponto de trabalho, variando a rotação da bomba e o diâmetro do rotor da bomba (SANTOS, 2007).

Como o custo dos inversores de frequência é maior do que o uso de válvulas de bloqueio, a vantagem estará no custo de operação da linha, pois ao calcularem-se as potências entre os pontos G e F, verifica-se que a carga manométrica do ponto F é bem menor que a carga manométrica do ponto G e ocorrerá um possível aumento do rendimento do ponto F em relação ao ponto G, conseqüentemente a potência será menor, o que compensa o uso dos inversores (SANTOS, 2007).

5 ESTUDO DE CASO

Esse estudo de caso tem por objetivo analisar a quantidade de bombas utilizadas em uma usina sucroalcooleira e agrupá-las de acordo com sua velocidade específica, determinando quantas bombas serão centrífugas e a partir dessas analisar as que possuem maior potência e tempo de funcionamento dentro da usina para poder estimar o consumo energético e o custo operacional.

5.1 Análise Quantitativa de bombas

Para realização deste estudo de caso foi considerado uma usina sucroalcooleira que opera com 102 bombas no total.

A potência consumida por essas bombas variou desde 0,4 cv até 225 cv, sendo que a potência média dessas bombas ficou em torno de 41 cv. A tabela 9 mostra qual são a vazão e a altura manométrica da bomba de maior e de menor potência, nessa tabela verifica-se que existem dois valores de vazão, uma de primeira fase e outra de segunda fase. A 1° fase identifica o projeto inicial da usina e a 2° fase identifica o projeto de expansão (maior moagem de cana por dia).

Tabela 9 - Ponto de operação das bombas de menor e maior potência

Bomba	Vazão 1° fase (m³/h)	Vazão 2° fase (m³/h)	H (m)	Potência consumida (cv)
Mínima	10	10	5	0,4
Máxima	1.500	1.500	35	225

Os fluidos são de extrema importância na usina, pois algumas características são alteradas modificando as curvas características das bombas. Existe grande variedade de fluidos bombeados dentro de uma usina sucroalcooleira e a tabela 10 indica quantas bombas operam com determinado tipo de fluido.

Tabela 10 - Quantidade de bombas operando com diferentes tipos de fluidos

Fluido	Quantidade
Água	53
Álcool	10
Caldo	4
Caldo com bagaço	4
Caldo clarificado	3
Vinho	6
Outros fluidos	22

Estão inclusos no item outros fluidos: bombeamento de produtos químicos como ácido sulfúrico, soda, etc., água com CO₂, água fraca, fermento, filtrado, flegmassa, leite cal, óleo fúsel, vinho delevedurado, vinho levedurado e vinhaça.

5.2 Tipos de bombas

Das 102 bombas operando dentro da usina nem todas são convenientes para o estudo deste trabalho, será dado um foco nas bombas que são importantes. O método da velocidade específica irá excluir as bombas que não são de interesse para o estudo desse trabalho.

A velocidade específica sempre corresponde ao ponto de máxima eficiência da bomba e é representada pela equação 8, porém para analisar todas as 102 bombas, foi considerado o ponto de projeto, fora do ponto de melhor rendimento.

$$n_s = \frac{\omega \cdot \sqrt{Q}}{\sqrt[4]{(g \cdot H)^3}} \quad (8)$$

As bombas que possuem velocidade específica maiores que 1 foram excluídas, pois são bombas de fluxo misto ou axial e a exclusão se deu também para os rotores abertos, pois esses rotores são úteis no bombeamento de fluido sujo, deixando que caldo com fiapo de bagaço de cana seja bombeado para processos industriais da usina.

As tabelas a seguir organizam as bombas que restaram da exclusão de acordo com o valor de velocidade específica, sendo que: a tabela 11 mostra os valores de velocidade específica menores que 0,3 denominadas por bombas centrífugas lentas, a tabela 12 representam as bombas centrífugas normais, cujos valores estão entre 0,3 e 0,5 e a tabela 13 representam as bombas centrífugas rápidas, cujos valores estão entre 0,5 até 1.

Tabela 11 - Quantidade de bombas centrífugas lentas

Quantidade	Q₁ (m³/h)	Q₂ (m³/h)	H (m)	FLUIDO	T (°C)	SELO MECÂNICO
1	20	20	135	ÁGUA	60	NÃO
2	20	20	135	FLEGMASSA	97	NÃO
3	20	20	50	ÁGUA	60	NÃO
4	3	3	14	ÁGUA FRACA	40	SIM
5	3	3	10	ÓLEO FÚSEL	40	SIM
6	25	25	31	ÁGUA	90	NÃO
7	60	100	30	ÁGUA	127	NÃO
8	60	100	30	ÁGUA	127	NÃO
9	15	15	20	ÁGUA CO2	40	NÃO
10	15	15	20	ÁGUA CO2	40	NÃO
11	36	36	30	ÁGUA	25	NÃO
12	40	50	30	ÁLCOOL	25	SIM
13	40	50	30	ÁLCOOL	25	SIM
14	100	100	30	ÁGUA	90	NÃO
15	100	100	30	ÁGUA	90	NÃO
16	50	50	80	ÁGUA	60	NÃO
17	60	80	20	ÁGUA	127	NÃO
18	60	80	20	ÁGUA	127	NÃO
19	260	300	45	CALDO	40	NÃO

Da tabela 11, observa-se que 19 bombas são consideradas lentas e que apenas quatro possuem selo mecânico. A maioria das bombas operam com fluido em temperatura maior que a ambiente.

Tabela 12 - Quantidade de bombas centrífugas normais.

BOMBA	Q₁ (m³/h)	Q₂ (m³/h)	H (m)	FLUIDO	T (°C)	SELO
1	50	50	30	ÁGUA	35	NÃO
2	10	14	10	ÓLEO FÚSEL	25	SIM
3	10	10	10	LEITE CAL	50	NÃO
4	10	10	10	LEITE CAL	50	NÃO
5	10	10	10	SODA 50%	25	NÃO
6	150	150	60	ÁGUA	90	NÃO
7	150	150	60	ÁGUA	90	NÃO
8	100	150	40	ÁGUA	65	NÃO
9	100	150	40	ÁGUA	65	NÃO
10	50	60	25	ÁGUA	90	NÃO
11	30	30	10	FILTRADO	60	NÃO
12	150	150	50	ÁGUA	25	NÃO
13	150	150	50	ÁGUA	25	NÃO
14	150	250	35	ÁGUA	60	NÃO
15	40	40	20	ÁGUA	65	NÃO
16	40	40	20	ÁGUA	65	NÃO
17	40	40	20	ÁLCOOL	25	NÃO
18	40	40	20	ÁLCOOL	25	NÃO
19	100	150	35	ÁGUA	30	NÃO
20	60	60	25	ÁGUA	90	NÃO
21	100	100	30	ÁLCOOL	25	NÃO
22	100	100	30	ÁLCOOL	25	NÃO
23	200	300	40	CALDO	127	NÃO
24	200	300	40	CALDO	127	NÃO
25	260	300	45	CALDO	40	NÃO
26	150	250	35	ÁGUA	70	NÃO

Da tabela 12 apenas uma usa selo mecânico e as temperaturas variam desde a ambiente até acima de 100°C.

Tabela 13 - Quantidade de bombas centrífugas rápidas.

BOMBA	Q ₁ (m ³ /h)	Q ₂ (m ³ /h)	H (m)	FLUIDO	T (°C)	SELO
1	150	150	32	ÁGUA	25	NÃO
2	150	150	32	ÁGUA	25	NÃO
3	50	100	15	FILTRADO	70	NÃO
4	50	100	15	FILTRADO	70	NÃO
5	50	50	15	VINHO	40	NÃO
6	10	10	5	ÁCIDO SULFÚRICO (98%)	25	SIM
7	300	400	27	VINHAÇA	85	NÃO
8	120	170	25	ÁLCOOL	25	SIM
9	250	300	40	CALDO CLARIFICADO	95	NÃO
10	250	300	40	CALDO CLARIFICADO	95	NÃO
11	300	350	45	VINHO LEVEDURADO	40	NÃO
12	300	350	45	VINHO LEVEDURADO	40	NÃO
13	180	180	30	SODA 20%	25	NÃO
14	180	180	30	FLEGMASSA	97	NÃO
15	300	350	40	VINHO DELEVEDURADO	40	NÃO
16	300	350	40	VINHO DELEVEDURADO	40	NÃO
17	150	150	25	ÁGUA	40	NÃO
18	150	150	25	ÁGUA	40	NÃO
19	150	150	25	ÁGUA	40	NÃO
20	150	150	25	ÁGUA	40	NÃO
21	120	150	12	ÁLCOOL	25	SIM
22	300	300	20	ÁGUA	40	NÃO
23	300	300	20	ÁGUA	40	NÃO
24	260	260	30	ÁLCOOL	25	NÃO
25	260	260	30	ÁLCOOL	25	NÃO
26	200	200	20	ÁGUA	60	NÃO
27	200	200	20	ÁGUA	60	NÃO
28	750	750	25	ÁGUA	30	NÃO
29	750	750	25	ÁGUA	30	NÃO
30	500	500	60	ÁGUA	25	NÃO
31	500	500	60	ÁGUA	25	NÃO
32	500	500	60	ÁGUA	25	NÃO
33	150	150	13	ÁGUA	25	NÃO
34	150	150	13	ÁGUA	25	NÃO

A tabela 13 consta um total de 34 bombas rápidas, apenas três possuem selo mecânico e as temperaturas são variantes. Após feita toda a exclusão para focar no estudo de caso, houve redução de 102 bombas para 79, a bomba com maior potência dentro da usina conforme mostrou a tabela 9 também foi excluída por ser uma bomba de fluxo misto ou axial.

5.3 Eficiência energética

As bombas consomem grande parte da energia elétrica na maior parte das indústrias e segundo dados da KSB (2013), chegam a consumir cerca de 10% da eletricidade mundial sendo que dois terços de todas as bombas consomem até 60% de energia desnecessária.

A eficiência energética em usinas sucroalcooleiras deve ser realizada buscando o ponto de operação de melhor rendimento de uma bomba para fazer com que o equipamento consuma menos potência para sobrar energia elétrica para venda ou consumo próprio.

Para realização da análise em eficiência energética, foi escolhida dentro destas 79 bombas as que possuem maior potência dentro da usina, verificando a importância do processo e o tempo de funcionamento destas bombas, a tabela 14 mostra essas bombas.

Tabela 14 - Bombas selecionadas de acordo com a maior potência consumida.

Item	Função	Modelo da bomba	Fluido	T (°C)
1	Captação de água	ETA 150-50/2	Água	25
2	Vinho para as centrífugas	MEGACHEM 150-315	Vinho levedurado	40
3	Vinho para aparelho	MEGACHEM 150-315	Vinho delevedurado	40
4	Caldo misto para processo	LCC-M 150-500	Caldo	40
5	Caldo evaporado para regenerador	MEGACHEM 150-315	Caldo	127
6	Caldo clarificado para pré-evaporador	MEGACHEM 150-315	Caldo clarificado	95
7	Água quente para desaerador	MEGANORM 80-400	Água	90
8	Água decantador para lavador de gases	MEGACHEM 150-315	Água	70

Tabela 14 - Bombas selecionadas de acordo com a maior potência consumida.

Item	Q ₁ (m ³ /h)	Q ₂ (m ³ /h)	H (m)	Potência consumida (cv)	rotação (rpm)	selo/gaxeta
1	500	500	60	99,8	1750	Gaxeta
2	300	350	45	73	1750	Gaxeta
3	300	350	40	73	1750	Gaxeta
4	260	300	45	70	1025	Gaxeta
5	200	300	40	59	1550	Gaxeta
6	250	300	40	59	1750	Gaxeta
7	150	150	60	48	1750	Gaxeta
8	150	250	35	47	1750	Gaxeta

Todas as bombas da tabela 14 são modelos da KSB e será feito uma estimativa de consumo energético e de custo operacional consumido por essas bombas.

Segundo dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel, 2013), o preço médio estabelecido no último leilão de energia, ocorrido em 18 de novembro de 2013, foi de R\$124,43 por MWh.

O tempo de funcionamento das bombas foram estimados baseado na literatura anteriormente descrita e se encontra descrito na tabela 15.

O consumo energético (E) para um dia de operação na usina pode ser definida através da equação 9:

$$E(kWh) = \frac{P(kW) \cdot t(h)}{\eta_m} \quad (9)$$

Onde: P é a potência consumida pela bomba, t é o tempo de operação para um dia de operação e η_m é o rendimento do motor que foi considerado 85%.

Após calcular essa energia consumida, calcula-se uma estimativa de custo operacional. Os dados são apresentados na tabela 15.

Tabela 15 - Valores estimados de consumo energético e de custo operacional

Item	P (cv)	P (kW)	Tempo (h)	E (kWh)	Custo (R\$)
1	99,8	73,4	24	2072,6	257,9
2	73	53,7	10	631,7	78,6
3	73	53,7	10	631,7	78,6
4	70	51,5	24	1453,7	180,9
5	59	43,4	14	714,7	88,9
6	59	43,4	14	714,7	88,9
7	48	35,3	24	996,8	124,0
8	47	34,6	20	813,4	101,2

Em seguida será feita uma análise para três bombas selecionadas da tabela 15 para analisar o custo operacional de se operar com a bomba na 1^o fase e no projeto de expansão (2^o fase). Geralmente, as bombas são dimensionadas para operarem acima do necessário, visando trabalhar em um possível projeto de expansão, por isso acabam operando com baixa eficiência e afastada de seu ponto de melhor rendimento, consumindo maior energia. Enquanto não ocorre a expansão da usina, o correto seria operar com uma bomba adequada, pois a escolha de uma bomba superdimensionada ocasiona em tempos de manutenções curtos, antes do recomendado.

As bombas que foram selecionadas tiveram como critério o maior consumo de potência dentro da usina e maior tempo de operação. Através das tabelas 14 e 15, escolheram-se os itens 4, 6 e 8 para análise, pois apresentaram amplo tempo de operação e com relevante alteração da vazão entre as fases 1 e 2 do projeto. As outras bombas ficaram de fora da seleção, pois para algumas delas não houve alteração significativa de vazão e o tempo de operação não foi significativo.

Todos os três casos serão propostos para duas situações: situação A e situação B.

• **Situação A:** Nessa situação, uma bomba superdimensionada foi selecionada visando expansão do projeto para operar na 2^o fase. Porém ainda não houve expansão e a bomba está operando na 1^o fase do projeto. Nessa situação, observa-se que essa bomba trabalha longe do ponto de melhor rendimento, operando com baixo rendimento e consumindo maior energia.

Será calculado para os pontos da 1^o e 2^o fase o consumo energético e conseqüentemente seu custo operacional estimado para um dia de trabalho e para uma safra inteira, que tem duração de 8 meses (244 dias), com isso será feita uma análise de quanto dinheiro estará desperdiçando ao colocar uma bomba de maior potência para operar na 1^o fase, sem expansão.

• **Situação B:** Outra bomba mais eficiente deverá ser selecionada para operar na 1^o fase, com maior rendimento e consumindo menos potência.

Para essa situação será feita para a nova bomba operante na 1^o fase do projeto uma estimativa de um novo consumo energético e de custo operacional. Será feito também uma comparação entre o custo operacional da 1^o fase da situação A com o custo da situação B.

5.3.1 Caso 1

Esse caso faz uma análise do item 4 das tabelas 14 e 15.

Os principais dados de operação dessa bomba estão representados na tabela 16:

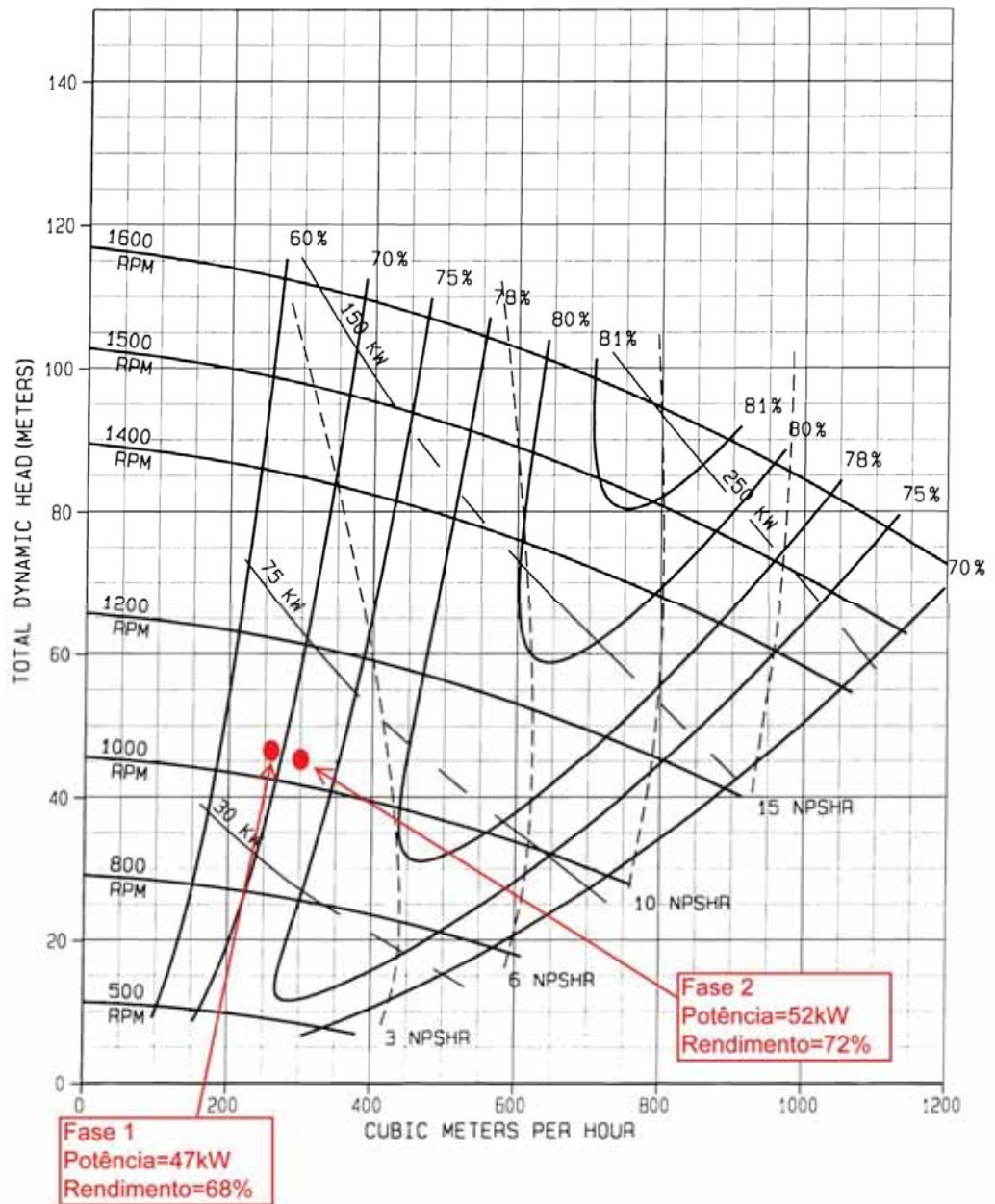
Tabela 16 - Dados do item 4

Dados - Item 4	
Processo	Caldo misto para processo
Modelo da bomba	KSB LCC-M 150-500
Fluido	Caldo
Vazão na 1° fase	260 m ³ /h
Vazão na 2° fase	300 m ³ /h
Pressão	45 m
Temperatura do fluido	40°C
Potência consumida pela bomba	70 cv
Rendimento da bomba	72%
Rotação da bomba	1025 rpm
Potência do motor	75 cv
Número de pólos do motor	4 pólos
Tempo de operação	24 horas

- **Situação A:**

A figura 38 mostra a curva dessa bomba com os pontos de operação da 1° e 2° fase representados.

Figura 38 - Curva KSB LCC-M 150-500



Fonte: (KSB, 2003).

Utilizando a equação 9, os valores do consumo energético e do custo operacional para um dia de funcionamento da usina e durante uma safra que dura em torno de 8 meses (244 dias) estão representados na tabela 17. A variação (Δ) representa o quanto de dinheiro é desperdiçado para uma bomba cujo ponto de operação é o da 1ª fase operando na fase de expansão.

Tabela 17 - Valores de consumo energético e de custo operacional do item 4.

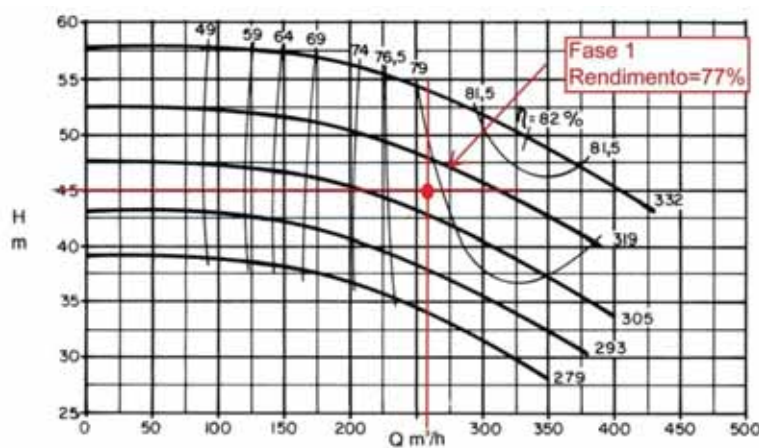
	1 dia		1 safra	
	FASE 1	FASE 2	FASE 1	FASE 2
E (kWh)	1.327,0	1.453,7	323.788,0	354.702,8
R\$	165,12	180,90	40.289,28	44.139,60
Δ (R\$)	15,78		3.850,32	

Porém, enquanto o projeto de expansão (2º fase) não fica pronto, é conveniente utilizar a bomba no ponto da 1º fase conforme mostra a figura 38, mas observa-se que o ponto não é adequado para essa situação e recomenda-se selecionar e utilizar uma outra bomba para que a operação nesse ponto esteja perto do ponto de melhor rendimento da bomba, consumindo menor potência e economizando energia.

- **Situação B:**

A figura 39 representa o ponto da 1º fase, com seu novo rendimento, operando em uma nova bomba selecionada KSB MEGACHEM¹.

Figura 39 - Nova bomba selecionada (KSB MEGACHEM 125-315)



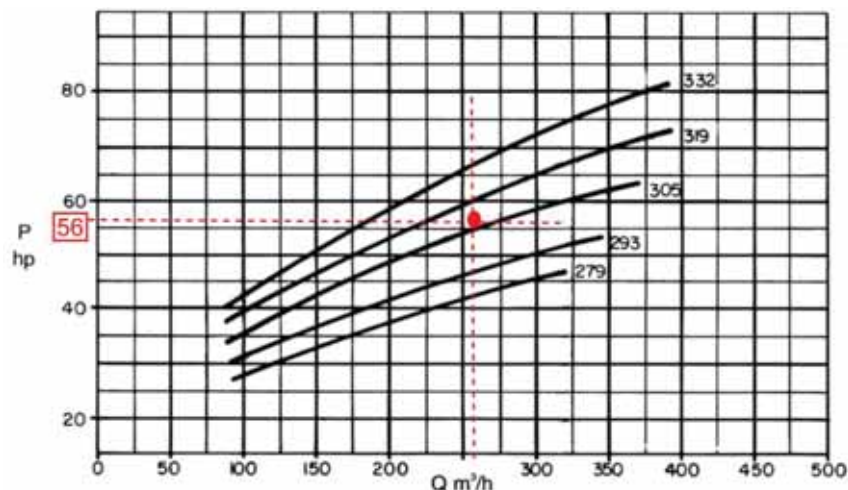
Fonte: (KSB, 2003).

A figura 39 mostra uma bomba representando melhor o ponto de operação da 1º fase, cujo rendimento é de 77%, melhor que a antiga bomba (68%, da figura 38). Outro detalhe econômico é que a bomba MEGACHEM tem um custo menor do que a bomba LCC.

¹ A escolha da bomba MEGACHEM foi feita, pois o fluido foi considerado filtrado, sem passagem de partículas sólidas de pequeno ou grande diâmetro.

A figura 40 mostra a potência consumida por essa bomba

Figura 40 - Potência consumida pela nova bomba (KSB MEGACHEM 125-315)



Fonte: (KSB, 2003).

Essa bomba possui 56 hp (41,2 kW) e seu consumo energético é representado pela equação 9 com um tempo de operação de 24h, sendo de 1.163,3 kWh e o custo operacional dessa bomba por um dia é de R\$144,70. A tabela 18 mostra esses valores para um dia e uma safra.

Tabela 18 - Resultados para nova bomba selecionada do item 4

	por dia	por safra
	1ªFASE	1ªFASE
E (kWh)	1.163,3	283.845,2
R\$	144,70	35.306,80

A economia em utilizar essa bomba cujo preço por dia é de R\$144,70 ao invés da bomba LCC no ponto operante da 1ª fase da situação A (R\$165,12) é de R\$20,42 por dia.

Considerando o período de safra da usina que dura em torno de 8 meses, aproximadamente 244 dias temos que o valor economizado é de R\$4.982,48.

Portanto para esse caso alterou-se a bomba selecionada para o projeto original que era uma LCC-M 150-500 para uma MEGACHEM 125-315 cujo ponto de operação se aproxima do ponto de melhor eficiência da bomba.

5.3.2 Caso 2

Esse caso representa a análise do item 6 das tabelas 14 e 15.

Os principais dados do item 6 estão representados na tabela 19:

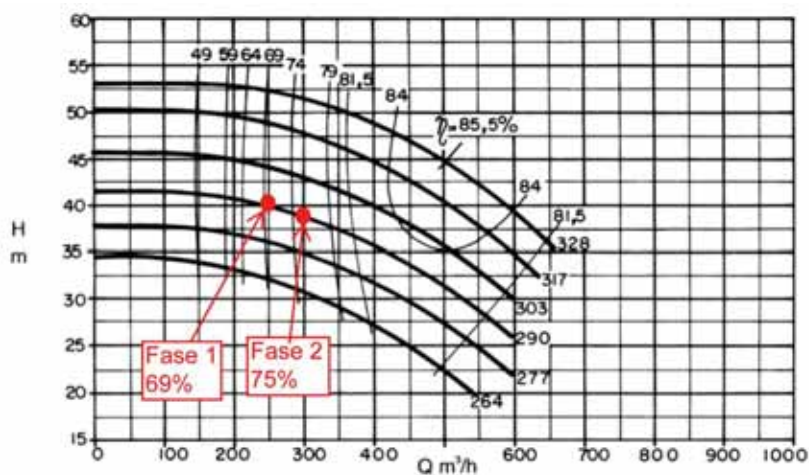
Tabela 19 - Dados do item 6

Dados - Item 6	
Processo	Caldo clarificado para pré-evaporador
Modelo da bomba	KSB MEGACHEM 150-315
Fluido	Caldo clarificado
Vazão na 1° fase	250 m ³ /h
Vazão na 2° fase	300 m ³ /h
Pressão	40 m
Temperatura do fluido	95°C
Potência consumida pela bomba	59 cv
Rendimento da bomba	75%
Rotação da bomba	1750 rpm
Potência do motor	75 cv
Número de pólos do motor	4 pólos
Tempo de operação	14 horas

- **Situação A:**

A figura 41 mostra a curva dessa bomba com os pontos de operação da 1° e 2° fase representados com seus respectivos rendimentos.

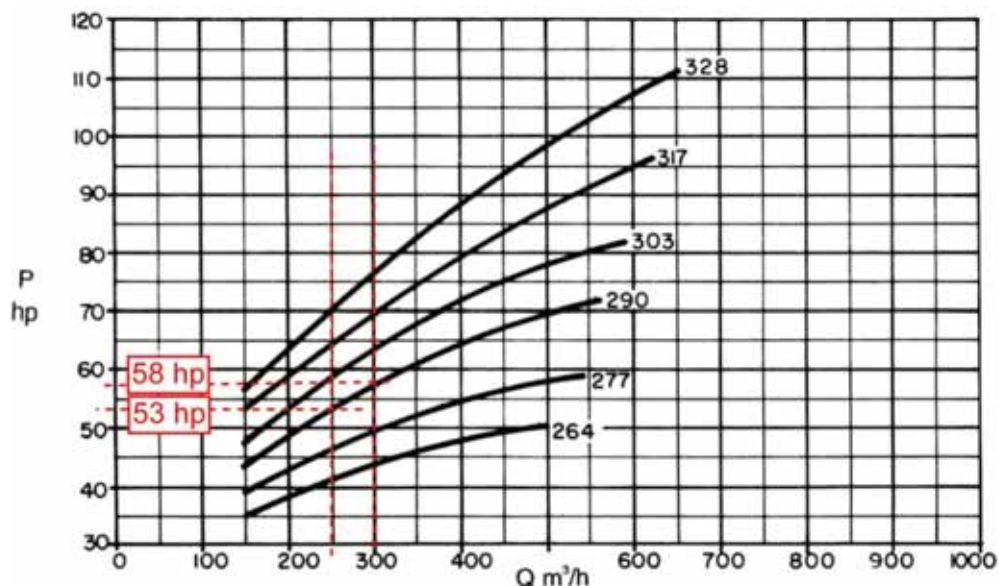
Figura 41 - Curva KSB MEGACHEM 150-315



Fonte: (KSB, 2003).

A figura 42 mostra a curva de potência por vazão com as respectivas potências para as fases um e dois do projeto.

Figura 42 - Curva P x Q (KSB MEGACHEM 150-315)



Fonte: (KSB, 2003).

Através da equação 9, calcula-se os valores de consumo energético e de custo operacional por dia e por safra respectivamente. Com o valor da variação Δ , analisa-se quanto dinheiro é desperdiçado com a bomba operando no ponto na 1ª fase do projeto. Os valores estão representados na tabela 20.

Tabela 20 - Valores de consumo energético e de custo operacional do item 6.

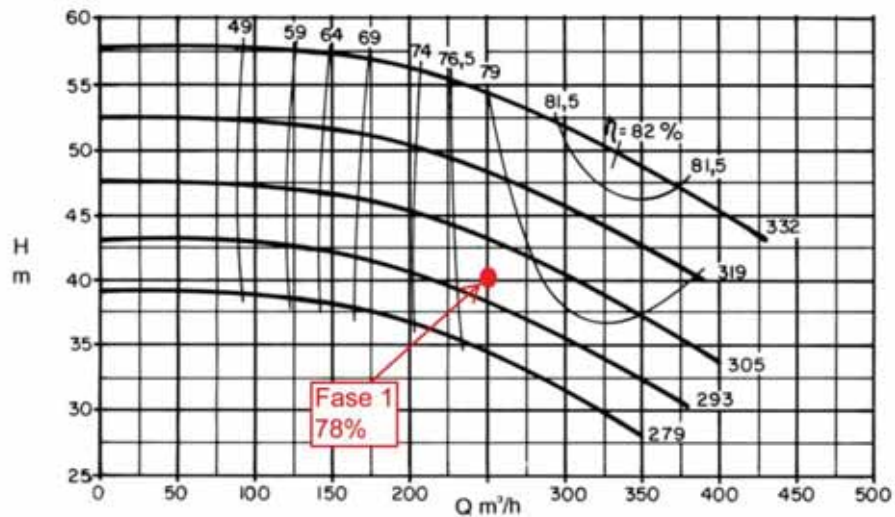
	1 dia		1 safra	
	FASE 1	FASE 2	FASE 1	FASE 2
E (kWh)	650,6	714,7	158.746,4	174.386,8
R\$	80,95	88,90	19.751,80	21.691,60
Δ (R\$)	7,95		1.939,80	

- **Situação B:**

Selecionando uma nova bomba para apresentar elevado rendimento e ponto de operação mais próximo ao ponto de rendimento, selecionou-se uma bomba cujo diâmetro nominal do flange de recalque é menor.

A figura 43 representa a nova bomba selecionada indicando seu ponto de operação da 1ª fase do projeto, com seu novo rendimento e a figura 44 mostra sua curva de potência por vazão.

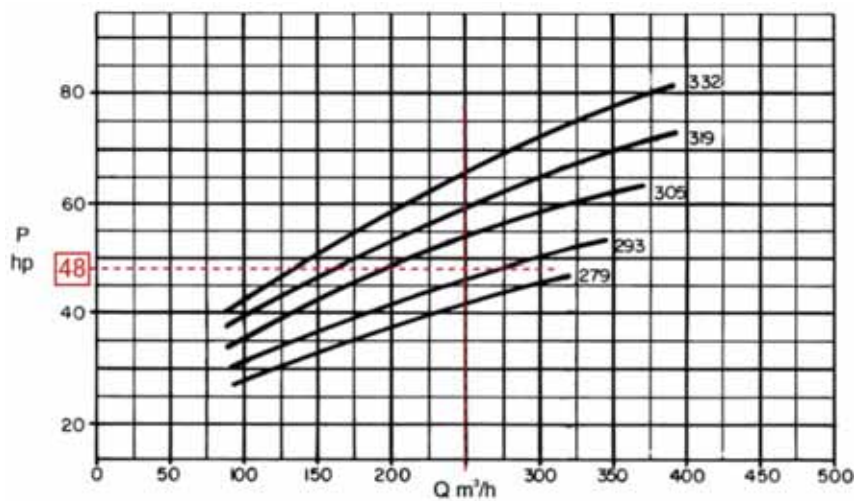
Figura 43 - Curva KSB Megachem125-315



Fonte: (KSB, 2003).

A figura 43 mostra que o rendimento da nova bomba é de 78%, melhor que a antiga bomba (69%, da figura 41).

Figura 44 - Curva P x Q (KSB Megachem125-315)



Fonte: (KSB, 2003).

Analogamente ao caso 1, para uma usina que opera por 8 meses (244 dias) e com o uso da equação 9 obtêm-se os valores de consumo energético e de custo operacional para essa nova bomba, conforme mostra a tabela 21.

Tabela 21 - Resultados para nova bomba selecionada do item 6.

	por dia	por safra
	1ºFASE	1ºFASE
E (kWh)	589,6	143.862,4
R\$	73,36	17.899,84

A economia em utilizar essa bomba cujo custo operacional por dia é de R\$73,36 ao invés da bomba MEGACHEM 150-315 no ponto de operação da 1º fase da situação A (R\$80,95) é de R\$7,59 por dia.

Considerando o período de safra da usina que dura em torno de 8 meses (244 dias) temos que o valor economizado é de R\$1.851,96.

Outra vantagem de selecionar essa bomba é quanto a sua potência consumida (48 cv), que é inferior a da outra bomba (75cv) permitindo utilizar um motor de mais baixa potência, deixando o preço do conjunto motobomba mais atrativo.

5.3.3 Caso 3

Análise do item 8 das tabelas 14 e 15.

Os dados principais do item 8 estão representados na tabela 22:

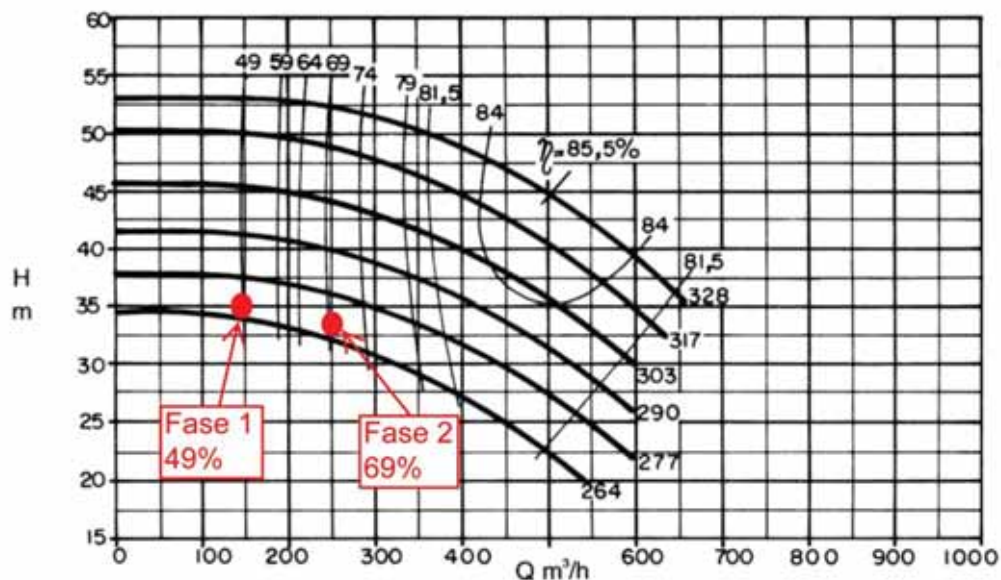
Tabela 22 - Dados do item 8

Dados - Item 8	
Processo	Água decantador para lavador de gases
Modelo da bomba	KSB MEGACHEM 150-315
Fluido	Água
Vazão na 1° fase	150 m ³ /h
Vazão na 2° fase	250 m ³ /h
Pressão	35 m
Temperatura do fluido	70°C
Potência consumida pela bomba	47 cv
Rendimento da bomba	69%
Rotação da bomba	1750 rpm
Potência do motor	50 cv
Número de pólos do motor	4 pólos
Tempo de operação	20 horas

- **Situação A:**

A figura 45 mostra a curva dessa bomba com os pontos de operação da 1° e 2° fase representados.

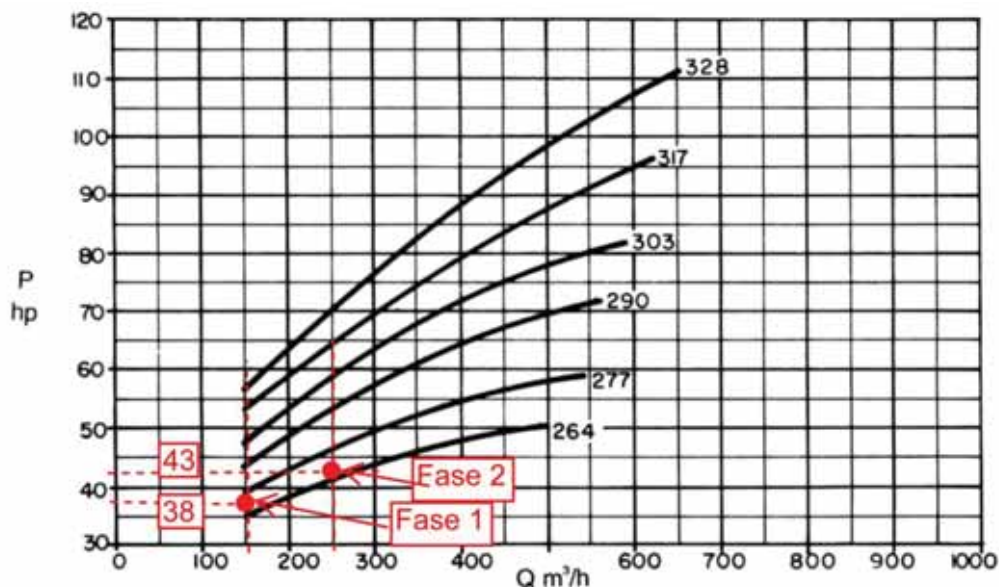
Figura 45 - Curva KSB MEGACHEM 150-315



Fonte: (KSB, 2003).

A figura 46 mostra a curva de potência por vazão com as respectivas potências para fase um e dois do projeto.

Figura 46 - Curva P x Q KSB (MEGACHEM 150-315)



Fonte: (KSB, 2003).

Analogamente aos casos anteriores e utilizando a equação 9, a tabela 23 mostra os valores do consumo energético e do custo operacional para um dia de funcionamento da usina e durante uma safra que dura em torno de 8 meses (244 dias). A variação representa o quanto se joga de dinheiro fora quando resolve-se operar no ponto da 1ª fase ao invés de expandir o projeto.

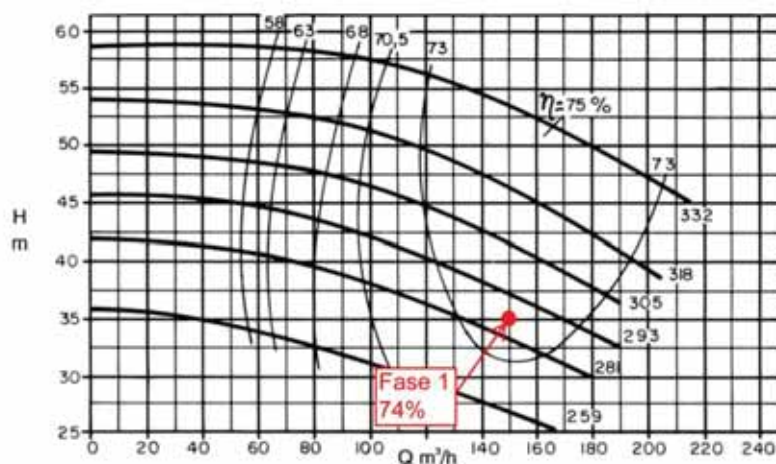
Tabela 23 - Valores de consumo de energia e de custo operacional do item 8.

	1 dia		1 safra	
	FASE 1	FASE 2	FASE 1	FASE 2
E (kWh)	701,2	813,4	171.092,8	198.469,6
R\$	87,25	101,20	21.289,00	24.692,80
Δ (R\$)	13,95		3.403,80	

- **Situação B:**

Seleciona-se uma bomba, cujo ponto da 1ª fase com seu novo rendimento, está apontado na figura 47. Novamente para essa seleção, alterou-se o diâmetro nominal do flange de recalque para um valor menor.

Figura 47 - Curva KSB MEGACHEM 80-315

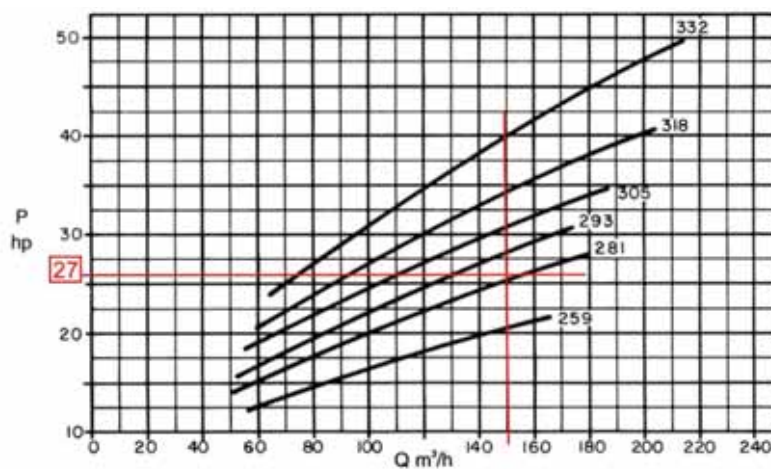


Fonte: (KSB, 2003).

A figura 47 mostra o ponto de operação da 1ª fase, cujo rendimento é de 74%, melhor que a antiga bomba (49%, da figura 45).

A figura 48 mostra a potência consumida por essa bomba.

Figura 48 - Curva P x Q (KSB Megachem80-315)



Fonte: (KSB, 2003).

Essa bomba possui 27 hp (20,1 kW) e seu consumo energético, representado através da equação 9, para um tempo de operação de 20 horas, é de 472,9 kWh e o custo operacional dessa bomba por um dia é de R\$58,84.

A economia em utilizar essa bomba cujo preço por dia é de R\$58,84 ao invés da bomba MEGACHEM 150-315 no ponto de operação da 1ª fase da situação A (R\$87,25) é de R\$28,41 por dia.

Considerando o período de safra da usina que dura em torno de 8 meses, aproximadamente 244 dias temos que o valor economizado é de R\$6.932,04. A tabela 24 mostra esses resultados.

Tabela 24 - Resultados para nova bomba selecionada do item 8

	por dia	por safra
	FASE 1	FASE 1
E (kWh)	472,9	115.387,6
R\$	58,84	14.356,96

Nesse caso também pode-se utilizar um motor com potência menor do que o original selecionado, pois a potência consumida pela bomba (27cv) foi bem inferior a que era consumida antes (47cv), não necessitando de um motor maior, economizando no preço do conjunto motobomba.

- **Conclusão final**

Observou-se que a alteração de bombas foi vantajosa, pois houve consumo de energia e diminuição dos custos. A tabela 25 mostra esses resultados.

Tabela 25 - Resultados significativos das bombas antes e depois.

	Antes		Depois	
	kWh	R\$	kWh	R\$
Bomba 1	323.788,0	40.289,28	283.845,2	35.306,80
Bomba 2	158.746,4	19.751,80	143.862,4	17.899,84
Bomba 3	171.092,8	21.289,00	115.387,6	14.356,96
Total	653.627,2	81.330,08	543.095,2	67.563,60

Sendo que a economia de consumo energético foi de 110.532 kWh e de custo operacional de R\$13.766,48.

6 COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

Este trabalho baseou-se em uma revisão bibliográfica sobre funcionamento de uma usina sucroalcooleira desde a chegada da cana-de-açúcar até a produção de açúcar e etanol, cujo objetivo visou o estudo da participação das bombas nos processos industriais.

Foi feito também uma revisão bibliográfica para o funcionamento de bombas hidráulicas, para auxiliar na seleção de bombas de um estudo de caso que se dividia em duas fases de projeto: a primeira fase que era um projeto inicial que requeria bombas com determinada vazão e altura manométrica e a segunda fase que visava a expansão da instalação da usina, exigindo bombas com maiores vazões do que as da primeira fase.

As bombas selecionadas para fazerem parte da instalação da usina estavam superdimensionadas, pois estavam operando com vazão e altura manométrica não compatíveis ao seu funcionamento ótimo, observou-se que as bombas foram ineficientes para operarem com os valores iniciais do projeto da primeira fase, pois o ponto de operação da bomba permaneceu longe do ponto de melhor rendimento da bomba, fazendo com que houvesse maior consumo energético de energia elétrica e submetendo a bomba a problemas operacionais tais como vibrações, ruídos estranhos, recirculação de fluido, desgaste do uso das gaxetas e do selo mecânico contribuindo para a redução da vida útil da bomba e com maiores paradas para manutenção.

A solução foi selecionar uma nova bomba que pudesse operar corretamente e com elevado rendimento para que sua potência não fosse maior que a da antiga bomba, reduzindo o consumo energético e o custo operacional para sobra de energia elétrica para venda ou para consumo próprio.

REFERÊNCIAS

CAMARGO, C.A. de. **Conservação de energia na indústria do açúcar e do álcool**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1990. (796p.).

CASTRO, N. J.; DANTAS, G. A. **Lições do PROINFA e do leilão de fontes alternativas para a inserção da bioeletricidade sucroalcooleira na matriz energética brasileira**. Curitiba, 2008. Disponível em: <<http://www.nuca.ie.ufrj.br>>. Acesso em: 01 out. 2013.

CONAB. **Perfil do setor do açúcar e do álcool no Brasil. Volume 5 – Safra 2011/2012**. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em: 01 out. 2013.

DADDARIO, H. **O álcool e a nova ordem econômica mundial**. Brasília: Frente Parlamentar Sucroalcooleira, 1996. 155 p.

EPE - Empresa de pesquisa energética. **Balanco energético nacional 2013 – ano base 2012**. Rio de Janeiro: EPE, 2013. Disponível em: <<https://ben.epe.gov.br>> Acesso em: 15 set. 2013.

HICKS, T. G.; **Pump Selection and Application**, 1.ed. Toronto: McGraw-Hill Book Company, 1957. (422 p.).

HUGOT, E. **Manual da Engenharia Açucareira**, volume I e II. São Paulo: Editora Mestre Jou, 1969. 544 p. vol. I e 652 p. vol. II.

KSB. **Manual de curvas suplementares**. Disponível em: <www.ksb.com.br> Acesso em: 24 nov. 2013.

LIMA, E. P. C.; **Mecânica das bombas**. 2.ed. Rio de Janeiro: Interciência: PETROBRAS, 2003. 610p.

LOBANOFF, V. S; ROSS R. R. **Centrifugal Pumps**. Gulf Publishing Company, 1992. 577p.

LOBOSCO, O. S.; DIAS, J.L.P.C; **Seleção e aplicação de motores elétricos**, volume 1 e 2. São Paulo: McGraw-Hill: Siemens S.A., 1988. 351p, vol1 e 158p, vol 2 (511 total).

MACINTYRE, A. J.; **Bombas e instalações de bombeamento**. 2.ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros técnicos e científicos editora S.A., 1987. 782p.

MATTOS, E. E. de; FALCO, R. de. **Bombas industriais**. 2.ed. Rio de Janeiro: Interciência, 1998. 474.

PAYNE, J.H. **Operações unitárias na produção de açúcar de cana**. São Paulo: Nobel: STAB, 1989. (245 p.).

REIN, P. **Cane Sugar Engineering**. Berlin: Verlag Dr. Albert Bartens KG, 2007. 768p.

RIBEIRO, P. R. **A usina de açúcar e sua automação**. 2ª edição. 2003.

SANTOS, S. L. dos. **Bombas & instalações hidráulicas**. São Paulo: LCTE editora, 2007. 253p.

SOUZA, Z. J. **Geração de energia elétrica excedente no setor sucroalcooleiro: Entraves estruturais e custos de transação**. Tese de doutorado. São Carlos: UFSCar, 2003. Disponível em: < <http://www.nuca.ie.ufrj.br>>. Acesso em: 02 out. 2013.

TROVATI, J. **Tratamento de água para geração de vapor: caldeiras**. Disponível em: <<http://snatural.com.br>>. Acesso em: 04 mar. 2013.

UNICA - União da indústria de cana-de-açúcar. Disponível em: <<http://www.unicadata.com.br/>>. Acesso em 15 mar. 2013.

GLOSSÁRIO

- Brix.** Porcentagem em massa de sólidos solúveis contidos em uma solução de sacarose quimicamente pura.
- Flegma.** Fluido resultante de uma das frações do vinho submetido à destilação.
- Flegmassa.** Fluido resultante do flegma que ao ser destilado novamente ocorre a sua produção, muito utilizado para fazer assepsia nos equipamentos.
- Leite de cal.** Utilizado no processo de calagem para corrigir o pH e auxiliar na precipitação.
- Óleo fúsel.** Obtido no processo de destilação e é fornecido para a indústria química para produção de solventes, vernizes, etc.
- Pol.** Porcentagem em massa de sacarose aparente contida em uma solução açucarada de peso normal determinada pelo desvio provocado pela solução no plano de vibração de luz polarizada.
- Vinhaça.** Resíduo que sobra do caldo de cana-de-açúcar fermentado quando passa pelo processo de destilação fracionada.
- Vinho delevedurado.** Obtido durante a fermentação, é uma mistura de levedura, álcool e outros resíduos.
- Vinhoto.** O mesmo que vinhaça.