



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA  
ENG07053 - TRABALHO DE DIPLOMAÇÃO EM ENGENHARIA  
QUÍMICA



# Estudo do Sistema de Água de Processo da Braskem UNIB

*Autora: Paula Souto Linck*

*Orientadores: Isabel Cristina Tessaro*

*Marcos Lovato Alencastro*

Porto Alegre, julho de 12

**Sumário**

Resumo	iii
Lista de Figuras	iv
Lista de Tabelas	v
Lista de Abreviaturas e Siglas	vi
1 Introdução	1
2 Braskem	2
2.1 Unidade de Insumos Básicos – UNIB	3
2.2 Olefinas – Planta 1	5
2.3 Estudo de Caso – Sistema de Água de Processo	8
3 Fundamentos Teóricos	10
3.1 Regime de escoamento	10
3.2 Fator de Atrito	11
3.3 Perda de Carga	11
3.3.1 Perda de Carga Distribuída	12
3.3.2 Perda de Carga Localizada	12
3.4 Bombas Centrífugas	13
3.4.1 Bombas Centrífugas	13
3.4.2 Curvas Características de Bombas Centrífugas	13
3.4.3 Cavitação	13
3.4.4 NPSH	14
3.5 Válvulas de Controle	15
4 Metodologia	16
5 Resultados e Discussão	21
6 Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros	27
7 Referências	28
ANEXO 1: Diagrama Isométrico	29
ANEXO 2: Folha de Dados da Placa de Orifício	30

## Resumo

O mercado cada vez mais competitivo da indústria do petróleo e petroquímica exige das empresas que atuam nesse ramo a busca constante por minimização de custos e maximização de produção. Neste contexto surgiu a necessidade de estudar o Sistema de Água de Processo da Braskem UNIB com o objetivo de verificar se ele segue adequadamente dimensionado para as novas vazões depois que a unidade passou por um aumento da capacidade produtiva. O sistema é composto de duas torres de destilação, dois permutadores, uma bomba, uma placa de orifício e uma válvula de controle. Os possíveis limitadores de vazão são as tubulações, a bomba e a válvula de controle. As tubulações foram avaliadas usando equações clássicas de escoamento de fluidos em tubulações, a bomba através dos NPSH requerido e disponível e para analisar a válvula de controle foi utilizado o software ValSpec. Para as tubulações os valores de velocidade de escoamento do fluido estão de acordo com os intervalos recomendados na literatura, o que indica que elas estão adequadas para a nova vazão. A bomba não sofre cavitação nas condições normais de operação, pois o NPSH disponível é maior que o NPSH requerido. A válvula de controle se mostrou um limitante de vazão. Ela foi avaliada comparando o valor do coeficiente de vazão indicado pelo fabricante e o  $C_v$  requerido nas condições de processo. Como o  $C_v$  requerido é maior que o da válvula conclui-se que esta deve ser substituída para que a planta possa operar na sua nova capacidade produtiva máxima.

## Lista de Figuras

Figura 2.1: A Braskem e a cadeia petroquímica. ....	2
Figura 2.2: Fluxograma das Unidades de Olefinas.....	5
Figura 2.3: Fluxograma simplificado da área de Efluentes. ....	7
Figura 4.1.: Fluxograma simplificado do sistema de água de processo. ....	16
Figura 5.1: Curvas características da bomba fornecidas pelo fabricante. ....	24
Figura 5.2: Imagem da tela do software FlowCalc.....	25
Figura 5.3: Imagem da tela do software ValSpeq.....	26

**Lista de Tabelas**

Tabela 5.1: Velocidade nos trechos de tubulação.....	21
Tabela 5.2: Número de Reynolds e rugosidade relativa em cada trecho de tubulação do sistema de água de processo.....	22
Tabela 5.3: Lista de acessórios e acidentes encontrados no sistema. ....	22
Tabela 5.4: Comprimentos equivalente, reto e total do sistema.....	22
Tabela 5.5: Perda de carga em cada trecho de linha.....	23
Tabela 5.6: Perda de carga nos permutadores. ....	25
Tabela 5.7: Perdas de carga no sistema.....	25

**Lista de Abreviaturas e Siglas**

UNIB: Unidade de Insumos Básicos

SITEL: Sistema Integrado de Tratamento de Efluentes Líquidos

TEDUT: Terminal Almirante Dutra

REFAP: Refinaria Alberto Pasqualini

PGM: Parada geral de manutenção

GLP: Gás liquefeito de petróleo

NPSH: Net positive suction head

VS: Vapor de superalta pressão

VM: Vapor de média pressão

AP: Água de processo

VD: Vapor de diluição

AQ: Água de quench

CM: Condensado de média pressão

OQ: Óleo de quench

Cv: Coeficiente de vazão

## 1 Introdução

No cenário econômico atual, as empresas trabalham no máximo de sua capacidade e, muitas vezes, isso significa trabalhar com cargas que ultrapassam a capacidade de projeto da unidade industrial.

Na Unidade de Insumos Básicos (UNIB) da Braskem, em abril de 2008, ocorreu uma parada geral de manutenção (PGM) na Planta 1 de Olefinas. Essa parada teve como objetivo fazer manutenção nos equipamentos que operam continuamente e que só podem sofrer reparos quando ocorre a parada programada de toda planta.

Além da manutenção dos equipamentos, durante as PGM podem ocorrer modificações no processo com o intuito de aumentar a capacidade produtiva. Na PGM de 2008, a carga da Planta 1 de Olefinas foi aumentada em 30 t/h de nafta com a instalação de um novo forno de craqueamento.

Esse aumento de carga demanda também maior capacidade dos demais sistemas que compõem a Planta 1, entre eles o Sistema de Água de Processo.

Quando a planta opera em sua capacidade máxima atual, o sistema de água de processo se mostra subdimensionado e assim é necessário fazer um descarte de água contaminada com hidrocarbonetos a montante do sistema e uma injeção de água tratada a jusante desse. O descarte de água nesse ponto do processo requer um tratamento de efluente e a injeção de água implica em maior consumo de utilidades.

O alto custo do tratamento de efluentes e do tratamento de água para especificá-la para o uso no processo e a crescente cobrança da sociedade pelo uso racional e descarte adequado motiva estudos na área de reaproveitamento de água e de minimização de geração de efluentes líquidos.

O presente trabalho tem por objetivo estudar o Sistema de Água de Processo para identificar o gargalo desse e verificar se é necessário adequá-lo a nova vazão de água de processo.

O estudo se desenvolveu com base nos dados obtidos nos diagramas isométricos do sistema e nas folhas de dados dos equipamentos. O foco principal era verificar se as tubulações, a bomba e a válvula de controle estão adequadas à vazão máxima. Essa análise foi feita a partir de cálculos de perda de carga em todos os elementos que compõem o sistema.

O trabalho está dividido em cinco seções. Na primeira parte é apresentada a empresa na qual foi realizado o estudo, uma explicação breve do processo da Unidade de Olefinas Planta 1 e o estudo de caso. Na segunda seção são apresentados os fundamentos teóricos necessários para melhor compreensão do problema a ser estudado. Na seção seguinte é apresentada a metodologia utilizada. Na quarta parte são apresentados os resultados e na última seção são apresentadas as conclusões obtidas ao longo do trabalho.

## 2 Braskem

A Braskem é uma empresa com atuação nos setores químico e petroquímico e se destaca no cenário global como a maior produtora de resinas termoplásticas das Américas. Sua produção é focada nas resinas termoplásticas polietileno, polipropileno e policloreto de vinila, além de insumos químicos básicos, como eteno, propeno, butadieno, benzeno, tolueno, cloro, soda e solventes, entre outros.

A Braskem possui 35 unidades industriais. Destas 25 estão instaladas no Brasil, nos estados de Alagoas, Bahia, Rio de Janeiro, Rio Grande do Sul e São Paulo. Cinco nos Estados Unidos, nos estados da Pennsylvania, West Virginia e Texas e duas na Alemanha nas cidades de Wesseling e Schkopau.

A Braskem é a primeira petroquímica integrada do país, isto é, que combina operações da primeira e da segunda gerações da cadeia produtiva do plástico, em uma única empresa conforme ilustração da Figura 2.1.



Figura 2.1: A Braskem e a cadeia petroquímica.

A Braskem possui seis unidades industriais no Rio Grande do Sul localizadas no Polo Petroquímico de Triunfo. Esse é formado pela Unidade de Insumos Básicos e oito indústrias de segunda geração.

As empresas que formam um polo petroquímico classificam-se em três segmentos conforme apresentado a seguir.

- Indústrias de 1ª geração: são as chamadas centrais de matérias-primas e produzem os petroquímicos básicos.
- Indústrias de 2ª geração: processam os petroquímicos básicos para fabricar os produtos intermediários, como resinas, por exemplo.
- Indústrias de 3ª geração: também conhecidas como indústrias de transformação, processam os produtos intermediários para manufaturar os bens de consumo que chegam até o consumidor.



## 2.1 Unidade de Insumos Básicos – UNIB

A Unidade de Insumos Básicos é responsável pela fabricação e distribuição das matérias-primas para as empresas de segunda geração que integram o polo petroquímico.

As Unidades de Olefinas 1 e 2, de Aromáticos e de Utilidades compõe a UNIB e possuem responsabilidades bem definidas em relação a quais produtos cada unidade distribui.

Na Unidade de Utilidades os produtos gerados são destinados ao consumo na empresa e nas indústrias de segunda geração. A seguir, as áreas pertencentes a esta Unidade são descritas sucintamente.

- Estação de tratamento de água: tem por finalidade produzir água tratada, nas especificações adequadas para cada tipo de utilização. São elas: água de incêndio, água clarificada, água filtrada, água potável, água de serviço, água desmineralizada, água de mancais e água de resfriamento.

- Dois turbogeradores e uma turbina a gás: geração de cerca de 26 MW através das turbinas à vapor (13 MW por turbogerador) e cerca de 14 MW na turbina a gás.

- Distribuição de nitrogênio: o nitrogênio, produzido pela unidade da White Martins, é utilizado como gás inerte principalmente para a regeneração de reatores, purga e selagem nas unidades de processo, purga e selagem no porto e na área transferência e estocagem, injeção de amostras, purga de analisadores no laboratório e, eventualmente, para controle de instrumentação pneumática.

- Sistema de ar comprimido: tem por finalidade produzir ar para instrumentação e serviço, nas especificações adequadas para cada tipo de utilização através de cinco compressores centrífugos.

- Sistema de água de resfriamento: tem por finalidade fornecer água de resfriamento para as unidades de processo, através de duas torres de resfriamento do tipo tiragem induzida e uma torre de resfriamento de tiragem forçada.

- Sistema de geração de vapor: tem por finalidade produzir vapor de super alta pressão (VS), nas especificações adequadas (113 bar e 525°C). Para tanto, a Unidade conta com duas caldeiras aquatubulares que queimam óleo, gás e carvão e uma caldeira aquatubular que queima apenas óleo e gás. Outros níveis de vapores são obtidos através do vapor de superalta pressão exausto de turbinas e redutoras de pressão:

Vapor de alta pressão (VA): 40 bar e 410°C.

Vapor de média pressão (VM): 18 bar e 325°C.

Vapor de baixa pressão (VB): 4,5 bar e 225°C.

A Unidade de Aromáticos é responsável pela produção de butadieno, buteno-1, propano, benzeno, tolueno, xilenos, ETBE (etil-terc-butil-éter), C6C8 refinado, gasolinas, C6 solvente, C5 solvente e C9 solvente. Ela está dividida em dez áreas diferentes, onde cada qual produz um determinado produto. Para produzir os produtos mencionados

anteriormente, a Unidade utiliza como matérias-primas produtos produzidos pela Unidade de Olefinas, dentre eles: gasolina de pirólise bruta, componentes de corte C4 e hidrogênio.

Os componentes de corte C4 são processados no chamado “trem de gases” (plantas que processam gases), gerando como produtos o buteno-1, o 1,3 butadieno, ETBE e Gás Liquefeito de Petróleo (GLP).

A gasolina de pirólise bruta, formada por hidrocarbonetos de corte C5 a C10+, é processada no “trem de líquidos” (plantas que processam líquidos), gerando uma série de solventes: C5, C9, benzeno, tolueno, xilenos, solvente C9 aromático, solvente C7+ e C6C8 refinado. Dentre estes, o C5, o C9, o C6C8 refinado e o C7+ podem ser utilizados na formulação de gasolina (realizada no setor de transferência e estocagem).

As Unidades de Olefinas 1 e 2 recebem as matérias-primas. A nafta que é consumida no polo petroquímico provém de duas fontes principais – produção da Refinaria Alberto Pasqualini (REFAP) de Canoas e descargas no Terminal Almirante Dutra (TEDUT), terminal da Petrobras em Tramandaí, oriundas de outras refinarias da Petrobras ou do exterior. Eventualmente – em períodos de mau tempo no litoral gaúcho, quando o TEDUT encontra-se fechado para manobras marítimas – ocorrem descargas pequenas no Terminal Santa Clara, em Triunfo, a partir de navios que operam na Lagoa dos Patos.

A Olefinas 1 recebe nafta e a Olefinas 2 recebe nafta, GLP e condensado de petróleo. As duas plantas tem como objetivo transformar estas matérias-primas nos seguintes produtos: eteno, propeno, resíduo aromático, BTE (baixo teor de enxofre), hidrogênio, corte C4 e gasolina de pirólise (gasolina bruta).

As duas Unidades de Olefinas processam a matéria-prima primeiramente em fornos de pirólise e de etano para dar origem aos seus produtos através do craqueamento térmico. Após o craqueamento, o produto das fornalhas passa por duas torres, uma de óleo de quench e outra de água de quench, onde a parte pesada é arrastada e a parte leve vai para a seção de compressão, onde ocorre além do tratamento e da compressão dos gases, uma separação dos mais pesados.

A área de separação, também chamada de área fria, é a responsável pela separação dos gases craqueados em seus diferentes componentes. A separação é realizada basicamente através de torres de destilação, que operam em um crescente de temperatura para separar as diversas correntes, contando ainda com reatores que visam eliminar a presença de produtos indesejados.

Um fluxograma simplificado dos principais produtos das Unidades de Olefinas é mostrado na Figura 2.2.

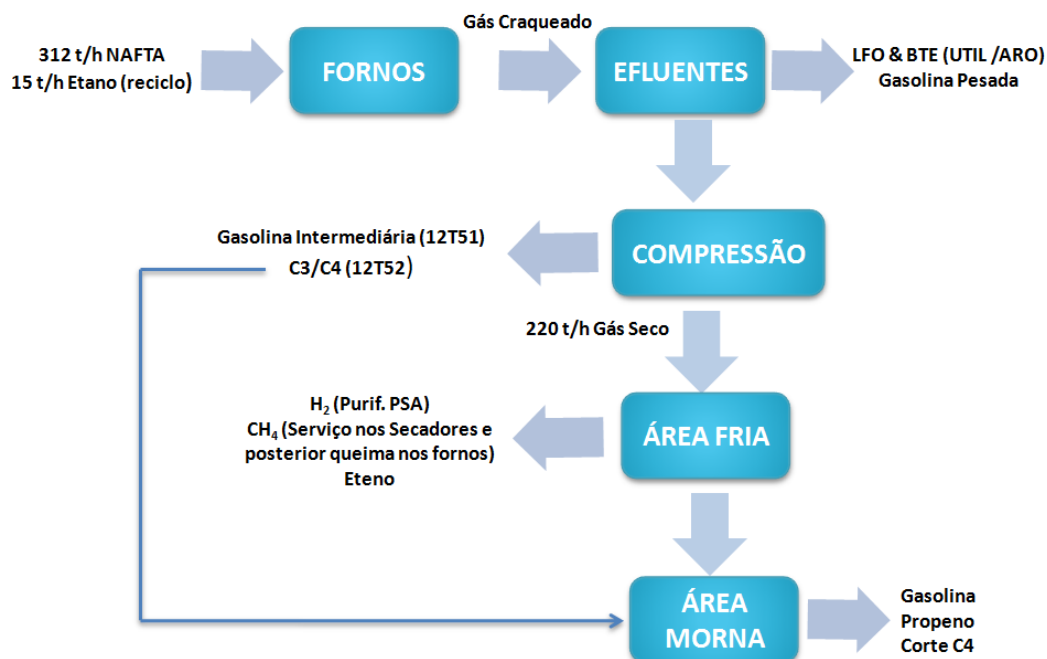


Figura 2.2: Fluxograma das Unidades de Olefinas.

## 2.2 Olefinas – Planta 1

Para facilitar a compreensão do Sistema de Água de Processo (AP) é feita a seguir uma descrição da Unidade de Olefinas da qual o Sistema de AP faz parte. Essa descrição é baseada no Manual de Operação de Olefinas Planta 1 (BRASKEM, 2001).

Na Unidade de Olefinas 1, a nafta é transformada principalmente em eteno e propeno, além de outros subprodutos. A nafta é uma mistura de hidrocarbonetos variando desde o corte C5 até o corte C11 aproximadamente, semelhante à gasolina. Aquecendo a nafta até altas temperaturas (acima de 800°C) ocorrem reações de craqueamento que resultam na quebra das moléculas, gerando moléculas menores.

Esta reação química pode ser controlada de tal forma que resulte em altos rendimentos em eteno ( $C_2H_4$ ) e propeno ( $C_3H_6$ ). E além destes produtos são gerados inúmeros outros, desde substâncias bem leves como hidrogênio ( $H_2$ ) e metano ( $CH_4$ ), até gasolina (corte C6 a C8) e óleos pesados (corte C15 e C20).

A Unidade é dividida em diversas áreas conforme descrito a seguir.

- Área 11 – Área quente: onde se localizam os fornos de pirólise em que se realizam as reações de craqueamento. Nesta área ocorre uma primeira separação dos componentes mais pesados (óleo e gasolina pesada);
- Área 12 – Compressão: onde o gás proveniente da área 11 é tratado e comprimido. Na compressão, separam-se alguns componentes (gasolina média e GLP);
- Área 13 – Área fria: o gás é resfriado a baixíssimas temperaturas, de forma que se possam separar os leves (hidrogênio, metano, eteno, propeno e corte C4). Uma gasolina leve também é produzida;

- Área 14 – Refrigeração: é responsável pela refrigeração da área fria, de forma que se possam atingir as baixas temperaturas necessárias a separação dos componentes leves;
- Área norte: responsável pelo recebimento, armazenamento e bombeamento da matéria-prima, nafta ou condensado, além de produtos intermediários de processos oriundos desta Unidade.

A área quente é dividida em duas seções: fornos e efluentes.

A área de fornos cumpre a finalidade de produzir eteno e propeno a partir da pirólise da nafta, bem como gerar parte do vapor de super alta pressão, utilizado na própria unidade para acionar turbinas. Embora a pirólise seja um processo complexo, ela consiste basicamente da des-hidrogenação e ruptura da ligação carbono-carbono, formando radicais orgânicos. Estas duas reações básicas são endotérmicas, ou seja, consomem energia para manter a reação.

Vapor de diluição (VD) e nafta são as principais cargas para as fornalhas. A adição de vapor de diluição a carga de hidrocarbonetos diminui a severidade da reação, pois reduz a pressão parcial dos hidrocarbonetos, fato este que minimiza o sobre-craqueamento e a formação de coque, e também diminui o tempo de residência dos gases dentro da fornalha.

Quanto menor a pressão parcial dos hidrocarbonetos, mais alto será o rendimento de produtos desejáveis e mais lenta a formação de coque no forno. A quantidade ótima de vapor de diluição é dependente das propriedades da carga. Em geral, cargas mais leves requerem menos vapor de diluição. Vapor de diluição em excesso penalizará o consumo de utilidades.

A área de efluentes é responsável por remover calor da corrente de gás craqueado das fornalhas, recebendo-o em torno 360°C e entregando-o em torno de 37,5°C na sucção dos compressores. Dentro do conceito de reaproveitamento e otimização de energia, a área de efluentes realiza importantes funções, tais como:

- separação de óleo com ponto de ebulição acima de 200°C;
- condensação e separação de água de processo e gasolina para posterior reaproveitamento na geração de VD e refluxo da fracionadora primária (11T01) respectivamente;
- produção de óleo combustível que pode ser vendido ou consumido nas caldeiras geradoras de VS.

A Figura 2.3 mostra um fluxograma simplificado da Área de Efluentes.



### 2.3 Estudo de Caso – Sistema de Água de Processo

Este trabalho foi desenvolvido a partir de uma demanda da Unidade de Olefinas. Após a ampliação da capacidade produtiva da planta na parada de manutenção de 2008 foi constatado que o sistema de água de processo poderia ser um limitante da produção. Assim, é necessário um estudo de processo para verificar qual ponto do sistema pode causar restrição na vazão de AP.

A torre de esgotamento de água de processo (11T05) tem como função principal a remoção das impurezas da água de processo à baixa pressão e o aumento da eficiência do “stripping”, devido a maior volatilidade relativa e menor pressão parcial dos hidrocarbonetos, além de minimizar a presença destes hidrocarbonetos polimerizáveis em pontos com temperaturas mais elevadas. A pressão da torre é controlada por injeção direta de VD na seção de fundo. Os hidrocarbonetos vaporizados são retirados pelo topo sob controle de vazão e retornam para a 11T03. A corrente de fundo depois de retificada é enviada para 11T04.

A retificadora de água de processo tem como função principal gerar vapor de diluição especificado para os fornos de pirólise. A água oriunda do fundo da torre 11T05 é enviada para o pré-aquecedor da carga da 11T04, 11P21. A carga é pré-aquecida por meio da troca térmica com condensado de média pressão (CM), até 148°C, passando posteriormente no 11P29 onde troca calor com óleo de quench, entrando na retificadora de água de processo com temperatura aproximadamente de 162°C.

A geração do VD se dá em maior parte pela troca térmica com óleo de quench nos 11P15 A-L e por condensação do VM nos refeedores (11P23 A-B), como complemento. Há disponibilidade de injeção de VM para complementar o vapor de diluição dos fornos. Caso a pressão do VD no coletor esteja baixa, um controlador aumenta primeiro a vazão de VM para os 11P23, visando aumentar a taxa de geração de VD no fundo da torre. A seguir, dá início a injeção de VM diretamente na linha de vapor de diluição.

A torre geradora de VD, 11T04, opera numa faixa de pressão entre 5,5 e 7 bar, o que corresponde na torre à temperatura de aproximadamente 165°C. Sua carga pode ser injetada em três pontos diferentes: no fundo, no meio ou ainda no topo da torre de acordo com a conveniência do processo.

Na parte inferior um esgotamento muito eficiente remove a maior parte dos fenóis, resultando numa contaminação muito pequena da água de purga. A purga contínua do fundo da coluna, após ser resfriada, é enviada para esgoto oleoso que posteriormente é tratado no Sistema Integrado de Tratamento de Efluentes Líquidos (SITEL).

Após deixar a torre na altura do prato 6, o vapor passa pelo separador de gotículas (11V13), é superaquecido de aproximadamente 20°C no 11P24 e encaminhado para os fornos.

O sistema de água de processo e geração de vapor de diluição é um circuito fechado: a água que é vaporizada e limpa nas 11T04 e 05 é enviada aos fornos de pirólise na forma de VD e esta retorna às torres.

Quando a planta opera em sua capacidade máxima não é possível operar com toda a vazão necessária de AP da 11T05 para a 11T04, sendo necessário descartar água na primeira torre e injetar na segunda. Essa impossibilidade de operar o sistema em circuito

---

fechado gera uma grande quantidade de efluente a montante da 11T05, onde a água descartada ainda está contaminada com hidrocarbonetos, e exige uma injeção de água na 11T04 aumentando o consumo de utilidades.

### 3 Fundamentos Teóricos

Para escrever este capítulo de fundamentos teóricos foram utilizadas as seguintes referências: Perry e Grenn (1984), Foust *et al* (1982), McCabe e Smith (1967), Mattos e de Falco (1988) e Bega *et al* (2006).

No escoamento de um fluido em tubulações, verifica-se a perda de energia do fluido devido à necessidade de se vencer forças resistivas ao movimento, tanto internas quanto externas. A parcela de energia perdida, denominada perda de carga, traduz-se no caso de escoamento em tubos horizontais, por uma gradual diminuição da pressão do fluido, que vai caindo ponto a ponto no sentido do escoamento.

Resistências externas são aquelas devidas ao atrito do fluido com as paredes do tubo e às acelerações e mudanças de direção do fluido com seu conseqüente turbilhonamento. Esse tipo de resistência é diretamente proporcional à velocidade do fluido e à rugosidade das paredes, e inversamente proporcional ao diâmetro da tubulação.

Resistências internas são resultantes do atrito devido ao choque das moléculas do fluido entre si e estão relacionadas à viscosidade. Devido a isto, parte da energia interna do fluido é dissipada sob a forma de calor. A resistência interna será maior quanto maiores forem a velocidade e a viscosidade do fluido.

#### 3.1 Regime de Escoamento

O número de Reynolds foi proposto originalmente por Sir Osborne Reynolds, nos meados do século XIX, como um critério para caracterizar a natureza do escoamento em dutos e tubos.

O número de Reynolds é uma grandeza adimensional definida como a razão entre as forças de inércia e as forças viscosas e é dado por:

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad \text{Equação (1)}$$

onde:  $Re$  é o número de Reynolds (adimensional);

$\rho$  é a massa específica do fluido ( $\text{kg/m}^3$ );

$v$  é a velocidade de escoamento do fluido ( $\text{m/s}$ );

$D$  é o diâmetro da tubulação ( $\text{m}$ );

$\mu$  é a viscosidade absoluta do fluido ( $\text{N.s/m}^2$ ).

O escoamento de um fluido em uma tubulação pode ser laminar ou turbulento. A classificação é feita de acordo com o valor do número de Reynolds:

$Re < 2.000$  Regime laminar.

$Re > 4.000$  Regime turbulento.



Escoamento laminar é definido como aquele no qual o fluido se move em camadas, ou lâminas, uma camada escorregando sobre a adjacente. Não há mistura macroscópica entre as camadas adjacentes de fluido e a influência da rugosidade da tubulação é desprezível.

O escoamento no regime turbulento é caracterizado por movimentos aleatórios, tridimensionais, de partículas fluidas, adicionais ao movimento principal. As características do fluido possuem menor influência sobre as condições do escoamento que no caso laminar. A rugosidade adquire maior importância, especialmente quando é suficiente para perturbar o núcleo turbulento na parte central da corrente.

A rugosidade representa o valor médio entre todas as saliências encontradas na tubulação e tem dimensão de comprimento. É determinada experimentalmente e varia conforme o tipo de material. Na determinação da perda de carga utiliza-se o parâmetro adimensional rugosidade relativa que é a razão entre a rugosidade e o diâmetro interno da tubulação.

### 3.2 Fator de Atrito

O fator de atrito é um parâmetro adimensional que é utilizado para calcular a perda de carga em uma tubulação devida ao atrito. Ele pode ser função de dois parâmetros: número de Reynolds ( $Re$ ) e rugosidade relativa ( $\epsilon/D$ ) da tubulação em estudo.

De posse da rugosidade relativa e do número de Reynolds pode-se determinar o fator de atrito através do ábaco de Moody. Alguns estudiosos propuseram fórmulas teórico-experimentais que podem ser usadas, dentro de seus respectivos limites, em substituição ao ábaco de Moody.

### 3.3 Perda de Carga

A equação de Bernoulli relaciona a energia de volume, a energia cinética e a energia potencial de um fluido. Para escoamento incompressível e sem atrito, tem-se:

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} + gz_1 = \text{constante} \quad \text{Equação (2)}$$

onde:  $p$  é a pressão no ponto considerado (Pa);

$g$  é a aceleração da gravidade ( $m/s^2$ );

$z$  é a altura do ponto considerado (m).

Porém, na prática, para um escoamento entre dois pontos quaisquer ocorre perda de energia, ou seja, a energia mecânica num ponto adiante no escoamento será cada vez menor. A perda de carga expressa a energia mínima por unidade de massa necessária para um fluido escoar de um ponto para outro. Esta energia também pode ser expressa em altura de coluna de líquido.

A equação abaixo relaciona a diferença de energia entre dois pontos quaisquer de um escoamento com a perda de carga.

$$\left(\frac{p_1}{\rho} + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2} + gz_1\right) - \left(\frac{p_2}{\rho} + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2} + gz_2\right) = H_f \quad \text{Equação (3)}$$

onde:  $\alpha$  é o coeficiente de fluxo de energia cinética (adimensional).

$H_f$  é a perda de carga (J/kg).

Na forma apresentada, a perda de carga possui as dimensões de energia por unidade de massa e os subíndices 1 e 2 representam o ponto inicial e o ponto final do trecho considerado.

As perdas de carga devido à fricção são classificadas em perdas primárias ou distribuídas, e perdas secundárias ou localizadas.

### 3.3.1 Perda de Carga Distribuída

A perda de carga primária ocorre ao longo dos trechos retos de tubulação devido ao atrito. Ela depende do diâmetro e do comprimento do tubo, da rugosidade da parede, das propriedades do fluido e da velocidade de escoamento.

O ábaco de Moody é um dos métodos mais utilizados para o cálculo da perda de carga distribuída. Entra-se com os valores de rugosidade relativa e o número de Reynolds obtendo-se o valor do fator de atrito.

A fórmula da perda de carga para a aplicação do ábaco de Moody é dada por:

$$h_d = \frac{fLv^2}{D2g} \quad \text{Equação (4)}$$

onde:  $h_d$  é a perda de carga distribuída (m);

$f$  é o fator de atrito (adimensional);

$D$  é o diâmetro da tubulação (m).

### 3.3.2 Perda de Carga Localizada

A perda localizada é causada pelos acessórios da tubulação. Sua ocorrência é considerada concentrada no ponto provocando uma queda acentuada da pressão no curto espaço compreendido pelo acessório.

Um método utilizado para o cálculo da perda de carga localizada é o do comprimento equivalente que é definido como um comprimento de tubulação que causa a mesma perda de carga que o acessório. Esse comprimento equivalente permite tratar o sistema de transporte de líquido como se fosse um único conduto retilíneo. A perda de carga localizada é dada por:

$$h_l = \frac{fL_{eq}v^2}{D2g} \quad \text{Equação (5)}$$

onde:  $L_{eq}$  é o comprimento equivalente da tubulação (m).

### 3.4 Bombas Centrífugas

Bombas são máquinas operatrizes hidráulicas que conferem energia ao líquido com a finalidade de transportá-lo de um ponto para o outro obedecendo às condições do processo. Isto é, elas aumentam a pressão do líquido, a velocidade ou ambas as grandezas. A energia cedida ao líquido pode ser medida pela diferença entre os trinômios de Bernoulli na saída e na entrada da bomba, conforme a equação abaixo:

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} + z_1 g = \frac{P_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} + z_2 g \quad \text{Equação (6)}$$

As bombas podem ser classificadas pela forma com que a energia é cedida ao fluido que é transportado em dinâmicas ou turbobombas e volumétricas ou deslocamento positivo.

As turbobombas são classificadas em centrífugas, de fluxo misto, de fluxo axial e periféricas ou regenerativas.

#### 3.4.1 Bombas Centrífugas

As bombas centrífugas são aquelas em que a energia fornecida ao líquido é primordialmente do tipo cinética, sendo posteriormente convertida em grande parte em energia de pressão. A energia cinética pode ter origem puramente centrífuga ou de arrasto, ou mesmo uma combinação das duas, dependendo da forma do impelidor. A conversão de grande parte da energia cinética em energia de pressão é obtida fazendo com que o fluido que sai do impelidor passe em um conduto de área crescente.

#### 3.4.2 Curvas Características de Bombas Centrífugas

As curvas características das bombas são fornecidas pelos fabricantes e normalmente traduzem o desempenho da bomba quando operando com água. As três curvas características tradicionais estão descritas a seguir.

- Curva da carga (H) x vazão (Q): carga de uma bomba pode ser definida como energia por unidade de massa ou energia por unidade de peso que a bomba tem condições de fornecer ao fluido para uma determinada vazão.
- Curva de potência absorvida ( $P_{\text{abs}}$ ) x vazão (Q): potência absorvida é aquela que a bomba recebe ou absorve do acionador (motor ou turbina).
- Curva de rendimento total ( $\eta$ ) x vazão (Q): rendimento é a razão entre a potência útil cedida ao fluido e a potência absorvida pela bomba.

#### 3.4.3 Cavitação

O fenômeno de cavitação é muito importante no estudo das bombas. Ocorre quando existe uma região de baixa pressão onde um valor abaixo da pressão de vapor do líquido naquela temperatura é atingido. Pela depressão formam-se bolhas próximas à superfície. As bolhas ao atingirem regiões de maior pressão tendem a colapsar formando um jato líquido que incide sobre a superfície, danificando-a (KRAHL, 2007).

Os inconvenientes da cavitação são: barulho, vibração, alteração nas curvas características e danificação do material, diminuindo, desta forma, o seu tempo de vida

útil. O barulho e a vibração resultam do colapso das bolhas. A presença das bolhas devido ao seu volume influência consideravelmente no desempenho da bomba.

#### 3.4.4 NPSH

O termo NPSH é proveniente de nomenclatura inglesa constituindo as iniciais de *Net Positive Suction Head* e recebe duas denominações distintas: NPSH disponível e NPSH requerido.

O NPSH disponível é interpretado fisicamente como sendo a energia absoluta por unidade de massa existente no flange de sucção da bomba, acima da pressão de vapor. O NPSH disponível depende das características do sistema e do líquido bombeado como pode ser visto:

$$NPSH_{disp} = h_s + \frac{P_{atm} - P_v}{\gamma} \quad \text{Equação (7)}$$

onde:  $h_s$  é a altura manométrica de sucção (m);

$P_{atm}$  é a pressão atmosférica local (Pa);

$P_v$  é a pressão de vapor do líquido (Pa);

$\gamma$  é o peso específico na temperatura de bombeamento (N/m<sup>3</sup>).

O NPSH requerido depende apenas das características da bomba e é a quantidade mínima de energia absoluta por unidade de massa acima da pressão de vapor que deve existir no flange de sucção para que não haja cavitação.

O NPSH requerido pode ser obtido pela curva característica da bomba  $NPSH_{req}$  x vazão ou através da equação que segue:

$$NPSH_{req} = h_{fi} + \frac{V_1^2}{2g} + \frac{\lambda V_{r1}^2}{2g} \quad \text{Equação (8)}$$

onde:  $h_{fi}$  é a perda de carga entre o flange de sucção e o olho do impelidor (m);

$V_1$  é a velocidade absoluta no olho do impelidor (m/s);

$V_{r1}$  é a velocidade relativa no olho do impelidor (m/s);

$\lambda$  é o fator experimental que depende do projeto da sucção da bomba (adimensional).

Para evitar que a bomba cavite o NPSH disponível deve ser maior que o NPSH requerido. De um modo geral, a margem de segurança usada na prática é de 2 ft (0,6m) de líquido:

$$NPSH_{disp} \geq NPSH_{req} + 0,6 \text{ m} \quad \text{Equação (9)}$$

### 3.5 Válvulas de Controle

As válvulas de controle desempenham um papel importante no controle automático de processos industriais que dependem da correta distribuição e controle de líquidos, gases e vapores. Tais processos dependem de algum tipo de elemento final de controle para executar tarefas.

Os elementos finais de controle que têm na válvula seu principal representante são responsáveis pela manipulação do fluxo de matéria ou de energia, que tem como finalidade atuar no processo de modo a corrigir o valor da variável controlada sempre que houver algum desvio em relação ao valor desejado.

Atualmente, o dimensionamento de válvulas de controle é efetuado por programas de computador que fornecem o coeficiente de vazão ( $C_v$ ) da válvula.

Toda válvula de controle tem seu chamado coeficiente de vazão que define sua capacidade, valor este publicado pelos fabricantes em função do tipo de válvula, diâmetro do corpo e características de seus internos.

Por definição, o coeficiente  $C_v$  de uma válvula de controle é a vazão de água em galões por minuto que passa pela válvula, quando a queda de pressão através da mesma for de 1 psi. Trata-se, basicamente, de um índice cujo valor conduz à identificação do diâmetro da válvula, necessário ao controle da variável à qual a válvula se destina, em função das condições de processo.

O cálculo de uma válvula de controle conduz ao  $C_v$  requerido que depende da vazão no sistema. A escolha da melhor válvula, entretanto, é função também da análise da curva característica da mesma, onde a abertura da válvula nas condições máxima e mínima deverá ser observada na seleção do  $C_v$  da válvula.

## 4 Metodologia

A Figura 4.1 mostra um fluxograma simplificado do Sistema de Água de Processo que foi avaliado neste estudo.

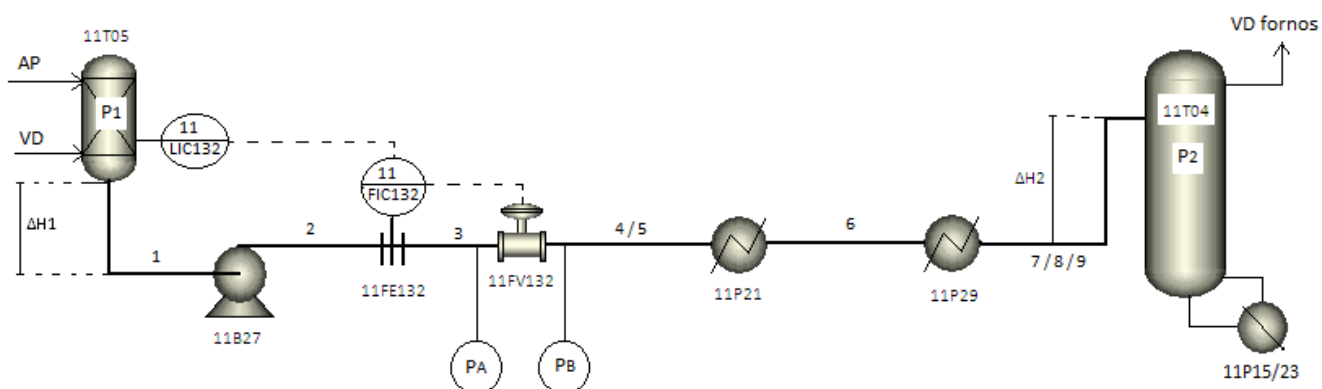


Figura 4.1.: Fluxograma simplificado do sistema de água de processo.

O sistema de água de processo inicia na Torre de Água de Processo (11T05), que contém 14 pratos valvulados de duplo passe, com injeção de VD no fundo para fazer a esgotamento de hidrocarbonetos residuais e purificar a água de processo que irá para a torre geradora de VD. As variáveis chaves são temperatura e pressão que em operação normal são controladas em 123°C e 1,2 bar.

A energia necessária para o escoamento da AP é fornecida por bombas do tipo centrífuga, 11B27A/B, sendo que uma opera e a outra permanece como reserva. Para maior confiabilidade do processo uma é acionada por motor elétrico e a outra por turbina a vapor.

A jusante das bombas a medição de vazão é realizada por uma placa de orifício e uma válvula de controle de atuador pneumático (11FV132) opera em cascata com o nível da 11T05.

A AP é succionada do fundo da 11T05 e bombeada para dois pré-aquecedores. O primeiro é o 11P21 onde a AP é aquecida de 123°C para 138°C pela troca térmica com condensado de média pressão. Esse permutador é do tipo casco tubo e a água de processo passa pelos tubos. O segundo é o 11P29 que aquece a AP a 160°C com óleo de quench. Também é um trocador de calor do tipo casco tubo, mas nesse caso a AP passa pelo casco.

Depois de aquecida a AP é enviada para a Geradora de Vapor de Diluição (11T04). É uma torre de dois diâmetros, com 16 pratos perfurados de duplo passe, com possibilidade de injeção de carga no topo, meio e fundo. Possui uma retirada lateral de VD, no sexto prato que vai para os fornos e uma retirada no topo da torre que devolve os hidrocarbonetos estripados para o processo. Em operação normal trabalha com temperatura de 170°C e pressão de 6,5 bar.

O objetivo dessa torre é gerar vapor de diluição especificado para os fornos de pirólise através da água de processo. A geração do VD se dá em maior parte pela troca térmica com óleo de quench nos 11P15 A-L e por condensação do VM nos refervedores (11P23 A-B), como complemento. Há disponibilidade de injeção de VM para complementar o vapor

de diluição dos fornos. Caso a pressão do VD no coletor esteja baixa, um controlador aumenta primeiro a vazão de VM para os 11P23, visando aumentar a taxa de geração de VD no fundo da torre. A seguir, dá início a injeção de VM diretamente na linha de vapor de diluição.

Desta forma, conhecido o sistema sobre o qual se deseja trabalhar, podem-se iniciar as etapas de determinação das perdas de carga do sistema para posterior avaliação da capacidade do mesmo.

Para os cálculos de perda de carga foram feitas as seguintes considerações:

1. escoamento em regime permanente, isto é, que todos os valores de todas as grandezas não variem com o tempo;
2. escoamento isotérmico de tal forma que não haja variações de temperatura ao longo da tubulação;
3. fluido homogêneo sem mudança de fase, não havendo variações de um ponto para outro ou de um instante para outro;
4. escoamento incompressível.

Com o objetivo de determinar a perda de carga do sistema foram avaliados os Fluxogramas de Engenharia da Unidade para verificar as linhas do Sistema de Água de Processo. Identificados os números das linhas solicitou-se ao arquivo técnico da Braskem os diagramas isométricos das mesmas.

Diagramas isométricos são documentos técnicos que apresentam equipamentos, linhas, acidentes, válvulas e outros acessórios de um processo. Eles contêm informações importantes da construção do sistema como a altura e comprimento de cada linha, a distância exata entre os acessórios e o material do qual são feitas as tubulações, como pode ser visto no Anexo 1.

A fim de facilitar o estudo, o sistema foi dividido em trechos de tubulações de acordo com sua distribuição nos isométricos. Esses trechos estão numerados e indicados na Figura 4.1.

Para calcular a perda de carga distribuída, ou seja, as perdas por atrito nos trechos retos de tubulação verificou-se o comprimento das tubulações existentes no processo utilizando os diagramas isométricos.

A perda de carga localizada se deve à perda de energia cinética do fluido devido a alterações no escoamento e também devido ao seu atrito com os acessórios de tubulação, como cotovelos, válvulas, etc. Para determiná-la é necessário verificar os acessórios e válvulas existentes nos diferentes trechos de tubulação considerados no sistema. Esse levantamento também foi feito através do isométrico de cada trecho de tubulação, tendo em vista a riqueza de informações e detalhes desta documentação técnica.

Para os acessórios e válvulas utilizou-se o método do comprimento equivalente que consiste em fixar o valor do comprimento reto de tubulações que reproduziria, nas

mesmas condições, a mesma perda de carga que o acessório em questão. Os valores de  $L/D$  são dados do apêndice C do Foust *et al* (1982).

Os dados relativos ao fluido, como massa específica e viscosidade, em cada trecho de tubulação foram obtidos através de amostras coletadas na planta e analisadas no laboratório da Braskem.

A vazão utilizada para o cálculo da velocidade de escoamento do fluido foi determinada pela soma da vazão máxima que cada usuário de AP pode demandar, totalizando 192 t/h. Considerou-se uma margem de erro de 10% e a vazão utilizada foi de 211 t/h. Os usuários de AP são os fornos de pirólise, a injeção de VD na 11T05 e a injeção de VD para selagem de algumas válvulas dos fornos.

Então, determinou-se o número de Reynolds para cada trecho de tubulação utilizando a Equação (1). Todos os valores obtidos ficaram acima de 4.000 caracterizando um regime de escoamento plenamente turbulento, no qual o fator de atrito depende apenas da rugosidade relativa.

A rugosidade foi obtida no apêndice C do Foust *et al* (1982) de acordo com o material da tubulação, neste caso aço comercial. A rugosidade relativa foi determinada pela razão entre a rugosidade e o diâmetro da tubulação. Como fator de atrito depende apenas da rugosidade relativa utilizou-se a correlação de Churchill, mostrada abaixo, para o cálculo deste.

$$f = 8 \left[ \left( \frac{8}{Re} \right)^{12} + \frac{1}{(A+B)^{\frac{3}{2}}} \right]^{\frac{1}{12}} \quad \text{Equação (10)}$$

A correlação de Churchill pode ser usada quando o escoamento é plenamente desenvolvido e para quaisquer valores de rugosidade relativa.

Deve-se calcular dois fatores para chegar o fator de atrito:

$$A = \left[ 2,457 \ln \frac{1}{\left( \frac{7}{Re} \right)^{0,9} + 0,27 \left( \frac{\epsilon}{D} \right)} \right]^{16} \quad \text{Equação (11)}$$

$$B = \left( \frac{27530}{Re} \right)^{16} \quad \text{Equação (12)}$$

onde:  $\epsilon/D$  é a rugosidade relativa (adimensional).

Uma vez determinado o fator de atrito, a velocidade de escoamento e o comprimento total das tubulações, a perda de carga foi calculada utilizando a equação:

$$\frac{\Delta P}{\gamma} = \frac{fLv^2}{2gD} \quad \text{Equação (13)}$$

A fim de determinar a diferença de cota entre sucção e descarga das bombas, ainda utilizando os isométricos, determinou-se as distâncias verticais entre a linha central horizontal da bomba e o bocal de saída da 11T05 e entre a linha central horizontal da bomba e o bocal de alimentação da 11T04.



Nas duas torres foram considerados os casos em que a demanda da bomba é maior. Na 11T05 é a altura com o nível em 0% e na 11T04 é a alimentação entrando no bocal de topo.

O transporte do fluido é realizado por uma bomba centrífuga. Para determinar a carga fornecida pela bomba utilizou-se a folha de dados e as curvas características da mesma. Considerando o diâmetro de projeto do rotor entra-se na curva *head* contra vazão com a vazão de estudo e obtêm-se o *head* da bomba. O  $\Delta P$  é dado por:

$$\Delta P = \rho g H \quad \text{Equação (14)}$$

onde:  $H$  é a carga da bomba (m).

Outro parâmetro importante que foi determinado através das curvas características da bomba é o saldo positivo de carga na sucção ou  $NPSH_{req}$ .

Para verificar se a bomba não sofre cavitação na vazão máxima do sistema calculou-se o  $NPSH$  disponível do sistema utilizando a seguinte equação:

$$NPSH_{disp} = z_s + \frac{P_s}{\gamma} - \Delta P_s + \frac{P_{atm} - P_v}{\gamma} \quad \text{Equação (15)}$$

Como o líquido bombeado está no seu ponto de ebulição, o  $NPSH_{disp}$  é providenciado apenas pela altura de sucção, pois  $P_s = P_v + P_{atm}$  e a Equação (15) pode ser simplificada para:

$$NPSH_{disp} = z_s - \Delta P_s \quad \text{Equação (16)}$$

A perda de carga provocada pela placa de orifício que mede a vazão no sistema foi determinada usando o software FlowCalc. Os dados necessários como informações do orifício, dimensões da placa e da linha e condições de operação foram retirados da folha de dados do elemento primário de medição, vide Anexo 2.

Com o objetivo de avaliar a perda de carga nos permutadores que compõe o sistema procedeu-se da seguinte forma: no 11P29 utilizaram-se informações da folha de dados do equipamento para calcular o  $\Delta P$  na vazão desejada. No 11P21 não foi possível usar a mesma metodologia, pois a folha de dados estava incompleta. Então, foram instalados indicadores de pressão nos flanges de entrada e saída do trocador de calor para calcular a queda de pressão e a vazão foi obtida através da indicação de um transmissor de vazão.

Como a vazão da folha de dados e a vazão medida na área, no caso do 11P21, não correspondem às vazões de trabalho utilizou-se uma extrapolação quadrática para estimar a perda de carga na vazão máxima:

$$\left(\frac{Q_1}{Q_2}\right)^2 = \frac{\Delta P_1}{\Delta P_2} \quad \text{Equação (17)}$$

onde:  $Q_1$  é a vazão indicada na folha de dados (kg/h);

$Q_2$  é a vazão máxima do sistema (kg/h);

$\Delta P_1$  é a queda de pressão para a vazão indicada na folha de dados (bar);

$\Delta P_2$  é a queda de pressão para a vazão máxima (bar).

O último elemento do sistema que deve ser verificado é a válvula de controle. Como o sistema já está em operação a melhor maneira de verificar se a válvula está subdimensionada é determinar a perda de carga disponível para a válvula e calcular o Cv requerido para esse  $\Delta P$  e para a vazão em estudo. Para avaliar a válvula de controle, esse valor obtido deve ser comparado com o Cv da válvula que consta na folha de dados fornecida pelo fabricante.

A fim de determinar o Cv requerido, primeiramente verificou-se a pressão a montante e a jusante da válvula, indicadas na Figura 4.1 como  $P_A$  e  $P_B$ , respectivamente.

Sendo que  $P_A$  e  $P_B$  foram calculadas através das equações:

$$P_A = P_1 + \Delta H_1 - \sum \Delta P_l + \Delta P_{11B27} - \Delta P_{11FE132} \quad \text{Equação (18)}$$

onde:  $P_1$  é a pressão na torre de sucção da bomba (bar);

$\Delta H_1$  é a diferença de altura entre a torre e a bomba (bar);

$\sum \Delta P_l$  é a perda de carga nas linhas a montante da válvula (bar);

$\Delta P_{11B27}$  é a carga fornecida pela bomba (bar);

$\Delta P_{11FE132}$  é a perda de carga na placa de orifício (bar).

$$P_B = P_2 + \Delta H_2 + \sum \Delta P_l + \Delta P_{11P21} + \Delta P_{11P29} \quad \text{Equação (19)}$$

onde:  $P_2$  é a pressão na torre de descarga da bomba (bar);

$\Delta H_2$  é a diferença de altura entre a bomba e a torre (bar);

$\sum \Delta P_l$  é a perda de carga nas linhas a jusante da válvula (bar);

$\Delta P_{11P21}$  é a perda de carga no permutador (bar);

$\Delta P_{11P29}$  é a perda de carga no permutador (bar).

A perda de carga disponível para a válvula é dada por:

$$\Delta P_{\text{valv}} = P_A - P_B \quad \text{Equação (20)}$$

Para determinar o Cv requerido, utilizou-se o software ValSpeq da Masoneilan que é a fabricante da válvula de controle em questão. Fornecendo algumas informações como modelo e Cv da válvula, tipo de fluido, temperatura, vazão e  $\Delta P$  disponível, o software calcula o Cv requerido.

## 5 Resultados e Discussão

Os elementos do sistema de água de processo que poderiam ser os limitantes de vazão são as tubulações, a bomba e a válvula de controle.

A fim de avaliar as tubulações estas foram divididas em trechos e a velocidade determinada para cada um deles consta na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Velocidade nos trechos de tubulação.

Trecho		N° da linha	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Viscosidade (cP)	Vazão (m <sup>3</sup> /h)	Velocidade (m/s)
1	sucção	10"-11-AQ-101-507.1-DA9	893	0,22	236,26	1,290
2	descarga	8"-11-AQ-101-508.1-DA9	893	0,22	236,26	2,033
3	descarga	8"-11-AQ-101-509.1-DA9	893	0,22	236,26	2,033
4	descarga	8"-11-AQ-101-509.1-DA9	893	0,22	236,26	2,033
5	descarga	8"-11-AQ-26-022.1-DA9	893	0,22	236,26	2,033
6	descarga	8"-11-AQ-26-023.1-DA9	884	0,21	238,67	2,054
7	descarga	8"-11-AQ-26-038-DA9	869	0,19	242,78	2,090
8	descarga	8"-11-AQ-26-038-DA9	869	0,19	242,78	2,090
9	descarga	8"-11-AQ-26-038.1-DA9	869	0,19	242,78	2,090

Segundo TELLES (2001), o valor recomendado de velocidade para sucção de bombas que operam com água é entre 1 e 2,5 m/s. Na sucção da 11B27 a velocidade do fluido é de 1,29 m/s. Na descarga da bomba, em todos os trechos, a velocidade ficou acima da mínima recomendada que é 2 m/s e abaixo da máxima que é 4 m/s.

Como a velocidade com que o fluido escoar nas tubulações está dentro dos limites indicados na literatura pode-se dizer que as tubulações estão adequadamente dimensionadas para a vazão máxima do sistema em questão.

O fator de atrito, que é necessário para determinar a perda de carga no sistema, foi determinado utilizando-se a correlação de Churchill, Equação (10). Para isso foram determinados o número de Reynolds e a rugosidade relativa e os valores obtidos estão na Tabela 5.2.

Para determinar a perda de carga por atrito com a tubulação e seus acessórios realizou-se um levantamento dos acidentes e acessórios tanto na linha de sucção quanto nas de descargas e esses estão listados na Tabela 5.3.

Tabela 5.2: Número de Reynolds e rugosidade relativa em cada trecho de tubulação do sistema de água de processo.

Trecho	N° da linha	Reynolds	Rugosidade Relativa ( $\epsilon/D$ )	Churchill			
				A	B	f	
1	Sucção	10"-11-AQ-101-507.1-DA9	1285455,819	0,00018	7,09E+22	1,96E-27	0,01114
2	Descarga	8"-11-AQ-101-508.1-DA9	1613866,346	0,000225	9,55E+22	5,14E-29	0,01073
3	Descarga	8"-11-AQ-101-509.1-DA9	1613866,346	0,000225	9,55E+22	5,14E-29	0,01073
4	Descarga	8"-11-AQ-101-509.1-DA9	1613866,346	0,000225	9,55E+22	5,14E-29	0,01073
5	Descarga	8"-11-AQ-26-022.1-DA9	1613866,346	0,000225	9,55E+22	5,14E-29	0,01073
6	Descarga	8"-11-AQ-26-023.1-DA9	1690717,124	0,000225	1,01E+23	2,44E-29	0,01065
7	Descarga	8"-11-AQ-26-038-DA9	1868687,348	0,000225	1,15E+23	4,92E-30	0,01048
8	Descarga	8"-11-AQ-26-038-DA9	1868687,348	0,000225	1,15E+23	4,92E-30	0,01048
9	Descarga	8"-11-AQ-26-038.1-DA9	1868687,348	0,000225	1,15E+23	4,92E-30	0,01048

Tabela 5.3: Lista de acessórios e acidentes encontrados no sistema.

Trecho	N° da linha	Joelho		T	Válvulas			Bocais		Redução	Expansão	
		90°	45°		gaveta	Retenção	globo	In	out			
1	Sucção	10"-11-AQ-101-507.1-DA9	6	2	2	1	0	0	1	1	1	0
2	Descarga	8"-11-AQ-101-508.1-DA9	10	0	1	2	1	0	0	1	1	1
3	Descarga	8"-11-AQ-101-509.1-DA9	4	0	0	1	0	0	0	0	0	1
4	Descarga	8"-11-AQ-101-509.1-DA9	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	Descarga	8"-11-AQ-26-022.1-DA9	1	1	2	1	0	0	1	0	0	1
6	Descarga	8"-11-AQ-26-023.1-DA9	6	4	1	2	0	0	1	1	1	1
7	Descarga	8"-11-AQ-26-038-DA9	7	2	5	1	0	0	0	1	1	0
8	Descarga	8"-11-AQ-26-038-DA9	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	Descarga	8"-11-AQ-26-038.1-DA9	9	2	2	1	0	0	1	0	0	0

Os valores de comprimentos equivalente, reto e total de cada trecho são mostrados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4: Comprimentos equivalente, reto e total do sistema.

Trecho	N° da linha	Lreto (m)	Leq (m)	Ltotal (m)	
1	sucção	10"-11-AQ-101-507.1-DA9	22,12	67,83	89,95
2	descarga	8"-11-AQ-101-508.1-DA9	25,08	98,06	123,14
3	descarga	8"-11-AQ-101-509.1-DA9	6,22	27,09	33,31
4	descarga	8"-11-AQ-101-509.1-DA9	77,15	91,44	168,59
5	descarga	8"-11-AQ-26-022.1-DA9	3,01	20,34	23,35
6	descarga	8"-11-AQ-26-023.1-DA9	33,021	59,41	92,43
7	descarga	8"-11-AQ-26-038-DA9	40,168	72,40	112,56
8	descarga	8"-11-AQ-26-038-DA9	64,025	30,48	94,51
9	descarga	8"-11-AQ-26-038.1-DA9	61,445	72,29	133,74

A perda de carga foi calculada utilizando a Equação (13) e os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5.5.

Tabela 5.5: Perda de carga em cada trecho de linha.

Trecho	N° da linha	$\Delta P/L$ (Pa/m)	$\Delta P$ fric (Pa)	$\Delta P$ fric (kgf/cm <sup>2</sup> )	$\Delta P/\gamma$ (m)	
1	Sucção	10"-11-AQ-101-507.1-DA9	32,577	2930,434	0,030	0,335
2	Descarga	8"-11-AQ-101-508.1-DA9	97,480	12003,658	0,122	1,370
3	Descarga	8"-11-AQ-101-509.1-DA9	97,480	3246,709	0,033	0,371
4	Descarga	8"-11-AQ-101-509.1-DA9	97,480	16434,079	0,168	1,876
5	Descarga	8"-11-AQ-26-022.1-DA9	97,480	2275,783	0,023	0,260
6	Descarga	8"-11-AQ-26-023.1-DA9	97,734	9033,432	0,092	1,042
7	Descarga	8"-11-AQ-26-038-DA9	97,835	11012,695	0,112	1,292
8	Descarga	8"-11-AQ-26-038-DA9	97,835	9245,885	0,094	1,085
9	Descarga	8"-11-AQ-26-038.1-DA9	97,835	13084,388	0,133	1,535

Então, a perda de carga total devido à fricção na sucção da bomba é de 0,335 m e na descarga 8,829 m.

As diferenças de altura entre a bomba e os pontos de sucção e descarga, mostrados na Figura 4.1, também foram determinados a partir dos isométricos. Os valores encontrados foram  $\Delta H_1$  igual a 4,253 m e  $\Delta H_2$  igual a 25,873 m.

A bomba é responsável por transmitir ao fluido a energia necessária para o deslocamento deste de um ponto ao outro. Determinou-se a carga produzida pela bomba a partir da curva *head* contra vazão conforme a Figura 5.1. O valor encontrado para vazão de 211 t/h foi H igual a 105 m.

Através das curvas características determinou-se também o NPSH requerido pela bomba que é de 5,2 m.

O NPSH disponível calculado utilizando a Equação (16) foi de 3,918 m. Mas esse valor não é representativo, pois ele foi determinado com nível da torre de sucção em 0%, condição esta incomum no processo.

Então, calculou-se o nível mínimo de líquido na torre para que não haja cavitação, ou seja, quando o  $NPSH_{req} = NPSH_{disp}$ . Os NPSH se igualam quando a 11T05 estiver com indicação de nível em 7,59%.

Como o controle de nível da torre é feito em 50%, a bomba não cavita nas condições de estudo. Para esse nível o NPSH disponível é 6,213 m. Ele é maior que o requerido pela bomba mesmo considerando a margem de segurança de 0,6 m indicada na literatura.

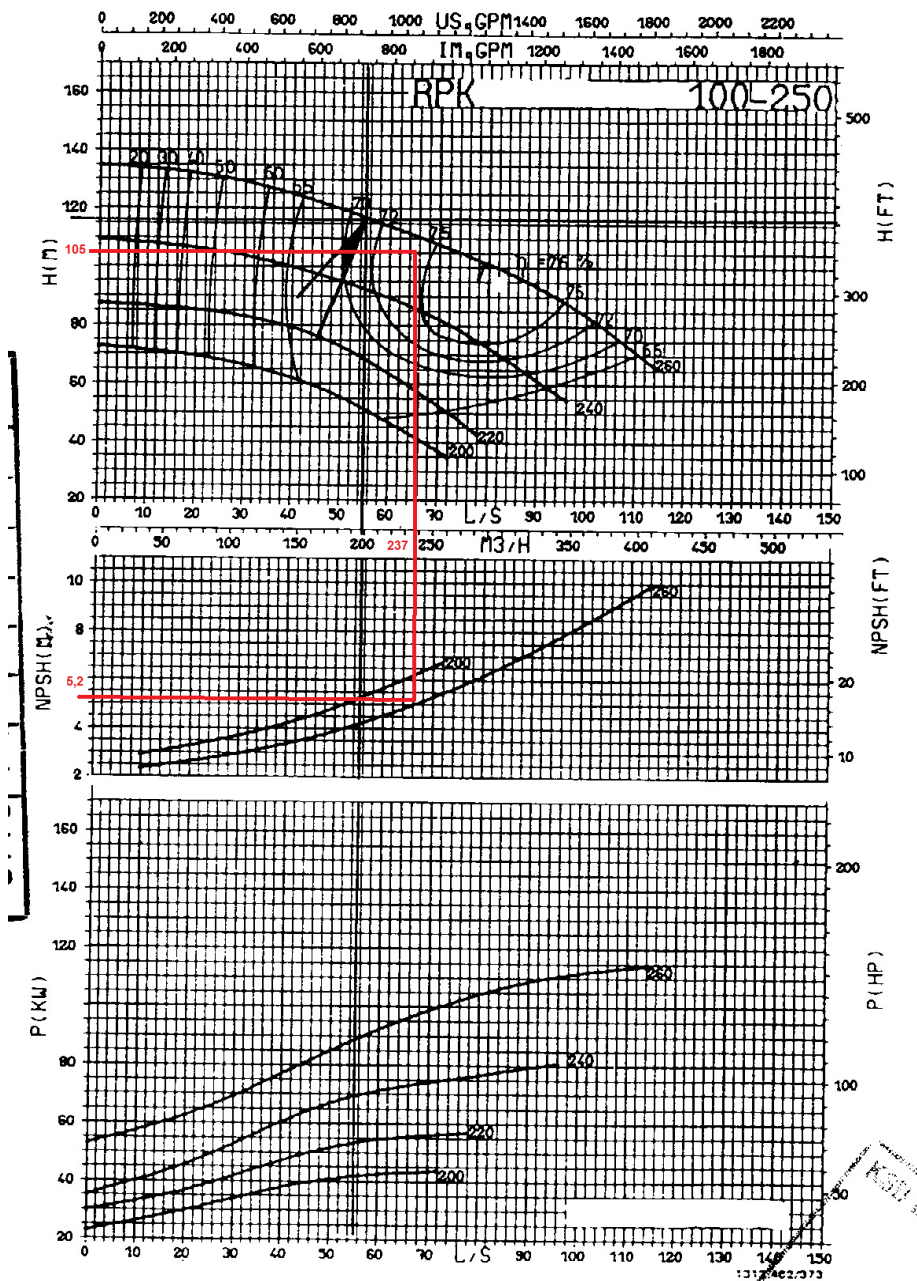


Figura 5.1: Curvas características da bomba fornecidas pelo fabricante.

A placa de orifício que mede a vazão provoca uma perda de carga de 0,066 bar que corresponde a 0,739 m. Esse valor foi obtido através do software FlowCalc como pode ser visto na Figura 5.2.

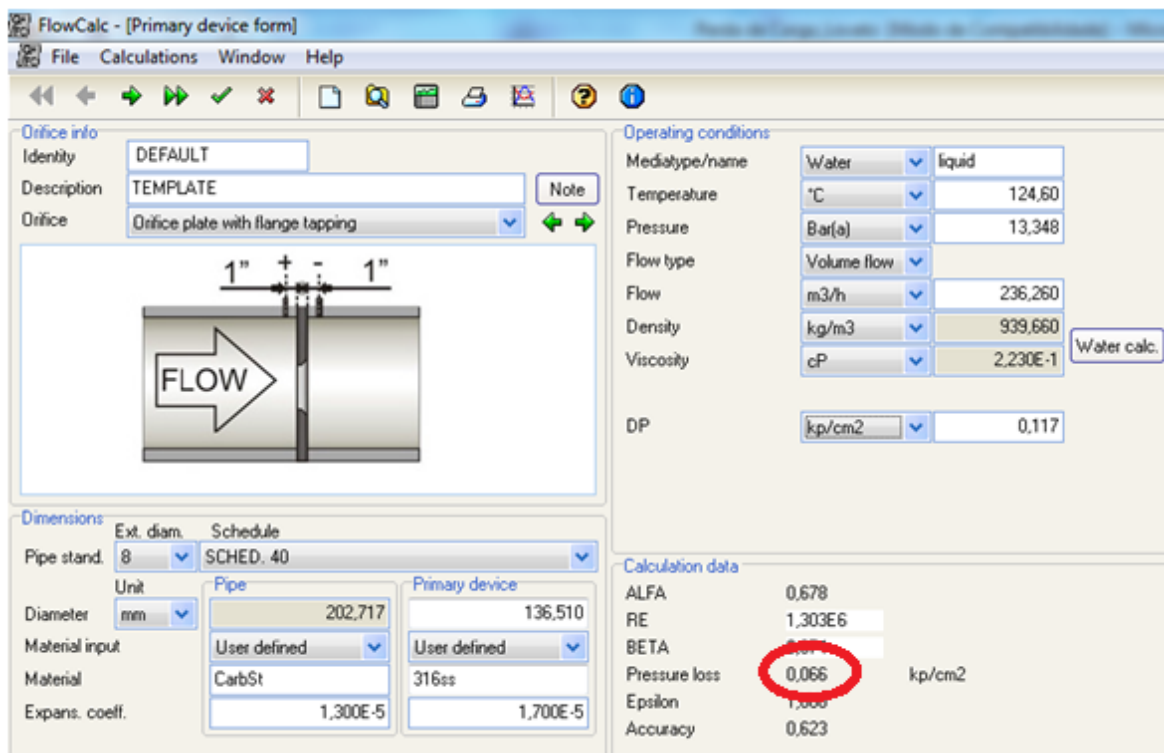


Figura 5.2: Imagem da tela do software FlowCalc.

Os resultados de perda de carga encontrados para os permutadores estão na Tabela 5.6. Utilizando a Equação (17) obteve-se 9,384 m para o 11P21 e 1,666 m para o 11P29.

Tabela 5.6: Perda de carga nos permutadores.

Permutador	Densidade (kg/m³)	Vazão 1		$\Delta P_1$ (kgf/cm²)	Vazão Max (m³/h)	$\Delta P_2$ (kgf/cm²)	$\Delta P_2$ (Pa)	$\Delta P_2/\gamma$ (m)
		(kg/h)	(m³/h)					
11P21	884	102000	115,385	0,2	236,26	0,8385	82207,9	9,384
11P29	869	170000	195,627	0,1	238,67	0,1488	14592,2	1,666

Para determinar o diferencial de pressão disponível para a válvula de controle utilizou-se os valores de perda de carga do sistema obtidos anteriormente. Estes estão listados na Tabela 5.7.

Tabela 5.7: Perdas de carga no sistema.

$P_1 = 1,2$ bar	$P_2 = 7$ bar
$\Delta H_1 = 0,380$ bar	$\Delta H_2 = 2,250$ bar
$\sum \Delta P_1 = 0,152$ bar	$\sum \Delta P_1 = 0,656$ bar
$\Delta P_{11B27} = 9,382$ bar	$\Delta P_{11P21} = 0,839$ bar
$\Delta P_{11FE132} = 0,066$ bar	$\Delta P_{11P29} = 0,149$ bar

Com as Equações (18), (19) e (20) determinaram-se  $P_A$  igual a 10,744 bar,  $P_B$  igual a 10,893 bar e  $\Delta P_{valv}$  igual a - 0,149 bar. Assim, nessas condições de operação, não há  $\Delta P$

disponível para válvula. Mas esse valor foi determinado considerando nível da 11T05 em 0%, condição incomum no processo.

Então, como o nível da 11T05 é controlado em 50%, determinou-se o peso de coluna de água equivalente à este nível e obteve-se 2,295 m ou 0,205 bar. Esse valor foi somado à  $\Delta H_1$  e calculou-se novamente  $P_A$  e  $\Delta P_{valv}$  obtendo-se 10,949 bar e 0,056 bar, respectivamente.

Considerando as condições normais de operação e utilizando o software ValSpeq obteve-se o valor do Cv requerido para esse diferencial de pressão na vazão de 211 t/h como pode ser visto na Figura 5.3.

The screenshot shows the ValSpeq software interface with the following data:

**ITEM:** 0  
**TAG:** 11FV132

**Fluid Type:** Liquid, Standard, Fluid Name: Water, PED Fluid Group: 1

**Pipe In:** size 8, sch 40, o.d. 8.625, wall 0.322  
**Pipe Out:** size 8, sch 40, o.d. 8.625, wall 0.322

**Type:** Globe, Rotary  
**Line:** 35000  
**Model:** -35012  
**Size:** 6 in, 6x6x6  
**Matl Group:** Carbon Steel  
**Rating:** ASME, CL 300  
**Body Matl:** A216 gr WCC  
**End Conn:** RF Flanges  
**Bonnet Type:** Integral  
**Trim:** Eccentric plug  
**Plug:** Eccentric  
**Flow Direct:** Flow to Oper, Leakage IV  
**Seat Ring:** Clamped  
**Rated Cv:** 300  
**Stem Matl:** A564 gr 630 (1075)  
**Plug Matl:** 316L St. St. Hard Faced  
**Seat Matl:** 316 St. St.

**Calculation Results:**

	Min	Norm	Max	Other	Units
flow rate	211				t/h
inlet pressure	12.6				kgf/cm2 g
outlet pressure	12.54				kgf/cm2 g
pressure drop	0.056				kgf/cm2
temperature	125				deg C
vapor pressure	2.369				kgf/cm2 a
critical pressure	225.4				kgf/cm2 a
viscosity	0.232				centipoise
liquid Gf	0.9393				
flowing cond.	Subcritical				
required Cv	1052				
oversize req Cv	1052				Cv x 1
Sound Level, IEC	< 70				dBA (+5/-5)
% lift	100				
% Cv	350.7				
FL	0.88				
critical FL	0.07246				
33 ft/s dia.	3.498				in
valve velocity	11.22 [0]				ft/s [Inlet [0]outlet
% Flashing	0				

**Summary:** PED Indeterminate, PED Classification: Rated Cv is less than required Cv

Figura 5.3: Imagem da tela do software ValSpeq.

O Cv requerido para estas condições é de 1052, mas esse valor está acima do indicado na especificação da válvula que é 300.

A válvula de controle 11FV132 é de 6 in e ela possui internos que podem ser substituídos com a finalidade de alterar o Cv da válvula. Para esse modelo da Masoneilan é possível obter valores de Cv de 200, 300 e 500.

Nesse caso, trocar os internos não seria suficiente para atingir o Cv requerido. Assim pode-se concluir que a válvula está subdimensionada para a vazão máxima e é necessário substituí-la.



## 6 Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

A avaliação da capacidade máxima de um sistema quando ocorre um aumento da produção na planta do qual ele faz parte é de extrema importância para que os recursos investidos nessa ampliação não sejam em vão.

A Unidade de Olefinas 1, na parada geral de manutenção de 2008, teve sua capacidade aumentada com a introdução de um forno de craqueamento de nafta de 30 t/h de carga. Por isso surgiu a necessidade de averiguar se o sistema de água de processo está adequadamente dimensionado para essa nova vazão.

Os possíveis limitadores de vazão deste sistema são as tubulações, a bomba e a válvula de controle. A partir do estudo realizado pode-se concluir que:

- a velocidade de escoamento do fluido dentro das tubulações está de acordo com o intervalo indicado na literatura e assim, pode-se dizer que as tubulações estão adequadas para a nova vazão. Na sucção da bomba a velocidade é de 1,29 m/s e o recomendado é entre 1 e 2,5 m/s e na descarga a velocidade é de 2,05 m/s enquanto o recomendado é entre 2 e 4 m/s.

- a bomba que fornece energia para o escoamento do fluido não sofre cavitação nas condições normais de processo para a vazão máxima possível. O NPSH disponível no sistema é de 6,2 m e o NPSH requerido é de 5,2 m.

- a válvula de controle está subdimensionada para a vazão máxima, pois o Cv requerido é maior do que o Cv da válvula. O coeficiente de vazão da válvula indicado pelo fabricante é 300 e o Cv requerido para a condição de processo avaliada é de 1052.

Frente aos resultados encontrados neste estudo do sistema de água de processo, sugere-se como trabalhos futuros o dimensionamento da válvula de controle a ser colocada no lugar da atual a fim de atender à nova demanda de produção e o estudo do efeito desta nova válvula no controle de nível da 11T05.

## 7 Referências

PERRY, R. H.; GREEN, D. W.; MALONEY, J. O., Perry's Chemical Engineers' Handbook, New York, 6<sup>th</sup> edition, 1984.

MACCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOT, P., Unit Operations of Chemical Engineering, Mc Graw-Hill Book Co.: New York. 1967.

FOUST, A. S.; WENZEL, L. A.; CLUMP, C. W.; MAUS, L.; ANDERSEN, L. B., Princípios das Operações Unitárias, Livros Técnicos e Científicos: Rio de Janeiro, 2<sup>a</sup> Ed, 1982.

MATTOS, E. E.; DE FALCO, R., Bombas Industriais, Editora Interciência: Rio de Janeiro, 2<sup>a</sup> edição, 1998.

TELLES, P. C. S, Tubulações Industriais: cálculo, Livros Técnicos e Científicos: Rio de Janeiro, 9<sup>a</sup> edição, 1999.


TELLES, P. C. S, Tubulações Industriais: materiais, projeto e montagem, Livros Técnicos e Científicos: Rio de Janeiro, 10<sup>a</sup> edição, 2001.

KRAHL, C., Apostila da Disciplina de Mecânica dos Fluidos – ENG07010. Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. UFRGS, 2007.

BEGA, E. A.; DELMÉE, G. J.; COHN, P. E.; BULGARELLI, R.; KOCH, R.; FINKEL, V. S., Instrumentação Industrial, Interciência IBP: Rio de Janeiro, 2<sup>a</sup> edição, 2006.



## ANEXO 2: Folha de Dados da Placa de Orifício

GENERAL	1	Tag Number		011-FE -132				
	2	Module	P&ID	COPESUL-0011-004-0101				
	3	Service						ÁGUA DE PROCESSO P/ A 011-T-04
	4	Line Number						8"11AQ101.509.1DA9
	5	Line Size	Line Sched.	8	In	40		
	6	Line Internal Diameter						7.981
	7	Line Material						
	8							
PROCESS CONDITIONS	9	Fluid	Phase	Water		Water		
	10	Flow Min.	Operating	Flow Max.	101000	166818	238311 kg/h	
	11	Press. Min.	Operating	Press. Max.	12.6	12.6	12.6 kgf/cm <sup>2</sup> -g	
	12	Temp. Min.	Operating	Temp. Max.	124.6	124.6	124.6 °C	
	13	Den. min	Operating	Density Max.	939.7	939.7	939.7 kg/m <sup>3</sup>	
	14	Visc. min.	Operating	Viscosity Max.	0.222896	0.222896	0.222896 cP	
	15	M. Weight	Design Pressure	Temperature			kgf/cm <sup>2</sup> -g °C	
	16	Base Press.	Base Temp			kgf/cm <sup>2</sup>	°C	
	17	Compressibility @ Oper. Con.						
	18	Specific Heat Ratio Cp/Cv						
	19	Liquid Vapour Pressure						2.3425 kgf/cm <sup>2</sup> -a
	20	Vapour Density						
	ORIFICE PLATE	22	Orifice Plate Type					
23		Standard						ISO-5167
24		Material						316 S.S.
25		Plate Thickness						3.0 mm
26		Plate Outside Diameter						
27		Pipe Reynolds No. @ Normal Flow						1862495
28		Beta Ratio						0.674
29		Bore Diameter @ 20 °C						136.51 mm
30		Drain or Vent Hole Size	Drain Hole Position					In
31		Ring Material & Type						
32		Taps Type	Taps Size	Taps Orientation	Flange Taps	1/2	In	
33		Flange Size	Flange Rating		8	In	300# RF	
34		Flange Material	Gasket Material				Carbon Steel	
35	Permanent Pressure Loss @ Flow						1271. mmH2O 4°C	
METER	37	Type of Meter						Differential Pressure Transmitter
	38	Differential Pressure @ Full scale						2400 mmH2O 4°C
	39	Meter Max Flow						238250 kg/h
	40	Seal Spec. Gravity. at 60° F						
	41	Static Pressure Range						
	42	Chart or Scale Range	Chart Multiplier					
	43							
PURCHASE	44	Manufacturer						DIGMAT
	45	Model						
	46	Requisition Number	Item Number				1	
	47	Serial Number						
Notes: See notes								
				INSTRUMENT SPECIFICATION				
				Orifice Plate style 2				
2	GPO	17/08/2010	As built					
1	ALC	14/04/2003	According EA-204244 rev. 1 (TEXIAN)					
No.	By	Date	Revision		Code: 60	Dwg. No.: JPE-FD-011-FE-132	Rev.: 2	
						Sheet 1	of 2	