

# *Monografia de Graduação*

## **Tratamento Foto-Bioquímico de Águas Produzidas em Campos de Petróleo**

**Gabriela Miranda de Assis Cunha**

**Natal, fevereiro de 2007**

**Cunha, Gabriela Miranda de Assis** – Tratamento Foto-Bioquímico de Águas Produzidas em Campos de Petróleo. Monografia, UFRN, Departamento de Engenharia Química, Programa de Recursos Humanos – PRH 14/ANP. Áreas de Concentração: Engenharia de Petróleo, Natal/RN, Brasil.

Orientador: Prof. Dr. Osvaldo Chiavone Filho

Colaboradores: Msc. Douglas do Nascimento Silva, Alcivan Almeida Evangelista Neto, George Gonçalves Dantas.

---

**RESUMO:** Os processos biológicos são caracterizados por possibilitarem o tratamento de grandes volumes de efluentes a um baixo custo operacional. Determinados efluentes industriais apresentam compostos orgânicos tóxicos e podem inviabilizar o tratamento em sistemas biológicos, devido à inibição do metabolismo dos microrganismos presentes no lodo ativado. Por sua vez, os processos oxidativos avançados (POAs), que fazem uso de radicais hidroxila como agentes oxidantes, permitem tratar tais efluentes, em alguns casos degradando completamente compostos orgânicos a CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O. Porém, apresentam custo significativamente maior, podendo se tornar inviáveis para o tratamento de grandes volumes. Uma alternativa interessante é o emprego dos POAs como pré-tratamento para remoção de toxicidade.

O presente trabalho tem como objetivo o estudo da viabilidade técnica da integração entre o POA, baseado na reação foto-Fenton, e o sistema de lodos ativados. Em uma primeira etapa um efluente sintético, replicando a água produzida em campos de petróleo, é pré-tratado pelo processo foto-Fenton, através de um reator que utiliza a radiação solar como fonte de fótons. Espécies aromáticas são convertidas a ácidos orgânicos e outros compostos provavelmente menos agressivos, tornando o meio viável à atividade microbiana. Este efluente pré-tratado é introduzido em um sistema contínuo de lodos ativados para complementar a oxidação da matéria orgânica residual.

---

**Palavras Chaves:** Água Produzida, POA, Processo Biológico.

## ABSTRACT

Biological degradation processes are able to treat a large volume of wastewaters a low cost. However the presence of highly toxic pollutants, in significant contents, may inhibit the microbial metabolism. Advanced oxidation processes (AOPs), based on the chemistry of non-selective hydroxyl radicals, can be used to treat such effluents, sometimes leading to the complete oxidation of recalcitrant compounds to CO<sub>2</sub> and water. The high costs involved in the generation of UV radiation, however, impose serious limitations to these processes. A promising alternative is the application of AOPs as a pre-treatment stage for the abatement of the toxicity.

In this work it has been studied the coupling between the photo-Fenton process and an activated-sludge system. Wastewater solution is treated, in a first stage, by the photo-Fenton system, using a parabolic reactor. In this phase, the conversion of aromatic compounds to acids and other less toxic compounds is verified, to get a better insight into the factors that govern the coupling between photochemical and biological processes.

*Esta monografia é dedicada:*

Aos meus pais, *Agenor e Fátima*, que sacrificaram seus sonhos em favor dos meus, e que não foram só pais, mas, amigos e companheiros, mesmo nas horas em que meus ideais pareciam distantes e inatingíveis e o estudo, um fardo pesado demais.

## Agradecimentos

A Deus em primeiro lugar que me deu a oportunidade de iniciar este curso e forças para concluí-lo. Tenho certeza que sem ele nada disso seria possível.

Aos meus pais Agenor e Fátima, minha fortaleza, que, mesmo com todas as dificuldades e limitações, não pouparam esforços para me educar e oferecer as condições necessárias para que eu estudasse.

Aos meus irmãos Daniela e Thiago pela amizade, companheirismo, carinho e amor, que foram fundamentais para minha vida.

Ao meu tio Batista que sempre esteve ao meu lado e me ajudou no que foi necessário.

Ao meu esposo Saint-Clayr, pelo amor, companheirismo, compreensão e incentivo durante todo o curso, sempre acreditando que eu ia conseguir, estando ao meu lado em todos os momentos e nunca me deixando desistir diante dos obstáculos que surgiram. Te amo muito!!

Às amigas Indira e Julianna, pela amizade sincera construída ao longo do curso, sempre estando ao meu lado como irmãs, passando por momentos divertidos e me incentivando sempre.

Aos meus amigos do curso de Engenharia Química, em especial à turma 2002.1, minha “segunda família”: Indira, Julianna, Rodrigo (vagabundo), Auberan (mestre Auberá), Zé Hilton (da Mata), Diego, Antonio, Gerson e Gledson. Obrigada pela amizade e por tudo que passamos juntos, jamais esquecerei das noites em claro, dos finais de semana e feriados que passamos estudando e dos momentos de descontração.

Aos amigos do laboratório, em especial a Geraldine (Dine) por sua amizade sincera e por toda orientação e a Douglas, Doug sem a sua ajuda este trabalho jamais seria possível, obrigada pela sua ajuda e principalmente pela sua amizade.

Aos bolsistas do PET Alcivan e George pelo auxílio na parte experimental e pela amizade.

A ANP, através da comissão gestora do PRH-14, pela concessão da bolsa, possibilitando ampliar os conhecimentos na área de petróleo e complementar a formação profissional através da infra-estrutura e do apoio de toda a comissão gestora.

Ao professor Osvaldo, pela amizade, dedicação e orientação. Ao professor Romualdo Vidal, por toda contribuição para nossa formação profissional, sua preocupação como se fôssemos seus filhos, buscando estágios e oportunidades de empregos, dedicando-se constantemente ao PRH-14 da ANP, e a todos os professores do DEQ/UFRN que contribuíram para minha formação profissional, por sua dedicação e empenho.

À empresa Petróleo Brasileiro S.A - PETROBRÁS pela oportunidade de estágio.

Ao gerente do ST - EIPA – José Henrique Patriota Soares pela concessão da vaga de estágio.

Ao coordenador de estágio Cícero Sena Moreira Gomes, pela paciência, atenção e amizade dedicadas durante o estágio, e por todos os ensinamentos passados que contribuíram bastante para a minha formação pessoal e profissional.

Aos amigos da PETROBRÁS, Márcia, Gilce, Célio, Aurélio, Jocely, Faria, Viangre, Ivandi, Pacheco, Geraldinho, Fabiano, Odiletil, Franco, Celso, Almeida, França e Luís Henrique por me integrarem no grupo de trabalho, sendo sempre companheiros e colaborando comigo em todos os momentos. Um obrigada especial à galera da “cozinha” que transformou o estágio ainda mais prazeroso, sem vocês o estágio não seria o mesmo: Ariel (por ter sido um anjo, sempre me ajudando e pela sua amizade sincera), João, Moisés, Dr.Vicente e Márcia .

Enfim, agradeço a todos que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho. Muito Obrigada!

## Índice

<b>1- INTRODUÇÃO.....</b>	<b>2</b>
<b>2- OBJETIVOS.....</b>	<b>5</b>
<b>2.1-OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....</b>	<b>5</b>
<b>3- ASPECTOS TEÓRICOS.....</b>	<b>7</b>
<b>3.1 - O PETRÓLEO .....</b>	<b>7</b>
<b>3.2 – CONCEITOS BÁSICOS SOBRE ÁGUA PRODUZIDA .....</b>	<b>7</b>
2.2.1 – <i>Impacto Ambiental.....</i>	<i>8</i>
2.2.2 - <i>Controle da Geração da Água Produzida .....</i>	<i>9</i>
2.2.3 - <i>Disposição .....</i>	<i>9</i>
<b>2.3 - OS PROCESSOS OXIDATIVOS AVANÇADOS .....</b>	<b>10</b>
<b>2.4-O PROCESSO FOTO-FENTON .....</b>	<b>11</b>
<b>2.5 – TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO.....</b>	<b>14</b>
2.5.1 – <i>Tratamento Biológico .....</i>	<i>14</i>
<b>4- METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>17</b>
<b>4.1 – PROCESSO FOTOQUÍMICO .....</b>	<b>17</b>
4.1.1 - <i>Reagentes e materiais.....</i>	<i>17</i>
4.1.2 – <i>Características do sistema.....</i>	<i>17</i>
4.1.3 – <i>Procedimento Experimental – Reator Lâmpada.....</i>	<i>17</i>
4.1.4 – <i>Procedimento Experimental – Reator Solar .....</i>	<i>18</i>
<b>4.2 – PROCESSO BIOLÓGICO .....</b>	<b>18</b>
4.2.1 – <i>Microorganismo e meio .....</i>	<i>18</i>
4.2.2 – <i>Processo Biológico .....</i>	<i>19</i>
<b>5- RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>21</b>
<b>6- CONCLUSÃO .....</b>	<b>27</b>
<b>7- REFERÊNCIAS.....</b>	<b>29</b>
<b>8- CRONOGRAMA DE EXECUÇÃO .....</b>	<b>34</b>
<b>9- RELATÓRIO DE ESTÁGIO.....</b>	<b>36</b>

## Lista de Figuras

- Figura 1 - Reservatório Esquemático de Óleo  
 Figura 2 - Representação esquemática do sistema de tratamento por lodos ativados  
 Figura 3 – Esquema de tratamento por reator fotoquímico  
 Figura 4 – Sistema de Lodos Ativados  
 Figura 5 - Eficiência de degradação através do processo foto-Fenton em reator lâmpada  
 Figura 6 – Degradação em reator solar com concentração de 30ppm  
 Figura 7 – Degradação em reator solar com concentração 250ppm  
 Figura 8 - Cromatograma do extrato obtido a partir das emulsões de petróleo em água  
 Figura 9 - Cromatograma obtido ao final do processo foto-Fenton

Figura 10 - Aspectos da água de produção antes, durante e após o tratamento com o processo sugerido

### **Lista de Tabelas**

Tabela 1 – Meio Sintético Básico

Tabela 2 – Análise da água após o processo foto-Fenton

---

---

Capítulo I

***INTRODUÇÃO***

---

---

## 1- Introdução

A água é um recurso fundamental, pois sua vasta gama de aplicação faz com que seja utilizada para os mais diversos fins. Por isso, há uma tendência de se racionalizar a utilização deste recurso, devido à alta em sua demanda.

Durante a produção de petróleo é comum a co-produção de água. A consequência desse fato é a geração de grandes volumes de água a serem descartados no mar. Esta água, denominada água produzida, geralmente, contém altos teores de sais e uma mistura complexa de compostos orgânicos e inorgânicos, cuja composição varia durante a vida do campo, e cujo volume tende a crescer à medida que o campo envelhece.

Ao longo das últimas décadas, a indústria petrolífera tem feito um esforço, sempre crescente, no sentido de prevenir danos ao meio ambiente e à saúde pública em todas as suas operações. No entanto, ainda há muito a ser feito no sentido de reduzir o impacto dos rejeitos oriundos das operações da indústria petrolífera. O tratamento da água de produção é necessário uma vez que as quantidades de poluentes contidas em diferentes concentrações não podem ser descarregadas no ambiente marinho.

Uma alternativa para tratar efluentes contendo cargas altamente tóxicas ao metabolismo dos microrganismos promotores da oxidação é a integração entre os processos fotoquímico e biológico.

Nos sistemas integrados, o pré-tratamento através dos Processos Oxidativos Avançados (POAs) tem como finalidade modificar estruturas dos poluentes, transformando-os em intermediários menos tóxicos e facilmente biodegradáveis, os quais seguem para o subsequente processo de degradação biológica (tratamento convencional).

O pré-tratamento fotoquímico empregado foi o processo foto-Fenton, o qual é conhecido como um Processo Oxidativo Avançado (POA), caracterizado pelo uso do radical hidroxila ( $\bullet\text{OH}$ ) como agente oxidante. O seu uso pode ser justificado se os intermediários formados são facilmente degradados posteriormente por um tratamento biológico.

O estudo foi realizado através de uma solução sintética que reproduz a água produzida nos campos de petróleo e teve como objetivo estudar a integração entre os processos fotoquímico e biológico no tratamento de águas produzidas em campos de petróleo, visando caracterizar sua viabilidade técnica. O pré-tratamento fotoquímico é

baseado no processo foto-Fenton e o posterior tratamento biológico é realizado por um sistema de lodos ativados.

---

---

Capítulo II

***OBJETIVOS***

---

---

## **2- Objetivos**

O grande volume de água produzida juntamente com o petróleo e a vasta incidência solar no estado motivaram a realização deste trabalho. Este trabalho prevê a minimização do impacto ambiental causado pelos efluentes gerados pela indústria de petróleo e redução da concentração de poluentes nos efluentes gerados, possibilitando a aplicação de um posterior tratamento biológico.

### **2.1-Objetivos específicos**

- Avaliar o processo combinado: Pré-tratamento com processo foto-Fenton e posterior tratamento biológico.

---

---

Capítulo III

***ASPECTOS TEÓRICOS***

---

---

### **3- Aspectos teóricos**

#### **3.1 - O Petróleo**

O petróleo consiste de uma mistura complexa de hidrocarbonetos gasosos, líquidos e sólidos, constituída por átomos de carbono e hidrogênio, e proporções pequenas de heterocompostos com presença de nitrogênio, enxofre, oxigênio e alguns metais.

É encontrado exclusivamente nas bacias sedimentares, formadas por rochas sedimentares, e nos aparece na vida cotidiana sob a forma de produtos acabados imediatamente utilizáveis.

As bacias petrolíferas podem ser encontradas tanto em terra quanto no mar, e a extração do petróleo é diferenciada para cada uma delas. Nas plataformas, o petróleo é separado da água, ocorrendo a adição de vários produtos químicos (inibidores de corrosão, anti-emulsionantes, anti-espumante e biocidas). Estes aditivos têm como objetivo a redução de problemas operacionais durante o processo. (Henderson, *et al.*, 1999).

#### **3.2 – Conceitos Básicos sobre Água Produzida**

A origem básica da Água Produzida juntamente com o petróleo está relacionada às condições ambientais existentes durante a gênese do petróleo. Um ambiente geológico marinho ou lacustre, em que tenha havido intensa deposição de matéria orgânica, associada com posterior soterramento, e condições físico-químicas apropriadas tende a reunir os condicionantes necessários para o aparecimento do petróleo nas rochas matrizes.

O petróleo gerado migra então para rochas permeáveis adjacentes que, trapeadas estruturalmente por rochas impermeáveis, resultam em acumulações nas rochas reservatório. Durante milhares de anos o petróleo se concentra, segregando-se da água, mas, mantendo muitas vezes, contato com os aquíferos como pode ser observado na *Figura 1*.

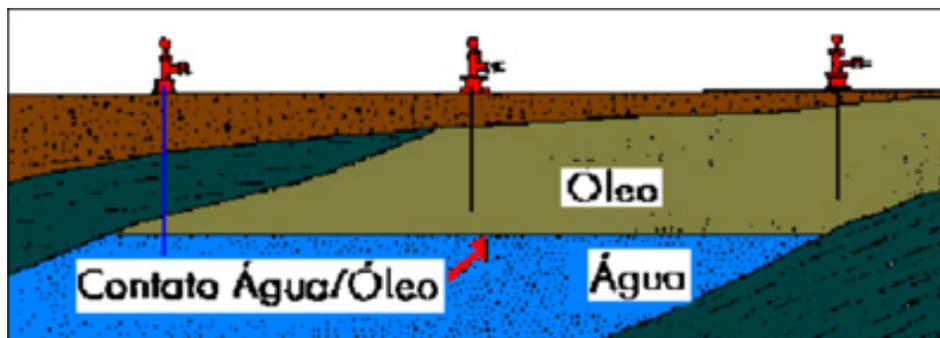


Figura 1 - Reservatório Esquemático de Óleo

A água de produção é a maior corrente na produção de petróleo *offshore*. Este volume depende do local de exploração, assim como da idade do poço. (Faksness *et al.*, 2004). Água do mar pode ser injetada na bacia para manter a pressão interna, facilitando a extração do petróleo. Portanto a água de petróleo tem como característica alta concentração de sais, tais como cloreto de sódio (NaCl), os sulfatos (principalmente BaSO<sub>4</sub> e SrSO<sub>4</sub>) e carbonatos (principalmente CaCO<sub>3</sub>), gerando um efluente de composição complexa contendo óleos dispersos, metais dissolvidos, radionuclídeos, hidrocarbonetos semi-solúveis como benzeno, tolueno, etilbenzeno e xileno, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos, naftalenos, fenantrolina e dibenzotiofenos, ácidos orgânicos, fenol. A concentração destes compostos depende do local de formação e idade do poço de extração. A salinidade da água expressa como íons cloreto (Cl<sup>-</sup>), pode chegar a 120 g Cl<sup>-</sup>/L (Campos *et al.*, 2002).

### 2.2.1 – Impacto Ambiental

A água produzida é potencialmente perigosa ao meio ambiente por causa dos vários elementos que a compõem. A combinação de um ou mais desses elementos, a quantidade e as características do local onde o efluente for descartado devem ser levados em conta para avaliar um possível impacto ambiental. Poderá ocorrer poluição em rios, mar, lagos, contaminação em aquíferos e do solo, danos à flora e à fauna.

As principais causas potenciais de perigo atribuídas à Água Produzida podem ser:

- Alta salinidade;
- Sólidos suspensos;
- Presença de metais pesados;
- Presença de orgânicos insolúveis;
- Presença de orgânicos solúveis;
- Presença de produtos químicos;
- radioatividade

### **2.2.2 - Controle da Geração da Água Produzida**

O controle da produção de água produzida junto com o petróleo é de grande interesse para os produtores de petróleo. O custo da produção do petróleo inclui a produção da água, a separação óleo/água e a disposição da água produzida, geralmente salgada, o que impossibilita o seu descarte em operações “*on-shore*”. A diminuição da produção de água pode levar a otimização do custo com a produção do petróleo, refletindo nos processos de separação e tratamento do óleo.

Em resumo, a importância do controle da produção de água na extração do petróleo consiste em otimizar a produção do óleo, e em minimizar os custos operacionais. A redução no volume de fluidos envolvidos no processo pode diminuir os riscos potenciais e os danos ao meio ambiente.

### **2.2.3 - Disposição**

Segundo Kai (2005), o descarte no mar tem sido feito até o momento, de acordo com critérios locais e, muitas vezes, não claramente definidos por órgãos governamentais. No mundo, companhias petrolíferas adotam suas próprias normas, as quais nem sempre são embasadas cientificamente. Tais procedimentos visam basicamente evitar possíveis efeitos visuais decorrentes do descarte. De acordo com Allen e Robinson (1993) a porcentagem global de poluição é pequena, porém as quantidades localizadas são enormes, e podem causar danos ambientais próximos aos locais de lançamento.

A água produzida tende a ser disposta sem tratamento prévio no solo com resultados previsíveis, tais como: contaminação de aquíferos e cursos de água, deposição de sal no solo tornando-o improdutivo para a agricultura. A remediação do solo é difícil e tem custo elevado, além do impacto sobre as águas subterrâneas muitas vezes usadas como fonte de abastecimento para o consumo humano. Segundo Allen e Robinson (1993), após o tratamento adequado, o uso da água de produção para irrigação pode suplementar as reservas de água de regiões de baixo índice pluviométrico.

### 2.3 - Os processos Oxidativos Avançados

Processos Oxidativos Avançados (POAs) são métodos alternativos atrativos, promissores e efetivos para a remediação de contaminantes (dissolvidos ou dispersos) contendo poluentes orgânicos não biodegradáveis presentes nas águas, nos solos e nas superfícies (Legrini *et al.*, 2003; Fahmi *et al.*, 2003; Kavitha e Palanivelu, 2004; Will *et al.*, 2004).

POAs são caracterizados pelas suas propriedades catalíticas, fotoquímica e reações de degradação oxidativas (químicas) (Legrini *et al.*, 1993; Maciel *et al.*, 2004). Baseiam-se na destruição do poluente, em vez de transferi-los para outra fase (Sanz *et al.*, 2002).

Embora faça uso de diferentes tipos de sistemas de reação, os POAs são todos caracterizados pela presença de radicais  $\bullet\text{OH}$ . A versatilidade destes processos é também aumentada pelo fato de oferecerem diferentes opções para produção de radicais hidroxila, permitindo adaptar os requerimentos a tratamentos específicos.

Os POAs dependem da geração de radicais orgânicos, os quais são produzidos por fotólise de substrato orgânico e/ou por reações com radicais hidroxilas (Kavitha e Palanivelu, 2004) a partir de um dos oxidantes utilizados:  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{O}_3$  ou  $\text{O}_2$  (Gimenez *et al.*, 1999; Espulgas *et al.*, 2002; Rodrigues *et al.*, 2002), sendo o peróxido de hidrogênio o mais comumente usado (Sanz *et al.*, 2002).

Os radicais hidroxilas ( $\bullet\text{OH}$ ) gerados são intermediários reativos e têm alto potencial de oxidação (2,8V) (Venkatadri e Peters, 1993) e baixa seletividade de ataque, degradando compostos orgânicos e inorgânicos presentes nas águas produzidas (Laat *et al.*, 1999; Benitez *et al.*, 2001; Abderrazik *et al.*, 2002; Will *et al.*, 2004). Estes radicais atacam moléculas orgânicas, abstraindo átomos de hidrogênio ou adicionando-se as ligações

duplas. Os radicais hidroxila atacam as moléculas da matéria orgânica dissolvida, produzindo uma melhoria na biodegradabilidade como resultado da redução do conteúdo orgânico ou a geração de intermediários bem menos tóxicos (Scheck e Frimmel, 1995; Sanz *et al.*, 2002; Fahmi *et al.*, 2003). As moléculas orgânicas podem, em casos favoráveis, serem totalmente mineralizadas (oxidação total) para dióxido de carbono e água (Huston e Pignatello, 1999; Rodrigues *et al.*, 2002; Will *et al.*, 2004).

Os principais POAs usam agentes oxidantes em presença de um catalisador apropriado e/ou luz ultravioleta (Legrini *et al.*, 1993) para oxidar ou degradar o contaminante de interesse. Eles são classificados em processos homogêneos e heterogêneos. Denomina-se sistema heterogêneo aquele que utiliza semicondutores no estado sólido, que catalisam a geração do radical  $\bullet\text{OH}$ . Nos sistemas homogêneos, os catalisadores estão dissolvidos. Comparando com os POAs heterogêneos, os processos homogêneos possuem baixa resistência à transferência de massa entre as fases e rápida degradação dos poluentes (Kavitha e Palanivelu, 2004).

Dentre os POAs, os sistemas combinados  $\text{TiO}_2/\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$  e  $\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$  são considerados os mais promissores para a remediação dos contaminantes da água. (Gimenez *et al.*, 1999; Espulgas *et al.*, 2002; Rodrigues *et al.*, 2002).

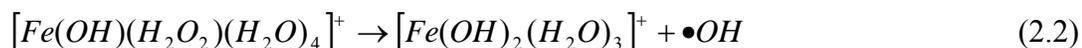
Os POAs são alternativas interessantes, desde que produtos nocivos não sejam gerados, e sim, minimizados a teores compatíveis ou eliminados, favorecendo os processos seguintes tais como tratamento biológico. (Will *et al.*, 2004).

#### 2.4-O Processo foto-Fenton

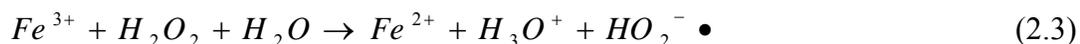
O reagente de Fenton consiste de uma mistura oxidante que contém íons de ferro e peróxido de hidrogênio. O mecanismo exato da reação de Fenton térmica ainda é motivo de discussão (Bossmann *et al.*, 1998). Em uma primeira etapa ocorre a reação 2.1 de oxidação do  $\text{Fe}^{2+}$  para  $\text{Fe}^{3+}$ , conhecida como reação de Fenton, produzindo radicais hidroxila em quantidade estequiométrica, os quais são extremamente reativos e não seletivos (Oliveros *et al.*, 1997; Maciel *et al.*, 2004).



Esta reação pode ser reescrita de maneira mais rigorosa, levando em consideração a formação de complexos aquosos:



Na ausência de luz, o íon  $Fe^{3+}$  produzido pela reação 2.1 é reduzido para  $Fe^{2+}$  conforme a equação 2.3:



Esta redução térmica é a etapa limitante da cinética global do processo Fenton por ser muito mais lenta que a reação de oxidação (reação 2.1). Segundo Bossamann *et al.* (1998), a reação de redução ocorre em três etapas:

- ✓ Formação de um complexo hidratado  $Fe^{3+} - H_2O_2$  ( $[Fe(OH)(HO_2)(H_2O)_4]^+$ ), conforme a reação 2.4:



- ✓ Redução do  $Fe^{3+}$  a  $Fe^{2+}$  nesse complexo (reação 2.5):



- ✓ Reação de transferência de elétrons, entre um segundo complexo aquoso  $Fe^{3+}$  ( $[Fe(OH)(H_2O)_5]^{2+}$ ) e o radical hidroperoxil ( $HO_2\bullet$ ) que também regenera a espécie  $Fe^{2+}$  ( $[Fe(OH)(H_2O)_5]^+$ ) de acordo com a reação 2.6:



É provável que complexos de  $Fe^{3+}$  sejam os responsáveis pela interrupção do processo de mineralização, desde que estes complexos, estáveis na ausência de irradiação, dificultem a regeneração do  $Fe^{2+}$ . Assim, a reação Fenton é retardada após a conversão completa de  $Fe^{2+}$  a  $Fe^{3+}$ .

Os radicais  $\bullet OH$  podem ser consumidos conforme as equações 2.7-2.9 (Lu *et al.* 1997).



Onde RH representa uma molécula orgânica.

Geralmente, radicais  $HO_2 \bullet$  não têm papel importante nestes processos de oxidação, pois apresentam menor reatividade quando comparados aos radicais  $\bullet OH$  (Nadtochenko e Kiwi, 1998; Maciel *et al.*, 2004). Um ponto importante a ser considerado é a quantidade de  $H_2O_2$  requerida para obter a melhor eficiência do tratamento, já que excesso de  $H_2O_2$  pode reagir com  $\bullet OH$  competindo com os compostos orgânicos diminuindo assim a eficiência do tratamento.

Por outro lado, na reação foto-Fenton, radicais  $\bullet OH$  são gerados pela reação de  $Fe^{2+}$  com  $H_2O_2$ , e pela redução do  $Fe^{3+}$  com luz UV. Verifica-se que a irradiação UV eleve significativamente a eficiência dos reagentes Fenton, aumentando a velocidade de degradação de poluentes orgânicos (Moraes *et al.*, 2001).

Este comportamento sob a ação da luz atribui à redução dos íons  $Fe^{3+}$  para  $Fe^{2+}$  segundo a reação 2.10:



Esta equação pode ser mais rigorosamente representada considerando a formação dos complexos de  $Fe^{3+}$  (reações 2.11 e 2.12), que além de regenerarem o íon  $Fe^{2+}$  também produzem radicais  $\bullet OH$ :



A reação 2.11 favorece o aumento da concentração de íons  $Fe^{2+}$  em solução que combinando com a reação 2.1 produz mais radicais  $\bullet OH$  que o processo Fenton ou UV-peróxido.

A faixa de pH neste sistema tem um efeito significativo na taxa de degradação pois os íons de ferro precipitam na forma de hidróxido, quando o pH do meio é aumentado, por outro lado, quando este é abaixado a concentração das espécies foto-ativas é baixa. O pH ótimo da reação foto-Fenton situa-se entre 2,8 e 3,0. (Pignatello e Sun, 1995; Oliveros *et al.*, 1997).

## 2.5 – Tecnologias de Tratamento

Existe hoje uma grande diversidade de alternativas para o tratamento de água residuária. Sua escolha depende da composição e do tipo de poluente contido nessas águas e do custo do tratamento. O custo deste processo pode inviabilizar o processo mesmo este sendo efetivo.

### 2.5.1 – Tratamento Biológico

O tratamento biológico é o processo mais econômico conhecido, além de apresentar a capacidade de tratar grandes volumes de efluente. Contudo, a aplicação do processo de tratamento biológico em geral requer a adaptação (aclimatação) dos microorganismos ao efluente a ser degradado. Quando o efluente tem alta toxicidade, ou tenha uma composição complexa, a utilização do processo biológico é dificultada, pois poderá ocorrer morte dos microorganismos. Diversas pesquisas têm estudado a aplicação de processos de tratamentos

integrados, ou seja, a implantação de mais de um tipo de tratamento para serem atendidos os parâmetros de despejo impostos pelos órgãos fiscalizadores.

Um exemplo de tratamento biológico é o tratamento de lodos ativados, que consiste em um tanque de aeração ou reator biológico, no qual acontece a remoção de matéria orgânica contida no efluente, um tanque de decantação para a separação do lodo e efluente, do qual o lodo é recirculado para o reator biológico e o excesso é retirado para um digestor de lodo, onde o seu volume é reduzido e estabilizado para a sua destinação final. (VON SPERLING, 2002).



Figura 2 - Representação esquemática do sistema de tratamento por lodos ativados

---

---

Capítulo IV

***METODOLOGIA EXPERIMENTAL***

---

---

## **4- Metodologia experimental**

### **4.1 – Processo fotoquímico**

#### **4.1.1 - Reagentes e materiais**

Para a realização do pré-tratamento fotoquímico através do processo foto-Fenton foram utilizadas solução sintética de água de produção (com concentrações de 50, 100, 150 e 200ppm), peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ , 30% m/m), sulfato ferroso heptahidratado ( $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ , < 98% Reatec). Todos os reagentes foram de grau analítico. Uma bomba dosadora (Ismatec, modelo IPC-4) foi utilizada para a adição contínua do peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ , 30% m/m) com uma vazão de alimentação de  $0,2 L \cdot h^{-1}$ .

#### **4.1.2 – Características do sistema**

Utilizou-se o reator fotoquímico, de geometria anular com um volume de líquido de 1L, colocado em uma caixa de madeira fechada, com a finalidade de evitar a saída de radiação luminosa do seu interior. Este reator foi conectado a um tanque de recirculação, com um volume de líquido de 5L, sendo a temperatura do mesmo controlada por meio de um banho termostático (Q.215. D2BS, Quimis) e monitorada por um termopar digital (SP – G21C\*, IOPE), o pH foi monitorado e controlado dependendo das condições experimentais por um pHgâmetro digital (Quimis). A fonte de radiação usada foi uma lâmpada de vapor de mercúrio de média pressão (Hanovia 679A36, 450W), a qual foi posicionada no eixo longitudinal do reator, no interior de uma camisa constituída de borossilicato ou quartzo, em que circulava água com a finalidade de resfriar a lâmpada.

Para o sistema fotoquímico solar, utilizou-se um reator fotoquímico parabólico, constituído de paredes espelhadas com tubos de vidro de borossilicato pelo qual passa o efluente a ser tratado. O reator é acoplado a um tanque de mistura (8L) e conectado a uma bomba centrífuga que permite a recirculação do efluente.

#### **4.1.3 – Procedimento Experimental – Reator Lâmpada**

Inicialmente o procedimento experimental consistiu no preenchimento do tanque de mistura com 4,8 L de solução sintética de água de produção. Em seguida, a bomba de recirculação e a lâmpada foram acionadas. A contagem do tempo de reação era iniciada,

executando-se, simultaneamente, as adições das soluções de sulfato ferroso heptahidratado ( $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ;  $1\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  em um balão de 100mL) e peróxido de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{O}_2$ , 30% m/m;  $100\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ), sendo este adicionado por meio de uma bomba peristáltica (Ismatec, modelo IPC-4) com uma vazão de alimentação de  $0,2 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ .

Coletaram-se amostras nos seguintes tempos: 0, 5, 10, 15, 30, 60 e 120 minutos. Extraíu-se com clorofórmio na proporção de amostra: clorofórmio de 2:10 v/v.

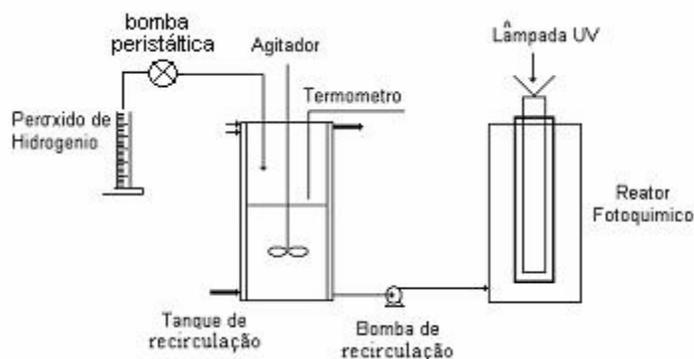


Figura 3 – Esquema de tratamento por reator fotoquímico

#### 4.1.4 – Procedimento Experimental – Reator Solar

Inicialmente o procedimento experimental consistiu no preenchimento do tanque de mistura com 7,8L de solução sintética de água de produção. Em seguida, a bomba de recirculação foi acionada. A contagem do tempo de reação era iniciada, executando-se, simultaneamente, as adições das soluções de sulfato ferroso heptahidratado ( $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ;  $1\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  em um balão de 100mL) e peróxido de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{O}_2$ , 30% m/m;  $100\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ), sendo este adicionado por meio de uma bomba peristáltica (Ismatec, modelo IPC-4) com uma vazão de alimentação de  $0,2 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ .

Coletaram-se amostras nos seguintes tempos: 0, 5, 10, 15, 30, 60 e 120 minutos. Extraíu-se com clorofórmio na proporção de amostra: clorofórmio de 2:10 v/v.

## 4.2 – Processo biológico

### 4.2.1 – Microorganismo e meio

O material biológico foi coletado de um Sistema de Lodos Ativados pertencente a uma Refinaria de Petróleo. O meio sintético básico que foi utilizado nestes experimentos está descrito na Tabela 1 (Xiong et al., 1998).

Tabela 1 – Meio Sintético Básico

Compostos	Concentração (mg/L)
MgSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O	41,7
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>b</sup>	25,3
MnSO <sub>4</sub>	53,0
CaCl <sub>2</sub>	28,3

#### 4.2.2 – Processo Biológico

Um sistema de lodo ativado (Figura 4), operando de modo contínuo, consistindo de um tanque aerado com um volume de 5 L conectado a um decantador de 3 L, foi utilizado durante todo o período experimental. Uma bomba peristáltica foi utilizada para alimentação do reator e recirculação do lodo do decantador para o tanque aerado, caracterizando uma recirculação de 1:1. Ar foi fornecido através de pedras porosas do tipo utilizadas em aquários. O afluente consistia de uma solução sintética de água produzida em campos de petróleo. Um lodo não adaptado, cedido por uma Refinaria de Petróleo, foi utilizado como inóculo para o sistema de lodos ativados conforme mencionado anteriormente.

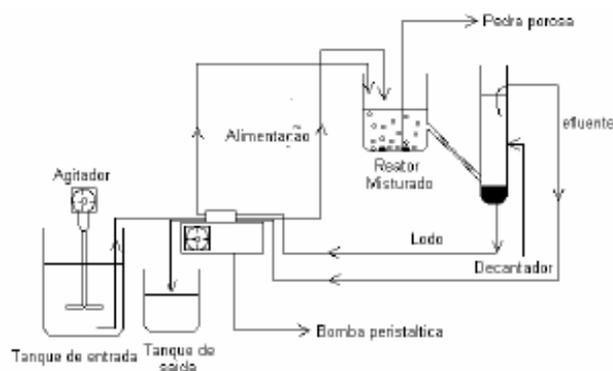


Figura 4 – Sistema de Lodos Ativados

---

---

Capítulo V

***RESULTADOS E DISCUSSÕES***

---

---

## 5- Resultados e discussões

Os estudos exploratórios realizados constituem-se de experimentos com concentrações de contaminante de 30, 50, 100, 150, 200 e 250 ppm.

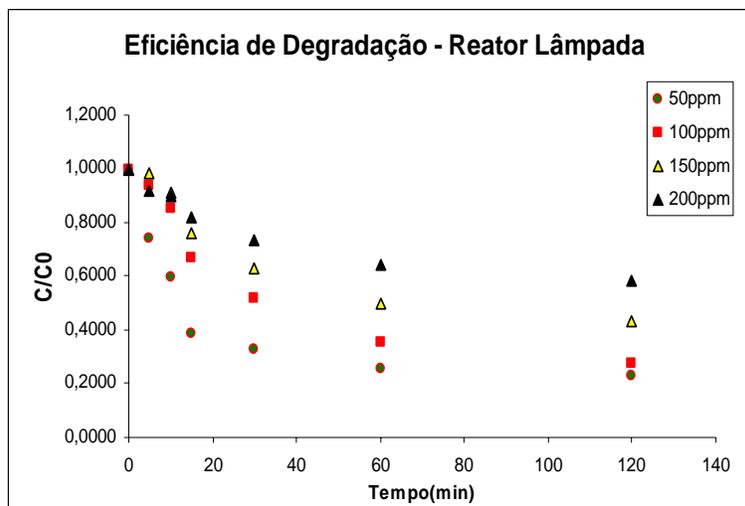


Figura 5 - Eficiência de degradação através do processo foto-Fenton em reator lâmpada

Os resultados apresentados na figura 5.1, mostram a eficiência de degradação da solução sintética de água de produção em reator lâmpada a diferentes concentrações.

Os experimentos foram realizados durante o mesmo intervalo de tempo (120 minutos) e é possível observar que à medida que a concentração de contaminante aumenta a eficiência do método diminui. Podem-se observar percentuais de degradação de até 80% para concentração inicial de 50ppm e de 40% para concentrações de 200ppm.

A radiação ultravioleta proporciona uma cinética de degradação mais favorável, principalmente nos primeiros minutos da reação. Trata-se de um resultado esperado, uma vez que além de catalisar a fotorredução dos íons  $Fe^{3+}$  ( $Fe^{3+} + H_2O + h\nu \rightarrow Fe^{2+} + H^+ + OH^{\bullet}$ ) a radiação ultravioleta permite a decomposição do peróxido de hidrogênio. Após 15 minutos de reação a conversão ferroso-férrico desvia do padrão dos minutos iniciais provavelmente em razão da baixa concentração residual de peróxido de hidrogênio.

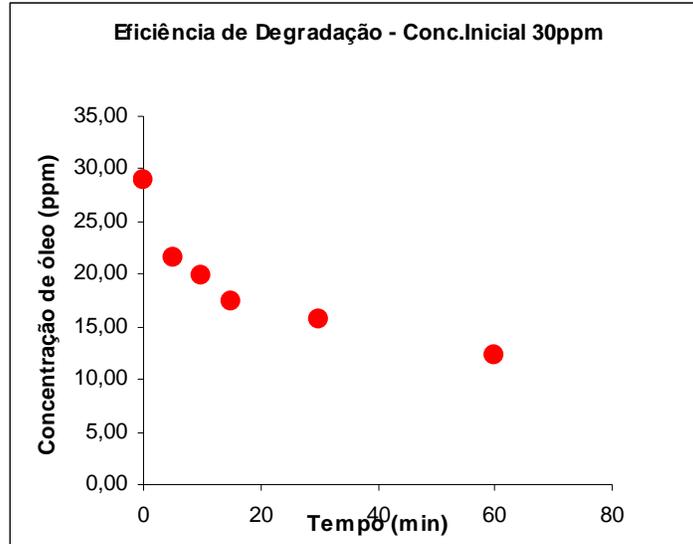


Figura 6 – Degradação em reator solar com concentração de 30ppm

A figura 6 mostra a degradabilidade da água de produção utilizando reator solar a uma concentração de 30ppm. É possível observar a completa degradação da solução a esta concentração. No início da reação, tempo 15 minutos, observa-se uma degradação mais favorável, este fato deve-se ao efeito do peróxido. Uma variação no perfil de degradação pode ser observada devido ao fato que as análises foram realizadas em espectrofotômetro, que como todo equipamento apresenta um erro normal, ao peróxido que também apresenta leitura e também a variações climáticas como presença de nuvens, pois os experimentos foram realizados no reator solar.

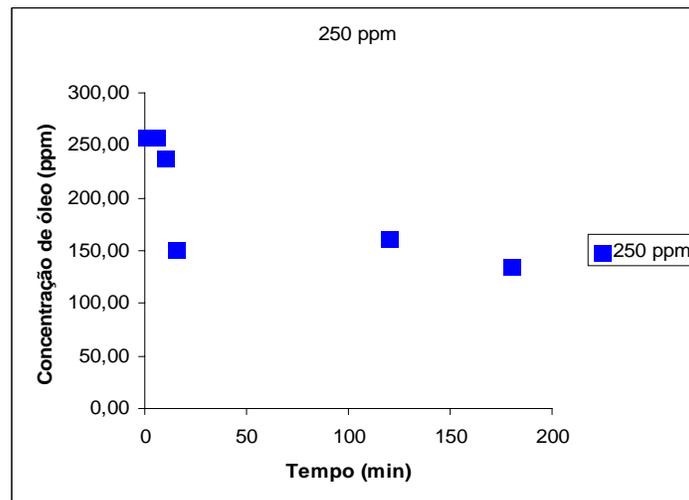


Figura 7 – Degradação em reator solar com concentração 250ppm

Através da figura 7 é possível observar a degradação da água de produção com elevadas concentrações de contaminante. Este experimento foi realizado para mostrar que mesmo com concentrações bastante elevadas o método apresenta uma eficiência de quase 50%. Devido à elevada concentração de contaminante, o efeito do peróxido é mascarado. Como após o tratamento fotoquímico ainda será aplicado o tratamento biológico, o método se mostra bastante eficiente.

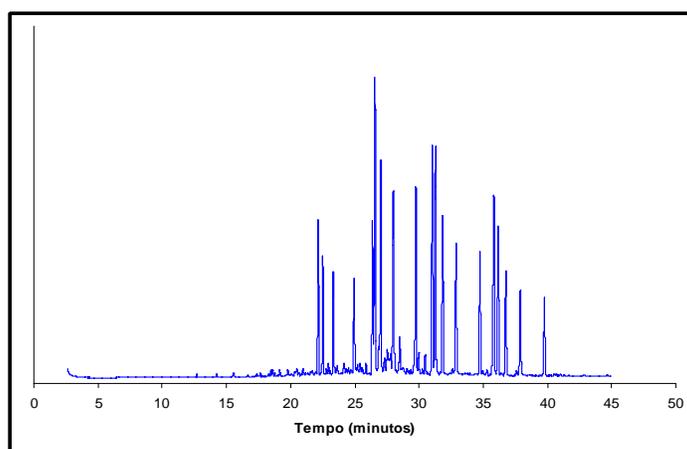


Figura 8 - Cromatograma do extrato obtido a partir das emulsões de petróleo em água

A figura 8 mostra um cromatograma do extrato obtido a partir das emulsões de petróleo em água, antes do tratamento. Pode-se observar a grande quantidade de substâncias presentes em solução.

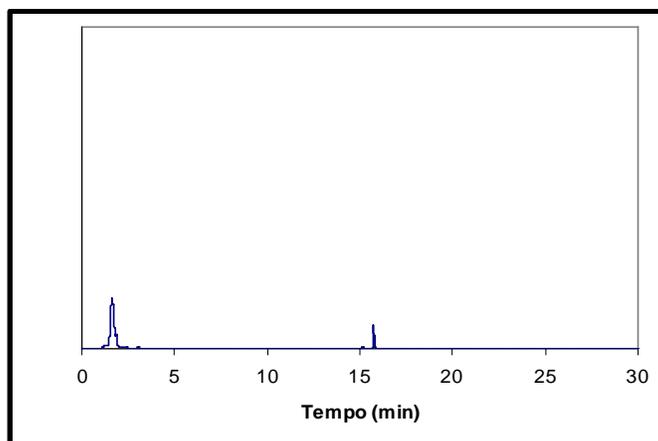


Figura 9 - Cromatograma obtido ao final do processo foto-Fenton.

A figura 9 mostra o cromatograma ao final do processo foto-Fenton. Observa-se que os compostos presentes são oxidados, não sendo detectados pelo método cromatográfico usado. Os compostos orgânicos são oxidados a álcool, aldeídos e ácidos orgânicos. Os ácidos orgânicos, em geral, podem servir de extrato para um processo biológico. Através da Figura 10 é possível observar o aspecto da água de produção antes, durante e após o tratamento com o processo Foto-Fenton.

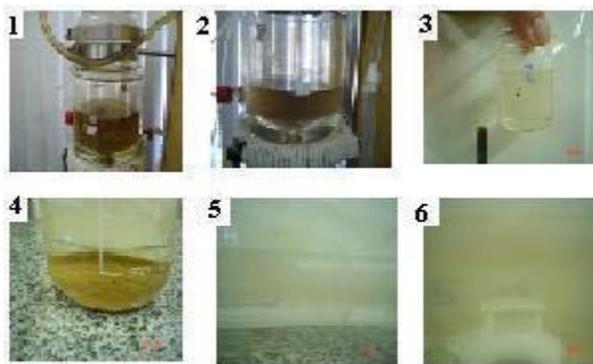


Figura 10 - Aspectos da água de produção antes, durante e após o tratamento com o processo sugerido.

(1) – Início do processo; (2) – Durante o processo; (3) – Aspecto da água após o tratamento; (4) – Sedimentação do Ferro após o processo; (5) e (6) – Aspecto da água após o tratamento (observar limpidez e transparência).

O ferro sedimentado pode ser retirado através de processo de floculação, não sendo necessário assim esperar algum tempo para que sedimente.

Foram realizadas análises da água, ficando demonstrada a possibilidade de utilização na agricultura, apresentando-se fora do padrão de potabilidade apenas no teor de nitrogênio, que será corrigido através do processo biológico, que se alimenta basicamente de nitrogênio. Os resultados encontram-se na tabela 2.

Tabela 2 – Análise da água após o processo foto-Fenton.

Análise físico-química	Valor máximo (água potável)	Valor máximo (água para irrigação)	Valor obtido neste trabalho
Nitrito (mg/L)	1,0	1,0	0,1
Nitrato (mg/L)	10,0	20,0	14,3
Nitrogênio Amoniacal (mg/L)	3,7 para pH<7,5	13,3 para pH<7,5	2,52
pH	6 a 9	6 a 9	2,57
Sólidos Totais Dissolvidos (mg/L)	500	500	206
Sulfato (mg/L)	250	250	71,82
Turbidez (NTU)	40	100	19,2

Os experimentos com o reator biológico ainda não apresentaram valores significativos, porém mediante as evidências é possível combinar os processos mencionados.

Os resultados apresentam a viabilidade de uso do processo foto-Fenton como pré-tratamento para águas de produção em campos de petróleo, pois apesar dos resultados da espectrofotometria apresentar compostos orgânicos ao final do processo, as análises cromatográficas mostram que os compostos que apresentam presença do anel aromático são oxidados, restando no meio substâncias que não apresentam toxicidade a um processo biológico.

---

---

Capítulo VI

***CONCLUSÃO***

---

---

## 6- Conclusão

Neste trabalho estudou-se a degradação da água de produção através do processo foto-Fenton e estudos sobre o processo combinado fotoquímico/biológico foram realizados constatando-se a possibilidade da utilização do método combinado, porém não foram obtidos resultados relevantes em virtude dos microorganismos apresentarem difícil adaptação.

Os experimentos permitiram verificar a eficiência do método utilizando o processo foto-Fenton. Obteve-se a degradabilidade, avaliada através de análises espectrofotométricas e cromatográficas da solução de água de produção. O processo Foto-Fenton mostrou-se bastante eficaz, obtendo-se remoções significativas de hidrocarbonetos entre 65% e 99%, produzindo um efluente com concentrações de poluentes dentro dos limites estabelecidos para descarte ou reaproveitamento.

Este trabalho apresenta grande aplicabilidade e importância, pois o tratamento utilizado atualmente não apresenta níveis de emissão para rios, apresentando benefícios econômicos, sociais e ambientais. Econômicos, porque os custos com bombeamento até os emissários serão reduzidos, visto que a água após o tratamento apresenta níveis aceitáveis para emissão de acordo com os órgãos regulamentadores. Sociais, pois se a região circunvizinha apresentar escassez de água após o tratamento a água poderá ser utilizada para irrigação. Ambiental, pois não apresenta níveis de poluição ao meio ambiente. Imaginemos que, mesmo sendo descartada em alto mar, a água tratada pelos métodos convencionais, utilizados atualmente, representa um grande volume devido à vazão diária que é cerca de 100.000m<sup>3</sup>, quando somados os volumes descartados representam um grande risco de dano ambiental.

---

---

Capítulo VII

***REFERÊNCIAS***

---

---

## 7- Referências

- **ABDERRAZIK, N.; MOMANI, F. A.; SANS, C.; ESPULGAS, S.** Combined advanced oxidation with biological treatment. *Afinidad Lix*, 498, p. 141-146, 2002;
- **ALLEN, R. & ROBINSON, KEITH.** *Environmental Aspects of Produced Water Disposal*. SPE 25549. 1993.
- **ALNAIZY, R.; AKGERMAN, A.** Advanced oxidation of phenolic compounds. *Advances in Environmental Research*, 4, p. 233-244, 2000;
- **ARPEL.** (1 993). *Diretriz Para a Eliminação e o Tratamento da Água de Produção*. 120 p.;
- **BENITEZ, F.J.; ACERO, J.L; GONZALEZ, T.; GARCIA, J.** Organic matter removal from wastewater of the black olive industry by chemical and biological procedures. *Process Biochemistry*, 37, p.527-265, 2001;
- **BOSSMANN, S.H.; OLIVEROS, E.; GÖB, S.; SIEGWART, S.; DAHLEN, E.P.; PAYAWAN, L.; STRAUB, M.; WÖRNER, M.; BRAUN, A.M.** New evidence against hydroxyl radicals as reactive intermediates in the thermal and photochemically enhanced Fenton Reactions. *J.Phys. Chem. A*, 102, p. 5542-5550, 1998;
- **CAMPOS, J.C.;BORGES, R.M.H; OLIVEIRA FILHO A. M; NOBREGA, R.; SANT'ANNA G.L.,**Oilfield wastewater treatment by combined microfiltration and biological processes. *Water Research*, 36 p 95-104, 2002;
- CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE (CONAMA) - RESOLUÇÃO Nº 357, DE 17 DE MARÇO DE 2005.
- **ESPULGAS, S.; GIMENÉZ, J.; CONTRERAS, S.; PASCUAL, E.; RODRIGUEZ, M.** Comparison of different advanced oxidation processes for phenol degradation. *Water Res.*, 36, p. 1034-1042, 2002;
- **FAHMI, NISHIJIMA, W.; OKADA, M.** Improvement of DOC removal by multi-stage AOP-biological treatment. *Chemosphere*, 50, p. 1043-1048, 2003.

- **FAKNESS, L.G; GRINI, P.G.; DALING, P.S.**, Partitioning of semi soluble organic compounds between the water phase and oil droplets in produced water, *Marine Pollution Bulletin*, 48, p 731-742, 2004.
- **GIMENEZ, J.; CURCÓ, D.A.; QUERAL, M.A.** Photocatalytic treatment of phenol and 2,4-dichlorophenol in a solar plant in the way of sacling-up. *Cat.Today*, 54, p. 229-243, 1999.
- **HENDERSON, S. B.; GRIGSON, S. J. W.; JOHNSON, P. and RODDIE.** Potential Impact of Production Chemicals on the Toxicity of Produced Water Discharges from North Sea Oil Platforms. *Marine Pollution Bulletin*, vol. 38, 12, pp. 1141-1151, 1999.
- **HUSTON, P.L.; PIGNATELLO, J.J.** Degradation of selected pesticide active ingredients and commercial formulations in water by the photoassisted Fenton reaction. *Water Res.*, 33, p. 1238-1246, 1999;
- **KAI, YURIKA FUKUSHIMA.** Estudo para destinação de água de produção de petróleo. Dissertação de Mestrado; Universidade de São Paulo, 2005.
- **KAVITHA, V.; PALANIVELU, K.** The role of ferrous ion in Fenton and photo-Fenton processes for the degradation of phenol. *Chemosphere*, 55, p.1235-1243, 2004;
- **LAAT, J.D.; GALLARD, H.; ANCELIN, S.; LEGUBE, B.** Comparative study of the oxidation of atrazine and acetone by  $H_2O_2/UV$ ,  $Fe(III)/UV$ ,  $Fe(III)/H_2O_2/UV$  and  $Fe(II)$  or  $Fe(III)/H_2O_2$ . *Chemosphere*, 39, 15, p. 2693-2706, 1999.
- **LEGRINI, O.; OLIVEROS, E.; BRAUN, A.M.** Photochemical processes for water treatment. *Chem.Rev.* 93, p.671-698, 1993;
- **LU, M.C.; CHEN, J.N.** Treatment of pesticide wastewater by photocatalytic oxidation. *Water Sci. Technol*, 36, p.117-122, 1997;
- **MACIEL, R.; SANT'ANNA JR, G. L.; DEZZOTTI, M.**, Phenol removal from high salinity effluent using Fenton's reagent and photo-Fenton reactions, *Chemosphere*, 57, p.711-719, 2004;
- **MARCO, A.; ESPULGAS, S.; SAUM, G.** How and why combine chemical and biological processes for wastewater treatment. *Water Research*, 35, 4, p. 321-327, 1997;

- **MATSUDA, FERNANDA YUMI.** Tratamento de efluente através do processo foto-Fenton integrado a um processo biológico. Dissertação de Mestrado; Universidade de São Paulo, 2005.
- **MORAES, J.E.F.; QUINA, F.H.; NASCIMENTO, C.A.O.; SILVA, D.N.; CHIAVONE-FILHO, O. (2004)** “Treatment of saline wastewater contaminated with hydrocarbons by the photo-Fenton process” *Eviron.Sci.Technol* 38, p.1183-1187.
- **MORAES, J.E.F.; WILL, I.B.S.; YU, J.; TEIXEIRA, A.C.S.C.; GUARDANI, R.** Photocatalytic degradation of phenol in water by the photo-Fenton process. *Anais do 3<sup>rd</sup> European Congress of Chemical Engineering (ECCE)*, Nuremberg, Alemanha, 2001.
- **NADTOCHENKO, V.; KIWI, J.** Photo induced mineralization of oxydine by the Fenton reagent, 2, Implications of the precursors formed in the dark. *Environ.Sci.Technol.*, 32, p. 3282-3285, 1998.
- **OLIVEROS, E.; LEGRINI, O.; HOHL, M.; MÜLLER, T.; BRAUN, A.M.** Industrial waste water treatment: large scale development of a light-enhanced Fenton reaction. *Chem.Eng.Proc.*, 36, 397-405, 1997b.
- **PIGNATELLO, J.J.; SUN, Y.** Complete oxidation of metolachlor and methyl parathion in water by the photoassisted Fenton reaction. *Water Res.*, 29, p. 1837-1844, 1995.
- **RODRIGUES, M.; SARRIA, V.; ESPULGAS, S.; PULGARIN, C.** Photo-fenton treatment of a biorecalcitrant wastewater generated in textile activities: biodegradability of the photo-treated solution. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 151, p. 129-135, 2002.
- **SANZ, J.; LOMBRANA, J.I.; LUIS, A.M.; ORTUETA, M.; VARONA, F.** Analysis of the efficiency of three advanced oxidation processes on the generation of hydroxyl radicals in the treatment of phenol. In: 15<sup>th</sup> International Congress of Chemical and Process Engineering, Praha, Czech Republic, 2002.
- **SCHECK, C.K.; FRIMMEL, F.H.** Degradation of phenol and salicylic acid by ultraviolet radiation/hydrogen peroxide/oxygen. *Water Research*, 29, 10, p. 2346-2352, 1995.

- **SPERLING, M.V. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias.** 2.ed.Belo Horizonte: SEGRAC, 1996.243p.
- **VENKATADRI, R.; PETERS, R.W., Hazardous Waster and Hazardous Material,** nº2, vol.10 p 107-149, 1993.
- **WILL, I.B.S.; MORAES, J.E.F.; TEIXEIRA, A.C.S.C.; GUARDANI, R.; NASCIMENTO, C.A.O.**Photodegradation of wastewater containing organic compounds in solar reactors. Sep.Purif.Technol.,34, p.51-57, 2004;

---

---

Capítulo VIII

***CRONOGRAMA DE EXECUÇÃO***

---

---

## 8- Cronograma de Execução

	1ºSemestre	2ºSemestre	3ºSemestre	4ºSemestre
<b>Pesquisa Bibliográfica</b>	<b>OK</b>		<b>OK</b>	
<b>Montagem do sistema fotoquímico</b>	<b>OK</b>			
<b>Realização de Experimentos no reator fotoquímico</b>		<b>OK</b>	<b>OK</b>	<b>OK</b>
<b>Montagem do sistema biológico</b>			<b>OK</b>	
<b>Ensaio no reator biológico</b>			<b>OK</b>	<b>OK</b>
<b>Disciplinas</b>	<b>OK</b>	<b>OK</b>	<b>OK</b>	<b>OK</b>
<b>Trabalhos de Congressos</b>	<b>OK</b>	<b>OK</b>	<b>OK</b>	<b>OK</b>
<b>Redação da Monografia</b>				<b>OK</b>

---

---

Capítulo IX

***RELATÓRIO DE ESTÁGIO***

---

---

## **9- Relatório de Estágio**



---

**Universidade Federal do Rio Grande do Norte  
Centro de Tecnologia  
Departamento de Engenharia Química**

*Relatório de Estágio Supervisionado  
Empresa:*



**PETRÓLEO BRASILEIRO S.A.  
PETROBRAS**

**"Avaliação de Compressores"**

**Aluna:**

***Gabriela Miranda de Assis Cunha***

**Orientador de Estágio:**

***Profº João Fernandes de Sousa***

**Supervisor de Estágio:**

***Eng. Processamento Cícero Sena Moreira Gomes***

Natal, 22 de Novembro de 2006.

Gabriela Miranda de Assis Cunha

## Relatório de Estágio Supervisionado

*Relatório apresentado junto ao Departamento de Engenharia Química da UFRN como pré-requisito para obtenção do conceito na disciplina DEQ0330 – Estágio Supervisionado, visando a conclusão do curso de graduação em Engenharia Química.*

Natal/RN

Novembro de 2006.

# Resumo

---

O presente relatório visa relatar as atividades realizadas pela estagiária Gabriela Miranda de Assis Cunha, aluna do curso de Engenharia Química da Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, na empresa Petróleo Brasileiro S.A. - PETROBRAS, na área correspondente ao Suporte Técnico da Engenharia de Instalações, Processamento e Automação da Unidade de Negócios do Rio Grande do Norte e Ceará (UN-RNCE), durante o período de 16 de janeiro de 2006 a 22 de novembro de 2006, com uma carga horária total superior a 360 horas, sendo supervisionado pelo Engenheiro de Processamento Cícero Sena Moreira Gomes e orientado pelo Prof. Dr. João Fernandes de Sousa, professor do Departamento de Engenharia Química da UFRN.

A disciplina de estágio supervisionado tem como objetivo possibilitar que o aluno possa vivenciar o dia-a-dia de uma indústria, facilitando a sua inserção no mercado de trabalho. Durante o estágio o aluno pode expor seus conhecimentos adquiridos durante a sua vida acadêmica, adquirir conhecimentos não só no trabalho, como também de vida e participar da rotina da empresa.

# Índice

---

<b>1 - INTRODUÇÃO.....</b>	<b>11</b>
<b>2 - A EMPRESA.....</b>	<b>13</b>
2.1 - HISTÓRICO DA EMPRESA.....	14
2.2-ATIVIDADES DA PETROBRAS.....	17
2.2.1 – <i>Exploração e Produção</i> .....	17
2.2.2 – <i>Gás Natural</i> .....	18
2.2.3 – <i>Energia</i> .....	18
2.2.4 – <i>Refino</i> .....	18
2.2.5 – <i>Transporte e Armazenamento</i> .....	19
2.2.6 – <i>Distribuição</i> .....	19
2.3 – A PETROBRÁS EM NÚMEROS.....	19
2.4 – A AUTO-SUFICIÊNCIA.....	19
2.5-ATIVIDADES DA PETROBRAS NA BACIA POTIGUAR.....	21
2.5.1 – <i>Ativos</i> .....	22
2.5.2 - <i>O Suporte Técnico</i> .....	22
<b>3 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>25</b>
3.1 - A ORIGEM DO PETRÓLEO.....	25
3.2 - CLASSIFICAÇÃO DO PETRÓLEO.....	25
3.3 - FLUIDOS PRODUZIDOS.....	26
3.3.1 – <i>O gás natural</i> .....	26
3.3.1.1 – Tipos de gás natural.....	27
3.3.1.1.1 – Gás Rico.....	28
3.3.1.1.2 – Gás Pobre.....	28
3.3.1.1.3 – Gás Industrial.....	28
3.3.1.1.4 – Gás Natural Liquefeito (GNL).....	28
3.3.1.1.4 – Gás Natural Comprimido (GNC).....	28
3.3.2 – <i>O Óleo</i> .....	28
3.3.3 – <i>A Água</i> .....	29
3.4 – PROCESSAMENTO DE HIDROCARBONETOS.....	29
3.4.1 - <i>Transporte de Hidrocarbonetos</i> .....	29
3.4.2 - <i>Separação de Hidrocarbonetos</i> .....	29
3.5 – PROPRIEDADES FÍSICAS DOS FLUIDOS.....	30
3.5.1 – <i>Viscosidade Dinâmica ou Absoluta</i> .....	30
3.5.2 - <i>Massa Específica (Densidade)</i> .....	31
3.5.3 - <i>Fator de Compressibilidade</i> .....	32
3.6 - PERDA DE CARGA.....	32
3.6.1 - <i>Tipos de perda de carga</i> .....	32
3.6.2 - <i>Expressão geral da perda de carga distribuída</i> .....	33
3.6.3 - <i>Expressão geral da perda de carga localizada</i> .....	33
3.6.4 – <i>Escoamento de Gases Combustíveis – Fórmula de Weymouth</i> .....	35
3.7 - EQUAÇÕES DE ESTADO.....	35
3.7.1 - <i>Van Der Waals</i> .....	36
3.7.2 - <i>Princípios de Estados Correspondentes</i> .....	36
3.8 - SIMULADORES.....	37
3.9 – EQUIPAMENTOS.....	38
3.9.1 – <i>Compressores</i> .....	38

3.9.1.1 – Tipos de Compressores.....	39
3.9.1.1.1 – Compressores Alternativos .....	39
3.9.1.1.1.1 – Elementos Básicos do Compressor Alternativo .....	40
3.9.1.1.1.2 – Princípio de Funcionamento.....	40
3.9.1.1.1.3 – Razão de Compressão .....	42
3.9.1.1.1.4 – Vazão do Compressor Alternativo .....	44
3.9.1.1.1.5 – Rendimento Volumétrico.....	44
3.9.1.1.1.6 – Potência consumida na compressão.....	45
3.9.1.1.1.6 – Temperatura de descarga .....	46
3.9.1.1.1.7 – Carga na Haste de compressão.....	46
3.9.1.1.1.8 – Carga na Haste de tração.....	46
3.9.1.1.1.9 – Potência de eixo.....	46
3.9.1.1.2 – Compressores Centrífugos .....	46
3.9.2 – Válvulas.....	47
3.9.2.1 – Válvulas Globo .....	47
3.9.2.2 – Dimensionamento de Válvulas.....	48
3.9.2.3 – Coeficiente de Vazão (Cv) .....	48
<b>4 - ATIVIDADES REALIZADAS .....</b>	<b>53</b>
4.1 ATIVIDADES PROPOSTAS.....	53
4.2 ATIVIDADES DESENVOLVIDAS .....	53
4.2.1 - <i>Avaliação do desempenho de um compressor alternativo</i> .....	54
4.2.1.1 - Introdução.....	54
4.2.1.2 - Premissas do Processo.....	54
4.2.1.3 – Condições de operação .....	56
4.2.1.4 – Cálculo do número de estágios.....	57
4.2.1.5 – Resultados e Discussões .....	57
4.2.1.5.1 – Duplo efeito – 2 cilindros – caso A.....	57
4.2.1.5.2 – Simples efeito – 2 cilindros – caso B.....	59
4.2.2 - <i>Avaliação do teste de Performance de compressor centrífugo</i> .....	59
4.2.2.1 - Objetivo.....	59
4.2.2.2 – Premissas básicas .....	59
4.2.2.3 – Memória de Cálculo.....	61
4.2.3 - <i>Elaboração de Memorial Descritivo</i> .....	63
4.2.4 - <i>Cálculo da Perda de Carga</i> .....	63
4.2.4.1 – Perda de carga em líquidos.....	63
4.2.5.2 – Perda de carga em gases.....	64
4.2.6 - <i>Realização de Relatórios Técnicos Econômicos</i> .....	65
4.2.7 - <i>Pesquisa de Dados e Construção de uma Planilha para Cálculo de Propriedades</i> .....	65
4.2.8 – <i>Avaliação das válvulas redutoras de pressão</i> .....	65
4.2.8.1 – Premissas básicas .....	66
4.2.8.2 – Memória de Cálculo.....	67
4.2.8.3 – Conclusões.....	68
4.2.9 – <i>Elaboração de Projeto Conceitual</i> .....	68
4.2.10 – <i>Elaboração de Relatórios Técnicos</i> .....	69
4.2.11 - <i>Visitas Técnicas</i> .....	69
4.2.11.1 - Pólo de Guimarães.....	69
4.2.11.2 - Plataforma.....	71
4.2.11.3 – Área Sul de Mossoró.....	72
<b>5 - CONCLUSÕES .....</b>	<b>74</b>
<b>6 - REFERÊNCIAS .....</b>	<b>76</b>
<b>6 - ANEXO I .....</b>	<b>78</b>

# Lista de Figuras

---

FIGURA 1 – ORGANOGRAMA SIMPLIFICADO DO ÓRGÃO DE LOTAÇÃO DO ESTÁGIO..	22
FIGURA 2. PLACAS PLANAS CONTENDO ENTRE SI UM FLUIDO .....	30
FIGURA 3 – TELA DE APRESENTAÇÃO DO COMPRESS .....	38
FIGURA 4 – COMPRESSOR ALTERNATIVO À PISTÃO.....	39
FIGURA 5 – ETAPAS NO FUNCIONAMENTO DO COMPRESSOR ALTERNATIVO .....	41
FIGURA 6 – CICLO TERMODINÂMICO DE UM COMPRESSOR .....	42
FIGURA 7 – ESQUEMA SIMPLIFICADO DE UM PROCESSO DE COMPRESSÃO.....	42
FIGURA 8 – VÁLVULA GLOBO .....	48
FIGURA 9 – ESQUEMA DO PROCESSO MENCIONADO.....	55
FIGURA 10 – REGIÃO DE OPERAÇÃO DO COMPRESSOR – FAIXAS DE PRESSÃO.....	57
FIGURA 11 – REGIÃO DE OPERAÇÃO – POTÊNCIA .....	58
FIGURA 13 – REGIÃO DE OPERAÇÃO – POTÊNCIA .....	59
FIGURA 14 - LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA DO PÓLO DE GUAMARÉ .....	70
FIGURA 15 - PÓLO INDUSTRIAL DE GUAMARÉ.....	70
FIGURA 16- PLATAFORMA DE UBARANA 2 (PUB-02) .....	71
FIGURA 17 – CAMPO DA ÁREA SUL DE MOSSORÓ.....	72
FIGURA 18 – LAYOUT DA PLANILHA DESENVOLVIDA PARA O CÁLCULO DA PERDA DE CARGA EM LÍQUIDOS.....	90
FIGURA 19 – LAYOUT DA PLANILHA DESENVOLVIDA PARA O CÁLCULO DE PROPRIEDADES DO GÁS NATURAL.....	90
FIGURA 20 – LAYOUT DA PLANILHA DESENVOLVIDA PARA O CÁLCULO DA PERDA DE CARGA EM GASES .....	91
FIGURA 21 – LAYOUT DA PLANILHA DESENVOLVIDA PARA O CÁLCULO DO CV DA VÁLVULA.....	91
FIGURA 22. CURVA CARACTERÍSTICA DA VÁLVULA EXISTENTE NA EV-A PARA UMA PRESSÃO À MONTANTE DE 35 KGF/CM2 .....	93
FIGURA 23. CURVA CARACTERÍSTICA DA VÁLVULA EXISTENTE NA EV-A PARA UMA PRESSÃO À MONTANTE DE 35 KGF/CM <sup>2</sup> , OPERANDO EM CONDIÇÕES LIMITES DE VAZÃO.....	93
FIGURA 24. CURVA CARACTERÍSTICA DA VÁLVULA EXISTENTE NA EV-B PARA UMA PRESSÃO À MONTANTE DE 35 KGF/CM2 .....	94
FIGURA 25. CURVA CARACTERÍSTICA DA VÁLVULA EXISTENTE NA EV-VII-ET PARA UMA PRESSÃO À MONTANTE DE 35 KGF/CM2 , OPERANDO EM CONDIÇÕES LIMITES DE VAZÃO.....	94

# Lista de Tabelas

---

TABELA 1 – FAIXAS DE APLICAÇÃO DOS COMPRESSORES.....	39
TABELA 2 - COMPOSIÇÃO DO GÁS USADA NA SIMULAÇÃO DO COMPRESSOR ALTERNATIVO .....	56
TABELA 3 – PRESSÕES DE SUCÇÃO E DESCARGA AVALIADAS PARA OS CASOS A E B 57	
TABELA 4 - FAIXAS DE VAZÃO E PRESSÃO, OBTIDOS A PARTIR DE DADOS DE PROJETO.....	60
TABELA 5. COMPOSIÇÃO DO GÁS NA SUCÇÃO DO PRIMEIRO ESTÁGIO .....	60
TABELA 6 – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO TESTE DE FÁBRICA .....	61
TABELA 7 - RESULTADOS SIMULAÇÃO TESTES EM CAMPO.....	62
TABELA 8. FAIXAS DE VAZÃO E PRESSÃO, OBTIDOS A PARTIR DE DADOS DE PROJETO .....	66
TABELA 9. COMPOSIÇÃO DO GÁS RICO UTILIZADO NA ALIMENTAÇÃO DA EV-A E EV-B .....	66
TABELA 10. PROPRIEDADES FÍSICAS E TERMODINÂMICAS DO GÁS.....	67
TABELA 11. PARÂMETROS CALCULADOS E CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO DO SISTEMA..	68
TABELA 12 – COMPARAÇÃO ENTRE OS PARÂMETROS INICIAIS FORNECIDOS PELA FD COM O VALOR SIMULADO.....	78

---

---

# Introdução

---

---

# 1

---

## 1 - Introdução

Neste relatório serão apresentadas as atividades desenvolvidas referentes ao estágio supervisionado realizado na PETROBRAS, no Setor de Engenharia de Instalações, Processamento e Automação, do Suporte Técnico da Unidade de Negócios do Rio Grande do Norte e Ceará - UN-RNCE.

As atividades foram realizadas como intuito de avaliar compressores alternativos e centrífugos, que são utilizados na empresa com a finalidade de proporcionar a elevação da pressão de um gás ou em escoamento gasoso. Além dessas atividades, outras foram realizadas com o objetivo de adquirir conhecimentos na área de Engenharia de Processamento, participar de pareceres técnicos, e resolver problemas operacionais que ocorrem eventualmente no campo.

---

---

# **A empresa**

---

---

# 2

---

## 2 - A Empresa

A Petrobrás foi a indústria de petróleo pioneira no Brasil, e este pioneirismo foi o responsável por várias dificuldades, entre as quais a falta de infra-estrutura e de tecnologias adequadas. Nos anos 50 e 60, a empresa construiu suas primeiras refinarias, que em conjunto com os campos descobertos e explorados no solo baiano iriam formar o núcleo de crescimento de uma das mais importantes empresas da América Latina.

A indústria nacional era, então, pouco desenvolvida, e a Petrobrás contribuiu, assim, para estimular seu crescimento.

Naquela época, com a necessidade de dotar o Brasil de uma infra-estrutura adequada, o Governo brasileiro optou pela substituição de importações e pelo incentivo à instalação de empresas estrangeiras no Brasil.

No início da década de 80, este modelo foi substituído, na Petrobrás, pelo Sistema de Nacionalização. Além da substituição da importação de itens prioritários, este sistema passou a buscar fornecedores alternativos e uma maior autonomia de decisão da empresa nos aspectos tecnológicos e industriais.

A demanda por materiais altamente sofisticados era crescente, principalmente pela necessidade de viabilizar a extração do óleo e do gás em águas cada vez mais profundas, situação em que, muitas vezes, não havia, no mundo, tecnologias disponíveis para esse propósito.

No final da mesma década, com a legislação que previa a modernização e o aumento da competitividade do parque industrial no Brasil, foram criados mecanismos de estímulo ao desenvolvimento tecnológico. O mercado interno, a esta altura, já atendia a 94% das necessidades da Petrobrás.

Em 1997, a Petrobras passou a atuar em um novo cenário de competição instituído pela Lei 9478, que abriu as atividades da indústria petrolífera no

Brasil à iniciativa privada. Nesse mesmo ano, o Brasil ingressou no seleto grupo de 16 países que produz mais de 1 milhão de barris de óleo por dia. Com a lei, foram criadas a Agência Nacional do Petróleo (ANP), encarregada de regular, contratar e fiscalizar as atividades do setor e o Conselho Nacional de Política Energética, um órgão formulador da política pública de energia.

Em 1998, a Petrobras ocupava a posição de 14<sup>a</sup> maior empresa de petróleo do mundo e a sétima maior entre as empresas de capital aberto, segundo a pesquisa divulgada pela Petroleum Intelligence Weekly.

Com sede localizada na cidade do Rio de Janeiro, a Petrobrás possui escritórios e gerências de administração em importantes cidades brasileiras como Salvador, Brasília e São Paulo. Devido à alta competitividade do novo cenário da indústria de energia, a Petrobrás reposicionou-se em relação ao futuro, utilizando os mais modernos instrumentos de gestão.

A Petrobrás desenvolve diversas atividades no exterior e mantém uma consistente atividade internacional, tal como: compra e venda de petróleo, tecnologias, equipamentos, materiais e serviços; acompanhamento do desenvolvimento da economia americana e europeia; operação financeira com bancos e bolsa de valores; recrutamento de pessoal especializado; afretamento de navios; apoio em eventos internacionais, entre outros.

Além de estar presente em diversos países da América (Argentina, Bolívia, Colômbia e Estados Unidos) e África (Angola e Nigéria), a Petrobras conta ainda com o apoio de seus escritórios no exterior como em Nova Iorque (ESNOR), e no Japão (ESJAP).

Além disso, existe ainda o Centro de Pesquisas da Petrobras – CENPES que possui uma das mais avançadas tecnologias na área de petróleo, desenvolvendo técnicas e métodos próprios. As pesquisas realizadas posicionam o Brasil entre os países de tecnologia de ponta da indústria do petróleo.

## **2.1 - Histórico da Empresa**

Em outubro de 1953, através da Lei 2.004, a criação da Petrobrás foi autorizada com o objetivo de executar as atividades do setor petróleo no Brasil em nome da União.

A Petróleo Brasileiro S/A iniciou suas atividades com o acervo recebido do antigo Conselho Nacional do Petróleo (CNP), que manteve sua função fiscalizadora sobre o setor:

- Campos de petróleo com capacidade para produzir 2.700 barris por dia (bpd);
- Bens da Comissão de Industrialização do Xisto Betuminoso;
- Refinaria de Mataripe-BA (atual RELAM), processando 5.000 bpd;
- Refinaria em fase de montagem, em Cubatão-SP (atual RPBC);
- Vinte petroleiros com capacidade para transportar 221 mil toneladas;
- Reservas recuperáveis de 15 milhões de barris;
- Consumo de derivados de 137.000 bpd;
- Fábrica de fertilizantes em construção (Cubatão - SP).

Ao longo de quatro décadas, tornou-se líder em distribuição de derivados no País, num mercado competitivo fora do monopólio da União, colocando-se entre as quinze maiores empresas petrolíferas na avaliação internacional. Detentora de uma das tecnologias mais avançadas do mundo para a produção de petróleo em águas profundas e ultraprofundas, por isso a Companhia foi premiada duas vezes, em 1992 e 2001, pela Offshore Technology Conference (OTC) (\*), o mais importante prêmio do setor.

Em 1997, o Brasil, através da Petrobras, ingressou no seleto grupo de 16 países que produz mais de um milhão de barris de óleo por dia. Nesse mesmo ano foi promulgada a Lei n ° 9.478, que abriu as atividades da indústria petrolífera no Brasil à iniciativa privada.

Com a lei, foram criados a Agência Nacional do Petróleo (ANP) (\*), encarregada de regular, contratar e fiscalizar as atividades do setor e o Conselho Nacional de Política Energética, um órgão formulador da política pública de energia.

Desde então a Petrobrás dobrou sua produção e em 2003 ultrapassou a marca de dois milhões de barris de óleo e gás natural por dia. E continuará crescendo.

A explicação para o sucesso da Petrobras está na eficiência de suas unidades espalhadas por todo o Brasil: nas refinarias, áreas de exploração e de produção, dutos, terminais, gerências regionais e na sua grande frota petroleira.

Além das atividades da holding, o Sistema Petrobras inclui subsidiárias - empresas independentes com diretorias próprias, interligadas à Sede. São elas:

- **Petrobras Gás S.A - Gaspetro**, subsidiária responsável pela comercialização do gás natural nacional e importado.
- **Petrobras Química S.A - Petroquisa**, que atua na indústria petroquímica;
- **Petrobras Distribuidora S.A. - BR**, na distribuição de derivados de petróleo;
- **Petrobras Internacional S.A. - Braspetro**, que atua nas atividades de exploração e produção e na prestação de serviços técnicos e administrativos no exterior;
- **Petrobras Transporte S.A. - Transpetro**, criada para executar as atividades de transporte marítimo e dutoviário da Companhia.
- **Braspetro Oil Services Company - BRASOIL**, que atua, principalmente, na prestação de serviços em todas as áreas da indústria do petróleo, bem como no comércio de petróleo e de seus derivados.
- **Braspetro Oil Company - BOC**, que atua na pesquisa, lavra, industrialização, comércio, transporte, armazenamento, importação e exportação de petróleo e de seus derivados.
- **Petrobras International Braspetro B.V. - PIB**, participa em sociedades que atuam em pesquisa, lavra, industrialização, comércio, transporte armazenamento, importação e exportação de petróleo e de seus derivados.
- **Petrobras Negócios Eletrônicos S.A.**, participa no capital social de outras sociedades que tenham por objetivo atividades realizadas pela Internet ou meios eletrônicos.
- **Petrobras Comercializadora de Energia Ltda**, que permite a atuação da Companhia nas novas atividades da indústria de energia elétrica no Brasil
- **Petrobras International Finance Company – PIFCO**, criada com o objetivo de facilitar a importação de óleo e produtos derivados de petróleo.

A história da Petrobras se confunde com a própria história do petróleo brasileiro. Uma empresa que inicia o século XXI enfrentando todos os desafios com muita eficiência.

A Petróleo Brasileiro S/A é:

- Uma companhia integrada que atua na exploração, produção, refino, comercialização e transporte de petróleo e seus derivados no Brasil e no exterior.
- Uma empresa de energia com enorme responsabilidade social e profundamente preocupada com a preservação do meio ambiente.

- Uma companhia que tem a sua trajetória de conquistas premiada por inúmeros recordes e pelo reconhecimento internacional.

Uma nova estrutura, forte e bem posicionada, está fazendo com que a empresa alcance suas metas estratégicas de expansão, internacionalização, rentabilidade e produtividade.

De acordo com o modelo de estrutura organizacional, a Companhia passa a funcionar com quatro áreas de negócio - E&P (Exploração e Produção), Abastecimento, Gás & Energia e Internacional -, duas de apoio - Financeira e Serviços - e as unidades corporativas ligadas diretamente ao presidente. Além de melhorar todo aspecto operacional e os resultados da empresa, a nova estrutura abre espaço para que os empregados desenvolvam seu potencial e se beneficiem do valor agregado ao negócio.

A Petrobras desenvolve diversas atividades no exterior e mantém uma consistente atividade internacional, tal como: compra e venda de petróleo, tecnologias, equipamentos, materiais e serviços; acompanhamento do desenvolvimento da economia americana e européia; operação financeira com bancos e bolsa de valores; recrutamento de pessoal especializado; afretamento de navios; apoio de seus escritórios no exterior como em Nova Iorque (ESNOR), e no Japão (ESJAP).

Além disso, há o CENPES, o centro de pesquisas da Petrobras, que possui uma das mais avançadas tecnologias do mundo e é reconhecido internacionalmente pela sua grande competência.

## **2.2-Atividades da PETROBRAS**

### **2.2.1 – Exploração e Produção**

A Petrobrás, desfrutando do reconhecimento internacional, com tecnologia própria para águas ultra-profundas, está produzindo petróleo a preços competitivos em campos offshore a profundidades cada vez maiores, atraindo o interesse de companhias petrolíferas de todo o mundo, com as quais está assinando acordos de parceria para a exploração e produção de suas reservas na enorme plataforma submarina brasileira. A abertura da área de exploração e produção de suas reservas na enorme plataforma submarina brasileira. A abertura da área de exploração e produção para parceiros internacionais gerou, por sua vez, oportunidades E&P em outras partes do mundo, principalmente onde o know how da Petrobrás possa contribuir para a realização de negócios. Um exemplo disso é a expansão da presença da

Companhia no Golfo do México e na costa Oeste da África, onde sua experiência em águas profundas adiciona valor aos empreendimentos.

### **2.2.2 – Gás Natural**

O gás natural é um combustível limpo, um produto sem restrições ambientais e que reduz significativamente os índices de poluição. O combustível do futuro, como já está sendo chamado, colabora diretamente para a melhoria da qualidade de vida nas grandes metrópoles. Utilizado como matéria-prima nas indústrias siderúrgica, química, petroquímica e de fertilizantes, o gás natural fornece calor, gera eletricidade e força motriz. Na área de transportes tem a capacidade de substituir o óleo diesel, a gasolina e o álcool, participando assim direta e indiretamente da vida de toda a população. O gás natural é uma nova e promissora fronteira que se abre no horizonte energético brasileiro. Por todas as suas virtudes energéticas, econômicas e ambientais, o gás natural deverá multiplicar a sua presença na matriz energética brasileira, saltando dos atuais 8,9% para 12% em 2015. Além disso, a área de Gás & Energia atua no desenvolvimento de fontes alternativas de energia e energia renovável como forma de agregar valor aos seus negócios.

### **2.2.3 – Energia**

No início deste novo milênio a Petrobrás começou a implementar um importante plano de reestruturação com o objetivo de se tornar uma Empresa de Energia. Ao investir em energias renováveis (eólica, solar, hídrica, geotermia, biomassa, biocombustíveis), a companhia ajuda a diversificar a matriz energética brasileira.

A Petrobrás produz energia para o conforto do homem e usa toda a tecnologia a seu alcance para transformar as diferentes fontes energéticas em progresso e crescimento. Essas ações fazem parte do Plano Estratégico da Petrobrás que entre suas metas, prevê para 2010, que 10% da energia elétrica consumida em toda companhia seja obtida a partir de fontes renováveis.

### **2.2.4 – Refino**

O refino vem acompanhando de perto as transformações que a Petrobrás vivencia nos últimos anos, adequando-se ao novo modelo de mercado do setor no Brasil. O desafio de processar a crescente produção de óleo pesado brasileiro, permitindo a conversão para derivados de alto valor agregado, vem sendo vencido com investimentos e grandes avanços tecnológicos.

A Petrobrás tem batido sucessivos recordes em suas refinarias, desenvolvendo tecnologia própria e possibilitando que o petróleo nacional, de característica mais pesada, possa render uma percentagem maior de produtos nobres e aumentar a rentabilidade do negócio.

A atuação do downstream (abastecimento) é fundamental para consolidar os objetivos estratégicos da Petrobrás, que caminha para se transformar numa corporação de alto desempenho na área de energia. A intenção é firmar sua liderança no mercado brasileiro, além de expandir suas atividades no exterior, sobretudo em outros países da América Latina, onde já dispõe de refinarias na Bolívia e na Argentina.

### **2.2.5 – Transporte e Armazenamento**

A empresa subsidiária da Petrobrás responsável pelas atividades de transporte e armazenamento é a Petrobrás Transporte S.A., a Transpetro. A empresa tem como missão atuar de forma rentável na indústria de petróleo e gás, nos mercados nacional e internacional, como fornecedora de serviços de transporte e armazenamento, respeitando o meio ambiente, considerando os interesses dos seus acionistas e contribuindo para o desenvolvimento do País.

### **2.2.6 – Distribuição**

Prestar sempre os melhores serviços em mais de sete mil postos espalhados por diversas cidades e rodovias do País é o objetivo da Petrobrás Distribuidora. Com uma trajetória marcada por iniciativas pioneiras e resultados expressivos, a BR mantém a liderança no mercado brasileiro de distribuição de derivados de petróleo, tendo mais de dez mil grandes empresas como clientes.

A maior distribuidora do Brasil está presente em diversos segmentos da indústria: automotivo, marítimo, ferroviário e na aviação. Com isso, os produtos da Petrobrás Distribuidora estão voltados para diferentes aplicações no mercado. Através de um rígido sistema de controle, a empresa garante a alta qualidade que a colocou na liderança do mercado nacional.

## **2.3 – A Petrobrás em números**

\* Dados referentes ao ano de 2005.

1. Exploração: 64 sondas de perfuração (42 marítimas);
2. Reservas: 11.77 bilhões de barris de óleo e gás equivalente;
3. Poços produtores: 14.061 (1.258 marítimos);
4. Plataformas de produção: 97 (73 fixas; 24 flutuantes);
5. Refinarias: 16;
6. Dutos: 30.343 km;

## **2.4 – A auto-suficiência**

Alcançar a auto-suficiência sustentável sempre foi uma meta para o Brasil e conseqüentemente para a Petrobras; significa reduzir a vulnerabilidade do País às flutuações internacionais do mercado de petróleo, ou seja, a Petrobras tem que sustentar sua produção acima da demanda a longo prazo. A trajetória da Petrobras até o alcance da auto-suficiência foi marcada por altos investimentos em avanços tecnológicos e recordes de perfuração em águas profundas, além do aperfeiçoamento de diversas atividades da Companhia.

Em 1974, descobriu-se a mais importante província petrolífera do país, a Bacia de Campos, um marco rumo à auto-suficiência. Nos anos seguintes a Petrobras recebeu duas vezes o OTC Award, pelas inovações tecnológicas conseguidas no projeto de produção do campo gigante de Roncador, na Bacia de Campos.

No final dos anos 70 a produção média brasileira ainda era de 200 mil barris por dia, enquanto o consumo atingia 1 milhão 115 mil barris/dia. O desafio passou a ser o descobrimento de grandes reservas para aumentar produção, e a Companhia lançou o Plano de Ação do Setor de Petróleo, que estabeleceu recursos para aumentar a produção, já almejando a auto-suficiência.

Nos anos 90 a Petrobras conquistou a posição de maior produtora em águas profundas do mundo, com cerca de 65% da área de seus blocos exploratórios offshore a profundidades de mais de 400 metros, graças a investimentos tecnológicos e programas como o Procap – Programa de Desenvolvimento Tecnológico para Sistemas de Exploração em Águas Profundas-, que tem como objetivo melhorar a competência técnica da companhia na produção de petróleo e gás natural em águas profundas. Os resultados levaram a Companhia a lançar o Procap 2000 e, no ano de 2000, o Procap 3000, com foco na exploração em águas ultraprofundas.

A produção doméstica de petróleo atingiu a marca de 1,54 milhão de barris por dia em 2003, representando cerca de 91% da demanda de derivados do país. A meta de produção nacional estabelecida no Plano Estratégico Petrobras 2015 é de 2,3 milhões de barris por dia em 2010. Para isso, serão implantados 15 grandes projetos de produção de petróleo até o ano de 2008

O ano de 2006 marca a auto-suficiência sustentável do Brasil na produção de petróleo. Com o início das operações da FPSO (Floating Production Storage Offloading) P-50 no campo gigante de Albacora Leste, no norte da Bacia de Campos (RJ), onde se extraem 84% da produção nacional. Albacora Leste está localizada a 120 quilômetros a partir do Cabo de São Tomé, ocupando uma área de 141 quilômetros quadrados onde a profundidade varia de 800 a dois mil metros.

A P-50 é a principal responsável pela auto-suficiência, que tornará o processo sustentável ao atingir sua plena capacidade de produção de 180 mil barris por dia. Suas medidas são 337 metros de comprimento, 21 metros de calado (parte submersa) e 55 metros de altura. O sistema de ancoragem é do tipo Dicas, que permite um número maior de poços conectados diretamente à plataforma, reduzindo custos. Ao todo, o sistema contempla 30 poços, dos quais 16 são produtores e 14 injetores de água. Os poços são interligados à plataforma por 416 km de linhas flexíveis.

A plataforma é o resultado da conversão do casco do navio Felipe Camarão, da frota da Petrobras, em unidade de produção do tipo FPSO – que produz, processa, armazena e escoar o óleo e o gás. Esta conversão foi realizada em Cingapura pelo estaleiro Jurong, em 2003, mas no Brasil foram construídos os módulos que ficam sobre o casco e a integração de todos os componentes da plataforma. Essas obras geraram quatro mil empregos diretos e 12 mil indiretos no país.

A unidade vai integrar um sistema petrolífero que abriga 34 unidades de produção, fixas e flutuantes, e produz diariamente cerca de 1,4 milhão de barris de óleo. A plataforma será responsável pelo aumento da produção brasileira de óleo e gás em 7%, até meados de 2006, quando alcançará sua capacidade máxima, e também terá capacidade de comprimir 6 milhões de metros cúbicos diários de gás, além de estocar 1,6 milhão de barris de óleo. Em parceria com a Repsol YPF, que detém 10% do projeto, a Petrobras investiu 1,95 bilhão de dólares para desenvolver o campo. Esse total inclui os gastos com sondas, perfuração, além da conversão do navio, que custou cerca de 650 milhões de dólares.

## **2.5-Atividades da PETROBRAS na Bacia Potiguar**

A Petrobrás tem como objetivo realizar atividades de exploração e produção, refino transporte, armazenamento e distribuição.

As atividades da PETROBRAS no Rio Grande do Norte e Ceará abrangem as áreas de produção da Bacia Potiguar, e estão vinculadas ao sistema PETROBRAS mediante a existência da UN-RNCE.

A UN-RNCE é uma unidade integrada que, além de explorar, processa o petróleo e o gás natural transformando-os em: diesel, querosene de aviação - QAV, GLP, NAFTA e gás industrial.

A UN-RNCE tem como objetivos:

- Procurar reservatórios de petróleo e gás natural;
- Conduzir trabalhos de perfuração de poços visando, principalmente, a descoberta e exploração de reservatórios de óleo e gás;

- Promover o desenvolvimento, a produção e o armazenamento de petróleo e gás natural associados a UN-RNCE, estão os ativos de produção:
- Ativo de Produção de Mossoró – ATP-MO;
- Ativo de Produção do Alto do Rodrigues – ATP-ARG;
- Ativo de Produção do Mar – ATP-MAR;
- Unidade de Tratamento e Processamento de Fluidos – UTPF.

Abaixo na figura 1, esta mostrada o organograma simplificado do órgão de lotação do estágio.

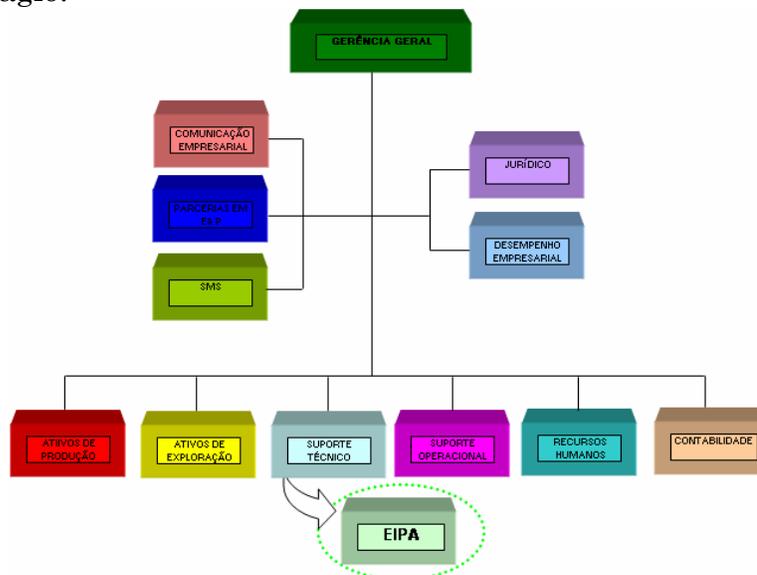


Figura 1 – Organograma simplificado do órgão de lotação do estágio

### 2.5.1 – Ativos

São quatro os ativos, sendo três de produção e um de tratamento e processamento:

- Ativo de Produção de Mossoró – ATP-MO;
- Ativo de Produção do Alto do Rodrigues – ATP-ARG;
- Ativo de Produção do Mar – ATP-MAR;
- Unidade de Tratamento e Processamento de Fluidos – UTPF.

A principal missão dos ativos é gerir as concessões de produção de sua área de atuação, responsabilizando-se pelos seus resultados, de acordo com as políticas e diretrizes da UN.

### 2.5.2 - O Suporte Técnico

O estágio foi desenvolvido na área correspondente ao suporte técnico. À gerência do suporte técnico tem como finalidade coordenar e controlar a produção tendo como missão elaborar estudos e projetos conceituais, básicos e executivos para as instalações de sistemas de transporte, processamento, armazenamento, tratamento do petróleo e gás natural, inclusive em projetos de automação desses sistemas. Além disso, faz acompanhamento e análise do desempenho dos de sistemas de produção e assistência técnica aos ativos da UN-RNCE. Os principais órgãos dessa gerência são:

- Setor de Caracterização e Estudos Especiais de Reservatórios;
- Setor de Engenharia de Poços;
- Setor de Engenharia de Manutenção e Inspeção;
- Setor de Elevação;
- Setor de Engenharia de Instalação, Processamento e Automação;
- Setor de Marketing, Coordenação e Controle da produção;
- Setor de Desenvolvimento da Produção e Reserva;
- Setor de Projeto Pescada-Arabaiana.

A gerência de Engenharia de Instalações, Processamento e Automação (EIPA) têm a função de elaborar projetos básicos, conceituais e executivos para automação industrial dos processos produtivos da UN-RNCE. Os principais objetivos dessa gerencia são:

- Emitir pareceres técnicos de processos de aquisição de equipamento;
- Elaborar relatório técnico-econômico;
- Promover assistência técnica-operacional aos demais órgãos;
- Integrar todos os projetos de automação industrial no âmbito da UN-RNCE, proporcionando a programação integrada da produção;
- Prestar assistência á pré-operação de empreendimento de automação;
- Planejar e controlar as atividades da função engenharia de projetos;
- Elaborar os memoriais descritivos
- Garantir a atualização tecnológica;
- Gerir plano diretor de automação industrial, sugerindo política, diretrizes, cometendo a identificação de novas oportunidades e analisando o impacto na organização e na força de trabalho.

---

---

# **Fundamentação Teórica**

---

---

# 3

---

## 3 - Fundamentação Teórica

### 3.1 - A Origem do Petróleo

Existem várias teorias para a origem do petróleo, a mais aceita atualmente é a que o petróleo tem origem a partir da matéria orgânica depositada junto com os sedimentos. A matéria orgânica marinha é basicamente originada de microorganismos e algas que formam o fitoplâncton e não pode sofrer processos de oxidação. A necessidade de condições não-oxidantes pressupõe um ambiente de deposição composto de sedimentos de baixa permeabilidade, inibidor da ação da água circulante em seu interior. A interação dos fatores - matéria orgânica, sedimento e condições termoquímicas apropriadas - é fundamental para o início da cadeia de processos que leva à formação de petróleo. A matéria orgânica proveniente de vegetais superiores também pode dar origem ao petróleo, todavia sua preservação torna-se mais difícil em função do meio oxidante onde vivem.

O tipo de hidrocarboneto gerado, óleo ou gás, é determinado pela constituição da matéria orgânica original e pela intensidade do processo térmico atuante sobre ela. A matéria orgânica proveniente do fitoplâncton, quando submetida a condições térmicas adequadas, pode gerar hidrocarboneto líquido. O processo atuante sobre a matéria orgânica vegetal lenhosa poderá ter como consequência a geração de hidrocarboneto gasoso.

Assim, o processo de geração de petróleo como um todo é resultado da captação da energia solar, através da fotossíntese, e transformação da matéria orgânica com a contribuição do fluxo de calor oriundo do interior da terra.

### 3.2 - Classificação do petróleo

A classificação do petróleo, de acordo com seus constituintes, interessa desde os geoquímicos até os refinadores. Os primeiros visam caracterizar o óleo para relacioná-lo à rocha-mãe e medir seu grau de degradação. Os refinadores

querem saber a quantidade das diversas frações que podem ser obtidas, assim como sua composição e propriedades físicas.

Assim, os óleos parafínicos são excelentes para produção de querosene de aviação (QAV), diesel, lubrificantes e parafinas. Os óleos naftênicos produzem frações significativas de gasolina, nafta petroquímica, QAV e lubrificantes, enquanto que os óleos aromáticos são mais indicados para a produção de gasolina, solventes e asfalto.

- Classe parafínica (75% ou mais de parafinas)
- Classe parafínico-naftênica (50-70% parafinas, >20% de naftênicos)
- Classe naftênica (>70% de naftênicos)
- Classe aromática intermediária (>50% de hidrocarbonetos aromáticos)
- Classe aromático-naftênica (>35% de naftênicos)
- Classe aromático-asfáltica (>35% de asfaltenos e resinas)

### 3.3 - Fluidos produzidos

Um comportamento padrão esperado para um reservatório de óleo é que ele produza óleo, gás natural e água. Assim, um reservatório típico apresenta uma vazão de produção de óleo, uma vazão de produção de gás e uma vazão de produção de água.

As vazões são sempre expressas nas condições de superfície, como, por exemplo, metro cúbico *standard* por dia ( $m^3$  std/dia) ou barril *standard* por dia (stb/dia). As condições de superfície também são chamadas de “condições padrão” ou “condições *standard*”, e correspondem à pressão de 1 atm e temperatura de 20°C.

#### 3.3.1 – O gás natural

O gás natural é uma mistura de hidrocarbonetos cuja composição abrange desde o metano até o hexano. Encontra-se na forma livre ou associada ao óleo em reservatórios naturais, contendo pequenas quantidades de diluentes e contaminantes.

O Processamento de Gás Natural é realizado através de uma instalação industrial denominada Unidade de Processamento de Gás Natural (UPGN), cujo objetivo é separar as frações pesadas ou ricas (propano e mais pesados) existentes no gás natural úmido ou rico, gerando o chamado gás natural seco ou pobre (metano e etano) e uma corrente de Líquido de Gás Natural (LGN).

O LGN é composto pelas frações mais pesadas que o propano: o gás liquefeito de petróleo (GLP), popularmente conhecido como gás de cozinha, e a gasolina natural. Eventualmente, pode-se produzir uma corrente de LGN composta de frações mais pesadas que o etano, de onde será possível separar frações líquidas de etano, de GLP e de gasolina natural. Nesse caso, recupera-se, também, uma fração de gás natural pobre predominante em metano. Essa UPGN recebe o nome de Unidade de Recuperação de Líquidos (URL).

O conceito de riqueza empregado diz respeito ao teor de compostos mais pesados que o propano, constituído pelas frações de GLP e gasolina natural. Assim, quando se diz que uma determinada corrente de gás natural úmido ou rico apresenta riqueza de 6%, isso significa que aquela corrente é constituída de 6% de GLP e gasolina natural e 94% de gás natural propriamente dito. E será esta parcela de 94% que constituirá, após tratamento e processamento em uma UPGN, a corrente de gás natural seco ou pobre, também chamada de gás natural processado ou residual.

Os principais tipos de processos aplicáveis a uma UPGN são os seguintes:

- Refrigeração simples;
- Absorção refrigerada;
- Expansão Joule-Thompson;
- Turbo-expansão.

De maneira simplificada, pode-se dizer que estes processos realizam as mencionadas separações através de uma seqüência de operações, que pode incluir tratamento (para eliminação de teores remanescentes de umidade), compressão, absorção e resfriamento, dependendo do tipo a ser empregado. Os hidrocarbonetos recuperados podem ser estabilizados e separados por fracionamento, para obtenção dos produtos desejados, na própria UPGN ou em outras unidades específicas, tais como as Unidades de Fracionamento de Líquidos (UFL) e de Processamento de Condensado de Gás Natural (UPCGN).

Os principais processos de tratamento que o gás é submetido são: desidratação ( retirada de água) e dessulfurização ( retirada de ácido sulfídrico, mercaptans).

- Odorização do Gás

O gás natural é inodoro de maneira que sua odorização é necessária por economia e por medida de segurança permitindo a detecção de vazamentos antes que a concentração de gás na área atingida chegue a níveis perigosos.

### 3.3.1.1 – Tipos de gás natural

#### **3.3.1.1.1 – Gás Rico**

O gás rico é aquele que apresenta quantidade de hidrocarbonetos superiores ao propano (C<sub>3</sub>) num percentual maior que 4% (4% é o limite mínimo para processamento de forma que seja obtido LGN em quantidade comercial).

#### **3.3.1.1.2 – Gás Pobre**

O gás pobre é aquele que não possui hidrocarbonetos que justifiquem em processamento para a recuperação de líquidos. Diante disso, podem ser colocados no mercado com um montante menor de investimentos.

#### **3.3.1.1.3 – Gás Industrial**

Trata-se do gás pronto para ser comercializado. Possui componentes e características peculiares conferidas por algum tipo de processamento.

O gás industrial apresenta teores muito baixos de água e tem sua composição determinadas pelo gás de origem, podendo conter CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> e compostos de enxofre.

Suas características são determinadas de acordo com uma legislação que é influenciada pelo tipo de indústria consumidora.

#### **3.3.1.1.4 – Gás Natural Liquefeito (GNL)**

Trata-se do gás que sofreu processo de liquefação a pressão atmosférica.

É uma mistura, dos vários componentes que deram origem, porém em fase líquida. É facilmente transportável e estocável por estar em fase líquida.

#### **3.3.1.1.4 – Gás Natural Comprimido (GNC)**

Trata-se mais de uma alternativa ao escoamento por dutos do que propriamente um tipo de gás.

Serve tanto para transportar gás natural (após tratamento) como gás industrial.

Consiste no envasamento de gás a alta pressão (200 bar).

### **3.3.2 – O Óleo**

O óleo é a parte dos hidrocarbonetos que permanece no estado líquido quando a mistura é levada para superfície. Quando se diz que um poço está produzindo com uma vazão de 100 m<sup>3</sup> std/dia de óleo, está se dizendo que da mistura líquida que está saindo diariamente do reservatório através daquele poço, 100 m<sup>3</sup> permanecem no estado líquido na superfície. Esta é uma maneira muito prática de exprimir os volumes, em primeiro lugar, porque as medições são feitas na superfície e, em segundo lugar, porque é esse volume que interessa comercialmente. Mesmo que a mistura de hidrocarbonetos nas condições de reservatório estivesse toda no estado gasoso, ainda assim seria possível obter líquido nas condições de superfície. Esse líquido obtido a partir do gás natural é mais conhecido pela sigla LGN (líquido do gás natural).

### **3.3.3 – A Água**

Além dos hidrocarbonetos, é bastante comum a produção de água. A quantidade de água produzida vai depender das condições em que ela se apresenta no meio poroso.

Apesar de a água estar sempre presente nos reservatórios, nem sempre a sua quantidade, expressa pela sua saturação, é suficiente para que ela se desloque. Existe uma saturação mínima de água a partir da qual ela se torna móvel. Essa saturação depende da rocha e dos fluidos nela contidos. Se a saturação de água for igual a esse valor mínimo, não haverá fluxo, e conseqüentemente não haverá produção de água dessa rocha.

A água produzida também pode ter origem em acumulações de água, chamadas aquíferos, que podem estar adjacentes às formações portadoras de hidrocarbonetos, ou pode ser devida à água injetada em projetos que visam aumentar a recuperação de óleo.

## **3.4 – Processamento de Hidrocarbonetos**

### **3.4.1 - Transporte de Hidrocarbonetos**

O transporte de hidrocarbonetos surge da necessidade de interligar: campos de produção, refinarias, plantas de tratamento e processamento, terminais, etc. O processo de transporte de hidrocarbonetos é feito basicamente por dutos, sendo usados também navios petroleiros que ajudam no escoamento da produção em grandes distâncias, onde as condições ambientais são desfavoráveis ao transporte por dutos. O gás natural, por exemplo, é transportado na sua fase gasosa em dutos, quando liquefeito (GNL) em reservatórios pressurizados.

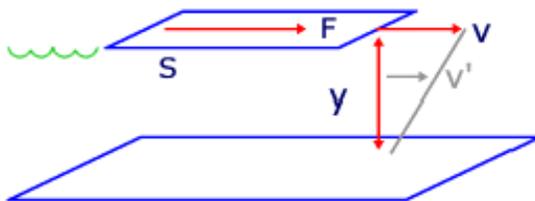
### **3.4.2 - Separação de Hidrocarbonetos**

A separação de hidrocarbonetos se dá pelo princípio da destilação que tem por base a existência de duas fases: líquida e vapor.

### 3.5 – Propriedades Físicas dos Fluidos

#### 3.5.1 – Viscosidade Dinâmica ou Absoluta

Sejam duas lâminas paralelas, distantes  $y$  entre si conforme Figura 2 abaixo, entre as quais existe um fluido. Considera-se a inferior fixa e, na lâmina superior (de área  $S$ ), é aplicada uma força tangencial  $F$  que faz a camada fluida em contato com a mesma se deslocar com uma velocidade  $v$ .



**Figura 2. Placas planas contendo entre si um fluido.**

Experimentalmente verifica-se a relação entre estas grandezas:

$$F / S = \tau = \eta v / y \quad (1)$$

Ou seja, a tensão de cisalhamento  $\tau$  na superfície do fluido é diretamente proporcional à velocidade adquirida e inversamente proporcional à distância entre as superfícies.

O coeficiente de proporcionalidade  $\eta$  é denominado **viscosidade dinâmica** do fluido.

Partindo da lâmina superior, a velocidade  $v'$  de uma camada intermediária decresce linearmente até zero na lâmina inferior.

A viscosidade dinâmica tem como unidade no Sistema Internacional (SI) o  $N \cdot s / m^2$  (newton-segundo por metro quadrado ou Pascal-segundo  $Pa \cdot s$ ), podendo também ser chamada **poiseuille** (PI). A unidade poise, usada em

outros sistemas, equivale a  $10^{-1} \text{ N s} / \text{m}^2$  (ou  $10^{-1} \text{ Pa s}$ ).

Na prática, é bastante utilizado o conceito de **viscosidade cinemática** ( $\nu$ ), que é a relação entre a viscosidade dinâmica e a massa específica ( $\mu$ ) do fluido:

$$\nu = \eta / \mu \quad (2)$$

A unidade SI é  $\text{m}^2 / \text{s}$  (metro quadrado por segundo). A unidade stoke (St) equivale a  $10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ .

A viscosidade dos fluidos diminui com o aumento da temperatura. Para a água entre 0 e  $100^\circ\text{C}$  vale aproximadamente:

$$\nu = \nu_0 / (1 + 0,034 t + 0,00022 t^2) \quad (3)$$

onde  $\nu_0 = 1,8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  e  $t$ , a temperatura em  $^\circ\text{C}$ .

Um fluido é chamado de Newtoniano se sua viscosidade é independente da tensão de cisalhamento ( $\tau$ ), e da velocidade de formação ( $dv/dX$ ) a que é submetido. Os fluidos newtonianos podem ser citados tais como gases, hidrocarbonetos líquidos e óleos lubrificantes minerais, nos quais a viscosidade é função apenas de temperatura e pressão.

A viscosidade absoluta representa a medida de resistência do fluido ao escoamento, e tem como unidade no Sistema Internacional, o poiseuille (Pi), ou pascal-segundo (Pa. s). Unidades usuais na indústria do petróleo são o poise (P), igual a  $10^{-6}$  poiseuille, e seu submúltiplo, o centipoise (cP).

### 3.5.2 - Massa Específica (Densidade)

É a propriedade que exprime a quantidade de massa do fluido que ocupa determinada unidade de volume. Para cada fluido haverá um valor de massa específica que é função da temperatura e pressão. Esta dependência é mais acentuada para os gases.

Por definição:

$$\rho = \left( \frac{m}{V} \right) \quad (4)$$

Cujas unidades mais comuns são:

1)  $\text{kg}/\text{m}^3$  no sistema MKS ou SI;

2)  $\text{g/cm}^3$  no sistema CGS.

### 3.5.3 - Fator de Compressibilidade

O fator de compressibilidade é uma forma de acompanhar o desvio da idealidade de um gás real, e ele pode ser definido como sendo a razão entre o volume real e o volume que seria ocupado caso fosse um gás real nas mesmas condições de temperatura e pressão.

O fator de compressibilidade pode ser calculado através da equação de Van Der waals (16), Peng – Robinson (13), entre outras que não serão mencionadas neste relatório.

### 3.6 - Perda de Carga

Um fluido ao escoar transforma (dissipa) parte de sua energia em calor. Essa energia não é mais recuperada na forma de energia cinética e/ou potencial e, por isso, denomina-se *perda de carga*. A perda de carga também pode ser conhecida como a perda de pressão do gás ou do fluido, devido ao atrito ou obstrução em tubos, válvulas, conexões, reguladores e queimadores. Trata-se de perda de energia devido ao atrito contra as paredes e à dissipação devido à viscosidade do fluido em escoamento.

#### 3.6.1 -Tipos de perda de carga

- Distribuída - São aquelas que ocorrem em trechos retos de tubulação.
- Localizada - São perdas de pressão ocasionadas pelas peças e singularidades ao longo da tubulação, tais como curvas, válvulas, derivações, reduções, expansões, etc.
- Total - É a soma das perdas de carga distribuídas em todos os trechos retos da tubulação e as perdas de carga localizadas em todas as curvas, válvulas, junções, etc.

As perdas de carga distribuídas e localizadas no escoamento em tubulações podem ser determinadas através das medidas de pressão. Por outro lado, estas perdas podem ser calculadas através de fórmulas experimentais ou empíricas, conhecendo-se as dimensões da tubulação, características do líquido, conexões, etc.

### 3.6.2 - Expressão geral da perda de carga distribuída

A fórmula de Darcy-Weisback é uma das utilizadas na indústria, pois pode ser utilizada para qualquer tipo de líquido (fluido incompressível) e para tubulações de qualquer diâmetro e material.

$$H_p = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (5)$$

Onde:  $H_p$  – perda de carga distribuída (m)

$L$  – comprimento do trecho reto do tubo (m)

$D$  – diâmetro interno da tubulação (m)

$v$  – velocidade média do escoamento (m/s)

$f$  – coeficiente de atrito ou de fricção (adimensional)

$g$  – aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>)

O coeficiente de atrito  $f$  ou de fricção é um coeficiente adimensional, do qual é função do Número de Reynolds e da rugosidade relativa. A rugosidade relativa é definida como  $k/D$ , onde  $k$  é a rugosidade da parede do tubo (dado conhecido) e  $D$  é o diâmetro do tubo. Ele pode ser determinado pelo diagrama de Moody-Rouse, ou também pelas expressões mostradas abaixo:

\*Escoamento laminar

$$f = \frac{64\mu}{\rho v D} = \frac{64}{Re} \quad (6)$$

\*Escoamento turbulento

$$f = 0,316 Re^{-0,25} \quad \text{para } 4000 < Re < 10^5$$

Onde:

$f$  – fator de fricção

$Re$  - numero de Reynolds

### 3.6.3 - Expressão geral da perda de carga localizada

#### Método do coeficiente de resistência

Neste método a perda de carga devida ao acidente é determinada através da seguinte relação:

$$H_p = k \frac{v^2}{2g} \quad (7)$$

A equação (8) expressa a perda de carga local como um múltiplo da carga da velocidade que o acidente produz.

Onde:  $H_p$  – perda de carga localizada (m)

$k$  – coeficiente obtido experimentalmente, este valor é tabelado, dependendo do tipo de singularidade. Os valores do coeficiente de resistência são encontrados em literaturas diversas da área, como:

- ✓ Crane – apêndice A-26 e seguintes.
- ✓ Hydraulic Institute – páginas 28 a 34.
- ✓ Perry páginas 5-53 - tabela 5-19 – 5ª edição.

$v$  – velocidade média do líquido na entrada da singularidade (m/s)

$g$  – aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>)

#### Método do comprimento equivalente

O método consiste em determinar o comprimento de tubo reto, de diâmetro idêntico ao acidente considerado, que produz a mesma perda de carga para o mesmo regime de escoamento.

Então a equação de Darcy

$$H_p = \frac{k v^2 L}{2D} \quad (8)$$

Passa a

$$H_p = f \frac{L_e v^2}{D} \quad (9)$$

Onde  $L_e$  é o comprimento equivalente em tubulação de mesmo diâmetro, que produz a mesma perda de carga que o acidente.

Os valores de comprimento equivalente são encontrados em literaturas

diversas da área, como:

- ✓ Crane página A-30.
- ✓ Brown página 141.

Conversão de Comprimento Equivalente para Coeficiente de Resistência e Vice-Versa.

Como

$$H_p = f \frac{L_e}{D} \frac{v^{-2}}{2} = \frac{k v^{-2}}{2} \quad \text{tem-se} \quad \frac{k}{f} = \frac{L_e}{D} \quad (10)$$

Esta equação (11) é apresentada em gráficos, o que permite a rápida conversão. Este gráfico é encontrado em Crane página A-31.

### 3.6.4 – Escoamento de Gases Combustíveis – Fórmula de Weymouth.

Para que ocorra o escoamento tem que haver uma diferença de pressão entre os pontos extremos da tubulação.

$$Q = 18,062 \times \frac{T_0}{P_0} \times \sqrt{\frac{(P_1^2 - P_2^2) \times d^{5,33}}{\gamma T L}} \quad (11)$$

Onde:

Q = vazão (ft<sup>3</sup>/h), medida em P = P<sub>0</sub> e T = T<sub>0</sub>;

T<sub>0</sub>, P<sub>0</sub> = Temperatura e pressão absoluta (°F+460);

P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub> = Pressões nos extremos da tubulação (psia);

d = diâmetro interno do tubo (pol);

γ = densidade do gás em relação ao ar na T de escoamento;

T = Temperatura de escoamento (°F+460 → T abs);

L = comprimento equivalente (milhas).

### 3.7 - Equações de Estado

Os simuladores utilizados oferecem várias equações de estado, isto possibilita a modelagem de inúmeros sistemas reais. Para uma abrangência maior de uma faixa das condições de operação de diferentes sistemas escolheu-se a equação de estado Peng-Robinson.

$$P = \frac{ZRT}{V-b} - \frac{a}{(V(V+b)+b(V-b))} \quad (13)$$

Em que:

$$a = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N x_i x_j (a_i a_j)^{0.5} (1 - k_{ij}) \quad (14)$$

$$b = \sum_{i=1}^N x_i b_i \quad (15)$$

As constantes a e b são função das propriedades críticas temperatura ( $T_c$ ) e pressão ( $P_c$ ) e de um terceiro parâmetro, usualmente o fator acêntrico  $\omega$ . No caso de misturas, são necessárias regras de mistura para determinar os valores de a e b (Van Ness, 1996).

### 3.7.1 - Van Der Waals

$$\left(P + \frac{a}{v^2}\right)(V - b) = ZRT \quad (16)$$

Onde: a e b são constantes obtidas do ponto crítico e quando para misturas a partir de combinações ou regras de misturas.

### 3.7.2 - Princípios de Estados Correspondentes

A equação de Van der Waals é a base do conceito da pressão reduzida ( $P_r$ ) e temperatura reduzida ( $T_r$ ), que são definidas pelas equações:

$$T_r = \frac{T}{T_c} \quad \text{e} \quad P_r = \frac{P}{P_c} \quad (17)$$

Onde:  $T_c$  e  $P_c$  são as condições nos pontos críticos, e T e P são a temperatura e pressão absoluta do sistema, respectivamente.

Este conceito diz que se dois gases diferentes tem a mesma  $P_r$  e  $T_r$  eles correspondem o mesmo estado, mesmo que suas  $P$  e  $T$  absolutas sejam diferentes. O mesmo estado correspondente significa que eles possuem propriedades reduzidas equivalentes iguais como densidade reduzida e viscosidade reduzida.

Para um sistema de componente simples (puro), valores de  $P$  e  $T$  podem ser lidos diretamente por tabela. Para uma mistura, uma regra pode ser usada.

### **3.8 - Simuladores**

Durante o estágio foram realizadas simulações em que se fez uso dos simuladores HYSYS, PIPESIM e COMPRESS.

O HYSYS da Hyprotech (Hyprotech's Integrate System of Engineering Software, 1995) é um simulador utilizado para o processamento do gás, óleo refinado, petroquímica, químicas e combustíveis sintéticos industriais. Todas as suas aplicações utilizam modelos termodinâmicos comuns, oferecendo várias opções de equação de estado para cálculo das propriedades termodinâmicas. Após a escolha do modelo a ser utilizado pode-se também caracterizar o fluido de trabalho podendo esse ser um fluido real ou hipotético

O simulador PIPESIM 2000 (Baker jardine versão 1.35.604) é um software de engenharia de petróleo, que utiliza modelos de sistemas de gás e óleo integrados com uma boa análise de desempenho dos dados de entrada e saída nos dutos, podendo ser usado na produção de gás, óleo, água, separadamente ou em conjunto.

O COMPRESS é um programa que apresenta interface DOS e permite avaliar parâmetros de compressores tais como carga na haste, eficiência, pressão de sucção e descarga estágio a estágio, entre outras propriedades.



Figura 3 – Tela de Apresentação do Compress.

Na simulação da avaliação do compressor alternativo utilizou-se em conjunto os simuladores Hysys e Compress, sendo o último um programa específico para a avaliação de parâmetros operacionais de compressores alternativos, para a simulação da avaliação do compressor centrífugo utilizou-se apenas o Hysys.

### 3.9 – Equipamentos

#### 3.9.1 – Compressores

Os compressores são utilizados para proporcionar a elevação da pressão de um gás ou escoamento gasoso. Nos processos industriais, a elevação da pressão requerida pode variar desde cerca de 1 atm até centenas de milhares de atmosferas.

A escolha do compressor a ser adotado precede a seleção propriamente dita da máquina e envolve aspectos diversos.

Fazendo uma análise em que se leve em conta apenas as características previstas para o processo de compressão é possível estabelecer faixas de operação para as quais cada tipo de compressor é mais adequado e pode, em consequência, ser encontrado nas linhas de produção dos fabricantes. Conforme ilustra o quadro da tabela 1, vazão volumétrica aspirada, pressão de descarga e relação de compressão são os parâmetros que traduzem as restrições impostas a cada tipo do compressor pelo seu próprio princípio conceutivo. Esta tabela focaliza apenas valores médios, não se enquadrando rigidamente nos padrões de nenhum fabricante.

Tabela 1 – Faixas de aplicação dos compressores

COMPRESSOR	Vazão Aspirada(m <sup>3</sup> /min)	P <sub>2</sub> (kPa)	P <sub>2</sub> /P <sub>1</sub> max
Alternativo	Até 250	250000 ou mais	4,0 (por cilindro)
Palhetas	2 a 80	900	4,0 (por carcaça)
Parafusos	10 a 700	4500	4,0 (por carcaça)
Centrífugos	50 a 2800	70000	10,0(por carcaça de múltiplos estágios)
Axiais	1500 a 25000	1000	6,0(por carcaça de múltiplos estágios)

### 3.9.1.1 – Tipos de Compressores

#### 3.9.1.1.1 – Compressores Alternativos

Os compressores alternativos foram as primeiras máquinas de compressão de gases a serem construídas, ainda no século passado. Mesmo proporcionando vazões muito baixas, esses compressores se mantiveram absolutos até o meio deste século. A partir de então começaram a sofrer a concorrência dos demais tipos de compressores em todas as faixas de aplicação, à exceção daquelas caracterizadas por baixas vazões e altas pressões de descarga.

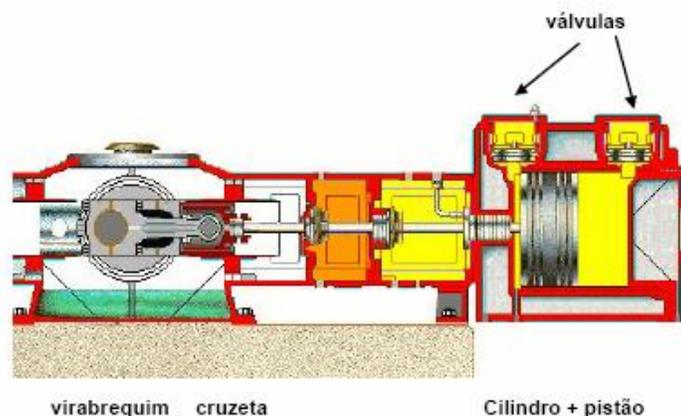


Figura 4 – Compressor alternativo à pistão

Essa máquina tem a sua estrutura formada por três partes básicas, que são a carcaça, o cilindro e a peça de distanciamento.

A carcaça tem a função de proteger as partes móveis do compressor (eixo, mancais, biela, cruzeta e haste) e serve também como reservatório de óleo lubrificante. Seu projeto estrutural é simples, pois não trabalha sob pressão.

Na outra extremidade temos o cilindro, onde se efetua propriamente a compressão do gás. O projeto do cilindro é bastante complexo, pois se trata de um vaso de pressão dotado de uma série de aberturas que proporcionam concentração de tensões e sujeito a diferenciais térmicos a sua operação.

A ligação da carcaça com o cilindro é feita através de um compartimento denominado peça de distanciamento. A finalidade dessa peça é evitar a excessiva proximidade entre as duas partes, sujeitas a diferentes condições de trabalho e de lubrificação. Quando o gás é comprimido é tóxico ou inflamável, a peça de distanciamento funciona como câmara de selagem, cujo interior é “ventado” para local seguro. A razão pela qual os projetistas tratam essa peça individualmente e não a transformam num simples prolongamento da carcaça é exatamente poder adaptar o compressor a diversas condições de utilização.

#### **3.9.1.1.1.1 – Elementos Básicos do Compressor Alternativo**

A seguir, pode ser observada uma série de elementos e características de funcionamentos associados ao ciclo ideal do compressor alternativo, com a respectiva simbologia.

D – diâmetro do cilindro

L - curso do pistão

N – Rotação do Eixo

$V_1$  – Volume do cilindro

$V_0$  – Volume morto

$V_d$  – volume deslocado, corresponde ao volume ( $V_1 - V_0$ ) varrido pelo pistão ao longo de seu curso.

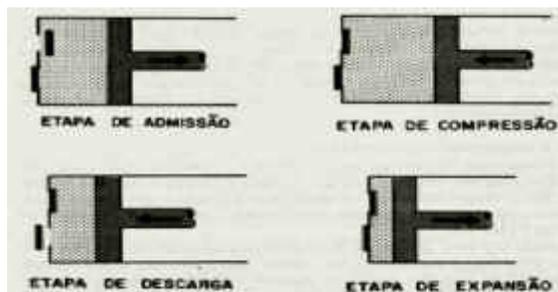
C – Clearance, denominação dada à relação  $V_0/V_d$

$V_{asp}$  – volume aspirado corresponde ao volume captado na fase de admissão.

#### **3.9.1.1.1.2 – Princípio de Funcionamento**

O funcionamento de um compressor alternativo está intimamente associado ao comportamento das válvulas. Elas possuem um elemento móvel denominado obturador, que funciona como um diafragma, comparando as pressões interna e externa ao cilindro. O obturador da válvula de sucção se abre

para dentro do cilindro quando a pressão na tubulação de sucção supera a pressão interna do cilindro, e se mantém fechado em caso contrário. O obturador da válvula de descarga se abre para fora do cilindro quando a pressão interna supera a pressão na tubulação de descarga, e se mantém fechado na situação inversa. Com isso, temos as etapas do ciclo de funcionamento do compressor mostradas na figura abaixo:



**Figura 5 – Etapas no funcionamento do compressor alternativo.**

Na etapa de admissão o pistão se movimenta em sentido contrário ao cabeçote, fazendo com que haja uma tendência de depressão no interior do cilindro que propicia a abertura da válvula de sucção. O gás é então aspirado. Ao inverter-se o sentido de movimentação do pistão, a válvula de sucção se fecha e o gás é comprimido até que a pressão interna do cilindro seja suficiente para promover a abertura da válvula de descarga. Isso caracteriza a etapa de compressão. Quando a válvula de descarga se abre, a movimentação do pistão faz com que o gás seja expulso do interior do cilindro. Essa situação corresponde à etapa de descarga e dura até que o pistão encerre o seu movimento no sentido do cabeçote. Ocorre, porém, que nem todo o gás anteriormente comprimido é expulso do cilindro. A existência de um espaço morto ou volume morto, compreendido entre o cabeçote e o pistão no ponto final do deslocamento deste, faz com que a pressão no interior do cilindro não caia instantaneamente quando se inicia o curso de retorno. Nesse momento, a válvula de descarga se fecha, mas a de admissão só se abrirá quando a pressão interna cair o suficiente para permiti-lo. Essa etapa, em que as duas válvulas estão bloqueadas e o pistão se movimenta em sentido inverso ao do cabeçote, se denomina etapa de expansão, e precede a etapa de admissão de um novo ciclo.

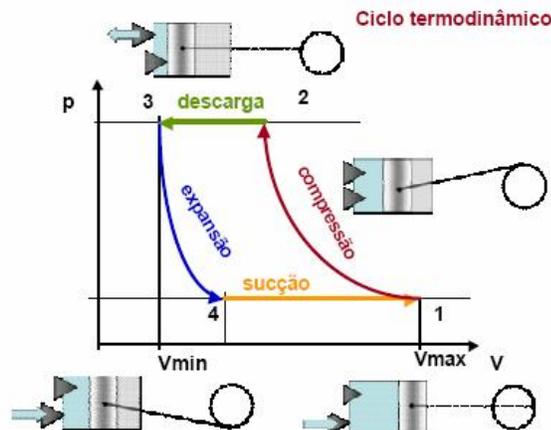


Figura 6 – Ciclo termodinâmico de um compressor

Podemos concluir então que, devido ao funcionamento automático das válvulas, o compressor alternativo aspira e descarrega o gás respectivamente nas pressões instantaneamente reinantes na tubulação de sucção e na tubulação de descarga. Em termos reais, há naturalmente certa diferença entre as pressões interna e externa ao cilindro durante a aspiração e a descarga, em função da perda de carga no escoamento.

### 3.9.1.1.1.3 – Razão de Compressão

O processo utilizado para determinar a razão de compressão e o número de estágios, é um processo simples de separação de gás saturado, utilizando compressores e resfriadores para obter a temperatura e pressão de descarga desejada.

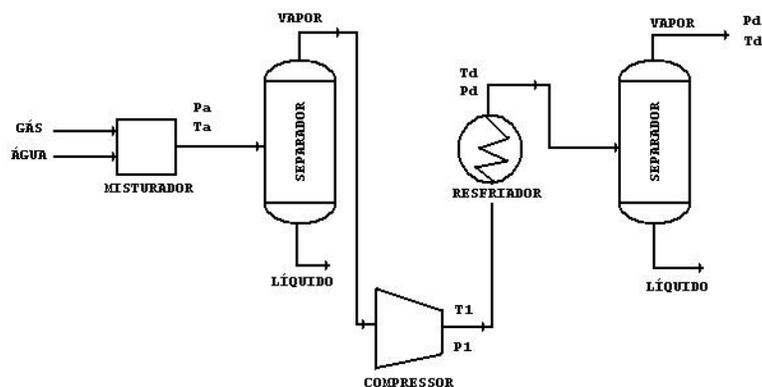


Figura 7 – Esquema simplificado de um processo de compressão

Onde:

$P_a$  = Pressão de alimentação ou sucção;

Ta = Temperatura de alimentação ou sucção;  
Pd = Pressão de descarga;  
Td = Temperatura de descarga.

Para o cálculo da razão de compressão e do número de estágios necessários utiliza-se a equação abaixo:

$$r_c = \sqrt[N]{\frac{P_d}{P_s}} < 4 \quad (18)$$

Onde:

$r_c$  é a razão de compressão.  
N é o número de estágios necessários.  
Pd é a pressão de descarga do compressor.  
Ps é a pressão de alimentação ou sucção

A equação 14 mostra que a razão de compressão deve ser menor que quatro isto porque a temperatura máxima permitida na saída do compressor é de 150°C para evitar danos ao equipamento, logo, para uma razão da pressão de descarga com a pressão de sucção igual ou maior que 4, deve-se adicionar ao processo quantos compressores forem necessários para que não ultrapasse esta temperatura limite.

Após a adição de cada compressor deve-se também adicionar um resfriador com a temperatura mínima permitida de 0°C, pois os fluidos de refrigeração são o gás nitrogênio e a água, onde para temperaturas abaixo de zero o gasto de energia é muito alto tornando-se o processo inviável economicamente no caso de utilizar o gás nitrogênio como fluido refrigerante, já para água em temperaturas abaixo de 4°C apresenta comportamento anômalo.

### 3.9.1.1.1.4 – Vazão do Compressor Alternativo

Compressores alternativos são máquinas que produzem vazão irregular.

Do ponto de vista do sistema de compressão, é a vazão média transportada da sucção para a descarga que se mostra efetivamente relevante por ser aquela a que se refere o projeto de operação da planta.

Podemos então escrever:

$$V_{asp} = \eta_{vol} V_d n \quad (19)$$

Onde:

$$V_d = \frac{\pi D^2}{4} L + \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} L \quad (20)$$

Ou, simplificando

$$V_d = (2D^2 - d^2) \frac{\pi L}{4} \quad (21)$$

Sendo  $d$  o diâmetro da haste do compressor,  $\eta_{vol}$  o rendimento volumétrico e  $n$  o número de ciclos em cada efeito na unidade de tempo.

### 3.9.1.1.1.5 – Rendimento Volumétrico

Podem ser encontradas na literatura diversas fórmulas empíricas para a avaliação do rendimento volumétrico. Todas elas se baseiam no modelo teórico desenvolvido para o ciclo ideal e apresentam resultados muito parecidos entre si. Adotaremos aqui a expressão:

$$\eta_{vol} = 0,97 - C \left( \frac{Z_1}{Z_2} r^{\frac{1}{k}} - 1 \right) - f \quad (22)$$

Onde:

$C$  – Clearance,  $V_0/V_d$

$Z_1$  e  $Z_2$  – são os fatores de compressibilidade nas condições de sucção e descarga

$f$  – é o coeficiente de fugas, em geral adotado em  $r/100$  para compressores lubrificados e  $r/50$  para compressores não-lubrificados. Em se tratando da compressão de gases de peso molecular inferior a 16, adotar o coeficiente  $f$  de

0,01 a 0,04, esse último valor na compressão de hidrogênio. Se a pressão de sucção for elevada, multiplicar  $f$  por  $5 \sqrt{\frac{P_1}{P_{atm}}}$ .

### 3.9.1.1.1.6 – Potência consumida na compressão

A determinação da potência consumida pelo compressor alternativo pode ser feita através da expressão fundamental:

$$W_c = \frac{mw_k}{\eta_k \eta_{mec}} \quad (23)$$

Onde:

$W_c$  – Potência consumida pelo compressor

$m$  - vazão mássica comprimida

$w_k$  – trabalho por unidade de massa consumido no ciclo ideal adiabático

$\eta_k$  – rendimento adiabático

$\eta_{mec}$  – rendimento mecânico

Nessa expressão, a vazão mássica e o trabalho ideal por unidade de massa devem ser calculados analiticamente em função das condições de operação do sistema, enquanto os rendimentos adiabático e mecânico devem ser obtidos junto ao fabricante da máquina.

Para a determinação do trabalho ideal por unidade de massa segue um procedimento na equação 19.

$$W_k = \frac{k}{k-1} RT_1 \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] Z \quad (24)$$

Onde:

$K$  - coeficiente de expansão isentrópico =  $C_p/C_v$

$R$  - relação de compressão =  $P_s/T_s$

$T_1$  – Temperatura na sucção

$Z$  – Fator de compressibilidade

### 3.9.1.1.1.6 – Temperatura de descarga

$$T_{desc} = T_s \left( r^{\frac{k-1}{k}} \right) \quad (25)$$

Onde:

$T_s$  – Temperatura de sucção

$r$  – razão de compressão =  $P_d/P_s$

### 3.9.1.1.1.7 – Carga na Haste de compressão

$$CHC = (P_d - P_s)A_p + P_s A_t \quad (26)$$

Onde:

$A_p$  = área do pistão do lado sem haste

$A_t$  = área do pistão do lado da haste

### 3.9.1.1.1.8 – Carga na Haste de tração

$$CHT = (P_d - P_s)A_p + P_d A_t \quad (27)$$

### 3.9.1.1.1.9 – Potência de eixo

$$BHP = 22 \times (\text{razão} / \text{estágio}) \times (n^\circ \text{estágios}) \times MMcf/d \times F \quad (28)$$

### 3.9.1.1.2 – Compressores Centrífugos

Neste tipo de compressor o ar é expirado continuamente pela abertura central do impelidor e descarregado pela periferia do mesmo, num movimento provocado pela força centrífuga que surge devido à rotação, daí a denominação do compressor. O fluido descarregado passa então a descrever uma trajetória em forma de espiral através do espaço anular que envolve o impelidor e que recebe o nome de difusor radial ou difusor em anel. Esse movimento leva à desaceleração do fluido e conseqüentemente elevação da pressão.

Prosseguindo em seu deslocamento, o gás é recolhido em uma caixa espiral denominada voluta e conduzido à descarga do compressor. Nessa peça, as propriedades do escoamento se mantêm invariáveis, ou pelo menos é o que se pretende em termos de projeto. Antes de ser descarregado, o escoamento

passa por um bocal divergente, o difusor da voluta, onde ocorre um suplementar processo de difusão.

Operando em fluxo contínuo, os compressores centrífugos aspiram e descarregam o gás exatamente nas pressões externas, ou seja, há uma permanente coincidência entre a relação de compressão interna e a relação de compressão externa.

Esse tipo de máquina é incapaz de proporcionar grandes elevações de pressão, de modo que os compressores dessa espécie normalmente utilizados em processos industriais são de múltiplos estágios.

### **3.9.2 – Válvulas**

As válvulas, aplicadas como elementos finais de controle, são responsáveis pela manipulação do fluxo de matéria e/ou energia, e têm por finalidade atuar no processo de modo a corrigir o valor da variável controlada sempre que houver desvio em relação ao valor desejado.

Elas dividem-se basicamente em:

- a) Atuador - É a parte da válvula de controle que fornece a força com que a válvula realiza seu trabalho.
- b) Corpo e internos - O fluido de processo passa pelo corpo da válvula de controle, sendo o obturador o elemento móvel da válvula, responsável por restringir a vazão.
- c) Castelo e engaxetamento - O castelo é a parte que conecta o atuador ao corpo da válvula, guiando a haste da mesma, alojando o sistema de selagem do fluido de processo.

As válvulas dimensionadas no estágio foram do tipo globo e sua descrição encontra-se no item abaixo.

#### **3.9.2.1 – Válvulas Globo**

São as válvulas de controle mais frequentemente utilizadas, do tipo globo de sede simples ou dupla. São para aplicações em caso de fluidos limpos.

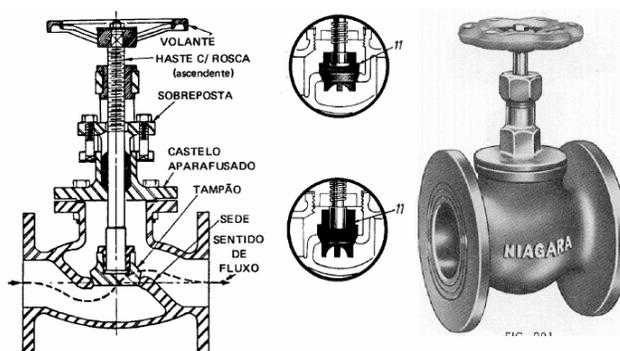


Figura 8 – Válvula Globo

### 3.9.2.2 – Dimensionamento de Válvulas

A vazão através da válvula é proporcional à área de abertura e à raiz quadrada da queda de pressão (delta P) na válvula. A válvula representa um orifício variável na linha de processo, onde a vazão através deste orifício segue a equação de Bernoulli:

$$Q = C \cdot A \cdot \sqrt{\Delta P} \quad (29)$$

### 3.9.2.3 – Coeficiente de Vazão (Cv)

Toda válvula tem o chamado coeficiente de vazão que define sua capacidade, valor este publicado pelo fabricante em função do tipo de válvula, diâmetro do corpo e características de seus internos.

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

Seguem algumas definições importantes para melhor compreensão das equações utilizadas para calcular o Cv da válvula:

- Fluxo crítico: É o mesmo que dizer que o fluxo está atingindo a velocidade sônica na saída do bocal da válvula;
- Fluxo subcrítico: Ocorre quando a contrapressão excede 54% da pressão de alívio absoluta, ou seja, a vazão e a velocidade de escoamento são influenciadas proporcionalmente pela contrapressão e seus valores na saída são menores que a velocidade sônica.

- Fator de escoamento crítico: O fator de escoamento crítico é uma expressão adimensional da razão entre o  $C_v$  obtido em condições críticas, tais como vaporização de um líquido ou velocidade sônica para gases e o  $C_v$  obtido em condições normais de recuperação de pressão. O  $C_f$  permitirá que se determine o quão menor será o  $C_v$  da válvula se exposta as condições críticas, comparado com o publicado. Servirá também como um indicador da capacidade de recuperação de pressão de uma determinada válvula, isto é, quanto maior for esta recuperação menor parecerá ser a válvula sob condições críticas com relação as condições de escoamento normal.

Antes de calcular o  $C_v$  é necessário identificar o tipo de escoamento, se o fluxo é subcrítico ou crítico.

Para o cálculo de do  $C_v$  são necessários vazão densidade e pressão à montante e à jusante (cálculo do  $\Delta P$ ).

Os líquidos são considerados fluidos incompressíveis, não sofrendo alterações em seu peso específico na passagem através da válvula, porém, ao tratarmos de gases ou de vapores deveremos considerar a variação do peso específico, ou seja, trataremos de fluidos compressíveis.

Se

$$P_v < 0,5 \cdot P_1 \quad \Delta P_s = P_1 - P_v \quad (30)$$

$$P_v \geq 0,5 \cdot P_1 \quad \Delta P_s = P_1 - \left( 0,96 - 0,28 \sqrt{\frac{P_v}{P_c}} \right) P_v \quad (31)$$

$$\Delta P < C_f^2 \cdot \Delta P_s \quad \text{Fluxo Subcrítico} \quad (32)$$

$$\Delta P \geq C_f^2 \cdot \Delta P_s \quad \text{Fluxo Crítico} \quad (33)$$

$$C_v = 1,16 \cdot q \cdot \sqrt{\frac{G_f}{\Delta P}} \quad \text{Líquidos, Fluxo subcrítico} \quad (34)$$

$$C_v = \frac{1,16 \cdot q}{C_f} \cdot \sqrt{\frac{G_f}{\Delta P}} \quad \text{Líquidos, Fluxo crítico} \quad (35)$$

$$C_v = \frac{q}{295} \cdot \sqrt{\frac{G \cdot T}{\Delta P \cdot (P_1 + P_2)}} \quad \text{Gases e Vapores, Fluxo subcrítico} \quad (36)$$

$$C_v = \frac{q \cdot \sqrt{G \cdot T}}{257 \cdot C_f \cdot P_1} \quad \text{Gases e Vapores, Fluxo crítico} \quad (37)$$

Onde:

$P_v$  – Pressão de vapor (psia)

$P_1$  – Pressão à montante

$P_2$  – Pressão à jusante

$P_c$  – Pressão crítica termodinâmica

$C_f$  – Fator de escoamento crítico

$Q$  – vazão volumétrica ( $m^3/h$ )

$T$  – Temperatura do escoamento (K)

$\Delta P$  – Perda de carga

$G$  – Gravidade específica do fluido

$C_v$  – Coeficiente de Vazão

Dimensionamento de válvulas: Dimensionar uma válvula significa determinar o tamanho da válvula mais adequada para controlar um processo. A primeira vista, uma válvula de controle deveria ter o mesmo diâmetro que a tubulação na qual fosse instalada; Entretanto, essa não é, em geral, a melhor solução, nem do ponto de vista técnico nem econômico. Se a válvula for superdimensionada, a operação normal se dará com a válvula quase fechada, sendo difícil controlar. Por outro lado, se a válvula for subdimensionada, é possível que ela não seja suficiente para deixar passar a vazão desejada.

Fluxo crítico e subcrítico: O fluxo crítico (pressão crítica) é o mesmo que dizer que o fluxo está atingindo a velocidade sônica na saída do bocal da válvula. E quando a contrapressão excede 54% da pressão de alívio absoluta o fluxo é denominado subcrítico, ou seja, a vazão e a velocidade de escoamento são influenciadas proporcionalmente pela contrapressão e seus valores na saída do bocal são menores que a velocidade sônica.

A mudança de fluxo crítico para subcrítico ocorre quando a pressão na saída do bocal da válvula é de aproximadamente 54% da pressão absoluta na entrada do bocal da válvula.

---

---

# **Atividades Realizadas**

---

---

# 4

---

## 4 - Atividades Realizadas

### 4.1 Atividades Propostas

-Capacitação em processamento:

- Utilização de simuladores de processo;
- Utilização de simuladores de escoamento;
- Escoamento e distribuição de líquidos;
- Escoamento e distribuição de gás natural;
- Simulação de escoamento;

-Solução de problemas de processo:

- Case escoamento de líquidos;
- Case de processo;
- Case de escoamento de gás/vapor;
- Avaliação de equipamentos;

-Avaliação de compressores alternativos;

-Visitas Técnicas.

### 4.2 Atividades Desenvolvidas

- Simulação de processos no HYSYS e escoamento no PIPESIM;
- Avaliação de compressores alternativos;
- Avaliação de compressores centrífugos;
- Elaboração de memorial descritivo visando a segregação de fluxo de hidrocarbonetos líquidos;

- Avaliação de perda de carga no sistema de medição de líquidos nas plataformas do RN/CE;
- Avaliação de perda de carga no sistema de medição de gases nas plataformas e campos de produção do RN/CE;
- Realização de relatórios técnicos econômicos;
- Desenvolvimento de planilha para cálculo do fator de compressibilidade, viscosidade e densidade para cálculo de incertezas de medição da ANP;
- Elaboração de projeto conceitual;
- Dimensionamento de válvulas;
- Visitas Técnicas.

A atividade de maior relevância foi a avaliação do desempenho de um compressor alternativo frente a novas condições operacionais e também de um compressor centrífugo. Também apresentaram bastante relevância as planilhas desenvolvidas para a avaliação de perda de carga de gases e líquidos.

A capacitação em processamento foi de fundamental importância para o desenvolvimento das atividades descritas a seguir, pois o treinamento para utilização dos simuladores facilitou bastante o desenvolvimento dos projetos.

#### **4.2.1 - Avaliação do desempenho de um compressor alternativo**

##### **4.2.1.1 - Introdução**

Foram realizadas simulações no simulador HYSYS e no simulador COMPRESS a fim de avaliar as variáveis: potência acumulada, vazão, carga na haste na compressão e tração, vazão de gás condensado, pressão inter-estágio 1/2 -2/3, pressão de sucção, pressão de descarga e eficiência em um compressor Demag três estágios à gás para atuais e novas condições operacionais.

Estas simulações foram realizadas com o intuito de verificar o comportamento destes parâmetros com o aumento da pressão de sucção, visando a ampliação das condições de operação. As pressões de sucção atualmente utilizadas são 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 kgf/cm<sup>2</sup>\_m, devido este ser o intervalo de condições operacionais máxima e mínima do gasoduto.

##### **4.2.1.2 - Premissas do Processo**

- O gás que entra no compressor está saturado com água na pressão e temperatura de processo;
- Temperatura ambiente mínima igual a 20°C e máxima igual a 50 °C;
- Pressão de processo mínima 0,5 Kgf/cm<sup>2</sup>\_m e máxima 5 Kgf/cm<sup>2</sup>\_m;
- Pressão de processo máxima na descarga igual a 70 Kgf/cm<sup>2</sup>\_m;
- O gás que entra no compressor possui a composição conforme tabela 2;
- Eficiência politrópica de 75%;
- Três estágios de compressão
- O compressor avaliado é constituído de dois cilindros iguais de 430 mm no 1º estágio, um cilindro de 255 mm no 2º estágio e um cilindro de 165 mm no 3º estágio.
- O compressor apresenta rotação igual a 450 rpm.
- O gás proveniente da tubulação de sucção entra no 1º estágio do compressor e segue para o resfriador do 1º estágio, em seguida passa pelo vaso separador onde o líquido é retido antes que o gás possa ser encaminhado para o 2º estágio, a operação se repete no 2º e 3º estágios conforme esquema abaixo:

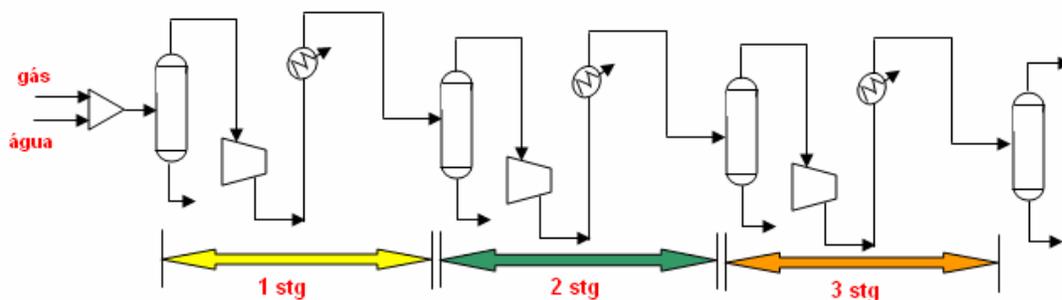


Figura 9 – Esquema do processo mencionado

- Foi pré-estabelecida uma condição de processo e para esta condição foi calculada a razão de compressão e o número de estágios. Os resultados gerados pelo simulador com as pressões e temperaturas de descarga de cada compressor, os dados de cada estágio, bem como o fluxograma de processo encontram-se no ANEXO I.

Tabela 2 - Composição do Gás usada na simulação do compressor alternativo

Composição	% Molar
Metano	0,69327
Etano	0,09911
Propano	0,06881
i-Butano	0,01660
n-Butano	0,00229
i-Pentano	0,00580
n-Pentano	0,00460
n-Hexano	0,03810
n-Hepntano	0,00730
n-Octano	0,00160
n-Nonano	0,00060
n-Decano	0,00020
H <sub>2</sub> O	0,02150
Nitrogênio	0,01930
CO <sub>2</sub>	0,00030

#### 4.2.1.3 – Condições de operação

Os casos analisados foram os seguintes:

- Caso A: Um compressor com dois cilindros em duplo efeito no primeiro estágio e um cilindro com duplo efeito no segundo e terceiro estágios;
- Caso B: Um compressor com dois cilindros em simples efeito no primeiro estágio e um cilindro com duplo efeito no segundo e terceiro estágios

O arranjo de duplo efeito significa que existe um conjunto de válvulas que comprime o gás nos dois sentidos, ou seja, na ida e na volta. Já o arranjo de simples efeito só comprime o gás em um sentido. Quando um dos cilindros é isolado tem-se o efeito com apenas um cilindro.

Foram utilizadas as combinações de pressão de descarga e sucção conforme a tabela 3, visando observar o comportamento do compressor frente a uma flexibilidade operacional.

Tabela 3 – Pressões de sucção e descarga avaliadas para os casos A e B

		Pressão de sucção(kgf/cm <sup>2</sup> _m)									
		0,50	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00
P_desc(kgf/cm <sup>2</sup> _m)	35,00	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	42,00	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	49,00	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	56,00	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	63,00	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	70,00	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

#### 4.2.1.4 – Cálculo do número de estágios

Para determinar o número de estágios utilizou-se a equação 14, onde se obteve que o número de estágios a ser utilizado é 3.

#### 4.2.1.5 – Resultados e Discussões

##### 4.2.1.5.1 – Duplo efeito – 2 cilindros – caso A

O arranjo com dois cilindros em duplo efeito no primeiro estágio e cilindro com duplo efeito no segundo e terceiro estágios foi avaliado e seus resultados encontram-se no anexo I. As figuras 8, 9 e 10 representam as regiões de operação para esta arquitetura.

- Região de Operação Pressão

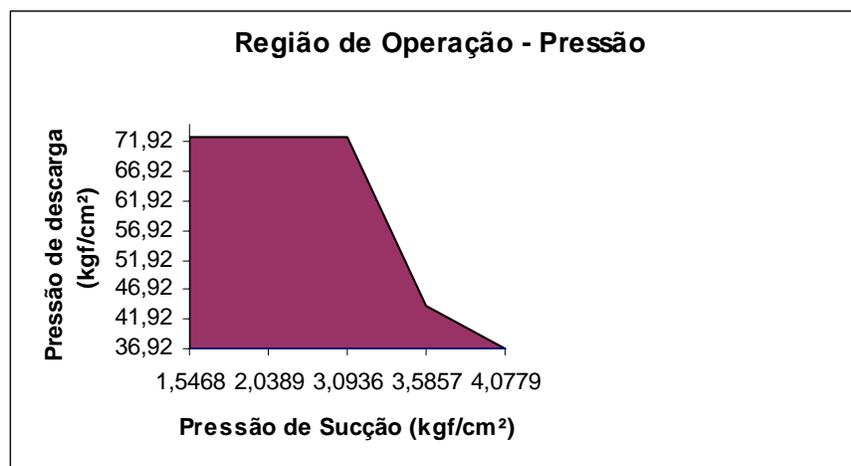


Figura 10 – Região de operação do compressor – Faixas de pressão

De acordo com a figura 8 verifica-se que este compressor deverá operar com uma pressão de descarga variando entre 35 kgf/cm<sup>2</sup>\_m e 70 kgf/cm<sup>2</sup>\_m e pressão de sucção compreendida entre 0,5 kgf/cm<sup>2</sup>\_m e 3,5 kgf/cm<sup>2</sup>\_m.

- **Região de Operação Potência**

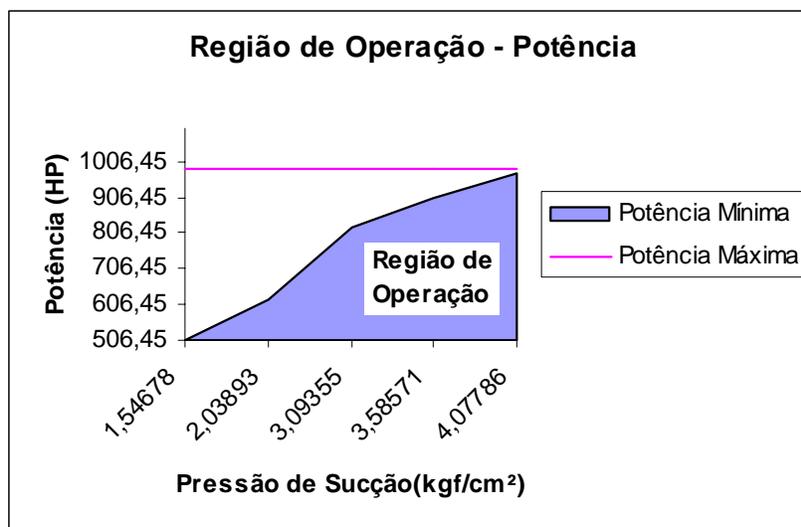


Figura 11 – Região de Operação – Potência

Para as faixas de pressão de sucção e descarga admissíveis ao funcionamento do compressor sem que sejam ultrapassados os limites de carga na haste, a região de operação de potência do compressor encontra-se entre 506,45 HP e 973,45 HP. Pressões de descarga superiores a 3,5 kgf/cm<sup>2</sup>\_m ultrapassam o limite admissível de potência que é de 985 HP.

- **Região de Operação Carga na Haste**

A máxima carga na haste admissível é de 27000 lbf. Os resultados da carga na haste em função da pressão de descarga que enquadram-se dentro dos limites admissíveis encontram-se na figura X. Para pressões de sucção superiores a 2,5 kgf/cm<sup>2</sup>\_m a carga na haste ultrapassa a faixa permitida.

Diante desses fatos, pode-se concluir que o compressor deverá operar com uma pressão de sucção máxima de 2,5 kgf/cm<sup>2</sup>\_m para que sejam satisfeitos todos os parâmetros necessários ao seu perfeito funcionamento.

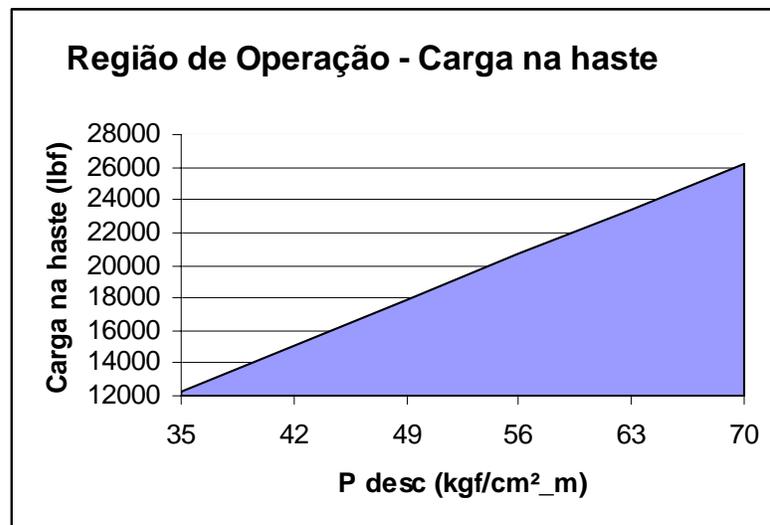


Figura 13 – Região de Operação – Potência

#### 4.2.1.5.2 – Simples efeito – 2 cilindros – caso B

Foram realizadas simulações com a Folha de dados do compressor fornecida (Dados de campo) – Observa-se que para todos os casos com efeito simples no primeiro estágio a eficiência não corresponde ao valor fornecido, ao simular com duplo efeito no primeiro estágio, a eficiência apresenta-se próxima do valor fornecido, constatando-se assim que se deve trabalhar com compressores com efeito duplo no primeiro estágio, não sendo relevante apresentar neste capítulo seus resultados, tendo em vista a divergência observada. O compressor com duplo efeito apresenta uma maior vazão para certo volume da câmara de compressão em relação ao de simples efeito. A tabela com os resultados encontra-se no anexo I.

### 4.2.2 - Avaliação do teste de Performance de compressor centrífugo

#### 4.2.2.1 - Objetivo

Esta atividade teve como objetivo apresentar os resultados referentes à avaliação do compressor C-UC-900-001-A. Desta forma analisou-se a possibilidade deste compressor atender a pressão e vazão mássica de descarga especificada para os parâmetros de fábrica (Polytropic Efficiency e Polytropic Head) e sua comparação com os valores obtidos a partir do teste em campo.

#### 4.2.2.2 – Premissas básicas

Para a avaliação dos parâmetros mencionados foram estabelecidas as seguintes premissas:

- **Variáveis de entrada**

A análise foi realizada comparando dados dos testes em campo (o equipamento, antes da compra passa por um teste para verificar a consistência de dados fornecidos pelo fabricante) e de fábrica (Antes de ser comercializado o equipamento passa por testes na fábrica para que seja montada a sua folha de dados)(Anexo I) com dados gerados no simulador *HYSYS*. Desta forma as variáveis de entrada foram: vazão de sucção no primeiro estágio, pressão e temperatura de sucção e descarga em cada estágio. Assim sendo, obteve-se o *Head* e *Eficiência politrópica* do sistema necessária para comprimir o gás à pressão de descarga prevista em projeto. As faixas das variáveis utilizadas nesta análise encontram-se na Tabela 4.

Tabela 4 - Faixas de vazão e pressão, obtidos a partir de dados de projeto.

Variável	unidade	TC 1	TC 2	TC 3	TC 4	TC 5	TF 1	TF 2
Psuc 1 stg	kg/cm <sup>2</sup> _g	3,7	3,7	3,7	3,5	3,5	4,06	4,06
Tsuc 1 stg	°C	31,4	32,1	32,1	32,3	32,5	34,7	34,5
Vazão suc 1 stg	ACTm <sup>3</sup> /h	5300	5171	4943	5215	5012	5272	5556
Pdesc 1 stg	kg/cm <sup>2</sup> _g	18,2	18,6	19	17,7	18,1	19,8	19,1
T desc 1 stg	°C	151,9	152,9	155,2	154,5	156,9	151,8	148,5
Psuc 2 stg	kg/cm <sup>2</sup> _g	17,3	17,8	18,2	16,9	17,3	18,74	18,1
Tsuc 2 stg	°C	36,1	37,3	37,1	36,9	36,6	44,7	44,7
Pdesc 2 stg	kg/cm <sup>2</sup> _g	69,90	73,30	75,20	69,80	72,80	75,95	70,95
T desc 2stg	°C	174,7	176,6	179,4	177,8	181,4	179,3	173,7

TC: Testes em campo;

TF: Testes de Fábrica.

- **Composição do gás**

A composição do gás na sucção do primeiro estágio utilizado nos testes em campo conforme Tabela 5.

Tabela 5. Composição do Gás na sucção do primeiro estágio.

Composição do Gás Componentes	Gás (Composição média)
N <sub>2</sub>	0,99
CO <sub>2</sub>	2,09

O <sub>2</sub>	0,01
C <sub>1</sub>	78,57
C <sub>2</sub>	11,40
C <sub>3</sub>	4,02
i-C <sub>4</sub>	0,54
n-C <sub>4</sub>	1,11
i-C <sub>5</sub>	0,25
n-C <sub>5</sub>	0,32
C <sub>6</sub>	0,30
C <sub>7</sub>	0,11
C <sub>8</sub>	0,12
C <sub>9</sub>	0,10
C <sub>10</sub>	0,07
Peso molecular	21,11

Os dados dos testes de fábrica foram obtidos utilizando um gás hipotético (R-22), desta forma a simulação foi realizada nos casos em que o peso molecular deste gás apresenta valor aproximado ao utilizado dos testes em campo.

#### 4.2.2.3 – Memória de Cálculo

- **Simulação dos Testes de fábrica**

A simulação dos testes de fábrica foi realizada para validar os modelos do simulador *HYSYS* e, conseqüentemente permitindo-nos utilizar este simulador para analisar os testes de campo. Os resultados obtidos a partir da simulação encontram-se apresentados de forma comparativa com testes de fábrica na Tabela 6.

Tabela 6 – Resultados da simulação Teste de Fábrica.

Variável	unidade	TF 1	Simulado	TF 2	Simulado
Potência 1stg	MW	1,578	1,532	1,613	1,567
Head Politrópica 1 stg	kg.m/kg	20322	20340	19772	19780
Efic. Politrópica 1 stg	(%)	79,6	80,0	79,8	80,0
Z 1stg		0,987	0,984	0,985	0,984
cp/cv 1stg		1,261	1,262	1,222	1,262
MW 1stg	(%)	21,2	21,1	21,2	21,1

Potência 2stg	MW	1,955	1,724	1,944	1,733
Vazão mássica 2 stg	Kg/h	21988	21950	23183	23140
Vazão volumétrica 2 stg	m <sup>3</sup> /h	1351	1352	1473	1474
Politropic head 2 stg	kg.m/kg	19919	19970	19265	19340
Efic. Politrópica 2 stg	(%)	62,4	69,1	64,2	70,1
Z 2stg		0,955	0,945	0,969	0,947
cp/cv 2stg		1,299	1,306	1,26	1,304
MW 2stg	(%)	21,18	20,92	21,18	20,92

Analisando a Tabela 6 pode-se verificar que os resultados gerados pelo simulador são muito próximos dos obtidos nos testes de fábrica.

- **Simulação Testes em campo**

A simulação dos testes de fábrica foi realizada para determinar a eficiência politrópica do equipamento necessária à compressão do gás na pressão descarga prevista em projeto e, conseqüentemente compará-la com a eficiência descrita pelo fabricante. Ainda com a simulação pode-se verificar se o equipamento alcança o Head politrópico de operação (Guarantee Polytropic Head). Os resultados obtidos a partir da simulação encontram-se apresentados de forma comparativa com a Data Sheet na Tabela 7.

Tabela 7 - Resultados simulação Testes em campo.

Variável	Unidade	TC 1	Simulado	TC 2	Simulado	TC 3	Simulado	TC 4	Simulado	TC 5	Simulado
Vazão suc. 2 stg	ACTm <sup>3</sup> /h	1549	1323	1521	1334	1431	1173	1509	1273	1448	1194
Vazão descarga	ACTm <sup>3</sup> /h	148,0	209,4	138,0	274,9	132,0	249,7	139,0	274,6	131,0	251,3
Potência 1 stg	MW		1,476		1,442		1,442		1,442		1,442
Potência 2 stg	MW		1,649		1,609		1,609		1,609		1,609
Potência	MW	2,353	3,125	2,363	3,051	2,357	2,986	2,272	2,990	2,305	2,947
Head Politrópica 1 stg	kg.m/kg		20190		20530		20880		20530		20900
Head Politrópica 2 stg	kg.m/kg		19580		20580		20010		20010		20360
Head Politrópica	kg.m/kg		39770		41110		40890		40540		41260
Efic. Politrópica 1 stg	(%)		77		78		78		77		77
Efic. Politrópica 2 stg	(%)		66		69		66		66		66

O Head politrópico deve estar dentro do range de 100 a 105% do Head normal.

Desta forma, analisando os resultados na Tabela 6 verifica-se que o equipamento não se encontra dentro da faixa de Head recomendado. Observe os dados de projeto e simulados:

- Head Politrópico Normal: 38139 Kg.m/Kg;
- Head Politrópico de operação: 38139 a 40046 Kg.m/Kg;
- Head Politrópico simulado: 39770 a 41260 Kg.m/Kg.

#### **4.2.3 - Elaboração de Memorial Descritivo**

Um memorial descritivo tem como objetivo descrever um conjunto de atividades, serviços ou processos.

Esta atividade visou relacionar uma seqüência de trabalhos a serem realizadas para proporcionar a separação de óleos leves de óleos pesados e serem bombeados e armazenados separadamente.

As segregações estudadas foram a separação dos óleos leves dos óleos pesado. Todas as opções aproveitarão as linhas atuais de 24” e 26” para realizar o envio das correntes para o processamento em Guamaré.

Foram realizadas pesquisas em link interno com a finalidade de realizar um levantamento da documentação das áreas avaliadas em campo. Realizaram-se visitas técnicas a fim de fazer um levantamento de dados e verificar em campo a possibilidade desta atividade. Foram realizadas simulações no Pipesim para verificar a possibilidade de escoamento.

#### **4.2.4 - Cálculo da Perda de Carga**

A seguir serão apresentadas as equações utilizadas para o cálculo da perda de carga de gases e líquidos em tubulações, utilizando um programa simples construído no Microsoft Excel, uma ferramenta simples que é muito utilizada no dia-a-dia da Petrobrás. Esta ferramenta foi utilizada em conjunto com os conhecimentos básicos teóricos adquiridos durante o curso.

##### **4.2.4.1 – Perda de carga em líquidos**

A equação utilizada por este programa para o cálculo da perda de carga foi retirada do livro *Gás Conditioning and Processing* de *Campbell*, o qual mostra uma variação da equação de Bernoulli para líquidos incompressíveis.

$$\Delta P = -2f \frac{L}{D} v^2 \rho - \rho \Delta H \quad (38)$$

Em que:

$\Delta P$ : Diferença de pressão entre dois pontos estudados;

$f$ : Fator de fricção;

$L$ : Comprimento (ou comprimento equivalente) do duto;

$D$ : Diâmetro interno do duto;

$v$ : Velocidade do fluido;

$\Delta H$ : Diferença de nível entre os pontos estudados;

$g$ : Gravidade.

Basicamente, a determinação da perda de carga foi necessária para verificar a capacidade das linhas de processo atualmente existentes frente a novas condições operacionais, bem como para avaliar perdas de pressão que normalmente estavam ocorrendo no sistema de medição de líquidos nas plataformas do RN/CE.

Utilizaram-se como premissas básicas o tipo de fluido e o material da tubulação, que normalmente é de aço carbono. Faz necessário também o conhecimento do layout das linhas (isométrico), pois a metodologia de cálculo faz uso do comprimento equivalente.

Foi desenvolvida uma planilha em Excel para o cálculo da perda de carga em líquidos que se encontra no anexo I.

#### 4.2.5.2 – Perda de carga em gases

A equação utilizada por este programa para o cálculo da perda de carga foi à equação de Weymouth:

$$Q = 18,062 \times \frac{T_0}{P_0} \times \sqrt{\frac{(P_1^2 - P_2^2) \times d^{5,33}}{\gamma TL}} \quad (39)$$

O cálculo das perdas de carga nos acessórios é feito pelos comprimentos equivalentes, utilizando de maneira análoga ao comprimento real.

O cálculo da perda de carga fez-se necessário para avaliar a perda de carga no sistema de medição de gases nas plataformas e campos do RN/CE.

Foi desenvolvida uma planilha Excel para o cálculo da perda de carga em escoamento de gases que se encontra no Anexo I.

#### **4.2.6 - Realização de Relatórios Técnicos Econômicos**

Para a aprovação de projetos é realizada a análise econômica, esta análise é feita através da elaboração de relatório técnico econômico.

O Sistema existente foi desenvolvido de forma modular, o que significa que, ao invés de uma única pasta de trabalho do MS Excel, é disponibilizado num mesmo "pacote" (diretório) diversos módulos individuais (pastas de trabalho do MS Excel), inter-relacionados e outras ferramentas auxiliares para a análise econômica. A sua utilização requer a disponibilidade do Office 2000. Na presente pasta deve conter os dados de uma Oportunidade Exploratória. É nela, e somente nela, que são alimentados todos os dados para serem submetidos à análise econômica. Por meio de macros, os dados são migrados para as pastas onde são calculados os indicadores econômicos.

#### **4.2.7 - Pesquisa de Dados e Construção de uma Planilha para Cálculo de Propriedades**

Esta atividade teve como finalidade o recolhimento de dados para a construção de uma planilha com o intuito de utilizá-la para o cálculo de propriedades dos gases tais como, fator de compressibilidade, viscosidade e densidade para o cálculo de incertezas de medição da ANP. A metodologia adotada foi à pesquisa de dados em literatura disponível. O layout da planilha encontra-se no Anexo I.

#### **4.2.8 – Avaliação das válvulas redutoras de pressão**

Esta atividade teve como objetivo apresentar os resultados referentes a avaliação e dimensionamento das válvulas redutoras de pressão existentes nas estações de vapor *EV-A* e na *EV-B*, situadas no **Campo de Produção AB** a determinadas vazões e condições de pressão de gás rico. A metodologia adotada consistiu em simulações no simulador Performance do fabricante das válvulas, onde foram obtidas as curvas características da válvula para cada condição de pressão e também foi elaborada uma planilha em Excel para validar os resultados obtidos no simulador que se encontra no Anexo I.

#### 4.2.8.1 – Premissas básicas

Para a avaliação dos parâmetros mencionados foram estabelecidas as seguintes premissas:

##### Faixas de vazão e pressão

As faixas de vazão, pressão e a temperatura do escoamento para cada estação encontram-se na Tabela 8. Para fins de projeto utilizou-se a pressão à montante como sendo de 70 kgf/cm<sup>2</sup> e de 35 kgf/cm<sup>2</sup> e a pressão à jusante de 18 kgf/cm<sup>2</sup>, observando-se os efeitos provocados no sistema para cada caso.

Tabela 8. Faixas de vazão e pressão, obtidos a partir de dados de projeto.

		EV-A (70)	EV-A (35)	EV-B (70)	EV-B (35)
Pressão à montante	kgf/cm <sup>2</sup> _m	70	35	70	35
Pressão à jusante	kgf/cm <sup>2</sup> _m	18	18	18	18
Temperatura	°C	30	30	30	30
Temperatura	K	303	303	303	303
Vazão máxima	P*m <sup>3</sup> /d	89000	89000	112000	112000
Vazão Normal	P*m <sup>3</sup> /d	81000	81000	98000	98000
Vazão Mínima	P*m <sup>3</sup> /d	14000	14000	14000	14000

P\* - @20 °C e 1 atm; \_m – manométrico.

##### A composição do gás que alimenta os GV's conforme Tabela 9.

Tabela 9. Composição do Gás Rico utilizado na alimentação da EV-A e EV-B

FONTE DE SUPRIMENTO DE GÁS Componentes	GÁS RICO (Composição média)
N <sub>2</sub>	0,98
CO <sub>2</sub>	0,15
C <sub>1</sub>	73,55
C <sub>2</sub>	12,76

C <sub>3+</sub>	12,56
Poder calorífico superior	11800
Poder calorífico inferior	10500
Densidade calc.	0,79
H <sub>2</sub> S	< 15 ppmv
Enxofre total	< 15 ppmv
Ponto de orvalho	< 30°C

*A FD, baseada em informações fornecidas pelo campo, das válvulas existentes nas EV's (EV-A e EV-B), encontram-se no Anexo I.*

*Diâmetro da linha à montante e à jusante da válvula de 3".*

#### 4.2.8.2 – Memória de Cálculo

*Propriedades físicas e termodinâmicas do gás.*

Tabela 10. Propriedades Físicas e Termodinâmicas do gás.

		EV-A (70)	EV-A (35)	EV-B (70)	EV-B (35)
Peso molecular	<b>Kg/kmol</b>	21,924	22,139	21,924	22,139
Pressão crítica	<b>kgf/cm<sup>2</sup></b>	48,5363	48,5289	48,53	48,5289
Temperatura crítica	<b>°C</b>	39,0568	37,5964	39,0568	37,5964
Densidade	<b>kg/m<sup>3</sup></b>	79,776	34,806	79,776	34,805
Z		0,7484	0,8659	0,7484	0,8659
k		1,1522	1,1928	1,1522	1,1928
Densidade relativa		0,7599	0,7674	0,7599	0,7674

#### Tipo de escoamento

Foram feitos os seguintes testes para determinar o tipo de escoamento:

- Escoamento subcrítico, se:  $\Delta P < 0,5 \times C_f^2 \times P_1$
- Escoamento crítico, se:  $\Delta P \geq 0,5 \times C_f^2 \times P_1$

Para pressão à montante de 70 kgf/cm<sup>2</sup> e pressão à jusante de 18 kgf/cm<sup>2</sup>, o  $\Delta P$  é igual a 52 kgf/cm<sup>2</sup>, e para pressão à montante de 35 kgf/cm<sup>2</sup>

e pressão à jusante de 18 kgf/cm<sup>2</sup>, o  $\Delta P$  é igual a 17 kgf/cm<sup>2</sup>. Realizando os testes, observa-se que o escoamento é crítico.

### Parâmetros calculados e condições de operação.

Tabela 11. Parâmetros calculados e condições de operação do sistema.

		EV-A	EV-A	EV-B	EV-B
Pressão à montante	kgf/cm <sup>2</sup>	70	35	70	35
Pressão à jusante	kgf/cm <sup>3</sup>	18	18	18	18
Vazão mínima	Nm <sup>3</sup> /h	583,33	583,33	583,33	583,33
Vazão normal	Nm <sup>3</sup> /h	3375	3375	4083,3	4083,3
Vazão máxima	Nm <sup>3</sup> /h	3708,33	3708,33	4666,66	4666,66
Vazão limite	Nm <sup>3</sup> /h	13250	13250	13250	13250
Cv para condição de vazão máxima		0,485	7,824	0,611	9,878
Cv para condição de vazão limite			29,95		29,95
Percentual de abertura para vazão máxima	%	45	87	50	81

As curvas das características das válvulas encontram-se no Anexo I. Só serão mencionadas as curvas dos casos em que a pressão à montante é de 35 kgf/cm<sup>2</sup> devido ao fato de esta ser a configuração atualmente utilizada em campo e também pelo fato deste caso ser representativo para a avaliação da válvula.

#### 4.2.8.3 – Conclusões

Conforme avaliação, as válvulas redutoras de pressão das estações **EV-A** e **EV-B**, atendem a vazão atual e comportam a vazão prevista.

Caso seja necessário um novo aumento de vazão, as estações comportarão uma vazão máxima de 13.250 Nm<sup>3</sup>/h cada, nas condições previstas neste relatório.

#### 4.2.9 – Elaboração de Projeto Conceitual

Esta atividade teve como objetivo fornecer as informações e diretrizes necessárias para a elaboração do projeto conceitual que deverá implementar facilidades para adequar as estações de A, B e C, de forma que as mesmas possam escoar gás em baixa pressão entre si, possibilitando maximizar a utilização da capacidade de compressão instalada. Tal maximização visa incrementar a produção de gás e ao mesmo tempo suprir o sistema com uma

capacidade de compressão reserva, a ser utilizada no caso de paradas programadas ou não e verificando sua capacidade de adequação as necessidades de escoamento.

#### **4.2.10 – Elaboração de Relatórios Técnicos**

Os relatórios técnicos têm como objetivo apresentar os resultados, estudos técnicos e/ou levantamento de dados em campo.

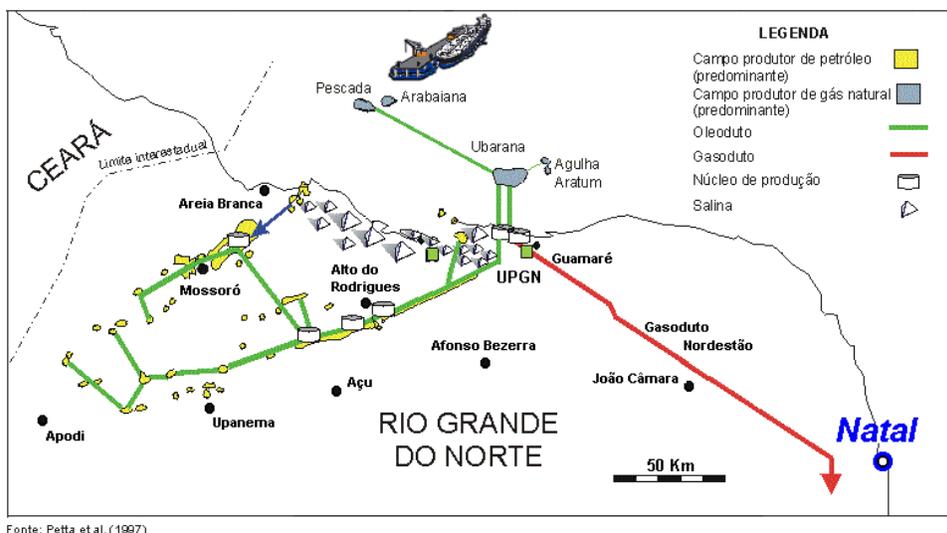
Para as atividades desenvolvidas no estágio que se enquadraram no escopo do relatório técnico, foram desenvolvidos os documentos com as respectivas numerações de acordo com a norma Petrobrás de nº1710, que rege a numeração de documentos na empresa.

#### **4.2.11 - Visitas Técnicas**

Durante a realização do estágio foram visitados: campos de produção, plataformas e unidades de tratamento e processamento de fluidos. A seguir estão apresentadas as áreas de operação visitadas:

##### **4.2.11.1 - Pólo de Guamaré**

O Pólo Industrial de Guamaré foi visitado com freqüência, está situado no Estado do Rio Grande do Norte, a cerca de 180Km de Natal e a 8 Km da cidade de Guamaré. É o coração do complexo petrolífero do Rio Grande do Norte e Ceará. É no pólo de Guamaré que a Petrobras processa o óleo e o gás produzidos nos campos terrestres e no mar da Bacia Potiguar. Apenas a produção marítima do Ceará não vai para o Pólo, segue de navio para as refinarias.



**Figura 14 - Localização geográfica do Pólo de Guararé.**

Todo óleo que chega a Guararé é tratado para que a água seja separada, esta água é processada nas duas estações de tratamento de efluentes e devolvida ao ambiente por meio de emissários submarinos. Já o óleo é enviado para refino por meio de duto que avança mar adentro e abastece navios-tanques a 20 Km através de uma manobóia. Parte do óleo, entretanto, é processada na unidade de diesel e consumida no mercado local do Rio Grande do Norte.



**Figura 15 - Pólo industrial de Guararé**

O gás que chega a Guamaré é comprimido na estação de compressores de Ubarana – ECUB - e vai para as unidades de processamento de gás natural. Além de abastecer o Rio Grande do Norte e o Ceará, o gás industrial proveniente das Unidades de Tratamento de Gás Natural – UPGN, segue também para os Estados da Paraíba e de Pernambuco. O gás de cozinha - GLP - atende o Rio Grande do Norte e a Paraíba.

#### **4.2.11.2 - Plataforma**

A visita a plataforma foi feita à Plataforma de Ubarana 2 (PUB-2), que possui grande estrutura com capacidade para alojar cerca de 100 funcionários.

Recentemente, em 16 de Junho deste ano, comemorou-se 30 anos de produção do campo de Ubarana, campo este que teve sua descoberta em Agosto de 1973 e início da produção três anos depois. O campo de produção de hidrocarbonetos, chamado de campo de Ubarana esta localizado no estado do Rio Grande do Norte na costa do município de Guamaré. Estão contidas neste campo 14 plataformas fixas, sendo duas de concreto armado e as outras 12 de estruturas metálicas, conhecidas como Jaquetas, e são nomeadas por siglas como PUB-02, que significa Plataforma de Ubarana 02.

Todas as plataformas estão interligadas por uma malha de dutos submersos que escoam toda a produção de óleo e gás e que sevem para transporte de fluídos que facilitam a produção. Ao redor do campo de Ubarana foram também encontrados outros campos com potencial para produção



**Figura 16- Plataforma de Ubarana 2 (PUB-02)**

#### 4.2.11.3 – Área Sul de Mossoró

Foram realizadas visitas técnicas aos campos produtores da área sul de Mossoró, onde foi possível conhecer os geradores de vapor e aprender um pouco mais sobre o seu princípio de funcionamento e regiões de abastecimento, conhecer os vasos separadores e de teste, as válvulas, entre outros equipamentos, bem como coletar dados pertinentes para a elaboração de projetos.



**Figura 17 – Campo da Área sul de Mossoró**

---

---

# Conclusões

---

---

# 5

---

## 5 - Conclusões

O estágio completou a parte curricular e assumiu um papel importante, pois possibilitou a integração em um ambiente de produção, a aquisição de conhecimentos e experiência profissional com a execução de atividades específicas na área de atuação de um Engenheiro Químico, suavizando a passagem da barreira que separa a vida curricular da vida profissional.

O estágio supervisionado foi de grande importância, pois o contato aluno-empresa trouxe benefícios, promovendo a interação com diversos profissionais, enriquecendo assim os conhecimentos e conseqüentemente a experiência do aluno.

A falta de familiaridade na utilização dos simuladores constituiu na principal dificuldade encontrada durante o desenvolvimento dos projetos. Porém o aprendizado do uso dos simuladores proporcionou uma ampliação dos conhecimentos relacionados a futuras atividades profissionais.

No que diz respeito às atividades desenvolvidas, proporcionaram um grande enriquecimento dos assuntos abordados, fazendo uso de ferramentas básicas como Excel, com a finalidade de avaliar a viabilidade de um projeto.

As visitas técnicas aumentaram enormemente a idéia do papel que um Engenheiro Químico exerce na indústria do Petróleo, mais especificamente na área de processamento.

---

---

# Referências

---

---

# 6

## 6 - Referências

---

- SMITH, J.M, VAN NESS, H.C; ABBOTT, M.M; *Introdução à engenharia Química*; 5° edição, Editora LTC; Rio de Janeiro, 2000.
- *CAMPBELL, J. M.; Gas Conditioning and Processing, Vol. 1 – The Basic Principles, sixth edition, USA: Campbell Petroleum Series, 1990.*
- *THOMAS, J.,E., Organizador; Fundamentos de Engenharia de Petróleo, Editora Interciência: PETROBRAS, Rio de Janeiro, 2001.*
- Normas Petrobras, ABNT (Associação Brasileira de Normas técnicas), ASME (American Society of Mechanical Engineers), API (American Petroleum Institute), IEC (International Electrotechnical Commission), ISA (Instrument Society of American), DIN (Deutsches Institut Für Normung), NFPA (National Fire protection Association), IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers).
- GPSA (Gas Processors Suppliers Association). “Engineering Data Book”. 11 ed., 1998.
- CRANE – Flow of fluids – Through valves, fittings, an pipe
- TELLES, Pedro Carlos da Silva; BARROS, Darcy G. de Paula; Tabelas e gráficos para projetos de tubulações, 5ed, Rio de Janeiro, Ed. Interciência, 1991.
- [www.petrobras.com.br](http://www.petrobras.com.br)

---

---

# **Anexos**

---

---

# 6

## 6 - Anexo I

- A tabela abaixo apresenta as simulações realizadas com a finalidade de validar o simulador. Observa-se que parâmetros como carga na haste e potência encontram-se muito próximos dos valores fornecidos pela folha de dados do equipamento.

Tabela 12 – Comparação entre os parâmetros iniciais fornecidos pela FD com o valor simulado

	A- original	A- simulado	B- original	B- simulado	C- original	C- simulado	E- original	E- simulado	F- original	F- simulado
Cilindros / estágio	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Efeito	simples	simples	simples	simples	simples	simples	duplo	duplo	duplo	duplo
Vazão (Mm3/d)	72	70,65	83	82,63	93	91,13	91	94,1	90	94,89
P <sub>1</sub> 1stg (psia)	28,916	29	33,14	33,14	36,027	36,03	24,649	24,65	24,649	24,65
P <sub>1</sub> 2stg (psia)	98,967	100,44	109,95	111,32	117,1	118,69	115,68	117,13	117,1	117,76
P <sub>1</sub> 3stg (psia)	299,16	308,52	317,6	326,87	330,45	338,32	327,96	332,84	331,83	334,88
P <sub>d</sub> 1stg (psia)	102,88	101,55	115,68	112,55	124,21	119,99	121,37	118,43	122,79	119,05
P <sub>d</sub> 2stg (psia)	313,38	316,46	334,71	335,29	348,94	347,03	346,05	341,41	348,94	343,5
P <sub>d</sub> 3stg (psia)	1014,5	1007	1014,5	1014,5	1014,5	1014,5	1014,5	1014,5	1014,5	1014,5
T <sub>s</sub> 1stg (°F)	104	104	104	104	104	104	104	104	95	95
T <sub>s</sub> 2stg (°F)	116,6	116,6	116,6	116,6	116,6	116,6	116,6	116,6	113	113
T <sub>s</sub> 3stg (°F)	116,6	116,6	116,6	116,6	116,6	116,6	116,6	116,6	113	113
T <sub>d</sub> 1stg (°F)	251,6	251,6	248	248	248	248	296,6	296,6	262,4	262,4
T <sub>d</sub> 2stg (°F)	255,2	255,2	248	248	244,4	244,4	246,2	246,2	228,2	228,2
T <sub>d</sub> 3stg (°F)	262,4	262,4	253,4	253,4	248	248	249,8	249,8	230	230
Densidade do gás	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,76	0,76
Clearance (Tampa/Haste) 1stg	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17
Clearance (Tampa/Haste) 2stg	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
Clearance (Tampa/Haste) 3stg	27,3	27,3	27,3	27,3	27,3	27,3	27,3	27,3	27,3	27,3
Rpm	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800
Eficiência Total (%)	76	66,3	76	66,4	76	66,65	76	76,85	76	79,79
Potência Requerida (Ehp)	654	654,37	730	730,22	778	778,29	867	867,06	831	831,13
Força do gás na haste (lbf)	25556	25023,69	25023	24773,28	24676	24461,89	24738	24610,86	24663	24555,5

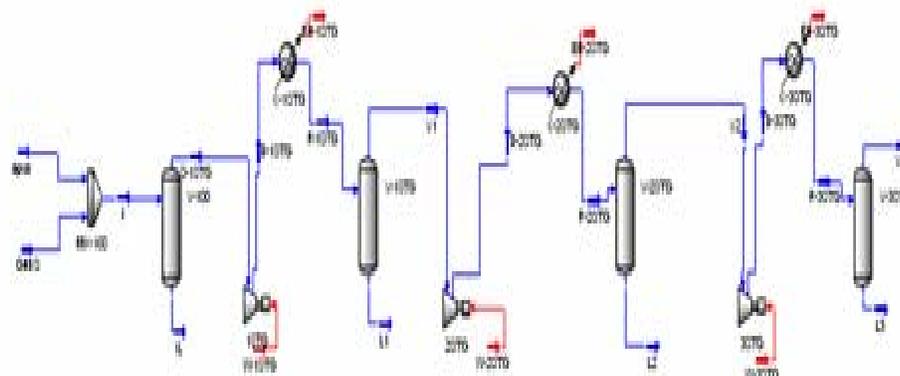


Figura 12 – Fluxograma de processo para a avaliação dos compressores

- As tabelas abaixo mostram os resultados obtidos através da simulação de um compressor alternativo com 3 estágios tanto para simples efeito como para duplo efeito, para as pressões de sucção citadas no tópico referente à avaliação dos compressores alternativos.

**Simple effect:**

- $P_{suc} = 0,5 \text{ kgf/cm}^2_m$

	Pdesc	BHP	BHP lim	CH-compr-1	CH-compr-2	CH-compr-3	CH-tração-1	CH-tração-2	CH-tração-3	Vazão-1	Cond.	P 1-2	P 2-3
	kg/cm <sup>2</sup>	HP	HP	lbf	lbf	lbf	lbf	lbf	lbf	Mm <sup>3</sup> /d	Mm <sup>3</sup> /d	psia	psia
				CH-compr-1-lbf	CH-compr-2-lbf	CH-compr-3-lbf	CH-tração-1-lbf	CH-tração-2-lbf	CH-tração-3-lbf	Vazão-1-Mm <sup>3</sup> /d	Cond.-Mm <sup>3</sup> /d	P 1-2-psia	P 2-3-psia
p1	35,90	433,19	985	3458,46	3009,40	10814,08	1227,36	7093,30	6265,70	66,63	1,8	71,05	195,93
p2	43,04	445,50	985	10037,14	10066,20	13350,05	1180,28	8181,14	8183,39	65,11	1,76	73,63	216,14
p3	50,16	452,63	985	10640,73	11467,39	15804,66	398,68	3409,09	10093,62	63,53	1,72	76,31	237,1
p4	57,41	455,78	985	10932,97	12725,58	18636,17	867,53	10733,70	12086,79	61,85	1,67	79,17	259,21
p5	64,51	455,66	985	11588,38	14284,51	21056,89	812,90	12003,01	14059,48	60,15	1,63	82,08	281,62
p6	71,70	452,90	985	12277,80	15577,55	23832,31	626,74	13470,44	16087,39	58,36	1,58	85,15	304,95

CHLim	P max 1 stg	P max 2 stg	P max 2 stg	Temp suc 1stg	Temp suc 2stg	Temp suc 3stg	Temp desc 1stg	Temp desc 2stg	Temp desc 3stg
	psia	psia	psia	°F	°F	°F	°F	°F	°F
CHLim-	P max 1 stg-psia	P max 2 stg-psia	P max 2 stg-psia	Temp suc 1stg-°F	Temp suc 2stg-°F	Temp suc 3stg-°F	Temp desc 1stg-°F	Temp desc 2stg-°F	Temp desc 3stg-°F
27000	196	507,8	1131,4	30,00	45,00	45,00	54,10	75,20	75,20
27000	196	507,8	1131,4	30,00	45,00	45,00	54,10	75,20	75,20
27000	196	507,8	1131,4	30,00	45,00	45,00	54,10	75,20	75,20
27000	196	507,8	1131,4	30,00	45,00	45,00	54,10	75,20	75,20
27000	196	507,8	1131,4	30,00	45,00	45,00	54,10	75,20	75,20
27000	196	507,8	1131,4	30,00	45,00	45,00	54,10	75,20	75,20

- Psuc = 1,0 kgf/cm<sup>2</sup>\_m

	Pdesc	BHP	BHP lim	CH-compr-1	CH-compr-2	CH-compr-3	CH-tração-1	CH-tração-2	CH-tração-3	Vazão-1	Cond.	P 1-2	P 2-3
	kg/cm <sup>2</sup>	HP	HP	lbf	lbf	lbf	lbf	lbf	lbf	Mm3/d	Mm3/d	psia	psia
				CH-compr-1-lbf	CH-compr-2-lbf	CH-compr-3-lbf	CH-tração-1-lbf	CH-tração-2-lbf	CH-tração-3-lbf	Vazão-1-Mm3/d	Cond.-Mm3/d	P 1-2-psia	P 2-3-psia
p1	35,90	535,21	985	12597,08	10503,39	10383,14	1281,01	8135,19	5542,04	91,03	3,25	90,48	228,02
p2	43,04	556,28	985	12855,47	11541,15	12861,54	1183,99	9183,03	7341,65	89,47	3,19	93,07	248,04
p3	50,18	570,90	985	13428,23	12989,81	15374,52	1183,99	10491,49	9295,86	87,86	3,13	95,77	268,8
p4	57,42	580,62	985	14069,81	14152,26	18161,43	1108,76	11673,80	11336,95	86,15	3,07	98,62	290,61
p5	64,56	586,24	985	14728,04	15697,09	20589,98	911,70	13068,55	13212,74	84,41	3,01	101,55	312,8
p6	71,70	588,66	985	15061,50	16933,09	23356,71	824,15	14333,77	15238,60	82,60	2,95	104,58	335,6

CHLim	P max 1 stg	P max 2 stg	P max 2 stg	Temp adm 1 stg	Temp adm 2 stg	Temp adm 3 stg	Temp desc 1 stg	Temp desc 2 stg	Temp desc 3 stg	Potência
	psia	psia	psia	°F	°F	°F	°F	°F	°F	HP
CHLim-	P max 1 stg-psia	P max 2 stg-psia	P max 2 stg-psia	Temp adm 1 stg-°F	Temp adm 2 stg-°F	Temp adm 3 stg-°F	Temp desc 1 stg-°F	Temp desc 2 stg-°F	Temp desc 3 stg-°F	535,21
27000	196	507,8	1131,4	30,00	45,00	45,00	54,10	75,20	75,20	556,28
27000	196	507,8	1131,4	30,00	45,00	45,00	54,10	75,20	75,20	570,90
27000	196	507,8	1131,4	30,00	45,00	45,00	54,10	75,20	75,20	570,90
27000	196	507,8	1131,4	30,00	45,00	45,00	54,10	75,20	75,20	580,62
27000	196	507,8	1131,4	30,00	45,00	45,00	54,10	75,20	75,20	586,24
27000	196	507,8	1131,4	30,00	45,00	45,00	54,10	75,20	75,20	588,66

- Psuc = 1,5 kgf/cm<sup>2</sup>\_m

	Pdesc	BHP	BHP lim	CH-compr-1	CH-compr-2	CH-compr-3	CH-tração-1	CH-tração-2	CH-tração-3	Vazão-1	Cond.	P 1-2	P 2-3
	kg/cm <sup>2</sup>	HP	HP	lbf	lbf	lbf	lbf	lbf	lbf	Mm3/d	Mm3/d	psia	psia
				CH-compr-1-lbf	CH-compr-2-lbf	CH-compr-3-lbf	CH-tração-1-lbf	CH-tração-2-lbf	CH-tração-3-lbf	Vazão-1-Mm3/d	Cond.-Mm3/d	P 1-2-psia	P 2-3-psia
p1	35,90	624,41	985	15351,57	11781,54	10255,39	1443,83	9166,12	4325,09	115,69	4,87	109,83	259,53
p2	43,04	653,99	985	15934,94	12980,40	12748,06	1248,79	10175,15	6782,03	114,10	4,8	112,42	279,37
p3	50,18	675,80	985	16491,22	14045,84	15207,66	1140,37	11395,45	8634,74	112,46	4,74	115,12	299,83
p4	57,42	691,99	985	16826,22	15547,86	17701,57	1140,37	12603,31	10530,17	110,72	4,66	117,97	321,42
p5	64,56	703,17	985	17482,49	16873,35	20130,88	1140,37	13950,25	12392,17	108,95	4,59	120,89	343,29
p6	71,70	710,63	985	18162,51	18271,16	22906,27	1030,59	15193,34	14428,60	107,12	4,51	123,92	365,76

CHLim	P max 1 stg	P max 2 stg	P max 2 stg	Temp suc- 1stg	Temp suc- 2stg	Temp suc- 3stg	Temp desc 1- stg	Temp desc 2- stg	Temp desc 3- stg
	psia	psia	psia	F	F	F	F	F	F
CHLim-	P max 1 stg-psia	P max 2 stg-psia	P max 2 stg-psia	Temp suc- 1stg-F	Temp suc- 2stg-F	Temp suc- 3stg-F	Temp desc 1- stg-F	Temp desc 2- stg-F	Temp desc 3- stg-F
27000	196	507,8	1131,4	30,00	45,00	45,00	54,10	75,20	75,20
27000	196	507,8	1131,4	30,00	45,00	45,00	54,10	75,20	75,20
27000	196	507,8	1131,4	30,00	45,00	45,00	54,10	75,20	75,20
27000	196	507,8	1131,4	30,00	45,00	45,00	54,10	75,20	75,20
27000	196	507,8	1131,4	30,00	45,00	45,00	54,10	75,20	75,20
27000	196	507,8	1131,4	30,00	45,00	45,00	54,10	75,20	75,20

- $P_{suc} = 2,0 \text{ kgf/cm}^2_m$

	Pdesc	BHP	BHP lim	CH-compr-1	CH-compr-2	CH-compr-3	CH-tração-1	CH-tração-2	CH-tração-3	Vazão-1	Cond.	P 1-2	P 2-3
	kg/cm <sup>2</sup>	HP	HP	lbf	lbf	lbf	lbf	lbf	lbf	Mm3/d	Mm3/d	psia	psia
				CH-compr-1-lbf	CH-compr-2-lbf	CH-compr-3-lbf	CH-tração-1-lbf	CH-tração-2-lbf	CH-tração-3-lbf	Vazão-1-Mm3/d	Cond.-Mm3/d	P 1-2-psia	P 2-3-psia
p1	35,90	624,41	985	15351,57	11781,54	10255,39	1443,83	9166,12	4925,09	115,69	4,87	109,83	259,53
p2	43,04	653,99	985	15934,94	12980,40	12748,06	1248,79	10175,15	6782,03	114,10	4,8	112,42	279,37
p3	50,16	675,80	985	16491,22	14045,84	15207,66	1140,37	11395,45	8634,74	112,46	4,74	115,12	299,83
p4	57,42	691,99	985	16826,22	15547,86	17701,57	1140,37	12603,31	10530,17	110,72	4,66	117,97	321,42
p5	64,56	703,17	985	17482,49	16873,35	20130,88	1140,37	13950,25	12392,17	108,95	4,59	120,89	343,29
p6	71,70	710,63	985	18162,51	18271,16	22906,27	1030,59	15193,34	14428,60	107,12	4,51	123,92	365,76

CHLim	P max 1 stg	P max 2 stg	P max 2 stg	Temperatura suc- 1stg	Temperatura suc- 2stg	Temperatura suc- 3stg	Temperatura desc 1- stg	Temperatura desc 2- stg
	psia	psia	psia	F	F	F	F	F
CHLim-	P max 1 stg-psia	P max 2 stg-psia	P max 2 stg-psia	Temperatura suc- 1stg-F	Temperatura suc- 2stg-F	Temperatura suc- 3stg-F	Temperatura desc 1- stg-F	Temperatura desc 2- stg-F
27000	196	507,8	1131,4	30,00	45,00	45,00	54,10	75,20
27000	196	507,8	1131,4	30,00	45,00	45,00	54,10	75,20
27000	196	507,8	1131,4	30,00	45,00	45,00	54,10	75,20
27000	196	507,8	1131,4	30,00	45,00	45,00	54,10	75,20
27000	196	507,8	1131,4	30,00	45,00	45,00	54,10	75,20
27000	196	507,8	1131,4	30,00	45,00	45,00	54,10	75,20

- $P_{suc} = 2,5 \text{ kgf/cm}^2_m$

	Pdesc	BHP	BHP lim	CH-compr-1	CH-compr-2	CH-compr-3	CH-tração-1	CH-tração-2	CH-tração-3	Vazão-1	Cond.	P 1-2	P 2-3
	kg/cm <sup>2</sup>	HP	HP	lbf	lbf	lbf	lbf	lbf	lbf	Mm3/d	Mm3/d	psia	psia
				CH-compr-1-lbf	CH-compr-2-lbf	CH-compr-3-lbf	CH-tração-1-lbf	CH-tração-2-lbf	CH-tração-3-lbf	Vazão-1-Mm3/d	Cond.-Mm3/d	P 1-2-psia	P 2-3-psia
p1	35,90	772,74	985	20699,83	14227,71	9618,41	1411,03	10899,21	3880,96	164,98	8,49	147,7	320,14
p2	43,04	818,52	985	21283,87	15364,92	11840,67	1411,03	11856,93	5447,35	163,35	8,4	150,3	339,6
p3	50,16	854,24	985	21889,82	16726,50	14337,99	1411,03	13115,34	7208,70	161,66	8,32	152,99	359,68
p4	57,42	882,59	985	22527,94	17859,17	16847,43	1202,84	14190,91	9066,97	159,88	8,23	155,83	380,68
p5	64,56	904,41	985	23179,55	19335,26	19291,69	1053,80	15522,45	10898,31	158,07	8,13	158,73	401,97
p6	71,70	921,40	985	23734,06	20487,89	22083,88	1053,80	16677,87	12955,24	156,20	8,04	161,72	423,82

CHLim	P max 1 stg	P max 2 stg	P max 2 stg	Temp adm 1 stg	Temp adm 2 stg	Temp adm 3 stg	Temp desc 1 stg	Temp desc 2 stg	Temp desc 3 stg	Potência
	psia	psia	psia	°F	°F	°F	°F	°F	°F	HP
CHLim-	P max 1 stg-psia	P max 2 stg-psia	P max 2 stg-psia	Temp adm 1 stg-°F	Temp adm 2 stg-°F	Temp adm 3 stg-°F	Temp desc 1 stg-°F	Temp desc 2 stg-°F	Temp desc 3 stg-°F	772,74
27000	196	507,8	1131,4	30,00	45,00	45,00	54,10	75,20	75,20	818,52
27000	196	507,8	1131,4	30,00	45,00	45,00	54,10	75,20	75,20	854,24
27000	196	507,8	1131,4	30,00	45,00	45,00	54,10	75,20	75,20	854,24
27000	196	507,8	1131,4	30,00	45,00	45,00	54,10	75,20	75,20	882,59
27000	196	507,8	1131,4	30,00	45,00	45,00	54,10	75,20	75,20	904,41
27000	196	507,8	1131,4	30,00	45,00	45,00	54,10	75,20	75,20	921,40

- Psuc = 3,0 kgf/cm<sup>2</sup>\_m

	Pdesc	BHP	BHP lim	CH-compr-1	CH-compr-2	CH-compr-3	CH-tração-1	CH-tração-2	CH-tração-3	Vazão-1	Cond.	P 1-2	P 2-3
	kg/cm <sup>2</sup>	HP	HP	lbf	lbf	lbf	lbf	lbf	lbf	Mm <sup>3</sup> /d	Mm <sup>3</sup> /d	psia	psia
				CH-compr-1-lbf	CH-compr-2-lbf	CH-compr-3-lbf	CH-tração-1-lbf	CH-tração-2-lbf	CH-tração-3-lbf	Vazão-1-Mm <sup>3</sup> /d	Cond.-Mm <sup>3</sup> /d	P 1-2-psia	P 2-3-psia
p1	35,90	836,06	985	23468,70	15344,16	9121,14	1367,64	11593,05	3543,86	189,86	10,47	166,43	349,67
p2	43,04	883,70	985	23908,42	16345,55	11386,99	1367,64	12800,71	5055,41	188,21	10,38	163,03	368,34
p3	50,18	932,14	985	24512,83	17709,63	13905,03	1367,64	13780,51	6552,23	186,50	10,29	171,72	388,8
p4	57,42	966,43	985	25148,48	19147,59	16432,37	1367,64	15077,61	8396,13	184,71	10,19	174,54	409,55
p5	64,56	993,43	985	25736,96	20245,45	18890,89	1194,29	16150,83	10212,48	182,88	10,09	177,43	430,57
p6	71,70	1015,04	985	26466,76	21735,56	21333,47	1010,41	17494,47	12245,96	180,99	9,98	180,41	452,12

CHLim	P max 1 stg	P max 2 stg	P max 2 stg	Temp adm 1 stg	Temp adm 2 stg	Temp adm 3 stg	Temp desc 1 stg	Temp desc 2 stg	Temp desc 3 stg	Potência
	psia	psia	psia	°F	°F	°F	°F	°F	°F	HP
CHLim-	P max 1 stg-psia	P max 2 stg-psia	P max 2 stg-psia	Temp adm 1 stg-°F	Temp adm 2 stg-°F	Temp adm 3 stg-°F	Temp desc 1 stg-°F	Temp desc 2 stg-°F	Temp desc 3 stg-°F	836,06
27000	196	507,8	1131,4	30,00	45,00	45,00	54,10	75,20	75,20	889,70
27000	196	507,8	1131,4	30,00	45,00	45,00	54,10	75,20	75,20	932,14
27000	196	507,8	1131,4	30,00	45,00	45,00	54,10	75,20	75,20	932,14
27000	196	507,8	1131,4	30,00	45,00	45,00	54,10	75,20	75,20	966,43
27000	196	507,8	1131,4	30,00	45,00	45,00	54,10	75,20	75,20	993,43
27000	196	507,8	1131,4	30,00	45,00	45,00	54,10	75,20	75,20	1015,04

- Psuc = 3,5 kgf/cm<sup>2</sup>\_m

	Pdesc	BHP	BHP lim	CH-compr-1	CH-compr-2	CH-compr-3	CH-tração-1	CH-tração-2	CH-tração-3	Vazão-1	Cond.	P 1-2	P 2-3
	kg/cm <sup>2</sup>	HP	HP	lbf	lbf	lbf	lbf	lbf	lbf	Mm3/d	Mm3/d	psia	psia
				CH-compr-1-lbf	CH-compr-2-lbf	CH-compr-3-lbf	CH-tração-1-lbf	CH-tração-2-lbf	CH-tração-3-lbf	Vazão-1-Mm3/d	Cond.-Mm3/d	P 1-2-psia	P 2-3-psia
p1	35,90	893,51	985	26276,58	16296,71	8853,74	1324,22	12365,93	3034,01	214,88	12,57	185,02	378,7
p2	43,04	954,86	985	26571,85	17621,22	11096,12	1324,22	13456,84	4469,82	213,21	12,47	187,61	337,79
p3	50,18	1003,91	985	27101,52	18631,78	13470,16	1324,22	14684,55	5332,28	211,48	12,37	190,29	417,44
p4	57,42	1044,04	985	27734,26	20051,37	16018,88	1324,22	15701,68	7763,43	209,67	12,26	193,11	437,94
p5	64,56	1076,13	985	28373,17	21486,68	18495,68	1324,22	16395,86	9565,85	207,82	12,16	195,98	458,69
p6	71,70	1102,31	985	29044,70	22598,20	20952,76	1194,79	18080,90	11378,45	205,92	12,04	198,93	479,95

CHLim	P max 1 stg	P max 2 stg	P max 2 stg	Temp adm 1 stg	Temp adm 2 stg	Temp adm 3 stg	Temp desc 1 stg	Temp desc 2 stg	Temp desc 3 stg	Potência
	psia	psia	psia	F	F	F	F	F	F	HP
CHLim-	P max 1 stg-psia	P max 2 stg-psia	P max 2 stg-psia	Temp adm 1 stg-F	Temp adm 2 stg-F	Temp adm 3 stg-F	Temp desc 1 stg-F	Temp desc 2 stg-F	Temp desc 3 stg-F	893,51
27000	196	507,8	1131,4	30,00	45,00	45,00	54,10	75,20	75,20	954,86
27000	196	507,8	1131,4	30,00	45,00	45,00	54,10	75,20	75,20	1003,91
27000	196	507,8	1131,4	30,00	45,00	45,00	54,10	75,20	75,20	1003,91
27000	196	507,8	1131,4	30,00	45,00	45,00	54,10	75,20	75,20	1044,04
27000	196	507,8	1131,4	30,00	45,00	45,00	54,10	75,20	75,20	1076,13
27000	196	507,8	1131,4	30,00	45,00	45,00	54,10	75,20	75,20	1102,31

- Psuc = 4,0 kgf/cm<sup>2</sup>\_m

	Pdesc	BHP	BHP lim	CH-compr-1	CH-compr-2	CH-compr-3	CH-tração-1	CH-tração-2	CH-tração-3	Vazão-1	Cond.	P 1-2	P 2-3
	kg/cm <sup>2</sup>	HP	HP	lbf	lbf	lbf	lbf	lbf	lbf	Mm3/d	Mm3/d	psia	psia
				CH-compr-1-lbf	CH-compr-2-lbf	CH-compr-3-lbf	CH-tração-1-lbf	CH-tração-2-lbf	CH-tração-3-lbf	Vazão-1-Mm3/d	Cond.-Mm3/d	P 1-2-psia	P 2-3-psia
p1	35,90	945,74	985	28831,54	17417,05	8312,13	1280,86	13192,77	2624,39	239,98	14,77	203,44	407,22
p2	43,04	1014,66	985	29412,09	18531,94	10725,74	1280,86	14089,09	3903,66	238,29	14,66	206,02	426,13
p3	50,18	1069,74	985	29674,39	19863,58	13033,65	1280,86	15288,96	5350,45	236,44	14,55	208,76	445,45
p4	57,42	1116,09	985	30282,05	20928,31	15603,81	1280,86	16566,11	7167,62	234,72	14,44	211,49	465,83
p5	64,56	1076,13	985	28373,17	21486,68	18495,68	1324,22	16395,86	9565,85	207,82	12,16	195,98	458,69
p6	71,70	1183,88	985	31584,24	23793,50	20577,78	1280,86	18885,63	10756,50	230,94	14,21	217,28	507,31

CHLim	P max 1 stg	P max 2 stg	P max 2 stg	Temp adm 1 stg	Temp adm 2 stg	Temp adm 3 stg	Temp desc 1 stg	Temp desc 2 stg	Temp desc 3 stg	Potência
	psia	psia	psia	F	F	F	F	F	F	HP
CHLim-	P max 1 stg-psia	P max 2 stg-psia	P max 2 stg-psia	Temp adm 1 stg-F	Temp adm 2 stg-F	Temp adm 3 stg-F	Temp desc 1 stg-F	Temp desc 2 stg-F	Temp desc 3 stg-F	945,74
27000	196	507,8	1131,4	30,00	45,00	45,00	54,10	75,20	75,20	1014,66
27000	196	507,8	1131,4	30,00	45,00	45,00	54,10	75,20	75,20	1069,74
27000	196	507,8	1131,4	30,00	45,00	45,00	54,10	75,20	75,20	1069,74
27000	196	507,8	1131,4	30,00	45,00	45,00	54,10	75,20	75,20	1116,09
27000	196	507,8	1131,4	30,00	45,00	45,00	54,10	75,20	75,20	1076,13
27000	196	507,8	1131,4	30,00	45,00	45,00	54,10	75,20	75,20	1183,88

- $P_{suc} = 4,5 \text{ kgf/cm}^2\_m$

	Pdesc	BHP	BHP lim	CH-compr-1	CH-compr-2	CH-compr-3	CH-tração-1	CH-tração-2	CH-tração-3	Vazão-1	Cond.	P 1-2	P 2-3
	kg/cm <sup>2</sup>	HP	HP	lbf	lbf	lbf	lbf	lbf	lbf	Mm <sup>3</sup> /d	Mm <sup>3</sup> /d	psia	psia
				CH-compr-1-lbf	CH-compr-2-lbf	CH-compr-3-lbf	CH-tração-1-lbf	CH-tração-2-lbf	CH-tração-3-lbf	Vazão-1-Mm <sup>3</sup> /d	Cond.-Mm <sup>3</sup> /d	P 1-2-psia	P 2-3-psia
p1	35,90	992,89	985	31460,22	18337,60	7953,17	1237,47	13697,32	2305,83	264,90	17,05	222,19	434,17
p2	43,04	1068,98	985	32042,64	19284,63	10258,03	1237,47	14856,98	3398,70	263,19	16,94	224,78	452,79
p3	50,18	1130,68	985	32643,93	20602,95	12618,33	1237,47	15759,50	4834,54	261,42	16,83	227,46	471,89
p4	57,42	1183,40	985	32798,75	22133,65	14317,76	1237,47	17148,46	6602,84	259,91	16,73	229,74	493,31
p5	64,56	1225,45	985	33435,84	23181,02	17380,01	1237,47	18336,65	8382,87	258,04	16,61	232,58	513,56
p6	71,70	1260,54	985	34093,93	24608,83	19313,45	1237,47	19431,90	10170,06	256,10	16,48	235,51	534,27

CHLim	P max 1 stg	P max 2 stg	P max 2 stg	Temp adm 1 stg	Temp adm 2 stg	Temp adm 3 stg	Temp desc 1 stg	Temp desc 2 stg	Temp desc 3 stg	Potência
	psia	psia	psia	F	F	F	F	F	F	HP
CHLim-	P max 1 stg-psia	P max 2 stg-psia	P max 2 stg-psia	Temp adm 1 stg-F	Temp adm 2 stg-F	Temp adm 3 stg-F	Temp desc 1 stg-F	Temp desc 2 stg-F	Temp desc 3 stg-F	992,89
27000	196	507,8	1131,4	30,00	45,00	45,00	54,10	75,20	75,20	1068,98
27000	196	507,8	1131,4	30,00	45,00	45,00	54,10	75,20	75,20	1130,68
27000	196	507,8	1131,4	30,00	45,00	45,00	54,10	75,20	75,20	1130,68
27000	196	507,8	1131,4	30,00	45,00	45,00	54,10	75,20	75,20	1183,40
27000	196	507,8	1131,4	30,00	45,00	45,00	54,10	75,20	75,20	1225,45
27000	196	507,8	1131,4	30,00	45,00	45,00	54,10	75,20	75,20	1260,54

- $P_{suc} = 5 \text{ kgf/cm}^2\_m$

	Pdesc	BHP	BHP lim	CH-compr-1	CH-compr-2	CH-compr-3	CH-tração-1	CH-tração-2	CH-tração-3	Vazão-1	Cond.	P 1-2	P 2-3
	kg/cm <sup>2</sup>	HP	HP	lbf	lbf	lbf	lbf	lbf	lbf	Mm <sup>3</sup> /d	Mm <sup>3</sup> /d	psia	psia
				CH-compr-1-lbf	CH-compr-2-lbf	CH-compr-3-lbf	CH-tração-1-lbf	CH-tração-2-lbf	CH-tração-3-lbf	Vazão-1-Mm <sup>3</sup> /d	Cond.-Mm <sup>3</sup> /d	P 1-2-psia	P 2-3-psia
p1	35,90	1036,63	985	33950,83	19216,74	7473,63	1194,09	14303,51	1882,32	290,25	19,46	240,33	461,86
p2	43,04	1120,08	985	34530,69	20490,53	9743,06	1194,09	15451,68	2868,38	288,52	19,34	242,9	480,31
p3	50,18	1188,10	985	35128,70	21455,28	12156,92	1194,09	16608,85	4301,16	286,74	19,22	245,56	499,21
p4	57,42	1245,02	985	35755,48	22811,02	14503,25	1194,09	17562,75	5962,00	284,87	19,1	248,35	518,88
p5	64,56	1291,73	985	36032,27	24177,42	17037,01	1194,09	18793,65	7568,63	282,98	18,97	251,18	538,73
p6	71,70	1331,02	985	36688,12	25222,26	19545,89	1194,09	20044,59	9369,38	281,02	18,84	254,1	559,02

CHLim	P max 1 stg	P max 2 stg	P max 2 stg	Temp adm 1 stg	Temp adm 2 stg	Temp adm 3 stg	Temp desc 1 stg	Temp desc 2 stg	Temp desc 3 stg	Potência
	psia	psia	psia	F	F	F	F	F	F	HP
CHLim-	P max 1 stg-psia	P max 2 stg-psia	P max 2 stg-psia	Temp adm 1 stg-F	Temp adm 2 stg-F	Temp adm 3 stg-F	Temp desc 1 stg-F	Temp desc 2 stg-F	Temp desc 3 stg-F	1036,63
27000	196	507,8	1131,4	30,00	45,00	45,00	54,10	75,20	75,20	1120,08
27000	196	507,8	1131,4	30,00	45,00	45,00	54,10	75,20	75,20	1188,10
27000	196	507,8	1131,4	30,00	45,00	45,00	54,10	75,20	75,20	1188,10
27000	196	507,8	1131,4	30,00	45,00	45,00	54,10	75,20	75,20	1245,02
27000	196	507,8	1131,4	30,00	45,00	45,00	54,10	75,20	75,20	1231,73
27000	196	507,8	1131,4	30,00	45,00	45,00	54,10	75,20	75,20	1331,02

Duplo efeito:

- $P_{suc} = 0,5 \text{ kgf/cm}^2_m$

	Pdesc	BHP	BHP lim	CH-compr-1	CH-compr-2	CH-compr-3	CH-tração-1	CH-tração-2	CH-tração-3	Vazão-1	Cond.	P 1-2	P 2-3
	kg/cm <sup>2</sup>	HP	HP	Graus	lbf	lbf	lbf	lbf	lbf	Mm3/d	lbf	psia	psia
				CH-compr-1-Graus	CH-compr-2-lbf	CH-compr-3-lbf	CH-tração-1-lbf	CH-tração-2-lbf	CH-tração-3-lbf	Vazão-1-Mm3/d	Cond.-lbf	P 1-2-psia	P 2-3-psia
p1	35,90	660,41	985	0,00	0,00	0,00	90,00	270,00	90,00	16406,87	4075,91	1	0
p2	43,04	678,53	985	0,00	0,00	0,00	90,00	270,00	90,00	16852,34	4075,91	1	0
p3	50,18	689,06	985	0,00	0,00	0,00	90,00	270,00	90,00	17316,41	4075,91	1	0
p4	57,42	693,69	985	0,00	0,00	0,00	90,00	270,00	90,00	17806,77	4075,91	1	0
p5	64,56	693,45	985	0,00	0,00	0,00	90,00	270,00	90,00	18308,97	4075,91	1	0
p6	71,70	689,30	985	0,00	0,00	0,00	90,00	270,00	90,00	18829,34	4075,91	1	0

CHLim	P max 1 stg	P max 2 stg	P max 2 stg
	psia	psia	psia
CHLim-	max 1 stg-psia	P max 2 stg-psia	P max 2 stg-psia
27000	196	507,8	1131,4
27000	196	507,8	1131,4
27000	196	507,8	1131,4
27000	196	507,8	1131,4
27000	196	507,8	1131,4
27000	196	507,8	1131,4

- $P_{suc} = 1,0 \text{ kgf/cm}^2_m$

	Pdesc	BHP	BHP lim	CH-compr-1	CH-compr-2	CH-compr-3	CH-tração-1	CH-tração-2	CH-tração-3	Vazão-1	Cond.	P 1-2	P 2-3
	kg/cm <sup>2</sup>	HP	HP	-	lbf	lbf	lbf	lbf	lbf	Mm3/d	lbf	psia	psia
				CH-compr-1-	CH-compr-2-lbf	CH-compr-3-lbf	CH-tração-1-lbf	CH-tração-2-lbf	CH-tração-3-lbf	Vazão-1-Mm3/d	Cond.-lbf	P 1-2-psia	P 2-3-psia
p1	35,90	817,81	985	0,20	0,20	0,20	0,20	0,00	0,00	-19549,88	-21951,68	16,92	10,04
p2	43,04	848,61	985	0,20	0,20	0,20	0,20	0,00	0,00	-20009,40	-22411,2	16,92	10,04
p3	50,18	870,01	985	0,20	0,20	0,20	0,20	0,00	0,00	-20486,96	-22888,76	16,92	10,04
p4	57,42	884,35	985	0,20	0,20	0,20	0,20	0,00	0,00	-20671,91	-23391,86	16,92	10,04
p5	64,56	892,62	985	0,20	0,20	0,20	0,20	0,00	0,00	-21186,29	-23906,24	16,92	10,04
p6	71,70	896,17	985	0,20	0,20	0,20	0,20	0,00	0,00	-21718,58	-24438,53	16,92	10,04

CHLim	P max 1 stg	P max 2 stg	P max 2 stg
	psia	psia	psia
CHLim-	P max 1 stg-psia	P max 2 stg-psia	P max 2 stg-psia
27000	136	507,8	1131,4
27000	136	507,8	1131,4
27000	136	507,8	1131,4
27000	136	507,8	1131,4
27000	136	507,8	1131,4
27000	136	507,8	1131,4

- $P_{suc} = 1,5 \text{ kgf/cm}^2_m$

Pdesc	BHP	BHP lim	CH-compr-1	CH-compr-2	CH-compr-3	CH-tração-1	CH-tração-2	CH-tração-3	Vazão-1	Cond.	P 1-2	P 2-3
kg/cm <sup>2</sup>	HP	HP	-	lbf	lbf	lbf	lbf	lbf	Mm3/d	lbf	psia	psia
			CH-compr-1-	CH-compr-2-lbf	CH-compr-3-lbf	CH-tração-1-lbf	CH-tração-2-lbf	CH-tração-3-lbf	Vazão-1-Mm3/d	Cond.-lbf	P 1-2-psia	P 2-3-psia
p1	1,43	356,42	385	0,20	0,20	0,20	0,20	0,00	-24311,17	-26712,37	16,32	10,04
p2	1,33	339,41	385	0,20	0,20	0,20	0,20	0,00	-24770,31	-27172,72	16,32	10,04
p3	2,50	1031,33	385	0,20	0,20	0,20	0,20	0,00	-25247,34	-27643,15	16,32	10,04
p4	3,01	1054,36	385	0,20	0,20	0,20	0,20	0,00	-25748,32	-28150,72	16,32	10,04
p5	3,51	1071,33	385	0,20	0,20	0,20	0,20	0,00	-26260,78	-28662,58	16,32	10,04
p6	4,01	1082,24	385	0,20	0,20	0,20	0,20	0,00	-26543,70	-29131,93	16,32	10,04

CHLim	P max 1 stg	P max 2 stg	P max 2 stg
	psia	psia	psia
CHLim-	P max 1 stg-psia	P max 2 stg-psia	P max 2 stg-psia
27000	136	507,8	1131,4
27000	136	507,8	1131,4
27000	136	507,8	1131,4
27000	136	507,8	1131,4
27000	136	507,8	1131,4
27000	136	507,8	1131,4

- $P_{suc} = 2,0 \text{ kgf/cm}^2_m$

Pdesc	BHP	BHP lim	CH-compr-1	CH-compr-2	CH-compr-3	CH-tração-1	CH-tração-2	CH-tração-3	Vazão-1	Cond.	P 1-2	P 2-3
kg/cm <sup>2</sup>	HP	HP	-	lbf	lbf	lbf	lbf	lbf	Mm3/d	lbf	psia	psia
			CH-compr-1-	CH-compr-2-lbf	CH-compr-3-lbf	CH-tração-1-lbf	CH-tração-2-lbf	CH-tração-3-lbf	Vazão-1-Mm3/d	Cond.-lbf	P 1-2-psia	P 2-3-psia
35,30	1078,55	385	0,20	0,20	0,20	0,20	0,00	0,00	-28927,30	-31323,7	16,32	10,04
43,04	1133,18	385	0,20	0,20	0,20	0,20	0,00	0,00	-29386,54	-31788,34	16,32	10,04
50,18	1175,11	385	0,20	0,20	0,20	0,20	0,00	0,00	-29861,38	-32263,13	16,32	10,04
57,42	1207,64	385	0,20	0,20	0,20	0,20	0,00	0,00	-30360,17	-32761,37	16,32	10,04
64,56	1231,86	385	0,20	0,20	0,20	0,20	0,00	0,00	-30868,66	-33270,46	16,32	10,04
71,70	1243,80	385	0,20	0,20	0,20	0,20	0,00	0,00	-31333,48	-33735,28	16,32	10,04

CHLim	P max 1 stg	P max 2 stg	P max 2 stg
	psia	psia	psia
CHLim-	P max 1 stg-psia	P max 2 stg-psia	P max 2 stg-psia
27000	196	507,8	1131,4
27000	196	507,8	1131,4
27000	196	507,8	1131,4
27000	196	507,8	1131,4
27000	196	507,8	1131,4
27000	196	507,8	1131,4

- Psuc = 2,5 kgf/cm<sup>2</sup>\_m

	Pdesc	BHP	BHP lim	CH-compr-1	CH-compr-2	CH-compr-3	CH-tração-1	CH-tração-2	CH-tração-3	Vazão-1	Cond.	P 1-2	P 2-3
	kg/cm <sup>2</sup>	HP	HP	-	lbf	lbf	lbf	lbf	lbf	Mm3/d	lbf	psia	psia
				CH-compr-1-	CH-compr-2-lbf	CH-compr-3-lbf	CH-tração-1-lbf	CH-tração-2-lbf	CH-tração-3-lbf	Vazão-1-Mm3/d	Cond.-lbf	P 1-2-psia	P 2-3-psia
p1	36,11	1191,58	985	0,20	0,20	0,20	0,20	0,00	0,00	-33501,03	-35902,83	16,32	10,04
p2	43,04	1255,33	985	0,20	0,20	0,20	0,20	0,00	0,00	-33944,55	-36346,36	16,32	10,04
p3	50,18	1307,12	985	0,20	0,20	0,20	0,20	0,00	0,00	-34416,73	-36818,54	16,32	10,04
p4	57,42	1348,36	985	0,20	0,20	0,20	0,20	0,00	0,00	-34912,18	-37313,98	16,32	10,04
p5	64,56	1380,19	985	0,20	0,20	0,20	0,20	0,00	0,00	-35416,58	-37818,38	16,32	10,04
p6	71,70	1405,00	985	0,20	0,20	0,20	0,20	0,00	0,00	-35936,72	-38338,53	16,32	10,04

CHLim	P max 1 stg	P max 2 stg	P max 2 stg
	psia	psia	psia
CHLim-	P max 1 stg-psia	P max 2 stg-psia	P max 2 stg-psia
27000	196	507,8	1131,4
27000	196	507,8	1131,4
27000	196	507,8	1131,4
27000	196	507,8	1131,4
27000	196	507,8	1131,4
27000	196	507,8	1131,4

- Psuc = 3,0 kgf/cm<sup>2</sup>\_m

	Pdesc	BHP	BHP lim	CH-compr-1	CH-compr-2	CH-compr-3	CH-tração-1	CH-tração-2	CH-tração-3	Vazão-1	Cond.	P 1-2	P 2-3
	kg/cm <sup>2</sup>	HP	HP	-	lbf	lbf	lbf	lbf	lbf	Mm3/d	lbf	psia	psia
				CH-compr-1-	CH-compr-2-lbf	CH-compr-3-lbf	CH-tração-1-lbf	CH-tração-2-lbf	CH-tração-3-lbf	Vazão-1-Mm3/d	Cond.-lbf	P 1-2-psia	P 2-3-psia
p1	35,30	1283,94	985	0,20	0,20	0,20	0,20	0,00	0,00	-37358,20	-40360	16,32	10,04
p2	43,04	1367,03	985	0,20	0,20	0,20	0,20	0,00	0,00	-38412,46	-40814,26	16,32	10,04
p3	50,18	1428,32	985	0,20	0,20	0,20	0,20	0,00	0,00	-38881,36	-41283,17	16,32	10,04
p4	57,42	1478,04	985	0,20	0,20	0,20	0,20	0,00	0,00	-39372,89	-41774,7	16,32	10,04
p5	64,56	1517,31	985	0,20	0,20	0,20	0,20	0,00	0,00	-39872,71	-42274,52	16,32	10,04
p6	71,70	1548,81	985	0,20	0,20	0,20	0,20	0,00	0,00	-40387,75	-42789,55	16,32	10,04

CHLim	P max 1 stg	P max 2 stg	P max 2 stg
	psia	psia	psia
CHLim-	P max 1 stg-psia	P max 2 stg-psia	P max 2 stg-psia
27000	196	507,8	1131,4
27000	196	507,8	1131,4
27000	196	507,8	1131,4
27000	196	507,8	1131,4
27000	196	507,8	1131,4
27000	196	507,8	1131,4

- $P_{suc} = 3,5 \text{ kgf/cm}^2_m$

	Pdesc	BHP	BHP lim	CH-compr-1	CH-compr-2	CH-compr-3	CH-tração-1	CH-tração-2	CH-tração-3	Vazão-1	Cond.	P 1-2	P 2-3
	kg/cm <sup>2</sup>	HP	HP	-	lbf	lbf	lbf	lbf	lbf	Mm3/d	lbf	psia	psia
				CH-compr-1-	CH-compr-2-lbf	CH-compr-3-lbf	CH-tração-1-lbf	CH-tração-2-lbf	CH-tração-3-lbf	Vazão-1-Mm3/d	Cond.-lbf	P 1-2-psia	P 2-3-psia
p1	35,30	1381,88	385	0,20	0,00	0,00	0,00	90,00	180,00	40607,33	42787,88	16,32	0
p2	43,04	1469,80	385	0,20	0,00	0,00	0,00	90,00	180,00	41046,55	43227,1	16,32	0
p3	50,18	1540,44	385	0,20	0,00	0,00	0,00	90,00	180,00	41493,36	43679,92	16,32	0
p4	57,42	1598,48	385	0,20	0,00	0,00	0,00	90,00	180,00	41970,46	44154,02	16,32	0
p5	64,56	1645,04	385	0,20	0,00	0,00	0,00	90,00	180,00	42455,28	44635,83	16,32	0
p6	71,70	1683,11	385	0,20	0,00	0,00	0,00	90,00	180,00	42951,93	45131,95	16,32	0

CHLim	P max 1 stg	P max 2 stg	P max 2 stg
	psia	psia	psia
CHLim-	P max 1 stg-psia	P max 2 stg-psia	P max 2 stg-psia
27000	196	507,8	1131,4
27000	196	507,8	1131,4
27000	196	507,8	1131,4
27000	196	507,8	1131,4
27000	196	507,8	1131,4
27000	196	507,8	1131,4

- $P_{suc} = 4,0 \text{ kgf/cm}^2_m$

	Pdesc	BHP	BHP lim	CH-compr-1	CH-compr-2	CH-compr-3	CH-tração-1	CH-tração-2	CH-tração-3	Vazão-1	Cond.	P 1-2	P 2-3
	kg/cm <sup>2</sup>	HP	HP	-	lbf	lbf	lbf	lbf	lbf	Mm3/d	lbf	psia	psia
				CH-compr-1-	CH-compr-2-lbf	CH-compr-3-lbf	CH-tração-1-lbf	CH-tração-2-lbf	CH-tração-3-lbf	Vazão-1-Mm3/d	Cond.-lbf	P 1-2-psia	P 2-3-psia
p1	35,30	1381,88	385	0,20	0,00	0,00	0,00	90,00	180,00	40607,33	42787,88	16,32	0
p2	35,30	1417,78	385	0,20	0,00	0,00	0,00	90,00	180,00	46800,77	48981,33	16,32	0
p3	51,01	1642,76	385	0,20	0,00	0,00	0,00	90,00	180,00	45255,54	47436,09	16,32	0
p4	57,42	1700,06	385	0,20	0,00	0,00	0,00	90,00	180,00	45672,79	47853,35	16,32	0
p5	64,56	1753,07	385	0,20	0,00	0,00	0,00	90,00	180,00	46150,02	48330,57	16,32	0
p6	71,70	1808,90	385	0,20	0,00	0,00	0,00	90,00	180,00	47036,33	49216,89	16,32	0

CHLim	P max 1 stg	P max 2 stg	P max 2 stg
	psia	psia	psia
CHLim-	P max 1 stg-psia	P max 2 stg-psia	P max 2 stg-psia
27000	136	507,8	1131,4
27000	136	507,8	1131,4
27000	136	507,8	1131,4
27000	136	507,8	1131,4
27000	136	507,8	1131,4
27000	136	507,8	1131,4

- $P_{suc} = 4,5 \text{ kgf/cm}^2_m$

	Pdesc	BHP	BHP lim	CH-compr-1	CH-compr-2	CH-compr-3	CH-tração-1	CH-tração-2	CH-tração-3	Vazão-1	Cond.	P 1-2	P 2-3
	kgf/cm <sup>2</sup>	HP	HP	-	lbf	lbf	lbf	lbf	lbf	Mm <sup>3</sup> /d	lbf	psia	psia
				CH-compr-1-	CH-compr-2-lbf	CH-compr-3-lbf	CH-tração-1-lbf	CH-tração-2-lbf	CH-tração-3-lbf	Vazão-1-Mm <sup>3</sup> /d	Cond.-lbf	P 1-2-psia	P 2-3-psia
p1	35,30	1234,56	385	0,20	0,20	0,20	0,20	0,00	0,00	-63767,82	-72487,77	16,32	10,04
p2	43,04	1720,24	385	0,20	0,20	0,20	0,20	0,00	0,00	-56463,12	-58528,49	16,32	10,04
p3	51,01	1642,76	385	0,20	0,20	0,20	0,20	0,00	0,00	-47237,93	-49606,1	16,32	10,04
p4	57,42	1700,06	385	0,20	0,20	0,20	0,20	0,00	0,00	-47632,95	-50034,76	16,32	10,04
p5	64,56	1753,07	385	0,20	0,20	0,20	0,20	0,00	0,00	-48123,23	-50525,03	16,32	10,04
p6	71,70	1808,30	385	0,20	0,20	0,20	0,20	0,00	0,00	-49042,34	-51444,14	16,32	10,04

CHLim	P max 1 stg	P max 2 stg	P max 2 stg
	psia	psia	psia
CHLim-	P max 1 stg-psia	P max 2 stg-psia	P max 2 stg-psia
27000	136	507,8	1131,4
27000	136	507,8	1131,4
27000	136	507,8	1131,4
27000	136	507,8	1131,4
27000	136	507,8	1131,4
27000	136	507,8	1131,4

- A seguir encontram-se o layout das planilhas desenvolvidas com o intuito de facilitar o desenvolvimento das atividades.



DADOS			
Pressão	6,5000	kgf/cm <sup>2</sup> _m	
vazao	72000,00	m <sup>3</sup> /d	0,8333 m <sup>3</sup> /s
p	872,20	kgf/m <sup>2</sup>	
ρ	24,2300	cP	0,02423 Kgf/m.s
Ganho	-0,2064	kgf/cm <sup>2</sup> _m	
Pcarga	3,0916	kgf/cm <sup>2</sup> _m	
Pfinal	3,2020	kgf/cm <sup>2</sup> _m	VAPORIZA

Ítem	Trecho/Acidente		diâm. interno	Elev.	Gain	Elev. Abs	Horiz.	L geom	Lg total	Lequiv pq	Leq TR	L equiv	Area	veloc.
			in	mm			mm	mm	mm	mm	mm	mm	m <sup>2</sup>	m/s
1	tr. reto	TR	22,0000	200	200	200		200	200			200	0,24525	3,39794
2	curva 90°	AC	22,0000		0	0		0	200	15	0	15	0,24525	3,39794
3	tr. reto	TR	22,0000	0	0	0	100	100	300			100	0,24525	3,39794
4	expansão	AC	24,0000		0	0		0	300	5	-110	5	0,29186	2,85522
5	tr. reto	TR	24,0000		0	0	10	10	310			10	0,29186	2,85522
6	valv.esf.	AC	24,0000		0	0		0	310	3658	-20	3658	0,29186	2,85522
7	tr. reto	TR	24,0000		0	0	10	10	320			10	0,29186	2,85522
8	filtro	AC	24,0000		0	0		0	320	2293	-20	0	0,29186	2,85522
9	tr. reto	TR	24,0000		0	0	10	10	330			10	0,29186	2,85522
10	redução	AC	20,0000		0	0		0	330	9	-20	9	0,20268	4,11151
11	tr. reto	TR	20,0000		0	0	10	10	340			10	0,20268	4,11151

Figura 18 – Layout da planilha desenvolvida para o cálculo da perda de carga em líquidos

Composto		%Molar
Metano	CH <sub>4</sub>	96,2000
Nitrogênio	N <sub>2</sub>	0,5000
Dióxido de Carbono	CO <sub>2</sub>	0,4000
Etano	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	1,2000
Propano	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0,4500
Água	H <sub>2</sub> O	0,0000
Sulfato de Hidrogênio	H <sub>2</sub> S	0,0000
Hidrogênio	H <sub>2</sub>	0,0000
Monóxido de Carbono	CO	0,0000
Oxigênio	O <sub>2</sub>	0,0000
i-Butano	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,1000
n-Butano	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,1000
i-Pentano	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0,0500
n-Pentano	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0,0300
n-Hexano	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	0,0700
n-Heptano	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	0,0000
n-Octano	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	0,0000
n-Nonano	C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>	0,0000
n-Decano	C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>	0,0000
Hélio	He	0,0000
Argônio	Ar	0,0000
<b>Total</b>		<b>100,0000</b>

Pressão  Pa  
 Temperatura  K

**Dados computados para a gás (aproxim)**

Massa Molar 16,8275 kg/kmol  
 Densidade 0,5810  
 Densidade Molar 6,7735 kg/mol.m<sup>3</sup>  
 Massa Específica 113,9813 kg/m<sup>3</sup>  
 Viscosidade 0,00445 cP

**Dados computados para a gás (base)**

Massa Molar 16,8275 kg/kmol  
 Densidade 0,5810  
 Densidade Molar 0,0416 kg/mol.m<sup>3</sup>  
 Massa Específica 0,7007 kg/m<sup>3</sup>

**0,760980**

**0,9983865**

Calcula 2

OBS: Somente entre dados nas áreas brancas. As outras áreas apresentam resultados das cálculos efetuadas. Para calcular, entre a comparação, a pressão e a temperatura.

Figura 19 – Layout da planilha desenvolvida para o cálculo de propriedades do gás natural

Escoamento de Fluidos Compressíveis Utilizando a equação de Weymouth:

Tb	293	K	TCH	q <sub>i</sub>	d <sub>i</sub>	L <sub>real</sub>	Lequiv	L	L <sub>tot</sub>	Z(T1,P1)	Zm	Tf	G	P1	P2	ΔP				
Pb	14,73	psia		Mm <sup>3</sup> /d	in	m	m	m				°C	kgf/cm <sup>2</sup> -m	psia	kgf/cm <sup>2</sup> -m	psia				
m	433,5		TCH-01	trecho reto	26,00	2,07	0,43		0,43	0,97	0,97	30	0,75	6,00	100,01	5,39	93,85	0,011041	0,1	
n	1		TCH-02	curva 90°	26,00	2,07		1,40	1,40	1,83	0,97	0,97	30	0,75	5,99	93,85	5,35	93,34	0,036067	0,1
o	0,5		TCH-03	trecho reto	26,00	2,07	0,35		0,35	2,18	0,97	0,97	30	0,75	5,95	93,34	5,34	93,21	0,009046	0,1
p	0,5		TCH-04	curva 90°	26,00	2,07		1,40	1,40	3,58	0,97	0,97	30	0,75	5,94	93,21	5,31	93,63	0,036302	0,1
q	2,667		TCH-05	trecho reto	26,00	2,07	1,95		1,95	5,53	0,97	0,97	30	0,75	5,91	93,63	5,86	97,97	0,050882	0,1
r	1		TCH-06	curva 90°	26,00	2,07		1,40	1,40	6,93	0,97	0,97	30	0,75	5,86	97,97	5,82	97,45	0,036764	0,5
E1	0,504		TCH-07	trecho reto	26,00	2,07	1,77		1,77	8,70	0,97	0,97	30	0,75	5,82	97,45	5,77	96,78	0,046764	0,6
E2	1		TCH-08	válv esfera 2"	26,00	2,07		1,07	1,07	3,77	0,97	0,97	30	0,75	5,77	96,78	5,74	96,38	0,028426	0,4
E3	1		TCH-09	trecho reto	26,00	2,07	0,35		0,35	10,12	0,97	0,97	30	0,75	5,74	96,38	5,74	96,25	0,009324	0,1
Tb	527	R	TCH-10	curva 90°	26,00	2,07		1,40	1,40	11,52	0,97	0,97	30	0,75	5,74	96,25	5,70	95,71	0,037426	0,5
Pb	14,73	psia	TCH-11	trecho reto	26,00	2,07	0,35		0,35	11,87	0,97	0,97	30	0,75	5,70	95,71	5,63	95,58	0,009383	0,1
			TCH-12	curva 90°	26,00	2,07		1,40	1,40	13,27	0,97	0,97	30	0,75	5,63	95,58	5,65	95,04	0,037688	0,5
			TCH-13	trecho reto	26,00	2,07	0,35		0,35	13,62	0,97	0,97	30	0,75	5,65	95,04	5,64	94,91	0,009455	0,1
			TCH-14	curva 90°	26,00	2,07		1,40	1,40	15,02	0,97	0,97	30	0,75	5,64	94,91	5,60	94,37	0,037956	0,5
			TCH-15	trecho reto	26,00	2,07	1,05		1,05	16,07	0,97	0,97	30	0,75	5,60	94,37	5,57	93,96	0,028610	0,4
			TCH-16	pl. orifício	26,00	2,07		0,30	0,30	16,37	0,97	0,97	30	0,75	5,57	93,96	5,57	93,85	0,008197	0,1
			TCH-17	trecho reto	26,00	2,07	3,00		3,00	19,37	0,97	0,97	30	0,75	5,57	93,85	5,48	92,67	0,082538	1,1
			TCH-18	curva 90°	26,00	2,07		1,40	1,40	20,77	0,97	0,97	30	0,75	5,48	92,67	5,45	92,12	0,038878	0,5
			TCH-19	trecho reto	26,00	2,07	1,50		1,50	22,27	0,97	0,97	30	0,75	5,45	92,12	5,40	91,52	0,041915	0,5
			TCH-20	curva 90°	26,00	2,07		1,40	1,40	23,67	0,97	0,97	30	0,75	5,40	91,52	5,36	90,96	0,039363	0,5
			TCH-21	trecho reto	26,00	2,07	1,00		1,00	24,67	0,97	0,97	30	0,75	5,36	90,96	5,34	90,56	0,028263	0,4
			TCH-22	curva 90°	26,00	2,07		1,40	1,40	26,07	0,97	0,97	30	0,75	5,34	90,56	5,30	90,00	0,039783	0,5
			TCH-23	trecho reto	26,00	2,07	0,20		0,20	26,27	0,97	0,97	30	0,75	5,30	90,00	5,29	89,32	0,005075	0,1
			TCH-24	curva 90°	26,00	2,07		1,40	1,40	27,67	0,97	0,97	30	0,75	5,29	89,32	5,25	88,35	0,040077	0,5
			TCH-25	trecho reto	26,00	2,07	1,50		1,50	29,17	0,97	0,97	30	0,75	5,25	88,35	5,21	88,73	0,043226	0,6
			TCH-26	curva 90°	26,00	2,07		1,40	1,40	30,57	0,97	0,97	30	0,75	5,21	88,73	5,17	88,15	0,040616	0,5
			TCH-27	trecho reto	26,00	2,07	2,00		2,00	32,57	0,97	0,97	30	0,75	5,17	88,15	5,11	87,32	0,058483	0,8
			TCH-28	curva 90°	26,00	2,07		1,40	1,40	33,97	0,97	0,97	30	0,75	5,11	87,32	5,07	86,74	0,041276	0,5
			TCH-29	trecho reto	26,00	2,07	1,00		1,00	34,97	0,97	0,97	30	0,75	5,07	86,74	5,04	86,31	0,029855	0,4
			TCH-30	curva 90°	26,00	2,07		1,40	1,40	36,37	0,97	0,97	30	0,75	5,04	86,31	5,00	85,72	0,041761	0,5

Vazão compr.	15	
Vazão kical	11	
E1	TCH-01	TCH-56
E2	TCH-57	TCH-66
E3	TCH-67	TCH-68

Figura 20 – Layout da planilha desenvolvida para o cálculo da perda de carga em gases

**Planilha para cálculo do Cv da válvula**

	EV-Y (70)	EV-Y(35)	EV-VII(70)	EV-VII(35)					
Para molecular	21,324	22,139	21,324	22,139					
Perfítica	kgf/cm <sup>2</sup>	43,5263	43,5263	43,53	43,5263				
Terfítica	°C	-33,0563	-33,5364	-33,0563	-33,5364				
Densidade	kg/m <sup>3</sup>	79,776	34,806	79,776	34,806				
Pressão à montante	kgf/cm <sup>2</sup>	70	35	70	35				
Pressão à jusante	kgf/cm <sup>2</sup>	19	19	19	19				
Temperatura	°C	30	30	30	30				
Temperatura	K	303	303	303	303				
Vazão máxima	m <sup>3</sup> /d	69000	69000	112000	112000	3708,333333	3708,3333	4666,6667	4666,6667
Vazão Normal	m <sup>3</sup> /d	81000	81000	98000	98000	3375	3375	4083,3333	4083,3333
Vazão Mínima	m <sup>3</sup> /d	14000	14000	14000	14000	583,333333	583,333333	583,333333	583,333333
Z		0,7484	0,8659	0,7484	0,8659				
K		1,1922	1,1922	1,1922	1,1922				
Dens. relativa		0,7539	0,7674	0,7539	0,7674				
Gravidade Específica	N	79,260256	34,144636	79,260256	34,144636				

**Escoamento Subcrítico**

$$\Delta P < 0,5 \times C_v^2 \times P$$

$$C_v = \frac{Q}{29,5} \times \sqrt{\frac{G \times T}{\Delta P \times (R_1 + R_2)}}$$

**Escoamento Crítico**

$$\Delta P \geq 0,5 \times C_v^2 \times P$$

$$C_v = \frac{Q \times \sqrt{G \times T}}{257 \times C_v \times R_1}$$

14,175 }  
28,35 } Escoamento crítico

Efetuar o cálculo da válvula para a máxima vazão considerando-se o mínimo ΔP

	EV-Y (70)	EV-Y(35)	EV-VII(70)	EV-VII(35)
ΔP =	52	17	52	17
Cv <sub>max</sub> =	3,4754	6,985014	4,373535	8,79013
Cv <sub>normal</sub> =	3,163	6,357148	3,826843	7,691364
Cv <sub>min</sub> =	0,8585	1,098766	0,546692	1,098766

Figura 21 – Layout da planilha desenvolvida para o cálculo do Cv da válvula

- Folha de dados das válvulas redutoras de pressão

		FOLHA DE DADOS		Nº	FD.	REV.	0		
		ESTÇÃO REDUTORA DE PRESSÃO				FOLHA:	3	de	5
		DADOS DE PROCESSO PARA INSTRUMENTOS							VÁLVULA DE CONTROLE
01	IDENTIFICAÇÃO		PV-EY-652141A	PR-RR-011-0122-010					
02	SERVIÇO		REDUÇÃO	REDUÇÃO					
03	LINHAN.		4"-G15-ES21-102-DL	4"FG-B10-004					
04	FUNÇÃO		REDUTORA	REDUTORA					
05	GERAL	FLUIDO / SERVIÇO		GÁS NATURAL	GÁS NATURAL				
06		ESTADO FÍSICO		GÁSOSO	GÁSOSO				
07		ESTADO FÍSICO		GÁSOSO	GÁSOSO				
09	VAZÃO	OPERAÇÃO (m <sup>3</sup> /h)		3375	4083				
10		MÁXIMA (m <sup>3</sup> /h)		3708	4667				
11		MÍNIMA (m <sup>3</sup> /h)		583	583				
09	CARACT.	CLASSE DE PRESSÃO		600	600				
10		SCHEDULE		80	80				
11		ATUADOR PILOTO		SIM	SIM				
12		SCHEDULE		80	80				
13	DN		2 IN	2 IN					
14	PRESSÃO MAN.	A MONT.	A VAZÃO OPERAÇÃO (kgf/cm <sup>2</sup> )		35	35			
15			A VAZÃO MÁXIMA (kgf/cm <sup>2</sup> )		70	70			
16			A VAZÃO MÍNIMA (kgf/cm <sup>2</sup> )		35	35			
17		A JUS.	A VAZÃO OPERAÇÃO (kgf/cm <sup>2</sup> )		18	18			
18			A VAZÃO MÁXIMA (kgf/cm <sup>2</sup> )		18	18			
19			A VAZÃO MÍNIMA (kgf/cm <sup>2</sup> )		18	18			
20	PROJETO (kgf/cm <sup>2</sup> )		35	35					
21	± P MÁXIMA (kgf/cm <sup>2</sup> )		52	52					
22	P DO SISTEMA (1)	DINÂMICO A MONTANTE (kgf/cm <sup>2</sup> )		---	---				
23		ESTÁTICO A MONTANTE (kgf/cm <sup>2</sup> )		---	---				
24		DINÂMICO A JUSANTE (kgf/cm <sup>2</sup> )		---	---				
25		ESTÁTICO A JUSANTE (kgf/cm <sup>2</sup> )		---	---				
26	TEMP.	OPERAÇÃO (°C)		20-40	20-40				
27		PROJETO (°C)		ND	ND				
28	GÁS/VAPOR (COND.OP.)	PESO MOLECULAR		22,139	22,139				
29		c <sub>p</sub> /c <sub>v</sub>		1,1928	1,1928				
30		FATOR DE COMPRES. A MONTANTE		0,866	0,866				
31		VOL. ESPECIF. ENTRADA (m <sup>3</sup> /kg)		---	---				
32		VOL. ESPECIF. SAÍDA (m <sup>3</sup> /kg)		---	---				
33		GRAU DE SUPERAQUECIMENTO (°C)		---	---				
34	AÇÃO EM CASO DE FALHA		fecha	fecha					
35	MENOR CLASSE DE VAZAMENTO REQUERIDA (2)		---	---					

- A seguir encontram-se as curvas características das válvulas que foram avaliadas:

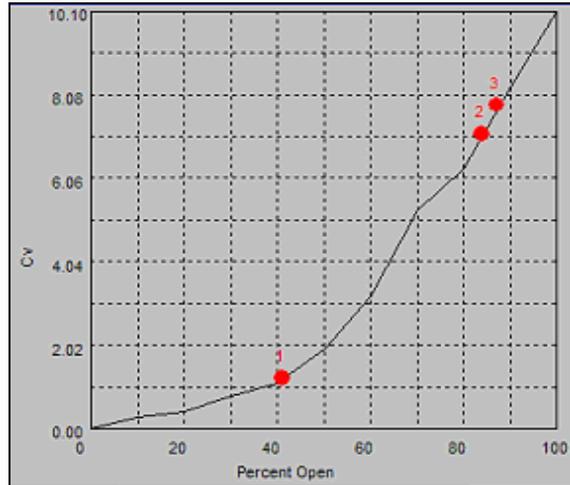


Figura 22. Curva característica da válvula existente na EV-A para uma pressão à montante de 35 kgf/cm<sup>2</sup>.

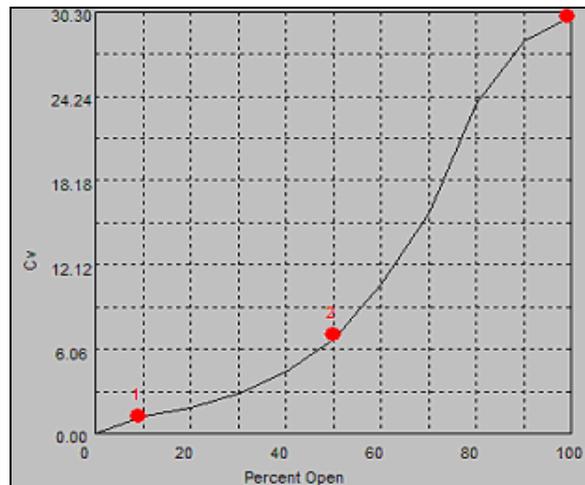


Figura 23. Curva característica da válvula existente na EV-A para uma pressão à montante de 35 kgf/cm<sup>2</sup>, operando em condições limites de vazão

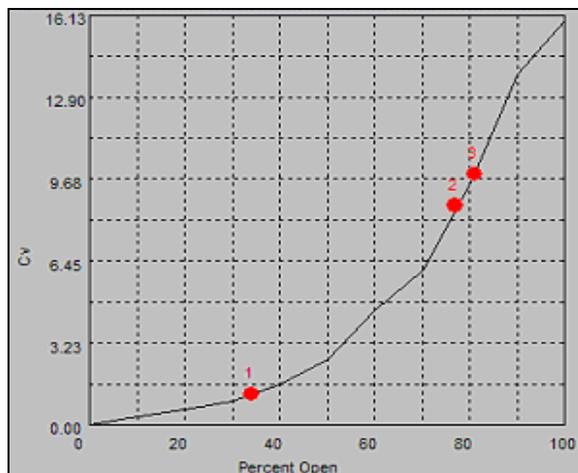


Figura 24. Curva característica da válvula existente na EV-B para uma pressão à montante de 35 kgf/cm<sup>2</sup>.

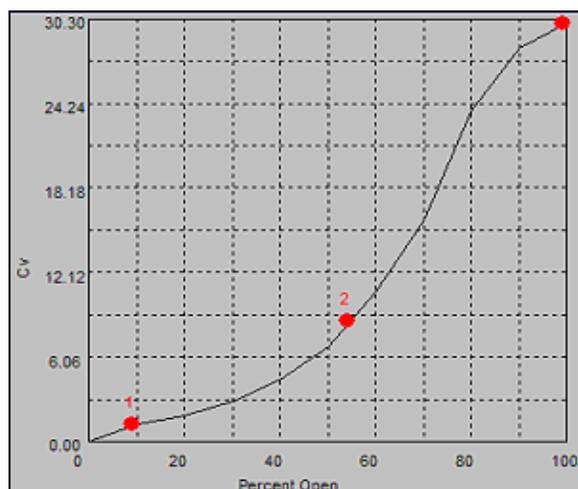


Figura 25. Curva característica da válvula existente na EV-VII-ET para uma pressão à montante de 35 kgf/cm<sup>2</sup>, operando em condições limites de vazão.