

## *Monografia de Graduação*

# **ESTUDO DO TENSOATIVO C<sub>16</sub>TAB E A VIABILIDADE DE SUA APLICAÇÃO NA RECUPERAÇÃO AVANÇADA DE PETRÓLEO**

**Priscilla Cibelle Oliveira de Souza Firmino**

**Natal, Fevereiro de 2014**

*Priscilla Cibelle Oliveira de Souza Firmino*

***ESTUDO DO TENSOATIVO C<sub>16</sub>TAB E A VIABILIDADE DE  
SUA APLICAÇÃO NA RECUPERAÇÃO AVANÇADA DE  
PETRÓLEO.***

Monografia apresentada ao Programa de Recursos Humanos  
PRH 14 – ANP, Departamento de Engenharia Química da  
Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Área de  
Concentração em Química.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dra. Tereza Neuma de Castro Dantas

Coorientadora: Ms. Ana Paula Justino Soares

**Natal – RN**

**2014**

*"Estou plenamente certo de que aquele que começou boa obra em vós há de completá-la  
até ao Dia de Cristo Jesus."*

*Filipenses 1:6*

## DEDICATÓRIA

*Esta monografia é dedicada:*

*A Deus, pois Ele me amou primeiro. Com sua infinita graça e misericórdia me sustenta e me dá forças para que mesmo na mais adversa situação não desista dos meus sonhos. Sonhos que ele colocou em meu coração. Obrigada, Pai.*

*A minha mãe Edvania de Oliveira, por ser minha eterna incentivadora, rocha forte, sempre disposta a com uma palavra de carinho me dar apoio e segurança em todas as longas caminhadas da vida. Te amo, mãe.*

*Ao meu pai Jocieudes, pelas palavras de sabedoria, sempre me mostrando que os obstáculos poderiam ser superados. Te amo, pai.*

*Ao meu amado esposo Daniel, pelo carinho, compreensão e paciência com que em todos esses anos esteve ao meu lado. Te amo infinitamente, parte de mim, amado meu.*

## AGRADECIMENTOS

*A Deus, pelo fôlego de vida, por suas misericórdias e por ter me proporcionado a oportunidade de realizar esta pesquisa e concluí-la.*

*A minha família, em especial aos meus pais, Edvânia e Jocieudes, e ao meu amado esposo, Daniel, pela confiança que em mim depositaram e hoje veem meu sonho se tornando realidade.*

*À Professora Doutora Tereza Neuma de Castro Dantas, pela orientação e dedicação com que me guiou no desenvolvimento desse trabalho, e pela oportunidade de crescimento profissional e pessoal.*

*À Doutoranda Ana Paula Justino Soares pela orientação e apoio no desenvolvimento deste trabalho, bem como pela confiança em mim depositada que fizeram da nossa convivência não apenas um canal para compartilhar seus conhecimentos mas uma sincera amizade.*

*Aos colegas e amigos do Laboratório de Tecnologia de Tensoativos Wilka, Miro, Yuri, Tamirys, Suzana e Kaline pelo apoio e troca de conhecimentos.*

*Aos meus amigos de graduação: Diane, Karine, Ygor, Mayara, Stephanie, Thayna, Alex e Rony, por me acompanharem em cada momento de dificuldade e também nos momentos de alegria e descontração. Foi muito bom estar com vocês.*

*À Agência Nacional de Petróleo – ANP, em especial ao PRH-14, pelo auxílio financeiro e incentivar os estudos na área de petróleo e gás.*

## SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO.....	12
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
2.1. Tensoativo.....	14
2.1.1. Definição.....	14
2.1.2. Classificação.....	14
2.1.3. Propriedades.....	15
2.2. Métodos de recuperação.....	19
2.2.1. Métodos convencionais de recuperação.....	19
2.2.2. Métodos especiais de recuperação.....	19
2.2.3. Métodos miscíveis.....	20
2.2.4. Métodos químicos.....	20
2.3. Rochas carbonáticas.....	21
2.3.5. Propriedades das rochas reservatório.....	21
2.4. Adsorção de tensoativo na interface.....	23
3 – METODOLOGIA.....	26
3.1. Reagentes.....	26
3.2. Equipamentos utilizados e vidrarias.....	26
3.3. Análise de tensão superficial.....	26
3.4. Determinação da concentração micelar crítica (c.m.c.).....	27
3.5. Determinação da temperatura de Krafft.....	27
3.6. Determinação da massa específica.....	28
3.7. Determinação do ângulo de contato.....	28
3.8. Ensaio de adsorção.....	29
3.8.1. Curva de calibração.....	29
3.8.2. Valores de adsorção.....	30
4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	33
4.1 Determinação da Concentração Micelar Crítica.....	33
4.2 Determinação da temperatura de Krafft.....	37
4.3 Determinação da densidade.....	38
4.4. Determinação do ângulo de contato.....	39
4.4.1. Na c.m.c.....	39
4.4.2. Tensoativo a 2%.....	41
4.5. Ensaio de adsorção.....	42
5 – CONCLUSÕES.....	50
7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	53

**Lista de Figuras**

Figura 1: Representação esquemática de uma molécula de tensoativo. ....	14
Figura 2: Ilustração das moléculas em uma micela esférica de tensoativo em meio aquoso. ....	15
Figura 3: Ilustração da ocorrência do ponto de Krafft. ....	17
Figura 4: Ângulo de contato entre uma gota de líquido e um sólido. ....	23
Figura 5: Representação esquemática do tensiômetro. A: Tubo capilar de 4mm. B: Termopar. C: Tubo capilar 1mm. ....	27
Figura 6: Aparato composto por aquecedor/agitador, becker com a solução e termômetro. ....	28
Figura 7: Equipamento utilizado na análise de densidade: densímetro Anton Paar, modelo DMA 4500 M. ....	28
Figura 8: Equipamento utilizado para fazer as medidas de ângulo de contato: tensiômetro Kruss modelo DSA100. ....	29
Figura 9: Esquema de aparato utilizado nas medidas de absorvância para ensaios de calibração. ....	30
Figura 10: Micelização do C <sub>16</sub> TAB em água a 23°C. ....	33
Figura 11: Micelização do C <sub>16</sub> TAB em KCl 2% à 23°C. ....	34
Figura 12: Micelização do C <sub>16</sub> TAB em NaCl 0,1M à 23°C. ....	34
Figura 13 : Micelização do C <sub>16</sub> TAB em NaCl 0,5M à 23°C. ....	34
Figura 14: Micelização do C <sub>16</sub> TAB em NaCl 1,0M à 23°C. ....	35
Figura 15: Micelização do C <sub>16</sub> TAB em NaCl 1,5M à 23°C. ....	35
Figura 16: Micelização do C <sub>16</sub> TAB em NaCl 2,0 M à 23°C. ....	35
Figura 17: Micelização do C <sub>16</sub> TAB a 23°C. ....	36
Figura 18: Dados e gráficos da variação da concentração do C <sub>16</sub> TAB com a temperatura para determinação do ponto de Krafft. ....	37
Figura 19: Curva de calibração do C <sub>16</sub> TAB em ADT. ....	42
Figura 20: Curva de calibração do C <sub>16</sub> TAB em KCl 2%. ....	43
Figura 21: Curva de calibração do C <sub>16</sub> TAB em NaCl 0,1 M. ....	43
Figura 22: Curva de calibração do C <sub>16</sub> TAB em NaCl 0,5 M. ....	44
Figura 23: Curva de calibração do C <sub>16</sub> TAB em NaCl 1,0 M. ....	44
Figura 24: Curva de calibração do C <sub>16</sub> TAB em NaCl 1,5 M. ....	44

Figura 25: Curva de calibração do C <sub>16</sub> TAB em NaCl 2,0 M. ....	45
Figura 26: Cinética da adsorção do C <sub>16</sub> TAB em ADT 2%, na rocha calcário em função do tempo de contato. ....	45
Figura 27: Cinética da adsorção do C <sub>16</sub> TAB em KCl 2%, na rocha calcário em função do tempo de contato. ....	46
Figura 28: Cinética da adsorção do C <sub>16</sub> TAB em NaCl 0,1 M, na rocha calcário em função do tempo de contato. ....	46
Figura 29: Cinética da adsorção do C <sub>16</sub> TAB em NaCl 0,5 M, na rocha calcário em função do tempo de contato. ....	46
Figura 30: Cinética da adsorção do C <sub>16</sub> TAB em NaCl 1,0 M, na rocha calcário em função do tempo de contato. ....	47
Figura 31: Cinética da adsorção do C <sub>16</sub> TAB em NaCl 1,5 M, na rocha calcário em função do tempo de contato. ....	47
Figura 32: Cinética da adsorção do C <sub>16</sub> TAB em NaCl 2,0 M, na rocha calcário em função do tempo de contato. ....	47
Figura 33: Cinética da adsorção comparativa entre todas as soluções do C <sub>16</sub> TAB, na rocha calcário em função do tempo de contato. ....	48

### Lista de Tabelas

Tabela 1: Soluções para medidas de adsorção. ....	31
Tabela 2: Valores da c.m.c. para diferentes soluções. ....	36
Tabela 3: Valores de densidade em (g/m <sup>3</sup> ) para o tensoativo em água e soluções salinas na c.m.c., 25% e 50% acima desta. ....	39
Tabela 4: Valores de ângulo obtidos para o tensoativo C <sub>16</sub> TAB em soluções na c.m.c. 40	
Tabela 5: Valores de ângulo obtidos para o tensoativo C <sub>16</sub> TAB a 2 %. ....	41

**FIRMINO, Priscilla Cibelle Oliveira de Souza** – Estudo do tensoativo C<sub>16</sub>TAB e a viabilidade de sua aplicação na recuperação avançada de petróleo. Monografia, UFRN, Programa de Recursos Humanos PRH 14 – ANP, Departamento de Engenharia Química, Área de Concentração em Química. Linha de Pesquisa: Tecnologia de Tensoativos e Processos de Separação, Natal – RN, Brasil.

**Orientadora:** Prof<sup>a</sup>. Dra. Tereza Neuma de Castro Dantas

**Coorientadora:** Ms. Ana Paula Justino Soares

---

**RESUMO:** No processo de produção de petróleo, grande quantidade fica retida no reservatório devido à diminuição da energia natural do reservatório. Os métodos de recuperação foram desenvolvidos com o objetivo de se obter uma produção mais eficiente. Dentre estes métodos, apresenta-se o método químico (utilização de tensoativos), no qual ocorre uma interação química entre o fluido injetado e os fluidos do reservatório. Com isso, a utilização de sistemas micelares proporciona uma maior recuperação de petróleo dos reservatórios. Como o método avançado, é bastante relevante uma vez que com a utilização desses sistemas a eficiência bruta de petróleo retirada aumenta quando comparada a extrações convencionais, este estudo objetiva avaliar as propriedades do tensoativo C<sub>16</sub>TAB (Brometo de Cetil Trimetil Amônio – 16) na recuperação avançada de petróleo valendo-se de recursos bibliográficos já publicados na área com uso de outros aditivos para fins de comparação e validação do método e substância utilizados. O conhecimento das propriedades do tensoativo (C<sub>16</sub>TAB) são fundamentais pois permite definir sua aplicabilidade na recuperação avançada de petróleo. Para tanto, foram avaliadas propriedades como a concentração micelar crítica (c.m.c.), estudo da densidade, ponto de Krafft, molhabilidade e adsorção. Em todos os estudos o tensoativo foi avaliado a diferentes concentrações do tensoativo em soluções salinas de KCl 2%, NaCl (0,1; 0,5; 1,0; 1,5 e 2,0 M) e em ADT (água destilada). Por se tratar de um tensoativo pouco estudado, as perspectivas para a aplicação deste na recuperação avançada são boas. Espera-se obter um índice de recuperação satisfatório e maior ao já obtido na recuperação convencional, contribuindo assim para o desenvolvimento tecnológico e econômico da área.

---

**Palavras - Chaves:** - C<sub>16</sub>TAB, molhabilidade, tensoativo, recuperação avançada.

## ABSTRACT

In the oil production process, large amount is retained in the reservoir due to decreased natural energy of the reservoir. The retrieval methods have been developed with the objective of obtaining a more efficient production. Among these methods, shows the chemical method (use of surfactants), in which a chemical interaction between the injected fluid and the reservoir fluids occurs. Thus, the use of micellar systems provides an enhanced oil recovery in reservoirs. As the advanced method, is quite relevant since the use of these systems gross oil removal efficiency increases compared to conventional extractions , this study aims to evaluate the properties of the surfactant C<sub>16</sub>TAB (Cetyl Trimethyl Ammonium Bromide - 16) in advanced recovery oil making use of library resources already published in the area with the use of other additives for comparison and validation of the method and substance use. The knowledge of the properties of the surfactant (C<sub>16</sub>TAB) are fundamental because it allows to define its applicability in enhanced oil recovery. To this end, properties such as critical micelle concentration (c.m.c. ) , density study , Krafft point , wettability , and adsorption were evaluated. In all studies, the surfactant was evaluated at different concentrations in saline solutions of surfactant 2% KCl , NaCl (0.1, 0.5 , 1.0, 1.5 and 2.0 M) and ADT (distilled water) . Because it is a surfactant understudied , prospects for the application of the advanced recovery are good . Expected to obtain a satisfactory rate and higher recovery already obtained in the conventional recovery, thus contributing to the technological and economic development of the area

---

**Key-words:** C<sub>16</sub>TAB, wettability, surfactant and enhanced recovery.

---

---

***CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO***

---

---

## 1 - INTRODUÇÃO

Do latim *petra* (pedra) e *oleum* (óleo), o petróleo origina-se da matéria orgânica depositada juntamente com sedimentos. Em estado líquido, apresenta-se como uma substância oleosa, inflamável e menos densa do que a água. Constituído por hidrocarbonetos, o petróleo existe sobre as formas de parafina, asfalto, diesel, nafta e éter de petróleo, dependendo basicamente das condições de temperatura e pressão a que está submetido.

No processo de extração, grande quantidade de petróleo fica retida no reservatório devido à diminuição da energia natural do reservatório. Os métodos de recuperação foram desenvolvidos com o objetivo de se obter uma produção mais eficiente do que aquela obtida caso apenas a energia natural do reservatório fosse utilizada.

Dentre estes métodos de recuperação, apresenta-se o método químico, objeto desse estudo (injeção de soluções micelares), no qual ocorre uma interação química entre o fluido injetado e os fluidos do reservatório.

Os tensoativos, substâncias também utilizadas na recuperação de petróleo, são caracterizados pela sua estrutura e propriedades devido à capacidade que apresentam de reduzir as tensões interfacial e superficial dos líquidos (petróleo e salmoura) em que se encontram e ampliar a eficiência de deslocamento. A principal característica das moléculas tensoativas é a capacidade de emulsionar dois líquidos imiscíveis, e os tensoativos que desenvolvem esta característica são denominados de agentes emulsificantes uma vez que agem facilitando a emulsificação e estabilizando a emulsão resultante.

De acordo com as características apresentadas, a utilização de tensoativos para obtenção de um maior rendimento na recuperação de petróleo em reservatórios, como método avançado, é bastante relevante uma vez que com a utilização destas substâncias a eficiência bruta de petróleo retirada aumenta quando comparada a extrações convencionais.

Sendo assim, este estudo objetiva avaliar as propriedades do tensoativo C<sub>16</sub>TAB (Brometo de Cetil Trimetil Amônio – 16) na recuperação avançada de petróleo valendo-se de recursos bibliográficos já publicados na área com uso de outros aditivos para fins de comparação e validação do método e substância utilizados.

---

---

***CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA***

---

---

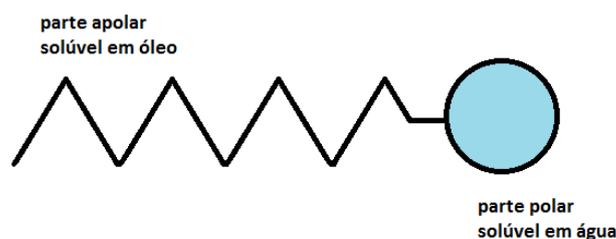
## 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Tensoativo

#### 2.1.1. Definição

Tensoativo é um tipo de molécula que apresenta uma parte com característica apolar ligada a uma outra parte com característica polar. Dessa forma, esse tipo de molécula é polar e apolar ao mesmo tempo (Daltin, 2011). A parte polar, hidrofílica ou ainda hidrofóbica, é responsável pela adição do tensoativo nas interfaces líquido-líquido, líquido-gás ou sólido-líquido de um dado sistema.

**Figura 1:** Representação esquemática de uma molécula de tensoativo.



A parte apolar de um tensoativo normalmente é uma cadeia carbônica (linear, ramificada ou com partes cíclicas), pois os carbonos dessa cadeia apesar de serem mais eletronegativos que os átomos de hidrogênio, não formam pólos de concentração de carga eletrostática. A parte polar deve ser formada por alguns átomos que apresentam concentração de carga, com formação de um pólo negativo ou positivo (Daltin, 2011).

#### 2.1.2. Classificação

A natureza da parte polar dos tensoativos é a principal característica a ser levada em consideração na escolha de um tensoativo para uma determinada aplicação. Os principais tipos de tensoativos, bem como suas características encontram-se detalhadas a seguir.

- **Tensoativos aniônicos:** Constituem a maior classe de tensoativos e a mais utilizada pela indústria em geral, pois nesta classe estão inseridos os

tensoativos principais dos sabões, sabonetes, xampus e detergentes. Quando em água, se dissociam liberando carga negativa. São fortemente influenciados pela presença de eletrólitos em solução.

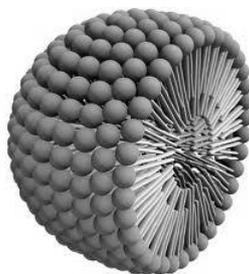
- **Tensoativos catiônicos:** Constituem uma classe representada por poucos tensoativos. Normalmente os tensoativos catiônicos não são compatíveis com tensoativos aniônicos. Quando em água, se dissociam liberando carga positiva.
- **Tensoativos não iônicos:** Constituem a segunda classe de tensoativos mais comercializada. Geralmente são compatíveis com todas as outras classes de tensoativos. Diferente dos tensoativos iônicos (catiônicos e aniônicos), as propriedades físico-químicas dos tensoativos não iônicos não são severamente influenciadas pela presença de eletrólitos.
- **Tensoativo anfóteros:** Apresentam duas cargas – negativa e positiva – por isso, apresentam propriedades de organização com as moléculas de tensoativos aniônicos e catiônicos que modificam suas propriedades. É a classe de tensoativos menos utilizada por causa do alto custo. São compatíveis com as demais classes de tensoativos.

### 2.1.3. Propriedades

#### 2.1.3.1. Micela

Trata-se de uma estrutura globular que possui características polares e apolares simultaneamente.

**Figura 2:** Ilustração das moléculas em uma micela esférica de tensoativo em meio aquoso.



### 2.1.3.2. Concentração micelar crítica

Para cada tipo de tensoativo existe uma concentração na qual todas as superfícies já estão ocupadas e a quantidade de tensoativo excedente atinge uma concentração mínima necessária para que as micelas comecem a se formar. Esta concentração é uma propriedade físico-química e é chamada de concentração micelar crítica (c.m.c.).

A concentração micelar crítica pode ser considerada a mais baixa concentração em que o tensoativo livre está em equilíbrio com as micelas. A c.m.c. pode ser influenciada por três fatores:

- Estrutura do tensoativo: a c.m.c. diminui com o aumento da cadeia carbônica dos tensoativos (comparação interna).
- Temperatura: tensoativos iônicos têm sua solubilidade aumentada com o aumento da temperatura, conseqüentemente sua c.m.c. também é aumentada. Os tensoativos não iônicos, por sua vez, têm sua solubilidade diminuída com o aumento da temperatura e conseqüente diminuição da c.m.c..
- Adição de outros componentes à solução: a adição de um sal implica em redução da c.m.c.. Para tensoativos não iônicos a variação do teor de sal na solução interfere pouco na c.m.c., ainda que o teor de sal interfira na solubilidade do tensoativo.

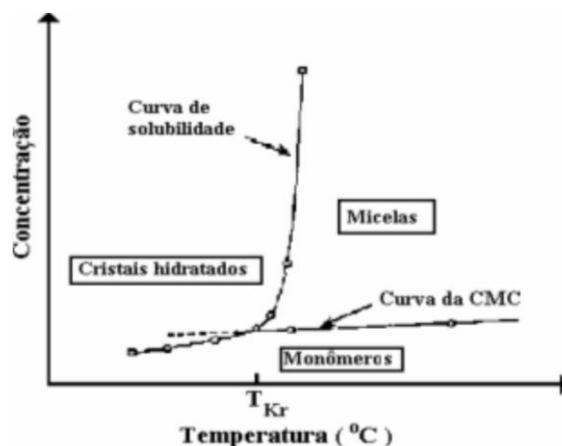
### 2.1.3.3. Ponto de Krafft

Conforme apresentado na seção anterior, a solubilidade aumenta com o aumento da temperatura para os tensoativos iônicos, enquanto o inverso ocorre para os tensoativos não iônicos. Para os tensoativos iônicos que têm sua solubilidade aumentada juntamente com a temperatura, esta solubilização atinge um ponto em que sua solubilidade passa a crescer de maneira bem mais intensa. A este ponto, denomina-se ponto de Krafft (ou temperatura Krafft).

O ponto de Kraft é a temperatura na qual o tensoativo passa a ser solúvel o suficiente para que suas moléculas livres estejam em concentração adequada para formação de agregados micelares (Daltin, 2011).

O ponto em que a curva de solubilidade se intersepta com a curva da c.m.c. corresponde ao ponto de Krafft (Vale, 2009).

**Figura 3:** Ilustração da ocorrência do ponto de Krafft (Vale, 2009).



Os tensoativos não iônicos não apresentam ponto de Krafft, pois sua solubilidade decresce com o aumento de temperatura e de forma muito mais branda que o crescimento para os iônicos.

#### 2.1.3.4. Balanço hidrófilo-lipófilo

Uma das principais propriedades decorrente da natureza anfifílica<sup>1</sup> das moléculas tensoativas é a capacidade de emulsionar uma mistura de dois líquidos imiscíveis. Os tensoativos que apresentam esta característica são, particularmente, chamados de agentes emulsificantes e atuam facilitando a emulsificação (Curbelo, 2006).

A estabilidade das emulsões depende intrinsecamente da interação interfásica estabelecida pelo agente emulsivo, composto anfifílico, entre as fases imiscíveis que as constituem. A escolha, proporção e a característica do tensoativo a ser utilizado na preparação da emulsão almejada, são previstas por meio da verificação dos valores de balanço hidrófilo-lipófilo (BHL) das substâncias envolvidas, o que permite prever o tipo de comportamento esperado do composto frente a substâncias polares ou apolares. Os tensoativos devem apresentar valor de BHL equivalente ao da fase dispersa, para

<sup>1</sup> Anfifílica: moléculas que possuem em sua estrutura duas solubilidades diferentes associadas (Mittal, 1979).

poder mantê-la estabilizada frente à fase dispersante. Para determinar o valor de EHL pode-se recorrer a dados em literatura ou equações baseadas na fórmula molecular do composto (Zanin, 2002).

### **2.1.3.5. Tensão Interfacial e Superficial**

A região de transição entre duas fases não miscíveis é identificada como interface, superfície ou interfase. A tensão superficial é resultado da assimetria das forças de coesão entre as moléculas da superfície e do interior do líquido. É a tensão superficial a responsável pela formação de gotas de geometria próxima a esférica e está relacionada as forças de Van der Waals, forças de dipolo forte e pontes de hidrogênio (caso existam) atuando na atração das moléculas (Daltin, 2011).

Esta assimetria presente nas moléculas de superfície, no estado líquido, por exemplo, é a origem da energia superficial manifestada como uma tensão superficial. A tensão superficial é alta em líquidos muito polares (água e glicerina, por exemplo), líquidos iônicos e sais fundidos. As substâncias apolares, por sua vez, apresentam menores valores de tensão superficial, uma vez que a atração entre estas moléculas é muito fraca. A tensão superficial pode ser influenciada, principalmente pelos seguintes parâmetros:

- Compostos orgânicos solúveis em água ocasionam a diminuição da tensão superficial com o aumento de suas concentrações.
- Os tensoativos promovem grande redução da tensão superficial mesmo que em baixas concentrações.
- Eletrólitos geralmente ocasionam um aumento dos valores de tensão superficial de suas soluções.

A tensão interfacial é uma tensão superficial entre dois condensados imiscíveis, como dois líquidos. Esta imiscibilidade decorre de grandes diferenças entre os valores de forças de coesão entre as moléculas desses líquidos. A tensão interfacial entre dois líquidos imiscíveis está, geralmente, entre os valores de tensão superficial desses líquidos (Daltin, 2011).

## 2.2. Métodos de recuperação de petróleo

Os métodos de recuperação foram desenvolvidos com o objetivo de se obter uma produção mais eficiente do que aquela obtida caso apenas a energia natural do reservatório fosse utilizada.

A recuperação primária é a produção resultante da atuação da energia natural do reservatório. A um segundo esforço de produção deu-se o nome de recuperação secundária; a um terceiro, de recuperação terciária. Com o passar do tempo, as expressões secundária e terciária perderam a sua conotação cronológica e passaram a designar a natureza do processo. Assim, recuperação secundária passou a significar injeção de água ou injeção de gás, e recuperação terciária passou a designar os demais processos (Vale, 2009). Entretanto atualmente o termo usual para representar os esforços de produção além da obtida pela surgência do poço denomina-se apenas recuperação avançada de petróleo.

Os métodos de recuperação podem ser classificados em dois grandes grupos: os métodos convencionais e os métodos especiais. A seguir, serão descritos os principais métodos de recuperação de petróleo.

### 2.2.1. Métodos convencionais de recuperação

Costuma-se classificar como recuperação convencional, a recuperação devido à energia primária do reservatório ou injeção de fluidos (água e o gás natural). Normalmente, a água antes de ser injetada, deve ser submetida a um tratamento, de modo a torná-la mais adequada ao reservatório e aos fluidos nele existentes (Thomas *et al.*, 2001).

### 2.2.2. Métodos especiais de recuperação

Pode-se dizer que um método especial de recuperação é empregado para atuar nos pontos onde o processo convencional falhou, ou falharia caso fosse empregado.

Os métodos especiais de recuperação são distribuídos em três categorias: métodos térmicos, métodos miscíveis e métodos químicos, de acordo com a natureza geral dos processos e o ponto principal a ser atingido (Rosa *et al.*, 2006).

### 2.2.2.1. Métodos Térmicos

Em reservatórios cujos óleos são muito viscosos, a recuperação por processos convencionais normalmente não resulta em sucesso. A alta viscosidade do óleo dificulta o seu movimento dentro do meio poroso, enquanto que o fluido injetado, água ou gás, tem uma mobilidade muito maior, resultando em baixas eficiências de varrido e, conseqüentemente, em uma recuperação geralmente baixa.

Fora constatado que o aumento da temperatura resulta em diminuição da viscosidade, ou seja, aumento da eficiência de varrido. Dentre os métodos térmicos há a injeção de vapor cíclico ou contínuo e a combustão *in situ*.

- **Injeção de vapor cíclico ou contínuo:** método indicado para óleos viscosos ou reservatórios rasos. O calor é gerado na superfície e em seguida transportado para o interior da formação, utilizando-se de um fluido.
- **Combustão *in situ*:** método indicado para óleos viscosos que apresenta como obstáculo o controle da combustão como medida de segurança. O calor é gerado no interior do próprio reservatório a partir da combustão de parte do óleo ali existente.

### 2.2.3. Métodos miscíveis

Trata-se de processos em que se procura reduzir substancialmente, e se possível, eliminar as tensões interfaciais. Os métodos miscíveis referem-se a injeção de fluidos que venham a se tornar ou que sejam miscíveis com o óleo do reservatório, de tal modo que não existam tensões interfaciais (Vale, 2009). É um método indicado para reservatórios de óleo leve.

### 2.2.4. Métodos químicos

Estão agrupados como métodos químicos alguns processos em que se pressupõe uma certa interação química entre o fluido injetado e o fluido do reservatório. São eles: a injeção de solução de polímeros, injeção de solução de tensoativos, injeção de microemulsão, injeção de solução alcalina etc.

#### 2.2.4.1. Injeção de polímeros

Quando o óleo do reservatório tem viscosidade um pouco elevada, pode-se adicionar polímeros à água de injeção para transformá-la em um fluido que se desloca dentro do meio poroso com a mesma mobilidade que o óleo.

#### 2.2.4.2. Injeção de tensoativos

O tensoativo tem a finalidade de reduzir as tensões interfaciais entre a água e o óleo, ampliando a eficiência de deslocamento.

#### 2.2.4.3. Injeção de microemulsão

A injeção de microemulsão é uma tentativa de se obter um deslocamento miscível com boas eficiências de varrido.

### 2.3. Rochas carbonáticas

As rochas carbonatadas são os calcários, as dolomitas e aquelas intermediárias entre os dois tipos. Os reservatórios de rochas carbonatadas diferem em diversos aspectos dos arenitos. A porosidade é localizada dentro de uma camada, tanto lateral como verticalmente. As rochas carbonática (calcário e dolomita) são as responsáveis por aproximadamente 50% da produção de petróleo e gás no mundo (Soares, 2012).

#### 2.3.5. Propriedades das rochas reservatório

##### 2.3.1.1. Porosidade

A porosidade representa a capacidade de armazenamento de fluidos de uma rocha e depende do tamanho, forma, arranjo e homogeneidade dos grãos. A porosidade absoluta ou simplesmente porosidade ( $\phi$ ) é definida como sendo a relação entre o volume de vazios presentes na rocha ( $V_v$ ) e o volume total desta ( $V_{tr}$ ):

$$\phi = \frac{V_v}{V_{tr}} \quad (1)$$

Os valores de porosidade mais comuns das rochas-reservatório variam de 5 a 35% concentrando-se na faixa de 15 a 30%.

### 2.3.1.2. Saturação de fluidos

A saturação de um fluido ( $S_F$ ) em um sistema poroso é definida como a fração ou porcentagem de volume de poros ( $V_P$ ) ocupada pelo fluido saturante ( $V_F$ ).

$$S_F = \frac{V_F}{V_P} \quad (2)$$

Para que se tenha um reservatório de hidrocarbonetos, os espaços vazios da rocha podem estar parcialmente preenchidos por um determinado líquido e os espaços remanescentes por um determinado gás. Ou ainda, dois ou três líquidos imiscíveis podem preencher todo o espaço vazio. Nesses casos, é de grande importância o conhecimento do conteúdo de cada fluido no meio poroso, pois as quantidades dos diferentes fluidos definem o valor econômico do reservatório (Vale, 2009).

### 2.3.1.3. Permeabilidade

Ainda que uma rocha contenha uma quantidade considerável de poros e neste haja uma quantidade significativa de hidrocarbonetos, não há como prever que estes serão extraídos. Para que a extração de óleo seja possível, é necessário que a rocha permita a passagem de fluidos através dela. Com isso, define-se permeabilidade como sendo a facilidade com que o meio poroso deixa-se atravessar por um determinado fluido.

### 2.3.1.4. Molhabilidade

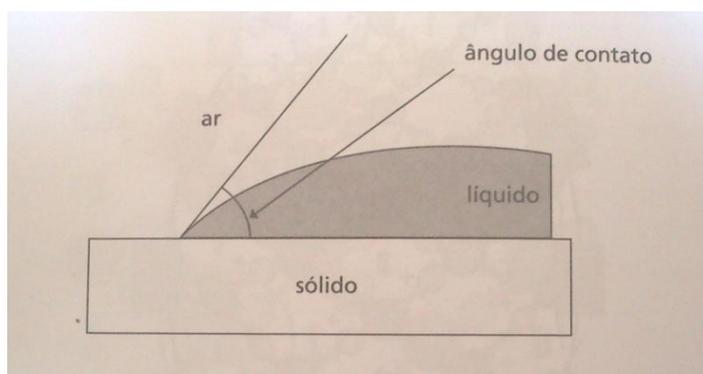
A molhabilidade, no contexto de engenharia de petróleo, pode ser definida como a tendência da rocha reservatório preferencialmente estar em contato com um determinado fluido em um sistema bifásico ou multifásico. Quando se avalia um sistema rocha/óleo/água de formação, a molhabilidade descreve a preferência da rocha de estar em contato com a água ou com o óleo na presença do outro fluido (Daltin, 2011).

Substâncias que apresentam uma elevada tensão superficial estão sujeitas a se comportarem como gotas esféricas sobre uma superfície, molhando-a pouco, pois as moléculas tendem a se manter juntas. No caso de uma tensão menor, o líquido irá se

espalhar mais sobre a superfície adquirindo um formato de lente. Essa lente apresenta um ângulo de contato com a superfície sólida que depende da tensão superficial.

Dessa forma, para que o sólido seja completamente molhado pelo líquido este ângulo de contato deve ser zero e parcialmente molhado se o ângulo de contato tiver um valor finito. A redução da tensão do líquido diminui o ângulo de contato e aumenta a área da superfície molhada (Daltin, 2011).

**Figura 4:** Ângulo de contato entre uma gota de líquido e um sólido (Daltin, 2011).



A molhabilidade é uma das principais características da formação pois determina a eficiência da produção de hidrocarbonetos.

#### 2.4. Adsorção de tensoativo na interface

A adsorção de tensoativos baseia-se na equação de adsorção de Gibbs. Por meio desta é possível prever a concentração de tensoativo que se encontra em excesso na solução. Logo, a concentração é obtida por meio da inclinação da reta formada anteriormente a c.m.c. (Santos, 2009).

$$\Gamma = -\frac{1}{nRT} \left( \frac{d\sigma_e}{d(\ln c)} \right) \quad (3)$$

Onde,

N: número de componentes independentes que varia entre 1 (tensoativos não iônicos) e 2 (tensoativos iônicos);

$\sigma_e$  (mN/m): tensão interfacial no equilíbrio;

$c$  (mol/L): concentração de tensoativo no equilíbrio;

$R$ : constante universal dos gases (8,314 J/mol.K);

$T$  (K): temperatura da solução;

$d\sigma_e/d(\ln c)$ : inclinação da reta formada antes da c.m.c.

De posse dos valores de  $\Gamma$  é possível obter a área superficial ( $A$ ) por molécula de tensoativo, em  $\text{Å}^2$  através da seguinte equação:

$$A = \frac{1}{N_A \Gamma} \quad (4)$$

Onde,

$N_A$  ( $6,02 \times 10^{23}$ ): número de Avogrado.

A adsorção é um parâmetro bastante sensível a ser observado, uma vez que as perdas causadas durante o processo de adsorção implicam diretamente em mudanças na molhabilidade e por conseguinte na interação entre os fluidos de reservatório e o fluido que será injetado. E por fim acaba por diminuir a eficiência da recuperação (Souza, 2013).

---

---

***CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA***

---

---

### 3 – METODOLOGIA

Este capítulo dedica-se a descrição dos materiais, bem como dos procedimentos experimentais utilizados para a elaboração deste trabalho. Sendo os principais ensaios realizados: tensão superficial, determinação da c.m.c., determinação da densidade, determinação da temperatura de Krafft, molhabilidade e adsorção.

#### 3.1. Reagentes

Na elaboração deste trabalho foram utilizadas diversas substâncias que enontram-se descritas a seguir, com seus respectivos fabricantes e grau de pureza.

NaCl 99% (Vetec), KCl 99% (Cromato), C<sub>16</sub>TAB, H<sub>2</sub>O destilada, álcool etílico, petróleo de Ubarana/ RN.

#### 3.2. Equipamentos utilizados e vidrarias

Foram utilizadas as seguintes equipamentos e vidrarias:

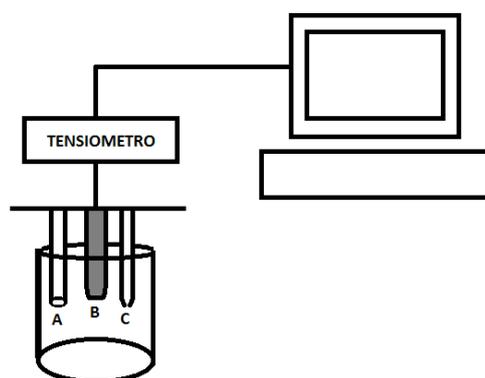
- Tensiômetro (Sensadyne – Inst. Div)
- Tensiômetro Kruss modelo DSA100
- Espectrofotômetro de UV-Visible
- Béqueres (50, 100 mL)
- Balão volumétrico (100, 1000 mL)
- Pipeta volumétrica (15 mL)
- Bureta (25 mL)
- Bastão de vidro

#### 3.3. Análise de tensão superficial

A análise de tensão superficial foi realizada para as seguintes soluções, em massa (g/g), de 4% C<sub>16</sub>TAB em ADT, KCl 2% e NaCl (0,1; 0,5, 1,0, 1,5 e 2,0 mol.L<sup>-1</sup>), no tensiômetro (Sensadyne – Inst. – Div.), sempre observando-se se havia mudanças bruscas nos valores de tensão. Cada solução era titulada com a solução salina na qual foi diluída inicialmente. Por exemplo, para a solução do C<sub>16</sub>TAB 4% em KCl 2%, a titulação foi feita com uma solução KCl 2%. Eram adicionadas pequenas quantidades da

solução diluída e então anotava-se este volume adicionado, para posterior cálculo de concentração, e o valor de tensão apontado pelo equipamento. A diluição era realizada até que o valor de tensão apresentado fosse o mesmo que o valor tabelado para a água na temperatura ambiente, 71,9 dina/cm que significava que a solução estava livre de tensoativo.

**Figura 5:** Representação esquemática do tensiômetro. A: Tubo capilar de 4mm. B: Termopar. C: Tubo capilar 1mm.



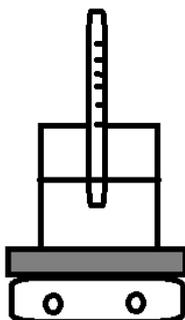
### 3.4. Determinação da concentração micelar crítica (c.m.c.)

Com os dados obtidos na adição de volume da solução diluída, foi calculada a concentração em cada ponto. Com estes dados de concentração e os de tensão obtidos no procedimento experimental, foi determinado o valor da c.m.c. para cada mistura de C<sub>16</sub>TAB e a respectiva solução salina.

### 3.5. Determinação da temperatura de Krafft

Foram preparadas soluções do tensoativo C<sub>16</sub>TAB em ADT, KCl 2%, NaCl 0,1, 0,5, 1,0, 1,5 e 2,0 mol.L<sup>-1</sup> na c.m.c., 25 e 50% acima deste valor. Estas soluções eram resfriadas até -12°C e submetidas a agitação e aquecimento gradual. Com o auxílio de um termômetro era verificada a temperatura exata em que a solução deixava de ser turva e adquiria o caráter límpido. O procedimento era realizado em duplicata para cada solução.

**Figura 6:** Aparato composto por aquecedor/agitador, becker com a solução e termômetro.



### 3.6. Determinação da massa específica

Foram preparadas soluções do tensoativo  $C_{16}TAB$  na c.m.c., 25 e 50% acima dela em ADT, KCl 2%, NaCl 0,1, 0,5, 1,0, 1,5 e 2,0 mol.L<sup>-1</sup>. Com o auxílio de uma seringa, as soluções foram injetadas em um densímetro e assim foram obtidos os valores de massa específica para cada uma das misturas.

**Figura 7:** Equipamento utilizado na análise de densidade: densímetro Anton Paar, modelo DMA 4500 M.



### 3.7. Estudo de molhabilidade

O estudo de molhabilidade foi realizado através de medidas de ângulo de contato. Foram preparadas pastilhas com rocha calcária da formação Jandaira

(Touros/RN) em uma granulometria de 350 Mesh determinada através de análise granulométrica em peneira vibratória. As pastilhas eram embebidas no petróleo de Ubarana/RN, e colocadas na estufa há 50° C por 48 horas. Após esta etapa, as pastilhas eram lavadas com tolueno e n-heptano, respectivamente. Depois de secas, eram imersas nas mesmas soluções de tensoativo a concentrações na c.m.c e próximas dela ( 25% e 50% acima dela) e em soluções do tensoativo a 2% por 30 minutos, duas pastilhas para cada solução. Em seguida, as pastilhas secavam em temperatura ambiente (Soares, 2012)

De posse das pastilhas secas, eram realizadas as medidas de ângulo. Com o auxílio do computador, os dados das medidas dos ângulos eram coletados. As medidas de ângulo de contato eram realizadas no tensiômetro Kruss.

**Figura 8:** Equipamento utilizado para fazer as medidas de ângulo de contato: tensiômetro Kruss modelo DSA100.



### 3.8. Ensaio de adsorção

#### 3.8.1. Curva de calibração

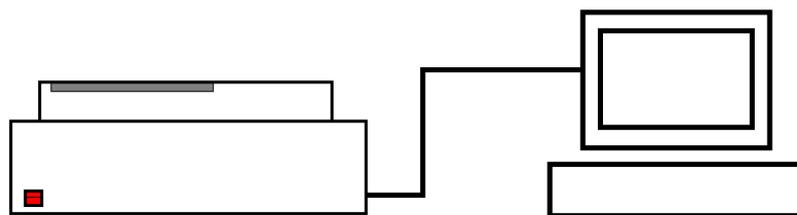
Foram preparadas soluções padrão de C<sub>16</sub>TAB a 2% em ADT, KCl 2%, NaCl 0,1, 0,5, 1,0, 1,5 e 2,0 mol.L<sup>-1</sup>. Destas soluções retirava-se uma alíquota de 2g e se adicionava 98g do respectivo diluente. A esta segunda solução nomeava-se C<sub>0</sub>, ou seja a concentração inicial na qual seriam feitas as seguintes diluições.

C<sub>0</sub>: 2g de C<sub>16</sub>TAB e 98g de C<sub>16</sub>TAB+diluente;

- C<sub>1</sub>: 5g de C<sub>0</sub> e 1g de diluente;
- C<sub>2</sub>: 4g de C<sub>0</sub> e 2g de diluente;
- C<sub>3</sub>: 3g de C<sub>0</sub> e 3g de diluente;
- C<sub>4</sub>: 2g de C<sub>0</sub> e 4g de diluente;
- C<sub>5</sub>: 1g de C<sub>0</sub> e 5g de diluente;
- C<sub>6</sub>: 0,5g de C<sub>0</sub> e 5,5g de diluente;
- C<sub>7</sub>: 0,1g de C<sub>0</sub> e 5,9g de diluente.

A curva de calibração é obtida através das medidas de absorvância. Estas realizadas utilizando o espectrofotômetro de UV-Visible, Cary – E da Varian, conforme esquema apresentado a seguir.

**Figura 9:** Esquema de aparato utilizado nas medidas de absorvância para ensaios de calibração.



As soluções preparadas eram submetidas ao equipamento objetivando medir a absorvância máxima num range de 190 nm a 900 nm de comprimento de onda. Com os valores obtidos foi possível construir uma curva de calibração de concentração do C<sub>16</sub>TAB em função da absorvância no comprimento de onda máximo.

### 3.8.2. Valores de adsorção

Para obtenção dos valores de adsorção, submetia-se 2,0 g de calcário a 4,0 g de soluções padrão (razão 1:2) em erlenmeyers de 100 mL que seguiam para agitação no período de 24 horas e 240, 120, 60, 30, 15 e 5 minutos. Após o tempo esperado, a solução em contato com a rocha era completamente separada desta por meio de centrifugação. Retirava-se uma alíquota desta solução resultante e diluía-se com a solução padrão inicial.

A seguir é apresentada uma tabela com as alíquotas de solução utilizada e de diluente adicionado.

**Tabela 1:** Soluções para medidas de adsorção.

<b>Solução padrão</b>	<b>(g) solução em contato com sólido</b>	<b>(g) da solução padrão</b>
ADT	0,10	10,0
KCl 2%	0,10	6,9
NaCl 0,1	0,05	10,0
NaCl 0,5	0,10	10,0
NaCl 1,0	0,10	10,0
NaCl 1,5	0,10	10,0
NaCl 2,0	0,10	10,0

A solução em contato com o sólido, após ser diluída segue para o espectrofotômetro, como apresentado na figura 7, onde são coletados os valores de absorvância.

A metodologia de determinação da quantidade de tensoativo adsorvido consiste no cálculo da diferença de concentrações inicial e final do tensoativo na solução em que está em contato com o a rocha. Para tanto, utiliza-se a seguinte equação.

$$q \left( \frac{mg}{g} \right) = \frac{(C_{ti} - C_{tf}) \times m_i}{m_{adsorvente}} \quad (5)$$

q = quantidade de tensoativo adsorvido por unidade de grama de sólido (mg/g);

C<sub>ti</sub> = concentração de tensoativo inicial (mg/g);

C<sub>tf</sub> = concentração de tensoativo após contato com a rocha (mg/g);

m<sub>i</sub> = massa inicial da solução (g);

---

---

***CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO***

---

---

## 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados experimentais obtidos no estudo inicial das propriedades do tensoativo C<sub>16</sub>TAB.

### 4.1 Determinação da Concentração Micelar Crítica

Inicialmente, determinou-se a concentração micelar crítica do tensoativo nas as soluções salinas citadas no capítulo anterior – C<sub>16</sub>TAB em ADT, KCl 2% e em NaCl 0,1; 0,5, 1,0, 1,5 e 2,0 mol.L<sup>-1</sup> à 23°C.

Com os dados fornecidos pelo tensiômetro e os de concentração, calculados, foram gerados os seguintes gráficos que apresentam o comportamento do tensoativo C<sub>16</sub>TAB em solução salina para diferentes sais, em diferentes concentrações.

**Figura 10:** Micelização do C<sub>16</sub>TAB em água a 23°C.

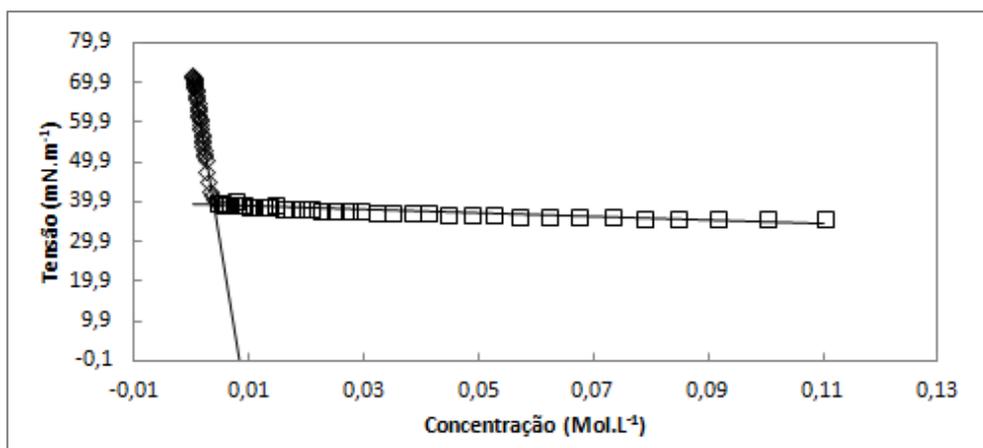


Figura 11: Micelização do C<sub>16</sub>TAB em KCl 2% à 23°C.

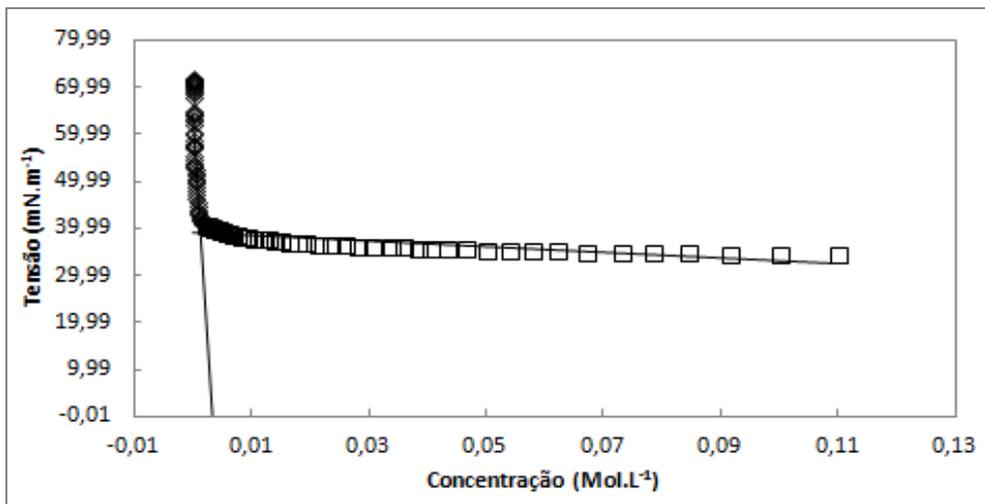


Figura 12: Micelização do C<sub>16</sub>TAB em NaCl 0,1M à 23°C.

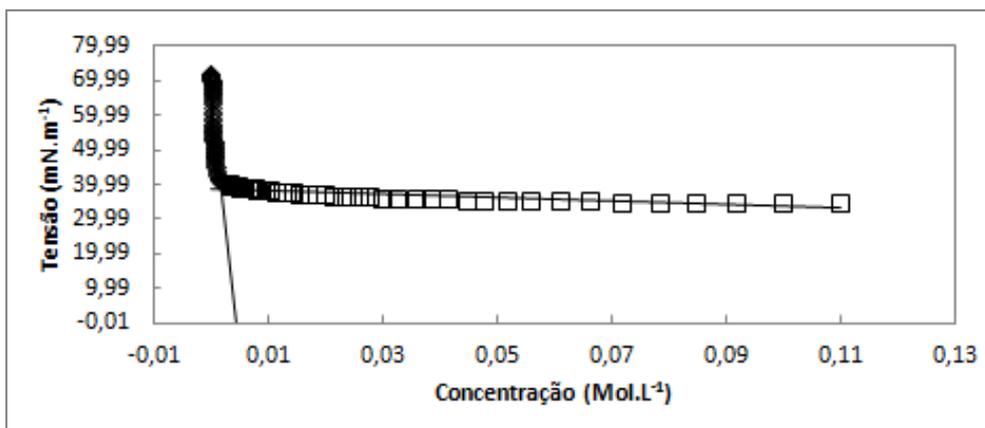
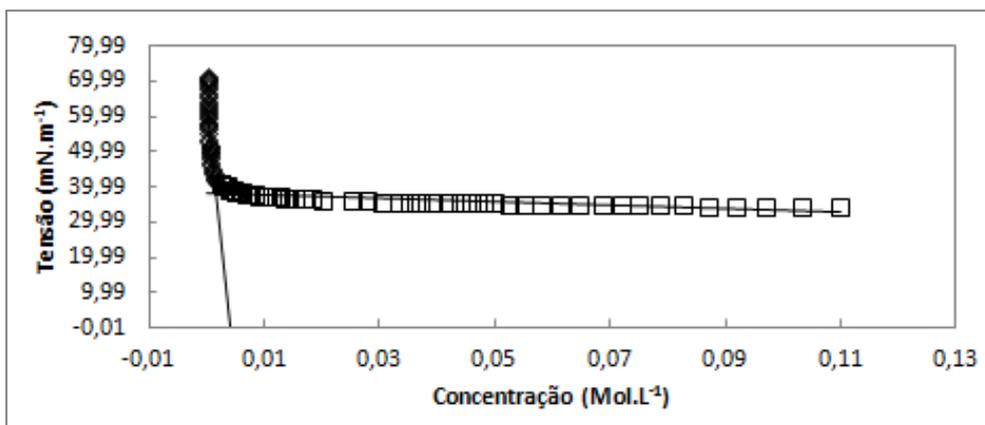
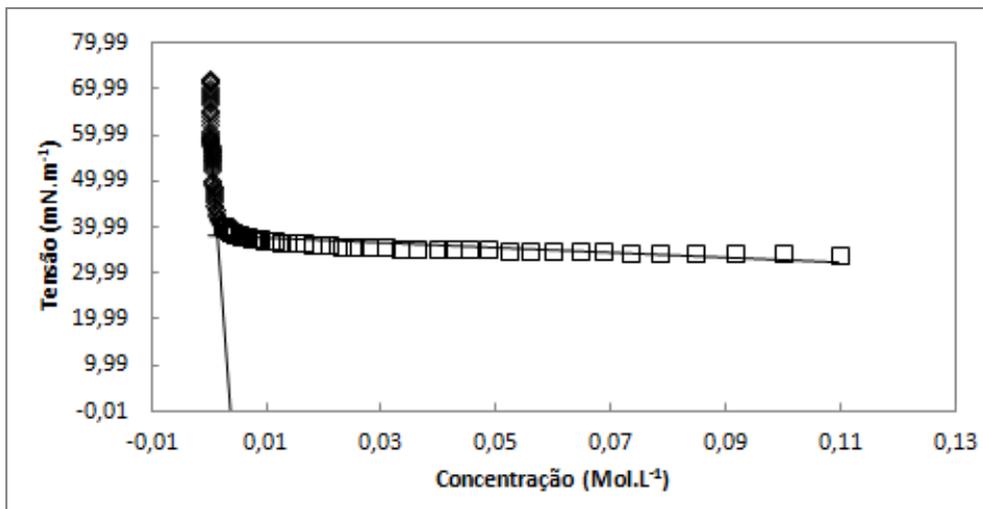


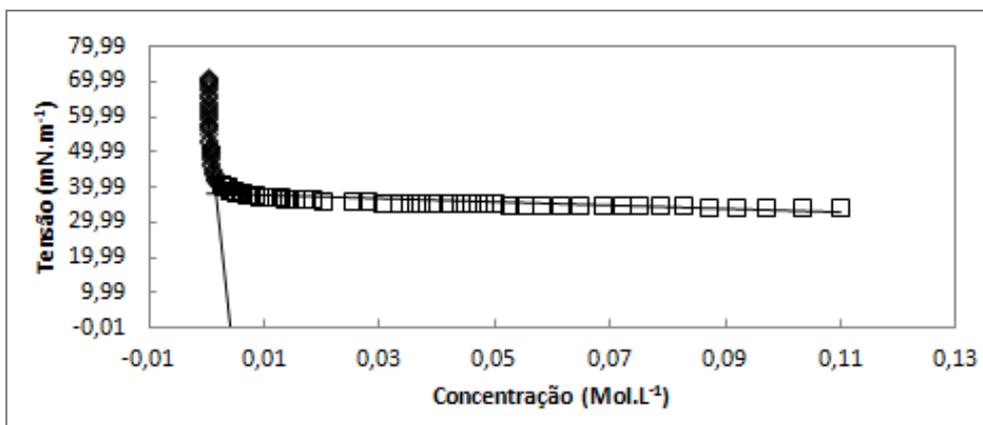
Figura 13 : Micelização do C<sub>16</sub>TAB em NaCl 0,5M à 23°C.



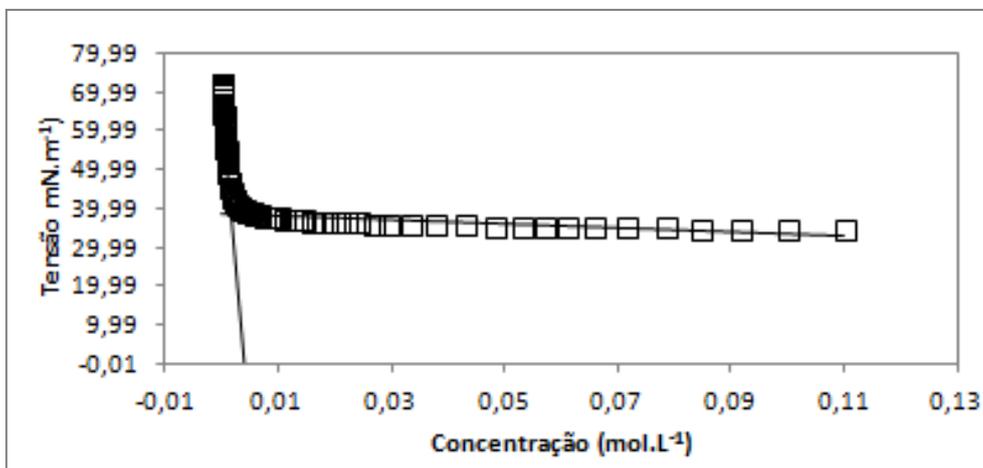
**Figura 14:** Micelização do C<sub>16</sub>TAB em NaCl 1,0M à 23°C.



**Figura 15:** Micelização do C<sub>16</sub>TAB em NaCl 1,5M à 23°C.



**Figura 16:** Micelização do C<sub>16</sub>TAB em NaCl 2,0 M à 23°C.



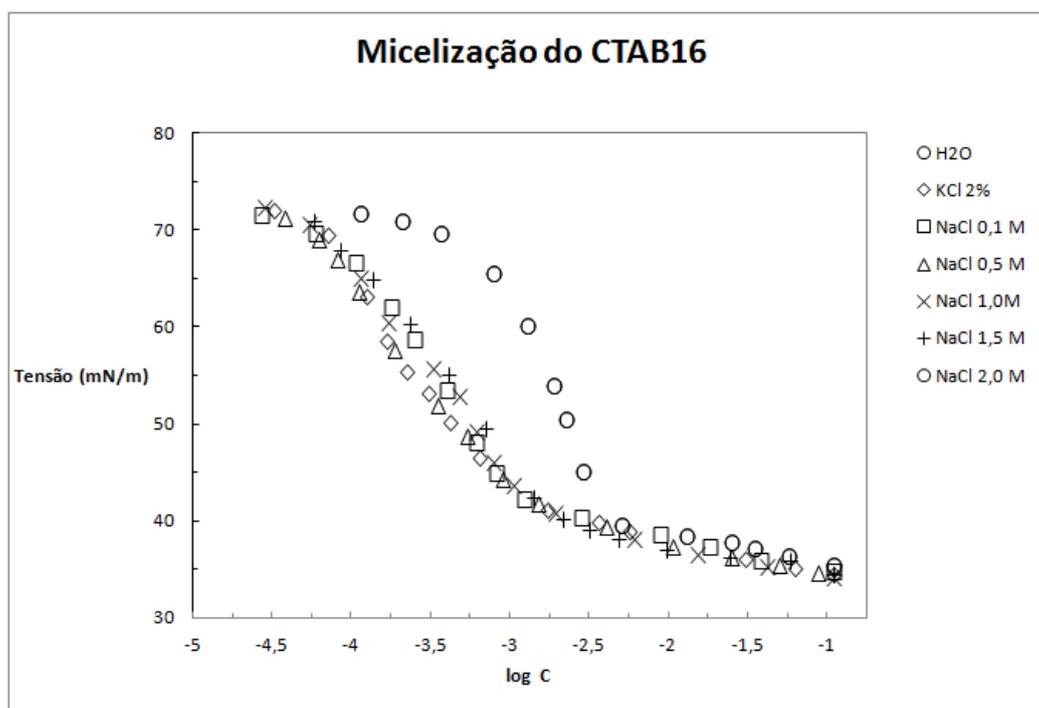
A partir desses gráficos, foram calculas as c.m.c.'s para cada uma das soluções em que o C<sub>16</sub>TAB foi diluído. Como valor de referência, determinou-se a c.m.c. para o C<sub>16</sub>TAB em água, a fim de comparar este valor com os demais, obtidos para o tensoativo em solução salina.

**Tabela 2:** Valores da c.m.c. para diferentes soluções.

Solução	c.m.c. (Mol.L <sup>-1</sup> )
C <sub>16</sub> TAB + H <sub>2</sub> O	0,00378
C <sub>16</sub> TAB + KCl 2%	0,00137
C <sub>16</sub> TAB + NaCl 0,1 M	0,00177
C <sub>16</sub> TAB + NaCl 0,5 M	0,00161
C <sub>16</sub> TAB + NaCl 1,0 M	0,00157
C <sub>16</sub> TAB + NaCl 1,5 M	0,00239
C <sub>16</sub> TAB + NaCl 2,0 M	0,00341

A comparação do comportamento do tensoativo com relação a concentração micelar crítica determinada nas soluções salinas também pode ser observada no gráfico abaixo.

**Figura 17:** Micelização do C<sub>16</sub>TAB a 23°C.



Pode-se observar que a salinidade reduz o valor de c.m.c., essa redução se deve a diminuição da espessura da dupla camada elétrica que rodeia as micelas, o que produz uma diminuição das forças de repulsão entre grupos hidrofílicos vizinhos e, como consequência, permite a agregação a uma concentração de tensoativo mais baixa. Porém foi possível perceber também que o aumento da concentração de sal a valores elevados, mas especificamente 1,5 e 2,0 mol.L<sup>-1</sup> de NaCl, o tensoativo apresentou comportamento adverso, ou seja a c.m.c. aumentou ao invés de diminuir.

#### 4.2 Determinação da temperatura de Krafft

Com os dados de temperatura obtidos para cada solução, o ponto de Krafft pode ser obtido com a média destas temperaturas. A seguir, encontram-se dispostos os gráficos que representam o crescimento do ponto de Krafft com o aumento da concentração do tensoativo.

**Figura 18:** Dados da variação da concentração do C<sub>16</sub>TAB com a temperatura para determinação do ponto de Krafft.

C <sub>16</sub> TAB em ADT				
M (mol/L)	T <sub>1</sub> (°C)	T <sub>2</sub> (°C)	T <sub>3</sub> (°C)	T <sub>Krafft</sub> (°C)
0,004	12,0	12,0	13,0	12,3
0,010	14,0	13,0	12,0	13,0
0,050	16,0	17,0	19,0	17,3

C <sub>16</sub> TAB em KCl 2%				
M (mol/L)	T <sub>1</sub> (°C)	T <sub>2</sub> (°C)	T <sub>3</sub> (°C)	T <sub>Krafft</sub> (°C)
0,002	2,0	2,0	2,0	2,0
0,010	3,0	3,0	3,0	3,0
0,100	7,0	6,0	8,0	7,0

C <sub>16</sub> TAB em NaCl 0,1 M				
M (mol/L)	T <sub>1</sub> (°C)	T <sub>2</sub> (°C)	T <sub>3</sub> (°C)	T <sub>Krafft</sub> (°C)
0,002	4,0	4,0	3,0	3,7
0,010	5,0	6,0	4,0	5,0
0,100	9,0	9,0	9,0	9,0

C <sub>16</sub> TAB em NaCl 0,5 M				
M (mol/L)	T <sub>1</sub> (°C)	T <sub>2</sub> (°C)	T <sub>3</sub> (°C)	T <sub>Krafft</sub> (°C)
0,002	3,0	4,0	3,0	3,3
0,010	4,0	4,0	3,0	3,7
0,100	5,0	7,0	7,0	6,3

C <sub>16</sub> TAB em NaCl 1,0 M				
M (mol/L)	T <sub>1</sub> (°C)	T <sub>2</sub> (°C)	T <sub>3</sub> (°C)	T <sub>Krafft</sub> (°C)
0,002	-6,0	-8,0	-8,0	-7,3
0,010	-8,0	-9,0	0,0	-5,7
0,100	2,0	2,0	3,0	2,3

C <sub>16</sub> TAB em NaCl 1,5 M				
M (mol/L)	T <sub>1</sub> (°C)	T <sub>2</sub> (°C)	T <sub>3</sub> (°C)	T <sub>Krafft</sub> (°C)
0,218	-6,0	-5,0	-8,0	-6,3
0,272	-9,0	-8,0	0,0	-5,7
0,327	0,0	-8,0	0,0	-2,7

C <sub>16</sub> TAB em NaCl 2,0 M				
M (mol/L)	T <sub>1</sub> (°C)	T <sub>2</sub> (°C)	T <sub>3</sub> (°C)	T <sub>Krafft</sub> (°C)
0,002	3,0	0,0	2,0	1,7
0,010	2,0	1,0	3,0	2,0
0,100	5,0	5,0	5,0	5,0

A partir da análise dos valores das temperaturas de Kraft para todas as soluções de tensoativo é possível perceber que a maior valor obtido foi 17 °C para a solução com ADT, o que garante que o tensoativo estará solúvel em todas as soluções que serão utilizadas na temperatura ambiente.

### 4.3 Determinação da massa específica

No densímetro, foram obtidos os dados apresentados a seguir para o tensoativo C<sub>16</sub>TAB em soluções salinas na c.m.c, 25% e 50% acima.

**Tabela 3:** Valores de massa específica em (g/m<sup>3</sup>) para o tensoativo em água e soluções salinas na c.m.c., 25% e 50% acima desta.

<b>Solução</b>	<b>c.m.c.</b>	<b>25% acima da c.m.c.</b>	<b>50% acima da c.m.c.</b>
C <sub>16</sub> TAB + H <sub>2</sub> O	0,99682	0,99727	0,99732
C <sub>16</sub> TAB + KCl 2%	1,00950	1,00957	1,00960
C <sub>16</sub> TAB + NaCl 0,1 M	1,00121	1,00122	1,00125
C <sub>16</sub> TAB + NaCl 0,5 M	1,01701	1,01705	1,01715
C <sub>16</sub> TAB + NaCl 1,0 M	1,03720	1,03759	1,03850
C <sub>16</sub> TAB + NaCl 1,5 M	1,0536	1,05649	1,05640
C <sub>16</sub> TAB + NaCl 2,0 M	1,07483	1,07529	1,07466

Com os dados obtido na tabela 3 é possível perceber que não houve variação na massa específica das soluções, todas apresentaram valores próximos a massa específica da água, por serem soluções bastante diluídas.

#### **4.4. Determinação do ângulo de contato**

O estudo da molhabilidade através das medidas de ângulo, foram separados em dois grupos tem como parâmetro pela concentração do tensoativo: soluções de tensoativo na c.m.c. e da solução de tensoativo a 2% em massa.

##### **4.4.1. Na c.m.c**

As tabelas com os valores obtidos encontram-se a seguir. Estas apresentam os valores dos ângulos médios, pois as medidas foram realizadas em duplicata.

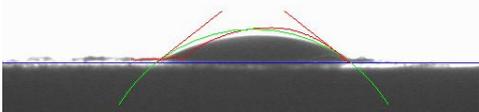
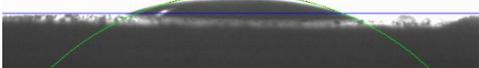
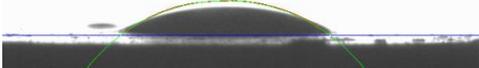
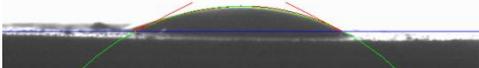
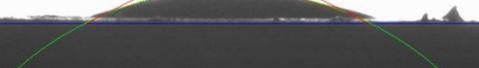
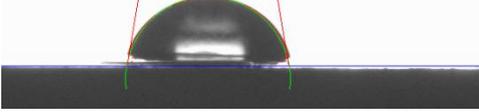
**Tabela 4:** Valores de ângulo obtidos para o tensoativo C<sub>16</sub>TAB em soluções na c.m.c.

Amostra	Instante inicial	Imagem
C <sub>16</sub> TAB + H <sub>2</sub> O	60,0 °	
C <sub>16</sub> TAB + KCl 2%	88,8°	
C <sub>16</sub> TAB + NaCl 0,1 M	50,7 °	
C <sub>16</sub> TAB + NaCl 0,5 M	18,6 °	
C <sub>16</sub> TAB + NaCl 1,0 M	64,3 °	
C <sub>16</sub> TAB + NaCl 1,5 M	52,2 °	
C <sub>16</sub> TAB + NaCl 2,0 M	86,0 °	

#### 4.4.2. Solução de tensoativo a 2%

Assim como os valores foram obtidos os ângulo na c.m.c. do tensoativo, também foram realizadas medidas de ângulo para o tensoativo a 2% em duplicata.

**Tabela 5:** Valores de ângulo obtidos para o tensoativo C<sub>16</sub>TAB a 2 %.

Amostra	Instante inicial	Imagem
C <sub>16</sub> TAB + ADT	28,1°	
C <sub>16</sub> TAB + KCl 2%	20,3°	
C <sub>16</sub> TAB + NaCl 0,1 M	36,3°	
C <sub>16</sub> TAB + NaCl 0,5 M	37,3°	
C <sub>16</sub> TAB + NaCl 1,0 M	26,9°	
C <sub>16</sub> TAB + NaCl 1,5 M	28,8°	
C <sub>16</sub> TAB + NaCl 2,0 M	26,1°	
Rocha sem tratamento	99,9°	

Comparando-se os resultados obtidos nas diferentes concentrações (c.m.c. e 2%), houve um maior efeito na diminuição do ângulo de contato quando utilizou-se a solução de tensoativo a 2% em detrimento a este na c.m.c., o que é justificado. O efeito do tensoativo frente suas propriedades é mais intensificado quando há uma quantidade maior de micelas formadas. Para as soluções avaliadas, a maior c.m.c. foi 0,00378 mol/L que é bastante inferior a concentração de 2% de C<sub>16</sub>TAB utilizados.

Com isso, utilizando 2% do tensoativo há um maior número de micelas formadas do que na c.m.c. o que leva a uma diminuição na tensão superficial da rocha devido a quantidade de tensoativo e conseqüentemente uma acentuada diminuição do ângulo de contato melhorando a molhabilidade da rocha calcária à água.

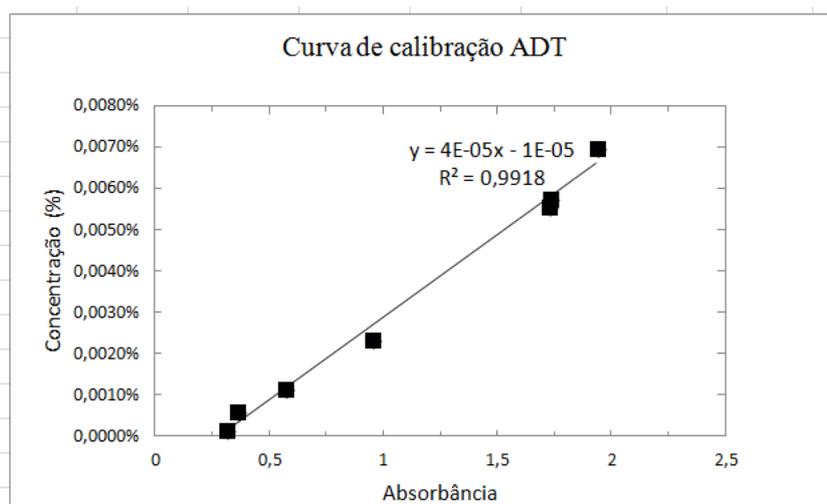
Com relação à concentração de eletrólitos, foi possível perceber que estes apresentaram baixos valores de ângulo de contato, que permite concluir que os eletrólitos estudados facilitam a interação do tensoativo com a rocha o que então proporciona a molhabilidade da rocha em relação à água.

#### 4.5. Ensaio de adsorção

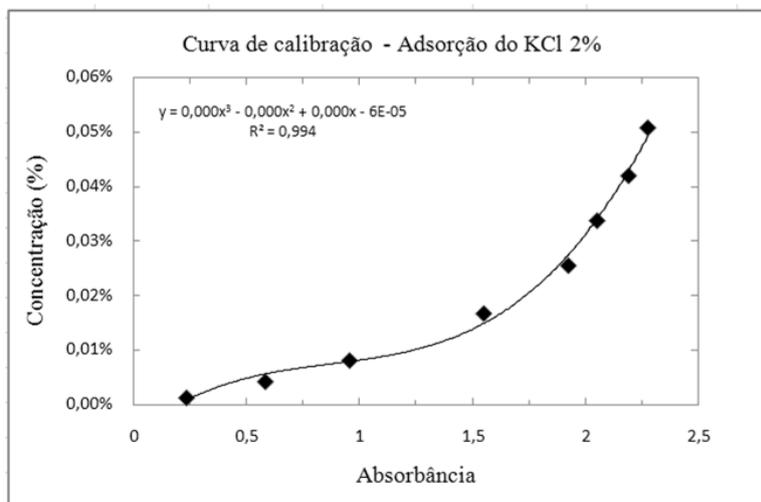
Com os dados de absorvância obtidos, e com os dados de concentração calculados, foi possível montar a curva de calibração para as soluções de C<sub>16</sub>TAB preparadas. Os ensaios de adsorção foram realizados com o intuito de determinar possíveis quantidades de tensoativo adsorvido a rocha.

Para esta determinação é necessário inicialmente obter a curva de calibração em que estão relacionados a concentração do tensoativo e absorvância.

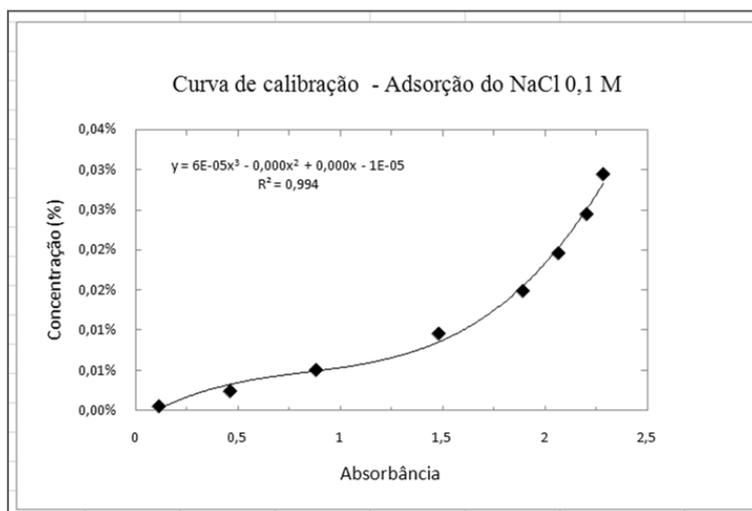
**Figura 19:** Curva de calibração do C<sub>16</sub>TAB em ADT.



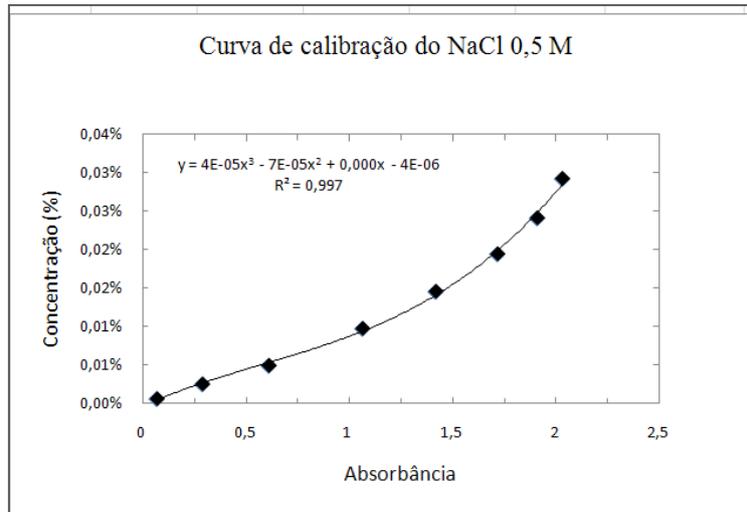
**Figura 20:** Curva de calibração do C<sub>16</sub>TAB em KCl 2%.



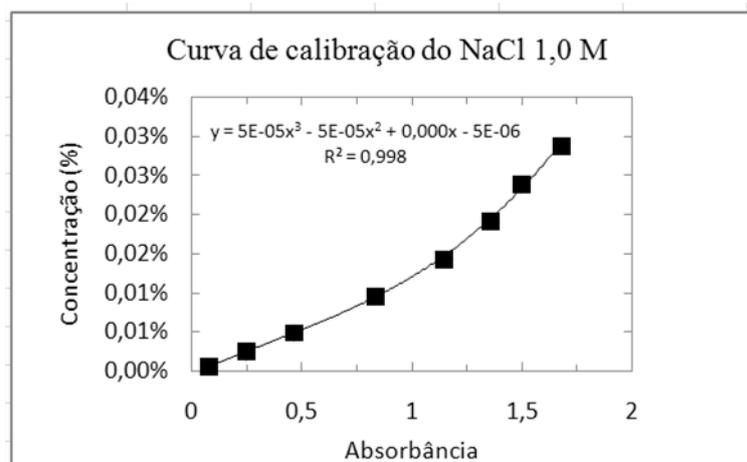
**Figura 21:** Curva de calibração do C<sub>16</sub>TAB em NaCl 0,1 M.



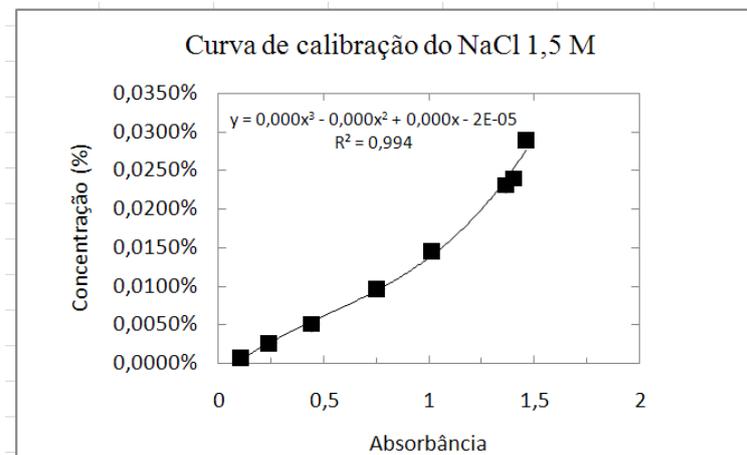
**Figura 22:** Curva de calibração do C<sub>16</sub>TAB em NaCl 0,5 M.

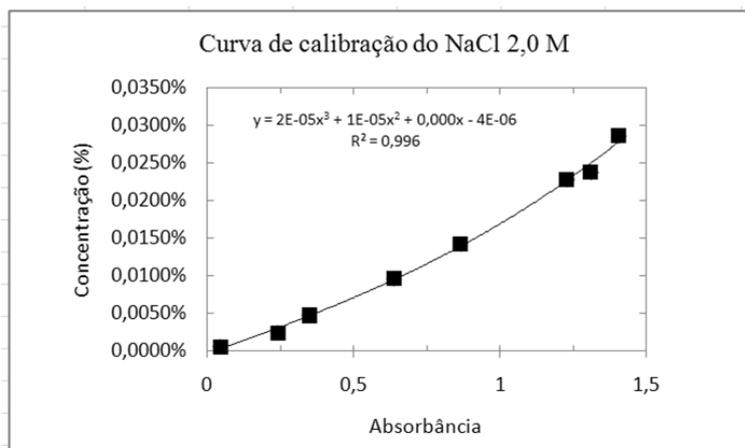


**Figura 23:** Curva de calibração do C<sub>16</sub>TAB em NaCl 1,0 M.



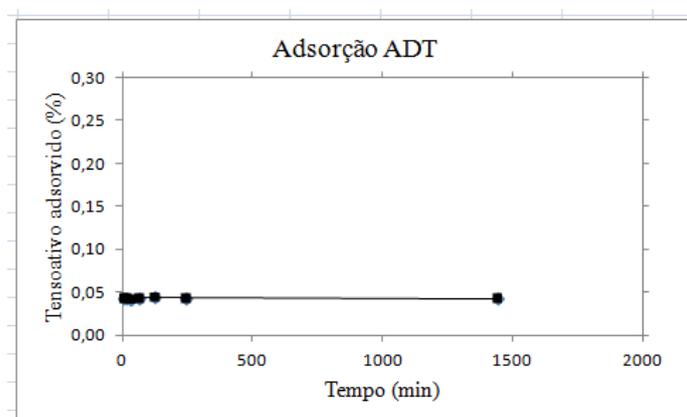
**Figura 24:** Curva de calibração do C<sub>16</sub>TAB em NaCl 1,5 M.



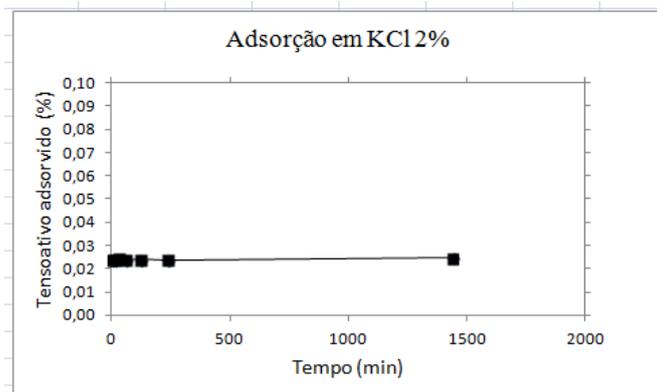
**Figura 25:** Curva de calibração do C<sub>16</sub>TAB em NaCl 2,0 M.

As soluções de tensoativo que permaneceram em contato com a rocha e que após submetidas ao espectrofotômetro permitem obter o valor da absorbância para cada solução respectiva.

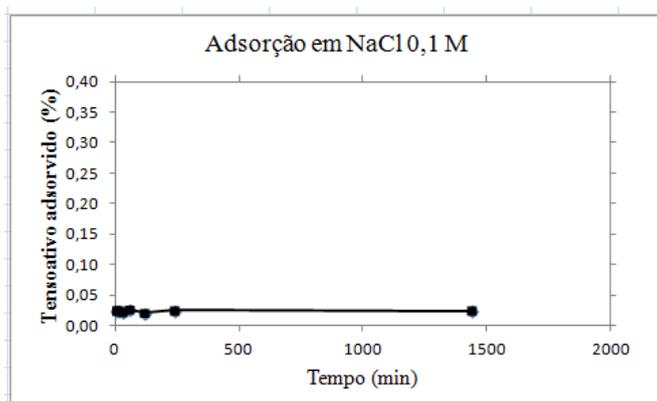
Com a absorbância encontrada e a curva de calibração, através do cálculo inverso, é possível então conhecer a concentração de tensoativo que não foi adsorvido pela rocha. Por fim, utilizando a equação (05) descrita na metodologia deste trabalho determina-se a quantidade de tensoativo adsorvido.

**Figura 26:** Cinética da adsorção do C<sub>16</sub>TAB em ADT 2%, na rocha calcário em função do tempo de contato.

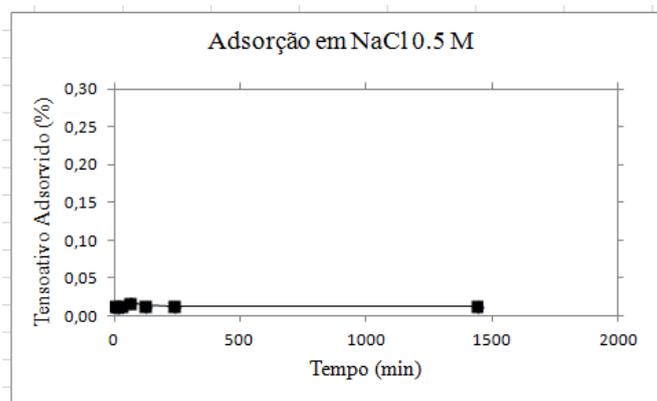
**Figura 27:** Cinética da adsorção do C<sub>16</sub>TAB em KCl 2%, na rocha calcário em função do tempo de contato.



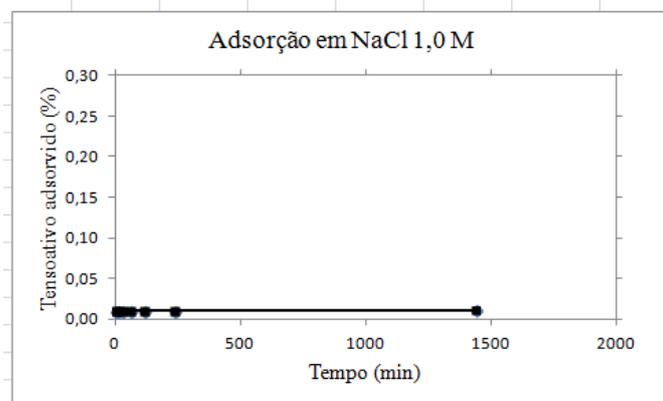
**Figura 28:** Cinética da adsorção do C<sub>16</sub>TAB em NaCl 0,1 M, na rocha calcário em função do tempo de contato.



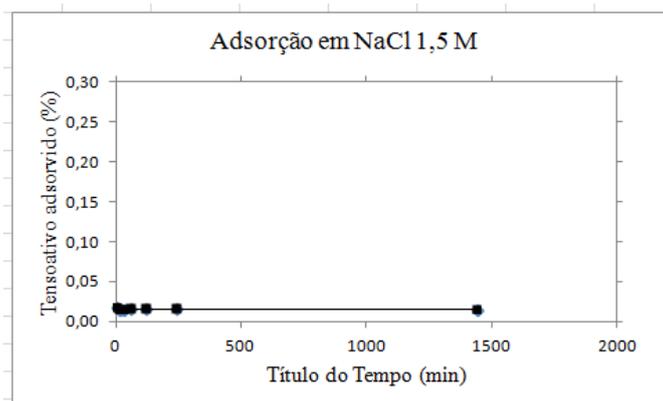
**Figura 29:** Cinética da adsorção do C<sub>16</sub>TAB em NaCl 0,5 M, na rocha calcário em função do tempo de contato.



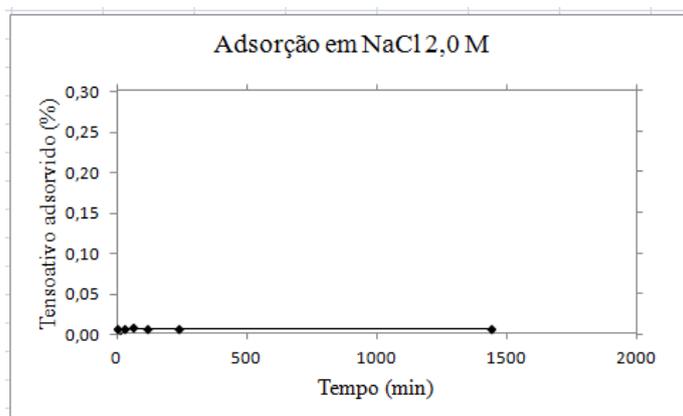
**Figura 30:** Cinética da adsorção do C<sub>16</sub>TAB em NaCl 1,0 M, na rocha calcário em função do tempo de contato.



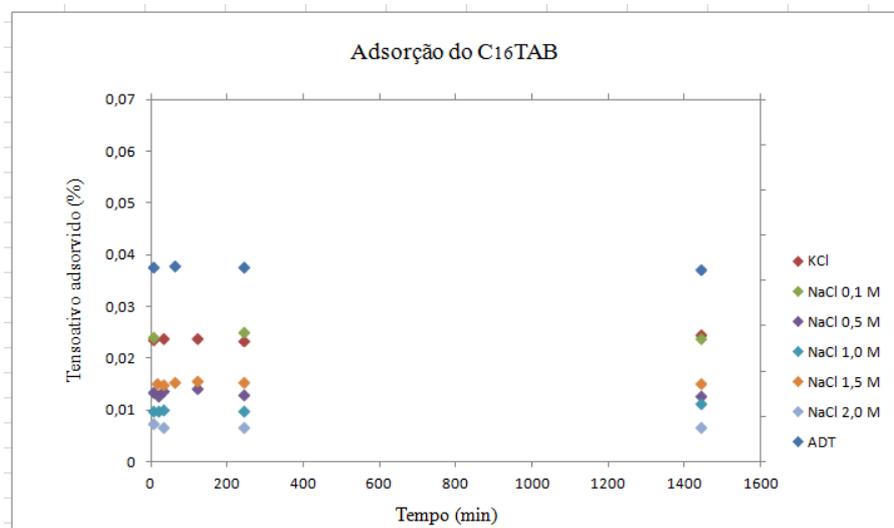
**Figura 31:** Cinética da adsorção do C<sub>16</sub>TAB em NaCl 1,5 M, na rocha calcário em função do tempo de contato.



**Figura 32:** Cinética da adsorção do C<sub>16</sub>TAB em NaCl 2,0 M, na rocha calcário em função do tempo de contato.



**Figura 33:** Cinética da adsorção comparativa entre todas as soluções do C<sub>16</sub>TAB, na rocha calcária em função do tempo de contato.



De acordo as figuras apresentadas acima, pode-se observar que a quantidade de tensoativo adsorvido aumenta com a diminuição da concentração do sal. Em relação presença de sais, o tensoativo é mais adsorvido quando a presença de eletrólitos diminui.

Sendo assim, o baixo índice de adsorção do tensoativo frente à presença de eletrólitos, faz com que os sistemas de NaCl de 1,0, 1,5 e 2,0 se classifiquem neste estudo como os melhores para serem trabalhados com o tensoativo C<sub>16</sub>TAB.

---

---

***CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES***

---

---

## 5 – CONCLUSÕES

De acordo com todas os procedimentos experimentais realizados relativos ao estudo do tensoativo C<sub>16</sub>TAB é possível inferir que:

A avaliação da tensão superficial do tensoativo C<sub>16</sub>TAB em soluções salinas possibilitou observar que, quando comparadas a c.m.c. do tensoativo em água, as c.m.c.'s para o tensoativo em soluções salinas, decresce de maneira considerável ao aumento do eletrólito em solução. Este fenômeno ocorre pois em se tratando de um tensoativo iônico, o C<sub>16</sub>TAB, quando na presença de eletrólitos, tem sua c.m.c. diminuída, uma vez que as interações entre os eletrólitos e os grupos polares (hidrofílicos) do tensoativo enfraquecerem, o que favorece consequentemente a formação de micelas.

Na avaliação do ponto de Krafft, a maior temperatura constatada foi de 17° C para o tensoativo em água. Este resultado satisfaz as expectativas, pois garante que o C<sub>16</sub>TAB estará totalmente solúvel a temperatura de reservatório que é expressivamente superior à temperatura máxima encontrada para a solubilização deste nas soluções.

Ainda no estudo das propriedades do tensoativo, constatou-se que a massa específica do C<sub>16</sub>TAB em solução salina aumenta com o aumento da concentração do tensoativo, porém esse aumento é relativamente pequeno, apresentando valores próximos ao da massa específica da água, por serem soluções muito diluídas.

No tocante ao ângulo de contato, foi possível observar houve redução acentuada da molhabilidade quando a rocha foi tratada com a solução do tensoativo na concentração de 2% em comparação ao tensoativo na c.m.c. devido às propriedades serem intensificadas com a quantidade de micelas, que acima da c.m.c. é expressivamente maior. Em relação ao comparativo frente à concentração de sal, resultou em uma diminuição significativa do ângulo de contato entre esta e a rocha, diminuindo gradativamente com a diminuição da concentração do sal. Para a concentração do tensoativo, os melhores resultados obtidos foram do KCl a 2% e do NaCl variando até a concentração de 1,0 mol/L.

A redução do ângulo implicou em redução da tensão superficial. Ou seja, a baixas concentrações dos eletrólitos estudados e na c.m.c. do C<sub>16</sub>TAB há facilidade de entrada do líquido nas frestas formadas na rocha o que então proporciona a umectação do material.

Referente à adsorção, as curvas de calibração obtidas foram satisfatórias uma vez que apresentam uma boa correlação ao crescimento da concentração do tensoativo. As medidas de adsorção, por sua vez, apontaram que o tensoativo é menos adsorvido quando na presença de uma concentração maior de eletrólito.

Comparando-se todos os estudos realizados, pode-se então concluir que o melhor sistema a se utilizar na recuperação avançada de petróleo é o C<sub>16</sub>TAB 2% na presença de NaCl 1,0 M.

Por fim, em relação à molhabilidade, a redução significativa de ângulo de contato e a baixa adsorção do tensoativo implicaram diretamente em tornar este sistema o mais favorável a ser aplicado na recuperação avançada de petróleo, pois ao melhorar a molhabilidade da rocha com relação a água, favorece significativamente a saída de óleo.

O estudo do C<sub>16</sub>TAB apresentou-se de grande importância para aplicação deste tensoativo na recuperação avançada, de forma que maiores estudos e ensaios de recuperação com este tensoativo mostram-se bastante significativos para o conhecimento total de sua aplicação.

---

---

***CAPÍTULO 6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS***

---

---

## 7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CURBELO, F. D. S. *Recuperação avançada de petróleo utilizando tensoativos*. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

DALTIN, D. *Tensoativos: Química, propriedades e aplicações*. São Paulo: Blucher, 2011.

ROSA, A. J.; CARVALHO, R. S.; XAVIER, J. A. D. *Engenharia de Reservatórios de Petróleo*. Editora Interciência, Rio de Janeiro, RJ., 2006.

SANTOS, F. K. G. *Avaliação do comportamento de fluidos micelares na recuperação avançada de petróleo*. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

SOARES, A. J. *Aplicação de microemulsão na recuperação de petróleo de reservatórios carbonáticos*. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

SOUZA, T. T. C. *Nanoemulsões aplicadas à recuperação avançada de petróleo*. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

THOMAS, J. E. *Fundamentos da engenharia de petróleo*. Editora Interciência, Rio de Janeiro, 2001.

VALE, T. Y. F. *Desenvolvimento de tensoativos e sistemas microemulsionados para a recuperação de petróleo*. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Centro de

Tecnologia, Departamento de Engenharia Química, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

ZANIN, S. M. W; MIGUEL, M. D; CHIMELLI, M; OLIVEIRA, A. B. *Determinação do Equilíbrio hidrófilo-Lipófilo (EHL) de óleos*. Visão Acadêmica, UFPR. 2002. Disponível em <[www.visaoacademica.ufpr.br/v3n1/v3n1sun.htm](http://www.visaoacademica.ufpr.br/v3n1/v3n1sun.htm)>. Acesso em 05/08/2012.

**APÊNDICE:**

**RELATÓRIO DE ESTÁGIO SUPERVISIONADO**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA**  
**ESTÁGIO SUPERVISIONADO – DEQ0537**

***RELATÓRIO DE ESTÁGIO SUPERVISIONADO:***  
***IMPLANTAÇÃO DE GERADOR DE VAPOR PARA INJEÇÃO EM***  
***POÇOS DE PETRÓLEO***

*Priscilla Cibelle Oliveira de Souza Firmino*

**Natal - RN**

**2014**

*Priscilla Cibelle Oliveira de Souza Firmino*

**RELATÓRIO DE ESTÁGIO SUPERVISIONADO:  
IMPLANTAÇÃO DE GERADOR DE VAPOR PARA INJEÇÃO EM POÇOS DE  
PETRÓLEO**

Relatório de estágio supervisionado apresentado junto ao Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial para obtenção do título de graduada em Engenharia Química.

**Orientadores:** Prof. Dr. Jackson Araújo de Oliveira

Prof. Dr. Gilson Gomes de Medeiros

**Supervisora:** Eng. Rosemary Silva de Oliveira

**Período:** 13 de maio de 2013 a 13 de outubro de 2013

**Natal - RN**

**2014**

## DEDICATÓRIA

*Este relatório de estágio é dedicado:*

*A **Deus**, pois Ele me amou primeiro. Com sua infinita graça e misericórdia me sustenta e me dá forças para que mesmo na mais adversa situação não desista dos meus sonhos. Sonhos que ele colocou em meu coração. Obrigada, Pai.*

*A minha mãe **Edvania de Oliveira**, por ser minha eterna incentivadora, rocha forte, sempre disposta a com uma palavra de carinho me dar apoio e segurança em todas as longas caminhadas da vida. Te amo, mãe.*

*Ao meu pai **Jocieudes**, pelas palavras de sabedoria, sempre me mostrando que os obstáculos poderiam ser superados. Te amo, pai.*

*Ao meu amado esposo **Daniel**, pelo carinho, compreensão e paciência com que em todos esses anos esteve ao meu lado. Te amo infinitamente, parte de mim, amado meu.*

## AGRADECIMENTOS

*A Deus, pelo fôlego de vida, por suas misericórdias e por ter me proporcionado a oportunidade de realizar este estágio e concluí-lo.*

*A minha família, em especial aos meus pais, Edvânia e Jocieudes, e ao meu amado esposo, Daniel, pela confiança que em mim depositaram e hoje veem meu sonho se tornando realidade.*

*Aos meus amigos, Liliam Aragão, Amanda Priscilla e Fabio Macelo pela amizade e carinho desde os tempos em que dávamos a sala de aula no ensino médio/técnico no IFRN.*

*A todo o corpo docente do DEQ, pela dedicação em compartilhar conhecimentos para minha formação. E aos demais professores da UFRN que também contribuíram de forma tão significativa, em especial aos professores Ricardo Valentim, Marcos Araújo, Diego Carvalho e Francisco Canindé de Oliveira.*

*A todos do PRH-14/ANP, pelo apoio e dedicação, em especial a Professora Dra. Tereza Neuma de Castro Dantas e a doutoranda Ana Paula Justino Soares pela amizade, apoio, compreensão e paciência com que sempre tiveram em me orientar na minha iniciação científica.*

*Aos meus amigos de graduação: Diane, Karine, Ygor, Mayara, Stephanie, Thayna, Alex e Rony, por me acompanharem em cada momento de dificuldade e também nos momentos de alegria e descontração. Foi muito bom estar com vocês.*

*Aos meus orientadores de estágio da UFRN, e também amigos Prof. Dr. Jackson Araújo de Oliveira, e Prof. Dr. Gilson Gomes de Medeiros pela paciência e comprometimento que tiveram em me conduzir na elaboração deste trabalho.*

*A minha supervisora de estágio da Petroeng Eng. Rosemary Silva Oliveira, pela confiança depositada.*

*A Petroeng Consultoria e Processos LTDA, por toda estrutura e suporte que contribuiu de forma significativa para o meu desenvolvimento profissional e pessoal. Pela maneira como me receberam e a oportunidade de vivenciar na prática todo o encantamento que senti pela engenharia química em sala de aula, desde o primeiro dimensionamento de bombas até a conclusão total do projeto. Aos amigos que fiz na empresa, Ana Patrícia, Thiago, Domitila, Nízia, Rosemberg e Marcy que fizeram o ambiente de trabalho ainda mais agradável. Aos engenheiros Sales e Tavares pela paciência e atenção dedicadas ao esclarecer minhas dúvidas.*

*A todos que foram citados acima, meu muito obrigado.*

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>12</b>
<b>2. DESCRIÇÃO DA EMPRESA.....</b>	<b>14</b>
<b>2.1. PETROENG.....</b>	<b>14</b>
<b>2.2. Política do S.G.I.....</b>	<b>14</b>
<b>2.3. Missão da PETROENG.....</b>	<b>15</b>
<b>3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>17</b>
<b>3.1. Propriedades dos fluidos.....</b>	<b>17</b>
3.1.1. Massa específica.....	17
3.1.2. Viscosidade absoluta ou dinâmica.....	17
3.1.3. Viscosidade cinemática.....	18
3.1.4. Pressão de vapor.....	18
<b>3.2. escoamento de fluidos.....</b>	<b>19</b>
3.2.1. Classificação de escoamento.....	19
3.2.1.1. escoamento laminar.....	20
3.2.1.2. escoamento de transição.....	20
3.2.1.3. escoamento turbulento.....	20
3.2.2. Teorema de Bernoulli.....	20
3.2.3. Perda de carga.....	21
3.2.3.1. Perda de carga normal.....	21
3.2.3.2. Perda de carga localizada.....	23
3.2.3.3. Perdas de carga na sucção e recalque de bombas, NPSH e Potência requerida.....	24
<b>3.3. Gás natural.....</b>	<b>26</b>
3.3.1. Definição.....	26
3.3.2. Composição do gás natural.....	26
3.3.3. Contaminantes.....	27
<b>3.4. Recuperação avançada de petróleo.....</b>	<b>28</b>
3.4.1. Método térmico.....	29
3.4.2. Gerador de vapor.....	29
<b>3.5. Controle de processos.....</b>	<b>30</b>
3.5.1. Instrumentação.....	30
3.5.1.1. Classes de instrumentos.....	31

3.5.2. Tipos de controle ( <i>Manual e Automático</i> ) .....	32
3.5.3. Controlador Lógico Programável .....	32
<b>4. ATIVIDADES REALIZADAS .....</b>	<b>34</b>
<b>4.1. Projeto de implantação de gerador de vapor para injeção em poços .....</b>	<b>34</b>
4.1.1. Sistema de abastecimento de água .....	34
4.1.1.1. Sistema de bombeio de produto químico .....	35
Cálculo do diâmetro das tubulações .....	36
Dimensionamento das bombas dosadoras .....	37
Monitoramento e controle do Processo .....	40
4.1.1.2. Sistema de tancagem de água .....	41
Dimensionamento das tubulações .....	42
Perda de carga no filtro .....	43
Dimensionamento das bombas B-01A/B .....	44
Monitoramento e controle do Processo .....	45
4.1.1.3. Sistema de fornecimento de água para o gerador .....	46
Dimensionamento das linhas de sucção e recalque .....	47
Determinação da perda de carga nos filtros .....	47
Dimensionamento das bombas B-02A/B .....	48
Determinação da perda de carga no mangote .....	49
Monitoramento e controle do Processo .....	50
4.1.2. Sistema de alimentação de gás .....	51
4.1.2.1. Dimensionamento das linhas das estações de redução de pressão .....	53
4.1.2.2. Avaliação da formação de condensado e sistema de alívio .....	56
4.1.2.3. Automação e instrumentação .....	57
4.1.2.3. Implantação de sistema de drenagem .....	60
<b>4.1. Outras atividades realizadas .....</b>	<b>61</b>
4.1.1. Utilização de <i>software</i> para simulação .....	61
4.1.2. Elaboração de fluxogramas de Engenharia e de Processos .....	61
4.1.3. Elaboração de documentos .....	61
4.1.4. Determinação de gradiente hidráulico e golpe de aríete .....	62
4.1.5. Revisão de documentos .....	63
<b>5. CONCLUSÕES .....</b>	<b>65</b>
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>68</b>

## Lista de Figuras

Figura 1: Placa de área $S$ imersa em um fluido e submetida a uma força $F$ . .....	17
Figura 2: Balanço de energia em um volume de controle. ....	20
Figura 3: Trecho de tubulação. ....	21
Figura 4: Símbolos de corpos de válvulas de controle. ....	31
Figura 5: Gráfico de perda de carga para filtro do tipo cesto <i>simplex</i> . ....	43
Figura 6: Gráfico da perda de carga para mangote de 3 polegadas .....	50
Figura 7: Saturação do gás na entrada de EV-A. ....	53
Figura 8: Estação de redução de pressão de <i>alta</i> .....	54
Figura 9: Estação redutora de pressão de <i>baixa</i> .....	55
Figura 10: Avaliação de formação de condensado .....	56

## Lista de Tabelas

Tabela 1: Composição típica do gás natural.....	27
Tabela 2: Caracterização do fluido.....	35
Tabela 3: Dados do processo.....	35
Tabela 4: Dados de operação para as bombas dosadoras.....	38
Tabela 5: Levantamento de acidentes na linha de sucção.....	38
Tabela 6: Levantamento de acidentes na linha de descarga.....	38
Tabela 7: Folha de dados da bomba dosadora Z-B-01A/B.....	40
Tabela 8: Dados do processo de tancagem de água.....	41
Tabela 9: Dados de operação do processo de tancagem.....	44
Tabela 10: Levantamento de acidentes na linha de sucção da bomba de abastecimento do tanque.....	44
Tabela 11: Levantamento de acidentes na linha de descarga da bomba de abastecimento do tanque.....	45
Tabela 12: Folha de dados das bombas de abastecimento do tanque.....	45
Tabela 13: dados do processo de abastecimento de água do gerador.....	47
Tabela 14: Resultado do dimensionamento das linhas de abastecimento do gerador.....	47
Tabela 15: Dados de operação para abastecimento do gerador.....	48
Tabela 16: Levantamento de acidentes na linha de sucção da bomba de abastecimento do gerador.....	48
Tabela 17: Levantamento de acidentes na linha de descarga da bomba de abastecimento do gerador.....	49
Tabela 18: Folha de dados das bombas de abastecimento do gerador.....	49
Tabela 19: Corrente de gás de processo.....	52
Tabela 20: Dados da simulação para dimensionamento de linhas de gás.....	55

**FIRMINO, Priscilla Cibelle Oliveira de Souza**– Implantação de gerador de vapor para injeção em poços de petróleo. Relatório de Estágio Supervisionado – PETROENG, Consultoria e projetos LTDA, UFRN, Departamento de Engenharia Química. Natal – RN, Brasil.

**Orientador: Prof. Dr. Jackson Araújo de Oliveira.**

**Co-orientador: Prof. Dr. Gilson Gomes de Medeiros**

---

**Resumo:** O Estágio Supervisionado (DE0537) no curso de graduação em Engenharia Química da UFRN é uma atividade de caráter obrigatório que compreende a inserção inicial do aluno no mercado de trabalho, aplicando para tanto todos os conhecimentos adquiridos em sua formação. Dessa forma, este trabalho descreve as atividades desenvolvidas pela aluna Priscilla Cibelle Oliveira de Souza Firmino, durante o estágio em que realizou na empresa Petroeng Consultoria e Projetos LTDA no período de 13 de maio de 2013 a 13 de outubro de 2013, com carga horária de 660h. Através da orientação dos professores Jackson Araújo de Oliveira e Gilson Gomes de Medeiros e supervisão da eng. Rosemary Silva Oliveira o referido estágio possibilitou a aluna o desenvolvimento de diversas atividades referentes a um engenheiro de processamento, tais como: Dimensionamento de trechos de tubulação; dimensionamento de bombas; cálculo de perda de carga em componentes como filtros, válvulas e carretéis; simulação de processo com auxílio de *software* apropriado; implantação de gerador de vapor; aplicação de instrumentação e controle de processos com avaliações de integridade e segurança; elaboração de memória de cálculo, fluxograma de engenharia e de processos, listas de linhas, folha de dados do processo; caracterização de gás; caracterização de óleo; avaliação de sistema de drenagem; avaliação de sistema de alívio para vasos separadores; determinação de gradientes hidráulicos; avaliação de formação de hidratos; determinação do golpe de Aríete em adutoras; revisão de documentos.

---

**Palavras-chave:** Gerador de vapor, injeção de vapor, Petroeng, controle de processos.

---

---

## ***CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO***

---

---

## 1. INTRODUÇÃO

Este relatório apresenta uma descrição sucinta das atividades desenvolvidas durante o estágio supervisionado obrigatório, seguido da aplicação dos conhecimentos técnicos adquiridos durante o curso de Engenharia Química.

Em cumprimento a regulamentação pedagógica do curso de Engenharia Química da Universidade Federal do Rio Grande do Norte e do Programa de Recursos Humanos de Engenharia Química da Agência Nacional de Petróleo – PRH14 ANP, o estágio curricular obrigatório apresentado neste relatório foi realizado na empresa Petroeng Consultoria de Projetos LTDA, no período de 13 de maio a 13 de outubro de 2013 de modo a integralizar o currículo acadêmico para obtenção do título de graduação em Engenharia Química.

No presente relatório encontra-se exposto o projeto para integralização de estágio intitulado “Implantação de gerador de vapor para injeção em poços de petróleo” onde estão apontadas as referências bibliográficas científicas e técnicas para sua execução. Também pode ser encontrado um resumo sucinto das principais atividades desenvolvidas na empresa que fogem ao escopo do projeto em questão mas que foram necessárias ao desenvolvimento das atividades durante o estágio.

Este relatório está dividido de forma a facilitar a compreensão por parte do leitor no entendimento da execução do estágio e projeto, apresentando-se da seguinte maneira: No capítulo 1 encontra-se uma breve apresentação do que se refere o trabalho e como está organizado. No capítulo 2, pode-se encontrar a descrição da empresa em que o estágio foi realizado, fornecendo ao leitor uma ideia inicial do campo de atuação do estagiário. O capítulo 3, por sua vez apresenta de forma sucinta todo o embasamento teórico para elaboração do projeto. No capítulo 4 encontra-se exposta a metodologia de desenvolvimento das atividades de elaboração do projeto, cálculos, gráficos, tabelas, simulações e fluxogramas desenvolvidos bem como os recursos utilizados para tanto. Ainda neste capítulo é possível conhecer um pouco das demais atividades realizadas durante o estágio que não fazem parte do projeto principal escopo deste relatório. O capítulo 5 apresenta a conclusão do trabalho com os pontos mais pertinentes seguido pelo capítulo 6 que traz as referências bibliográficas.

---

---

***CAPÍTULO 2 – DESCRIÇÃO DA EMPRESA***

---

---

## **2. DESCRIÇÃO DA EMPRESA**

### **2.1. PETROENG**

A PETROENG Consultoria e Projetos Ltda trata-se de uma empresa de engenharia de médio porte, cuja atuação contempla projetos de gerenciamento, planejamento e assistência a montagens industriais, desde o projeto básico até o *start-up*.

A empresa atua há cerca de onze anos no mercado de consultoria e projetos. Possui uma equipe técnica qualificada com experiências em diversos empreendimentos de pequeno, médio e grande porte, tanto no ramo petroquímico, químico, petrolífero como alimentício.

Como principal meta, destaca-se na PETROENG, a qualidade em prestação de serviços aos clientes e por tanto é exigido de seus profissionais prioridades tais como:

- Alto nível de conhecimento técnico;
- Cumprimento de prazos estabelecidos;
- Custos operacionais compatíveis com o mercado.

### **2.2. Política do sistema de gerenciamento integrado**

A PETROENG tem como princípio básico a busca pela melhoria contínua em seus processos, de forma que suas ações são fundamentadas no:

- No atendimento às necessidades e expectativas dos clientes;
- Na valorização de seus recursos humanos;
- Na preservação do meio ambiente e respeito à comunidade;
- No cumprimento das legislações nacionais e outros requisitos legais de Saúde, Segurança Ocupacional e Meio Ambiente aplicáveis aos seus processos;
- No atendimento às expectativas dos cotistas.

### **2.3. Missão da PETROENG**

Fornecer Engenharia Consultiva e Projetos Industriais para os mercados de indústrias químicas, petroquímicas, de petróleo e gás natural, alimentícia e de celulose, contribuindo para o desenvolvimento tecnológico e econômico do País, priorizando a Segurança Industrial e a preservação do Meio Ambiente, gerando com isso emprego e renda.

---

---

***CAPÍTULO 3 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA***

---

---

### 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1. Propriedades dos fluidos

A seguir encontram-se dispostos os principais conceitos referentes às propriedades de maior interesse na caracterização de fluidos.

##### 3.1.1. Massa específica

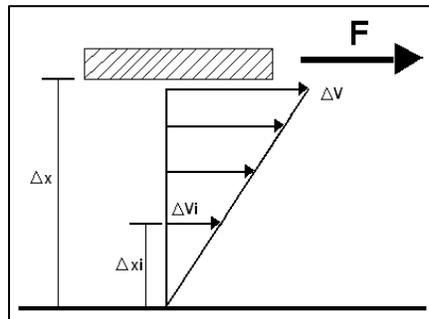
Refere-se à quantidade de massa que ocupa uma unidade de volume. As unidades mais utilizadas são  $\text{kg/m}^3$ ,  $\text{lbm/ft}^3$  e  $\text{slug/ft}^3$ . Por definição:

$$\rho = \left(\frac{m}{V}\right) \quad (1)$$

##### 3.1.2. Viscosidade absoluta ou dinâmica

Conforme definição de Newton, a viscosidade trata-se da resistência oposta pelas camadas líquidas ao escoamento recíproco.

**Figura 1:** Placa de área S imersa em um fluido e submetida a uma força F.



Conforme pode ser observado na figura 1, ao ser aplicada uma força F a esta placa, na direção de cisalhamento ao fluido, ela adquire uma velocidade V arrastando o fluido em contato direto com ela, com a mesma velocidade. Como resultado pode-se constatar que:

$$F \approx S \cdot \frac{\Delta V}{\Delta X} \quad (2)$$

Para se estabelecer a igualdade, é introduzida uma constante, de forma que se obtém a seguinte equação:

$$F = \mu S \cdot \frac{\Delta V}{\Delta X} \quad (3)$$

F é uma força que representa a resistência oposta ao deslocamento da placa, devido ao atrito entre camadas de fluido. À constante inserida nomea-se coeficiente de viscosidade. As unidades mais utilizadas são centipoise (cP), kgf.s/m<sup>2</sup> e lbf.s/ft<sup>2</sup>. Rearranjando (3), tem-se:

$$\tau = \mu \cdot \frac{\Delta V}{\Delta X} \quad (4)$$

Os fluidos que se comportam de acordo com a equação (4) são denominados fluidos newtonianos.

### 3.1.3. Viscosidade cinemática

É a relação entre a viscosidade absoluta  $\mu$  e a massa específica  $\rho$ . As unidades mais utilizadas são m<sup>2</sup>/s, ft<sup>2</sup>/s e centistokes (cSt). Pode ser expressa matematicamente como:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (5)$$

### 3.1.4. Pressão de vapor

É a pressão na qual coexistem as fases líquida e vapor, de forma que quanto maior for a temperatura, maior será a pressão de vapor correspondente (Pv).

## 3.2. Escoamento de fluidos

### 3.2.1. Classificação de escoamento

O deslocamento de um fluido dentro de uma tubulação possui características particulares condicionadas ao movimento das partículas e sentido de deslocamento. O deslocamento de um fluido em uma tubulação pode ser laminar, de transição e turbulento.

O tipo de escoamento, na prática, é caracterizado por um parâmetro adimensional conhecido como número de Reynolds (Re).

$$Re = \frac{\rho DV}{\mu} = \frac{V \times D}{\nu} \quad (6)$$

Em que,

Re: número de Reynolds, adimensional;

$\rho$ : massa específica do fluido, kg/m<sup>3</sup>;

D: diâmetro interno do tubo, m;

V: velocidade média de escoamento, m/s;

$\mu$ : viscosidade absoluta, Pa.s;

$\nu$ : viscosidade cinemática do fluido em escoamento.

A velocidade média de escoamento utilizada no cálculo do número de Reynolds pode ser obtida através da vazão e diâmetro interno da tubulação.

$$V = \frac{Q}{\pi \frac{D^2}{4}} \quad (7)$$

Em que,

V: velocidade média de escoamento, m/s;

Q: vazão, m<sup>3</sup>/s;

D: diâmetro, m;

A: área ( $\pi \frac{D^2}{4}$ ).

### 3.2.1.1. Escoamento laminar

O escoamento é dito laminar ( $Re < 2000$ ) quando todos os filetes de um líquido encontram-se alinhados paralelamente entre si e as velocidades em cada ponto não variam em direção e grandeza.

### 3.2.1.2. Escoamento de transição

Representa a passagem do escoamento laminar para o turbulento ou vice-versa.  $4000 > Re > 2000$ .

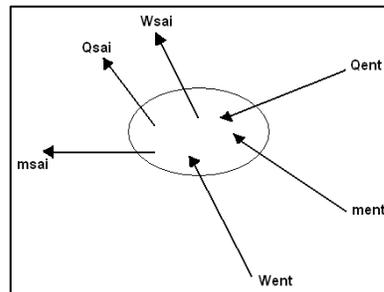
### 3.2.1.3. Escoamento turbulento

O escoamento é dito turbulento ( $Re > 4000$ ) quando todos os filetes de um líquido se movem em todas as direções com velocidades distintas em direção e módulo.

## 3.2.2. Teorema de Bernoulli

O teorema de Bernoulli é um caso particular do princípio da conservação de energia. Considerando-se o volume de controle.

Figura 2: Balanço de energia em um volume de controle.



Considerando-se que há apenas uma entrada (índice 1) e uma saída (índice 2), que o sistema é sem atrito, não troca trabalho, inexistente bomba ou turbina entre a entrada e a saída e que o fluido é incompressível, o balanço de energia neste volume de controle pode ser representado pela seguinte equação.

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} + z_1 g = \frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} + z_2 g \quad (8)$$

$Z_1$  e  $Z_2$ : altura estática dos pontos inicial e final, respectivamente, m;

$P_1$  e  $P_2$ : pressão nos pontos inicial e final, respectivamente, Pa;

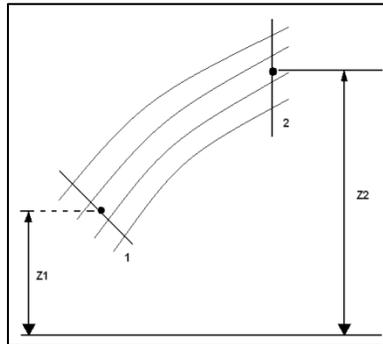
$V_1$  e  $V_2$ : velocidade nos pontos inicial e final, respectivamente, m/s;

$\rho$ : massa específica, kg/m<sup>3</sup>;

$g$ : aceleração da gravidade, 9,81 m/s<sup>2</sup>;

$h_f$  : perda de carga normal, m.

**Figura 3: Trecho de tubulação.**



### 3.2.3. Perda de carga

As perdas de carga representam em um sistema de escoamento quedas de pressões que são sofridas devido ao atrito da tubulação, perda de carga normal, e as que são causadas por entradas, acessórios e variações na área da seção, perdas localizadas.

#### 3.2.3.1. Perda de carga normal

A perda de carga normal é modelada matematicamente de acordo com o regime de escoamento. No regime laminar, a perda de carga pode ser demonstrada e obtida através de complexas equações diferenciais. Resultando na seguinte equação:

$$h_f = 32v \times \frac{L}{gD^2} \times V \quad (9)$$

Em que,

$h_f$  : perda de carga normal, m;

$v$ : viscosidade cinemática do fluido na temperatura de escoamento,  $m^2/s$ ;

$L$ : comprimento da tubulação, m;

$D$ : diâmetro interno do tubo, m;

$g$ : aceleração da gravidade,  $9,81 m/s^2$ ;

$V$ : velocidade média de escoamento, m/s.

Para o regime turbulento, a perda de carga normal depende da rugosidade relativa da tubulação. De forma que:

$$h_f = f \times \frac{L}{D} \times \frac{V^2}{2g} \quad (10)$$

Onde,

$h_f$  : perda de carga normal, m;

$f$ : coeficiente de atrito, adimensional;

$L$ : comprimento da tubulação, m;

$D$ : diâmetro interno do tubo, m;

$g$ : aceleração da gravidade,  $9,81 m/s^2$ ;

$V$ : velocidade média de escoamento, m/s.

O fator de atrito ( $f$ ) pode ser obtido graficamente ou por meio de equações experimentais, como a que segue cujo ajuste pode ser para:  $5000 < Re < 10^8$  e  $10^{-6} < \varepsilon/d < 10^{-2}$ .

$$f = \frac{1,325}{\left[ \ln\left(\frac{\varepsilon/d}{3,7}\right) + \left(\frac{5,74}{\text{Re}^{0,9}}\right) \right]^2} \quad (11)$$

Em que,

f: coeficiente de atrito, adimensional;

$\varepsilon$ : rugosidade absoluta da tubulação, m;

d: diâmetro interno do tubo, m;

Re: número de Reynolds, adimensional.

### 3.2.3.2. Perda de carga localizada

As perdas de carga localizadas são devidas aos acessórios, curvas ou mudanças súbitas de área. Estas perdas são relativamente menores, para longos trechos e são fornecidas em comprimento equivalente da tubulação. Matematicamente, podem ser determinadas de duas maneiras.

$$h_{f_m} = K \frac{V^2}{2} \quad (12)$$

$$h_{f_m} = f \frac{L_e}{D} \frac{V^2}{2} \quad (13)$$

Em que,

$h_{fm}$  : perda de carga localizada, m;

K: coeficiente obtido experimentalmente para cada situação, adimensional;

$L_e$ : comprimento da equivalente, m;

D: diâmetro interno do tubo, m;

V: velocidade média de escoamento, m/s.

### 3.2.3.3. Perdas de carga na sucção e recalque de bombas, NPSH e Potência requerida

A pressão de sucção é calculada pela seguinte equação:

$$P_s = \rho \times g \times h_s \frac{v^2}{2} \quad (14)$$

Em que,

$P_s$ : Pressão de sucção, em Pa (98066,5 Pa = 1 kgf/cm<sup>2</sup>);

$\rho$ : Massa específica nas condições de operação, em kg/m<sup>3</sup>;

$g$ : Aceleração da gravidade, em m/s<sup>2</sup>;

$h_s$ : Altura manométrica de sucção, em m.

E a pressão de descarga:

$$P_d = \rho \times g \times h_d \quad (15)$$

Em que,

$P_d$ : Pressão de descarga, em Pa (98066,5 Pa = 1 kgf/cm<sup>2</sup>);

$\rho$ : Massa específica nas condições de operação, em kg/m<sup>3</sup>;

$h_d$ : Altura manométrica de descarga, em m.

A altura manométrica de sucção, para reservatório de sucção aberto para a atmosfera, pode ser calculada da seguinte maneira:

$$h_s = Z_s - h_{fs} \quad (16)$$

Onde,

$h_s$ : Altura manométrica de sucção, em m;

$Z_s$ : Altura estática de sucção (desnível da tubulação + nível de líquido), em m;

$h_{fs}$ : Perda de carga nas linhas e acessórios da sucção, em m.

A altura manométrica de descarga, para reservatório de recalque aberto para atmosfera pode ser calculada pela seguinte equação:

$$h_d = Z_d + h_{fd} \quad (17)$$

Em que,

$h_d$ : Altura manométrica de descarga, em m;

$Z_d$ : Altura estática de recalque (desnível da tubulação), em m;

$h_{fd}$ : Perda de carga nas linhas e acessórios da descarga, em m.

A altura manométrica total (H) é a diferença entre a altura manométrica de descarga e a de sucção:

$$H = h_d - h_s \quad (18)$$

Onde,

H: Altura manométrica total, em m.

O NPSH disponível pode ser obtido a partir da seguinte equação:

$$NPSH_d = h_s + \frac{P_a - P_v}{\gamma} - f \quad (19)$$

em que,

$P_a$ : Pressão atmosférica local, em Pa;

$P_v$ : Pressão de vapor na temperatura de operação, em Pa;

$\gamma$ : Peso específico, em kgf/m<sup>3</sup>;

f: Fator de segurança (1 m).

A potência absoluta para bomba deve calculada por:

$$P = \frac{\gamma QH}{75\eta} \quad (20)$$

Em que:

P: Potência absoluta, em CV;

Q: Vazão, em m<sup>3</sup>/s;

$\gamma$ : Peso específico, em kgf/m<sup>3</sup>;

H: Altura manométrica total, em m.

### 3.3. Gás natural

#### 3.3.1. Definição

Gás Natural é por definição “todo hidrocarboneto que permaneça em estado gasoso nas condições atmosféricas normais, extraído diretamente a partir de reservatórios petrolíferos ou gaseíferos, incluindo gases úmidos, secos, processados e gases raros.” – LEI Nº 9.478/97.

O gás natural bruto compreende uma mistura de hidrocarbonetos que abrange, desde a menor fração, como o metano, até o hexano. O gás natural apresenta pequenas quantidades de componentes diluentes como o nitrogênio e o vapor de água bem como contaminantes (gás sulfídrico e dióxido de carbono) (Thomas *ET al*, 2001).

#### 3.3.2. Composição do gás natural

A composição do gás natural bruto é função de diversos fatores naturais que determinam o seu processo de formação e as condições de acumulação de seu reservatório de origem.

O gás natural como encontrado na natureza é uma mistura variada de hidrocarbonetos gasosos cuja composição principal é o Metano. O gás natural não associado (gás livre de óleo) apresenta os maiores teores de Metano, enquanto o gás natural associado (está em companhia do óleo no reservatório) apresenta proporções mais significativas de Etano, Propano, Butano e hidrocarbonetos mais pesados.

Além dos hidrocarbonetos fazem parte da composição do gás natural, este contém também o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), o nitrogênio ( $\text{N}_2$ ), hidrogênio sulfurado ( $\text{H}_2\text{S}$ ), Água ( $\text{H}_2\text{O}$ ), ácido clorídrico ( $\text{HCl}$ ) e metanol (bastante raros) e impurezas mecânicas. A presença e proporção destes elementos dependem essencialmente de diversos fatores tais como a localização do reservatório, se em terra ou no mar, sua condição de associado ou não, do tipo de matéria orgânica ou mistura do qual se originou, da geologia do solo bem como do tipo de rocha onde se encontra o reservatório. A seguir, encontra-se disposta uma composição típica para o gás natural (Natural Gas Engineering Handbook apud MEDEIROS, 2011).

**Tabela 1:** Composição típica do gás natural.

<b>Componentes</b>	<b>%molar</b>
Metano	84,07
Etano	5,86
Propano	2,20
i-butano	0,35
N-butano	0,58
i-pentano	0,27
n-pentano	0,25
Hexano	0,28
Heptanos e pesados	0,76
Dióxido de carbono	1,30
Sulfeto de hidrogênio	0,63
Nitrogênio	3,45
Total	100

*Fonte: Natural Gas Engineering Handbook*

### 3.3.3. Contaminantes

Conforme observado no item anterior, o gás natural pode conter em sua composição água, sulfeto de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{S}$ ), gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ), nitrogênio ( $\text{N}_2$ ), hélio ( $\text{He}$ ) ou outros componentes que podem ser contaminantes e/ou diluentes. Dessa forma, assim que é retirado do poço, o gás natural raramente é satisfatório para transporte em tubulação ou para ser usado comercialmente.

A presença de água e partículas sólidas (areia, óxido de ferro, fragmentos de partículas de catalisadores, por exemplo) presentes no combustível implica na redução de seu poder calorífico, devido aos inertes e à necessidade de calor adicional para a vaporização da água. Além disso, é responsável pelos seguintes problemas:

- Incrustações em linhas e instrumentos;
- Entupimentos de filtros e bicos de queimadores;
- Erosão de bicos de queimadores, rotores de bombas, instrumentos em geral;
- Produção de fagulhas e instabilidade de chama.

No caso do enxofre, quando este se encontra nos combustíveis, além de acarretar problemas de poluição devidos ao lançamento de óxidos de enxofre (SOx) na atmosfera, são a principal causa dos problemas de corrosão nas regiões frias de caldeiras (ventilador, chaminé, pré-aquecedor de ar, chaparia e tubulação em geral).

O gás carbônico também é removido visando impedir a corrosão destrutiva. Este pode ser injetado nos reservatórios de óleo cru a fim de aumentar a recuperação de óleo. Um pouco de hélio é eventualmente extraído, porém suas propriedades são as de um gás inerte.

O gás natural para sistemas de distribuição comerciais deve estar quase que completamente composto por metano e etano, com umidade e contaminantes removidos ou reduzidos a concentrações muito baixas. Existem exigências que impõem parâmetros de especificação requeridos para o sistema de produção, processamento e distribuição do gás natural, conforme se mostra a seguir.

### **3.4. Recuperação avançada de petróleo**

Durante muito tempo, a indústria petrolífera considerou apenas três etapas de recuperação: primária, secundária e terciária. Entretanto por vezes na produção em reservatório, estas etapas não são seguidas na ordem que se apresentam, para tanto fora estabelecido o termo “Recuperação Avançada de Petróleo” (ou “*Improved Oil Recovery*” – IOR) a fim de revitalizar a atividade que estava desgastada em virtude do baixo preço do petróleo e de fracassos técnicos.

As atividades de IOR englobam:

- Injeção de água;
- Injeção de gás;
- Métodos térmicos – Injeção de vapor, combustão *in situ*;
- Métodos químicos – Injeção de polímeros, injeção de tensoativos e Injeção de solução alcalina.

### 3.4.1. Método térmico

O ponto de partida para o desenvolvimento dos métodos de recuperação avançada foi a constatação de que com o aquecimento, o óleo tem sua viscosidade diminuída (Thomas *ET al.*, 2001).

A injeção de fluidos quentes utiliza-se do calor gerado na superfície fazendo com que este seja transportado para o interior da formação através de um fluido.

A injeção de vapor é um método bastante eficiente para a recuperação de petróleo pesado. O vapor injetado tem a vantagem de ao condensar aquecer o petróleo, diminuindo muito sua viscosidade e de muito facilitando seu deslocamento.

### 3.4.2. Gerador de vapor

O gerador de vapor é um dispositivo utilizado para produzir vapor aplicando energia térmica à água. Um gerador de vapor é uma caldeira somada a um superaquecedor que se diferencia das caldeiras usuais por seu tamanho e complexidade.

Vapor superaquecido é produzido e utilizado para geração de energia elétrica ou mecânica em ciclos termodinâmicos, e neste caso a limitação de temperaturas de trabalho fica por conta dos materiais de construção empregados. Em utilização industrial, poderíamos arbitrar uma classificação de geradores de vapor em relação a pressão de trabalho:

- Baixa pressão: até 10 kgf/cm<sup>2</sup>
- Média pressão: de 11 a 40 kgf/cm<sup>2</sup>
- Alta pressão: maior que 40 kgf/cm<sup>2</sup>

### **3.5. Controle de processos**

Os processos químicos são naturalmente "dinâmicos", ou seja, variam de forma contínua com o tempo, seja por interferências externas ou por mudanças na operação, sejam elas desejáveis ou não. Sendo assim, para alcançar os objetivos básicos da operação de um processo químico há a necessidade de um monitoramento de certas variáveis e tomada de decisões em tempo hábil para manter o processo funcionando conforme previsto. As tarefas de "monitoramento" e "tomada de decisões" compreendem um sistema de controle.

Controlar um processo significa atuar sobre ele ou sobre as condições a que está sujeito almejando um objetivo pré-definido. De forma que a grande preocupação do controle de processos é dominar a dinâmica dos processos a fim de que esta atenda as especificações do produto em níveis econômicos, esteja dentro dos padrões de segurança e obedeça as regras de regulamentação ambiental.

Para que todos estes critérios possam atendidos, qualquer tipo de sistema de controle possui três elementos principais: sensor, controlador e elemento final. Os sensores permitem a leitura das condições de processo. O controlador avalia as informações obtidas dos sensores e realiza decisões para que o processo continue funcionando sobre as condições pré-definidas. O elemento final de controle manipula de forma real o que acontece na linha. Por exemplo, os elementos finais de controle podem ser válvulas controladas eletricamente ou bombas de poço que partem automaticamente tão logo se eleve o nível de um tanque. De forma que estes parâmetros de monitoramento que baseiam-se em medidas obtidas pelos instrumentos presentes ao longo da planta de produção. Estes instrumentos são identificados na planta pelo operador e seguem padrões estabelecidos pela ANSI/ISA-5.1-2009.

#### **3.5.1. Instrumentação**

De acordo com a norma ANSI/ISA-5.1-2009, a instrumentação pretende atender os procedimentos diferentes de vários usuários que precisam identificar e graficamente equipamentos e sistemas de medição e controle.

Em todos os processos químicos é indispensável se controlar e manter constantes as principais variáveis, tais como pressão, nível, vazão, temperatura, pH, condutividade,

velocidade, umidade, etc. Os instrumentos de medição e controle permitem manter e controlar estas variáveis em condições mais adequadas/precisas do que se elas fossem controladas manualmente por um operador (BEGA *ET al*, 2011).

### 3.5.1.1. Classes de instrumentos

Em instalações industriais encontram-se arranjos complexos de instrumentos de medição e controle. Para compreender de maneira simplificada suas funções, torna-se necessário analisá-los através de uma classificação adequada. Encontra-se disposta a seguir a classificação para os tipos de instrumentos que serão escopo deste trabalho.

- Instrumentos indicadores: dispõem de indicador em escala graduada, na qual se pode ler o valor da variável medida/ controlada;
- Elementos primários: são os instrumentos que encontram-se em contato direto com a variável medida/controlada;
- Transmissores: são os instrumentos que detectam as mudanças na variável analisada por meio do respectivo elemento primário e transmitem-na a distancia;
- Controladores: são os instrumentos que comparam o valor da variável medida/controlada com o valor desejado e realizam a correção na variável manipulada.

Alguns exemplos de representação de instrumentos encontram-se apresentados na figura a seguir. Os padrões de nomenclatura estão dispostos no anexo 1.

**Figura 4:** Símbolos de corpos de válvulas de controle.

 Símbolo geral	 Angular
 Borboleta	 Esfera

### 3.5.2. Tipos de controle (*Manual e Automático*)

Um sistema de controle manual pode ser entendido basicamente como aquele em que as decisões são tomadas pelo operador do sistema, baseado em alguma amostragem de variável local. É também o operador quem efetua a modificação do sistema de maneira manual.

No sistema de controle automático, o operador é substituído por um instrumento que possui as condições ideais de operações, conhecidas como *set-point*. Ao realizar a medição, o instrumento compara os dados obtidos aos valores do *set-point* e caso haja discrepância o sistema possui autonomia para realizar as modificações necessárias no sistema para que este retorne a situação ideal.

### 3.5.3. Controlador Lógico Programável

O controlador lógico programável (CLP) trata-se de um equipamento de controle multiprocessado, criado inicialmente para efetuar de maneira específica o controle lógico de variáveis discretas, e atualmente usado para praticamente todos os tipos de controle (BEGA, 2011).

O CLP é constituído principalmente de módulos, ou cartões, de entrada e saída específicos, onde estão conectados os sinais elétricos de contatos provenientes do campo, tais como válvulas abertas/fechadas, motores ligados/desligados, presença/ausência de chama. Este dispositivo opera através de um ciclo examinando os sinais de entrada do processo e executando sobre eles instruções lógicas.

---

---

## ***CAPÍTULO 4 – ATIVIDADES REALIZADAS***

---

---

## **4. ATIVIDADES REALIZADAS**

### **4.1. Projeto de implantação de gerador de vapor para injeção em poços**

A Estação de Geração de Vapor EV-A será implantada como uma estação de vapor fixa através da instalação de um gerador de vapor GV-01 com capacidade de geração de vapor de 25 MMBTU/h para injeção em poços de petróleo. Este vapor é obtido por GV-01 através do aquecimento de água já tratada e livre de oxigênio com a queima de gás natural. A água tratada recebe a injeção de um produto químico para a captura de oxigênio antes de ser injetada no gerador de vapor GV-01. Para melhor compreensão do processo necessário à injeção de vapor nos poços de petróleo, o desenvolvimento deste trabalho divide-se em 4 partes:

- Sistema de abastecimento de água;
- Sistema de suprimento de gás;
- Sistema de alívio do separador;
- Sistema de drenagem.

#### **4.1.1. Sistema de abastecimento de água**

A estação de vapor EV-A não possuirá um sistema de tratamento de água para alimentação dos geradores de vapor. Entretanto receberá água já tratada transferida através de uma adutora a ser construída.

Para atender a antecipação do gerador, até a construção e implantação da adutora que irá abastecê-lo, será projetado um sistema de abastecimento de água para o gerador GV-01, composto por dois tanques de 60m<sup>3</sup>, cada, e duas bombas de alimentação do gerador sendo uma reserva. Os tanques de água serão abastecidos por carretas e o descarregamento delas será feito por duas bombas centrífugas, sendo uma em operação e a outra reserva. Como o transporte e armazenamento da água mantém contato com oxigênio, será injetado na descarga das bombas de abastecimento do gerador GV-01 um produto químico sequestrante de oxigênio para remover o oxigênio da água, de forma a inibir o processo de corrosão.

#### 4.1.1.1. Sistema de bombeio de produto químico

Conforme supracitado, a água deve necessariamente estar livre de oxigênio e portanto, deve receber um produto químico<sup>1</sup> injetado diretamente na linha que segue para o gerador. Com isso, o sistema de injeção de produto químico é composto por um tanque (TQ-03) que irá armazenar o sequestrante de oxigênio e por duas bombas dosadoras (ZB-01A/B), sendo uma reserva. A premissa de dimensionamento é a finalização do tratamento de águas disponibilizando produto químico a uma vazão de 6 L/d e a pressão de descarga deve ser de 2,5 kgf/cm<sup>2</sup>.

O fluido bombeado trata-se de bissulfito de amônio (NH<sub>4</sub>HSO<sub>3</sub>) a 35 °C, o qual permanece alocado em TQ-03. A caracterização do fluido e os dados do processo encontram-se a seguir.

**Tabela 2:** Caracterização do fluido.

Descrição	Valores	Unidade
Fluido	Bissulfito de Amônio	-
Massa específica do fluido	1330 a 1420	g/l
Pressão de vapor	35,0	mmHg
Viscosidade (21 °C)	30	cP

*Fonte: Ficha de informações de segurança de produtos químicos, NewChem.*

**Tabela 3:** Dados do processo.

Descrição	Valores	Unidade
Temperatura de Operação	35	°C
Pressão manométrica no ponto de descarga (Descarga das bombas de abastecimento do GV-01)	3,15	kgf/cm <sup>2</sup>
Vazão	6,0	L/d

<sup>1</sup> O produto químico foi pré-estabelecido pelo cliente do projeto, devido a já possuir o material em estoque.

Para obtenção dos valores de massa específica, pressão de vapor e viscosidade na temperatura de operação, utilizou-se o simulador *Aspen Hysys v. 7.2* tendo como parâmetro base as propriedades físico-químicas fornecidas na ficha técnica do produto<sup>2</sup>.

Nesta etapa do projeto, é necessário dimensionar as linhas de corrente, as bombas dosadoras do sequestrante de oxigênio.

Para fins de segurança e de dados mais conservativos, foram feitas as seguintes considerações:

- Margem de 10% a mais no valor da vazão de operação;
- Margem de 15% para incertezas devidas ao comprimento da tubulação e outros acidentes;
- Margem de segurança no NPSH disponível de 1m;
- Admite altura manométrica de sucção de (metros de coluna de líquido) e de descarga de 2,0 mcl;
- Rendimento de 70% para bomba.

### Cálculo do diâmetro das tubulações

#### Diâmetro da linha de sucção

$$A = \frac{Q}{v} = \frac{0,00000007 [m^3 / s]}{1,0 [m / s]} = 0,00000007 m^2$$

$$D = \left( \frac{4A}{\pi} \right)^{0,5} = \left( \frac{4 \times 0,00000007 m^2}{\pi} \right)^{0,5} = 0,000944069 m \rightarrow 0,000944069 m \times 39,37 [in / m] = 0,0372 in$$

Portanto, o diâmetro nominal mínimo obtido para o trecho de sucção deve ser de ½ polegada.

<sup>2</sup> A ficha técnica utilizada para o bissulfito de amônio foi obtida do fabricante *NewChem*, sendo aproveitada apenas como base para cálculos. A ficha técnica pode ser vista no anexo 2.

### Diâmetro da linha de descarga

$$A = \frac{Q}{v} = \frac{0,00000007 [m^3 / s]}{2,0 [m / s]} = 0,000000035 m^2$$

$$D = \left( \frac{4A}{\pi} \right)^{0,5} = \left( \frac{4 \times 0,000000035 m^2}{\pi} \right)^{0,5} = 0,0002111 m \rightarrow 0,0002111 m \times 39,37 [in / m] = 0,0083 in$$

Logo, com o diâmetro encontrado, deve-se estabelecer um diâmetro nominal que obedeça ao diâmetro mínimo calculado e aos valores comercialmente usuais. O menor diâmetro comercialmente utilizado neste tipo e tubulação é o de ½ polegada, o qual contempla perfeitamente o valor mínimo calculado.

Conforme observado, o dimensionamento das tubulações de sucção e descarga foi realizado prevendo-se velocidades máximas de 1,0 m/s e 2,0 m/s, respectivamente conforme recomendado pelo *American Petroleum Institute: Recommended Practice for Design and Installation of Offshore Production Platform Pipe Systems*.

De posse dos valores de diâmetro calculados e sabendo-se o tipo de fluido que será deslocado, o cliente possui documentos que classificam o *Schedule* (Sch). Este parâmetro determina os valores de diâmetros interno e externo de uma tubulação de acordo com o material de que é constituída.

Para os trechos avaliados, a especificação foi material de aço inox/ Sch 40S.

Para Sch 40S, tem-se um diâmetro interno que irá representar o bocal de sucção e descarga da bomba, no valor de 0,0158m (CRANE,1988).

### **Dimensionamento das bombas dosadoras**

No dimensionamento das bombas dosadoras, foram feitas as seguintes análises, conforme isométrico<sup>3</sup> fornecido pelo cliente. A seguir, encontram-se também os dados de operação.

---

<sup>3</sup> O desenho da perspectiva isométrica é baseado num sistema de três semirretas que têm o mesmo ponto de origem e formam entre si três ângulos de 120°.

**Tabela 4:** Dados de operação para as bombas dosadoras

<b>Variável</b>	<b>Valores</b>
Pressão absoluta no vaso de sucção	(kgf/cm <sup>2</sup> ) 1,03
Pressão absoluta no vaso de descarga	(kgf/cm <sup>2</sup> ) 3,53
Altura estática de sucção	(mcl) 0,00
Altura estática de recalque	(mcl) 0,00
Nível do Vaso de sucção	(mcl) 0,00
Nível do Vaso ou Equipamento na descarga	(mcl) 2,00

**Tabela 5:** Levantamento de acidentes na linha de sucção.

<b>Acidente</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Comprimento Equivalente (m)</b>
Válvula esfera	1	0,0
Tê direto	1	0,3
Tê ramal	3	3,3
Entrada	1	0,6
Saída	1	1,2
Comprimento Eq. Total (m)		5,5
Comprimento reto total (m)		10,0
Comprimento Total (m)		15,5

**Tabela 6:** Levantamento de acidentes na linha de descarga.

<b>Acidente</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Comprimento Equivalente (m)</b>
Válvula esfera	1	0,0
Val. Retenção	1	1,6
Tê direto	3	0,9
Tê ramal	2	2,2
Entrada	1	0,6
Saída	2	2,5
Comprimento Eq. Total (m)		7,9
Comprimento reto total (m)		20,0
Comprimento Total (m)		27,9

Com os diâmetros de sucção e descarga, utilizando a equação 07, calculou-se a área de transferência, a velocidade efetiva de deslocamento do fluido para enfim determinar o tipo de escoamento.

$$A = \frac{\pi \times (15,8)^2}{4000000} = 0,0002 \text{ m}^2$$

$$V = \frac{0,006 \times 3600}{0,0002} = 0,01 \text{ m/s}$$

A equação 06 permite então determinar o valor de Reynolds e o tipo de regime.

$$Re = 5,9095 \therefore \text{Regime laminar.}$$

Para  $Re < 2300$ , o fator de atrito foi calculado da seguinte maneira:

$$f = \frac{64}{Re} = 10,8299$$

De acordo com a equação 09,

$$h_f = 0,04 \text{ mcl}$$

Para a linha de descarga, os passos anteriores foram repetidos. De forma a se obter um regime também laminar com a seguinte perda de carga:

$$h_f = 0,07 \text{ mcl}$$

Com as equações 14, 15, 16, 17 e 18 foram calculadas as demais perdas para linha de sucção e descarga obtendo-se com as equações 19 e 20 os valores de NPSH e potência, respectivamente.

Na PETROENG, todos os cálculos aqui demonstrados eram obtidos de forma dinâmica através de uma planilha iterativa disposta em um arquivo Excel© 2007 – ver anexo 3. De forma que para o cliente é gerada uma folha de dados (FD) da bomba, conforme pode ser visto na tabela 6.

**Tabela 7:** Folha de dados da bomba dosadora Z-B-01A/B.

CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO			
LIQUIDO:	BISSULFITO DE AMONIO		
TEMP. NORMAL.....(°C):	35,0	PR.SUCÇÃO (Kg/cm2g):	-0,01
TEMP.PROJETO.....(°C):	35,0	PR.RECALQ.(Kg/cm2g):	3,16
DENSIDADE	1,3200	PRES.DIFER.(Kg/cm2):	3,17
VISCOSIDADE.....(cP):	30,000	ALTURA MANOM. (mcl):	23,98
PRES.DE VAPOR(Kg/cm2A):	0,050	NPSH DISPONÍVEL (m):	6,4
VAZÃO NORMAL....(m3/h):	0,0	EROSÃO / CORROSÃO :	-
VAZÃO DE PROJETO(m3/h):	0,0	POTÊNCIA NO EIXO (BHP)	0,004126

### Monitoramento e controle do Processo

Previendo a segurança do processo, foi projetado para o sistema de injeção de produto químico com monitoramento em todos os seus pontos de risco. Os instrumentos de medição e controle inseridos ao longo das linhas foram alocados de modo a prever o total controle do processo. Os instrumentos serão apresentados munidos de tagueamento (etiquetagem) para identificação. Recomenda-se acompanhar a descrição a seguir observando o anexo 4.

O bissulfito de amônio fica armazenado durante 10 dias no tanque TQ-03 com capacidade de 100 L. TQ-03 deve possuir visor de nível (LG-008) e monitoramento por um transmissor e identificador de nível, LIT-007, com alarme de nível baixo (LAL-007) e alarme de nível muito baixo com *set* 0,5 m. Caso o *set* de nível muito baixo seja atingido, é disparado um intertravamento que desliga a bomba de sucção do produto químico em operação.

O produto químico é succionado por bombas dosadoras a uma pressão manométrica de -0,01 kgf/cm<sup>2</sup> e segue por dois tramos idênticos, sendo um em operação e outro reserva. Estas bombas possuem botoeira local com função liga/desliga (HS-013 para Z-B-01A e HS-018 para ZB-01B). Os motores das bombas funcionam por acionamento elétrico e

possuem indicação local liga, desliga e *status* de falha, XIH-005/XIL-005/XA-005, para ZB-01A, respectivamente e XIH-006/XIL-006/XA-006 para ZB-01B, respectivamente. Estas bombas devem ainda possuir intertravamento que desliga os motores caso sejam atingidos os *sets* de níveis baixos nos tanques TQ-01, TQ-02 (que serão apresentados no sistema de injeção de água) e TQ-03.

Na descarga da bomba, o produto químico segue por uma linha a uma pressão de 3,16 kgf/cm<sup>2</sup>m, esta linha deve apresentar válvulas de alívio (PSV-001A e PSV-001B para ZB-01A e ZB-01B, respectivamente) com *set* de 3,8 kgf/cm<sup>2</sup>m que, caso seja atingido, desvie o fluxo para o novamente para o tanque TQ-03.

O produto químico segue passando por válvulas de retenção e esfera normalmente abertas NA até ser injetado na linha de água. Esta linha deve possuir um manômetro, PI-007A/B, para acompanhamento da pressão local.

#### 4.1.1.2. Sistema de tancagem de água

Conforme já foi abordado no início do capítulo, antecipando a construção da adutora, o fornecimento de água para EV-A será feito por caminhões carreta. O caminhão descarrega água a uma vazão de 60 m<sup>3</sup>/h diretamente na linha de sucção de duas bombas do tipo centrífugas B-01A/B, sendo uma em operação e a outra reserva. A água succionada preenche dois tanques de 60 m<sup>3</sup> cada.

**Tabela 8:** Dados do processo de tancagem de água

Descrição	Valores	Unidade
Fluido	Água	-
Temperatura de Operação	35,0	°C
Massa específica do fluido	999,8	kg/m <sup>3</sup>
Pressão de vapor	0,0563	kgf/cm <sup>2</sup> _a
Viscosidade	0,7165	cP

Devido ao abastecimento de carretas ser intermitente, foi proposto colocar na linha de sucção comum as bombas um filtro tipo cesto *simplex* com o objetivo de reter sedimentos e impurezas sólidas.

Como escopo desta etapa é necessário dimensionar as linhas de passagem de água, e perda de carga no filtro a fim de determinar a pressão no bocal de entrada das bombas e por fim dimensioná-las.

### Dimensionamento das tubulações

#### Diâmetro da linha de sucção

$$A = \frac{Q}{v} = \frac{0,0166666 [m^3 / s]}{1,0 [m / s]} = 0,0166666 m^2$$

$$D = \left( \frac{4A}{\pi} \right)^{0,5} = \left( \frac{4 \times 0,0166666 m^2}{\pi} \right)^{0,5} = 0,1456742 m \rightarrow 0,1456742 m \times 39,37 [in / m] = 5,74 in$$

#### Diâmetro da linha de descarga

$$A = \frac{Q}{v} = \frac{0,0166666 [m^3 / s]}{2,0 [m / s]} = 0,00833333 m^2$$

$$D = \left( \frac{4A}{\pi} \right)^{0,5} = \left( \frac{4 \times 0,00833333 m^2}{\pi} \right)^{0,5} = 0,1030072 m \rightarrow 0,1080347 m \times 39,37 [in / m] = 4,06 in$$

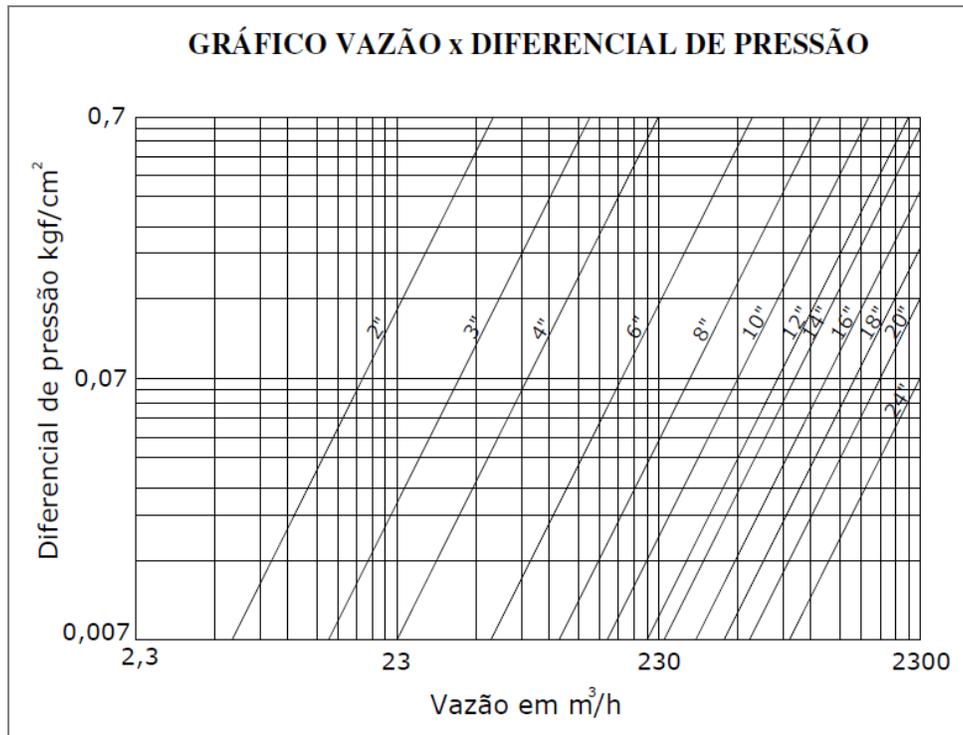
Conforme cálculos, os diâmetro mínimos dos trechos de sucção e descarga serão 6” de 4”, respectivamente e o material será aço carbono Sch40, de acordo com normas do cliente.

### Perda de carga no filtro

Devido ao abastecimento intermitente e a possibilidade da corrente de água conter impurezas, foi prevista a instalação de um filtro do tipo cesto *simplex* de 6 polegadas. A escolha do deste tipo de cesto deve-se ao fato de ser dispensado o uso de quaisquer ferramentas para sua manutenção além de possuir uma construção bastante simples e robusta.

A perda de carga em filtros é obtida através de manuais fornecidos por seus fabricantes<sup>4</sup>. Abaixo segue um modelo de gráfico fornecido por um fabricante para o cálculo da perda de carga considerando abertura de 2 mm.

**Figura 5:** Gráfico de perda de carga para filtro do tipo cesto *simplex*.



Com a vazão 60 m<sup>3</sup> e diâmetro de 6", a perda de carga no filtro é fixada em 0,0088 kgf/cm<sup>2</sup>. Este deverá ser limpo quando sua queda de pressão for de 0,2 kgf/cm<sup>2</sup>.

<sup>4</sup> Foi utilizada ficha técnica do fabricante Purifil. Ver anexo 5.

### Dimensionamento das bombas B-01A/B

As bombas de abastecimento do tanque, diferentemente das dosadoras, trabalham com um fluxo maior de vazão, porém os cálculos são realizados da mesma maneira seja na forma analítica ou através da planilha. Para cálculos mais conservativos, foi admitido altura estática de sucção igual a 0,0 mcl e altura estática de recalque igual a altura do tanque, 6,0 mcl. Sendo assim, serão apresentados apenas os parâmetros e os resultados obtidos.

**Tabela 9:** Dados de operação do processo de tancagem

Variável		Valores
Pressão absoluta no vaso de sucção	(kgf/cm <sup>2</sup> )	1,03
Pressão absoluta no vaso de descarga	(kgf/cm <sup>2</sup> )	1,03
Altura estática de sucção	(mcl)	0,00
Altura estática de recalque	(mcl)	0,00
Nível do Vaso de sucção	(mcl)	0,00
Nível do Vaso ou Equipamento na descarga	(mcl)	6,00

**Tabela 10:** Levantamento de acidentes na linha de sucção da bomba de abastecimento do tanque

Acidente	Quantidade	Comprimento Equivalente (m)
Válvula esfera	2	0,9
Curva 90°	4	12,3
Tê direto	4	12,3
Tê ramal	1	10,8
Entrada	1	6,0
Saída	1	12,0
Comprimento Eq. Total (m)		54,4
Comprimento reto total (m)		10,0
Comprimento Total (m)		64,4

**Tabela 11:** Levantamento de acidentes na linha de descarga da bomba de abastecimento do tanque

Acidente	Quantidade	Comprimento Equivalente (m)
Válvula esfera	3	0,9
Val. Retenção	1	10,2
Tê direto	3	6,1
Tê ramal	1	7,2
Entrada	1	4,0
Saída	1	8,0
Comprimento Eq. Total (m)		36,4
Comprimento reto total (m)		20,0
Comprimento Total (m)		56,4

**Tabela 12:** Folha de dados das bombas de abastecimento do tanque

CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO		
LIQUIDO: <b>ÁGUA</b>		PR.SUCÇÃO (Kg/cm2g): -0,23
TEMP. NORMAL.....(°C): 35,0		PR.RECALQ.(Kg/cm2g): 0,84
TEMP.PROJETO.....(°C): 35,0		PRES.DIFER.(Kg/cm2): 1,07
DENSIDADE 0,9998		ALTURA MANOM. (mcl): 10,69
VISCOSIDADE.....(cP): 0,717		NPSH DISPONÍVEL (m): 6,5
PRES.DE VAPOR(Kg/cm2A): 0,056		EROSÃO / CORROSÃO : -
VAZÃO NORMAL....(m3/h): 60,0		POTÊNCIA NO EIXO 3,3
VAZÃO DE PROJETO(m3/h): 60,0		(BHP)

### Monitoramento e controle do Processo

Visando o monitoramento do sistema de tancagem, foi inserido um manômetro, PI-001, para acompanhamento da pressão local na linha de sucção, imediatamente antes do filtro que possui um indicador e transmissor de pressão diferencial, PDIT-001, com alarme de pressão diferencial alta (PDAH) disponível no supervisório com *set* de 0,2 kgf/cm<sup>2</sup>.

Ao alarmar pressão diferencial alta, o operador deverá providenciar a limpeza do elemento filtrante.

Nas linhas de sucção das bombas existem válvulas esferas normalmente abertas NA favorecendo a passagem do fluido, e drenos com válvulas esfera que devem permanecer normalmente fechadas NF.

As bombas possuem botoeira local, HS-001 e HS-002, com função de liga/desliga para bomba B-01A e B-01B, respectivamente. Os motores das bombas possuem acionamento elétrico e terão indicação de liga, desliga e status de falha, XIH-001, XIL-001 e XA-001 para bomba B-01A, respectivamente, e XIH-002, XIL-002 e XA-002 para bomba B-01B, respectivamente. A utilização do acionamento elétrico para os motores permite a atuação do intertravamento em caso de sinistro para a operação.

Para as linhas de descarga das bombas também optou-se por inserir manômetros, PI-003A para B-01A e PI-003B para B-01B, para acompanhamento de pressão local.

#### **4.1.1.3. Sistema de fornecimento de água para o gerador**

O sistema de fornecimento de água para o gerador GV-01, dentro do processo de geração de vapor é parte fundamental. É nesta etapa que a água de abastecimento irá receber uma injeção de produto químico para então seguir para o gerador. Essa etapa do processo inicia-se na tancagem e finda em GV-01. Detalhamentos gráficos estão disponíveis no anexo 06.

A água para abastecimento do gerador fica armazenada nos tanques TQ-01 e TQ-02 de 60 m<sup>3</sup>. Que irão operar com pressão atmosférica e temperatura de 35°C. A água é succionada a uma vazão de 12 m<sup>3</sup>/h por duas bombas B-02A/B, sendo uma reserva, que possuem cada um deles, a montante, a montante um filtro cesto *simplex*. Seguindo pela linha de recalque, a água passa por um tramo que receberá a linha de produto químico. A água já acrescida do bissulfito é descarregada em um mangote de 180 m que termina na linha de abastecimento do gerador.

Nesta etapa objetiva-se o dimensionamento das linhas, a perda de carga no filtro, o dimensionamento das bombas bem como a perda de carga devido à passagem da água pelo mangote e a do filtro Y. Uma vez que os três primeiros quesitos já foram demonstrados neste trabalho, serão apresentados apenas os resultados obtidos, sendo escopo deste item apenas o cálculo da perda de carga no mangote.

**Tabela 13:** dados do processo de abastecimento de água do gerador.

Descrição	Valores	Unidade
Fluido	Água	-
Temperatura de Operação	35,0	°C
Pressão manométrica no ponto de descarga (gerador)	2,5	kgf/cm <sup>2</sup> .
Massa específica do fluido	999,8	kg/m <sup>3</sup>
Pressão de vapor	0,0563	kgf/cm <sup>2</sup> _a
Viscosidade (cP)	0,7185	cP

### Dimensionamento das linhas de sucção e recalque

As tubulações terão os seguintes diâmetros de sucção e descarga:

**Tabela 14:** Resultado do dimensionamento das linhas de abastecimento do gerador.

Descrição	Origem	Destino	Diâmetro	Material (Sch 80)
Sucção	Tanques de Água	B-02 A/B	3	Aço carbono
Descarga	B-02 A/B	Carretel	3	Aço carbono

### Determinação da perda de carga nos filtros

Para a determinação da perda de carga neste filtros foi utilizado o gráfico da figura 05. Com a vazão 12 m<sup>3</sup>/h e diâmetro de 3", a perda de carga nos filtros é de 0,012 kgf/cm<sup>2</sup>. Este deverá ser limpo quando sua perda de pressão for de 0,2 kgf/cm<sup>2</sup>.

## Dimensionamento das bombas B-02A/B

A folha de dados com o dimensionamento para as bombas está apresentada a seguir.

**Tabela 15:** Dados de operação para abastecimento do gerador

Variável		Valores
Pressão absoluta no vaso de sucção	(kgf/cm <sup>2</sup> )	1,03
Pressão absoluta no vaso de descarga	(kgf/cm <sup>2</sup> )	3,53
Altura estática de sucção	(mcl)	0,00
Altura estática de recalque	(mcl)	0,00
Nível do Vaso de sucção	(mcl)	0,00
Nível do Vaso ou Equipamento na descarga	(mcl)	2,00

**Tabela 16:** Levantamento de acidentes na linha de sucção da bomba de abastecimento do gerador

Acidente	Quantidade	Comprimento Equivalente (m)
Válvula esfera	3	0,4
Curva 90°	4	5,9
Tê direto	4	5,9
Tê ramal	1	5,2
Entrada	1	2,9
Saída	1	5,7
Comprimento Eq. Total (m)		26,0
Comprimento reto total (m)		10,0
Comprimento Total (m)		36,0

**Tabela 17:** Levantamento de acidentes na linha de descarga da bomba de abastecimento do gerador

Acidente	Quantidade	Comprimento Equivalente (m)
Válvula globo	2	50,1
Válvula esfera	1	0,2
Vál.retenção	1	7,4
Curva 90°	4	5,9
Tê direto	2	2,9
Tê ramal	1	5,2
Entrada	1	2,9
Saída	1	5,7
Comprimento Eq. Total (m)		80,3
Comprimento reto total (m)		20,0
Comprimento Total (m)		100,3

**Tabela 18:** Folha de dados das bombas de abastecimento do gerador

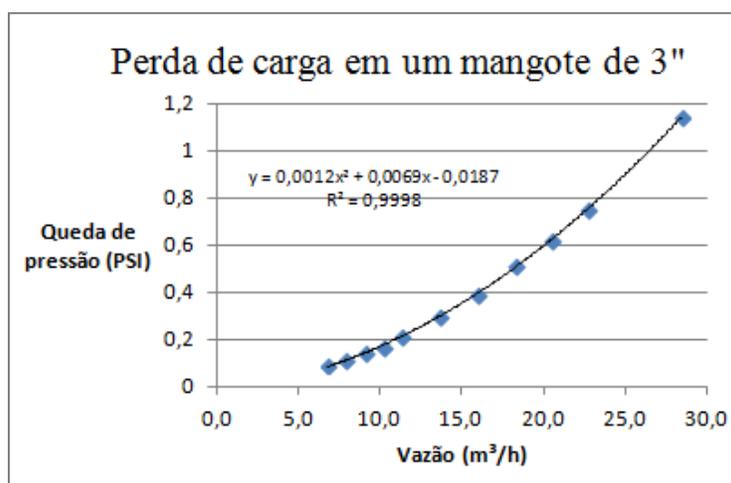
CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO			
LIQUIDO:	ÁGUA		PR.SUCÇÃO (Kg/cm2g): -0,23
TEMP. NORMAL.....(°C):	35,0		PR.RECALQ.(Kg/cm2g): 3,15
TEMP.PROJETO.....(°C):	35,0		PRES.DIFER.(Kg/cm2): 3,39
DENSIDADE	0,9998		ALTURA MANOM. (mcl): 33,88
VISCOSIDADE.....(cP):	0,719		NPSH DISPONÍVEL (m): 6,4
PRES.DE VAPOR(Kg/cm2A):	0,056		EROSÃO / CORROSÃO : -
VAZÃO NORMAL...(m3/h):	12,0		POTÊNCIA NO EIXO (BHP) 2,1
VAZÃO DE PROJETO(m3/h):	12,0		

### Determinação da perda de carga no mangote

A linha de junção de água e produto químico está ligada a um carretel de borracha sintética com rugosidade equivalente a um tubo liso, o qual foi inserido objetivando um aumento do tempo de residência de produto químico.

Para determinação da perda de carga no mangote, assim como feito com os filtros, fora utilizado um tabela fornecida por um fabricante<sup>5</sup> de um material com características equivalentes. Como os dados fornecidos eram apresentados pelo fabricante em forma de tabela, houve a necessidade de utilizar métodos matemáticos de linearização.

**Figura 6:** Gráfico da perda de carga para mangote de 3 polegadas



As perdas de carga fornecidas pela linearização são para trechos de 20 m. Para o trecho de 180 m, a queda de pressão é de 0,15 kgf/cm<sup>2</sup>.

### Monitoramento e controle do Processo

Para o controle do sistema de abastecimento do gerador, aos tanques de armazenamento de água foram adicionados indicadores de nível tipo régua, LI-001 e LI-004, permitindo a visualização local por operadores, transmissor e indicador de nível tipo radar, LIT-002 e LIT-005, com chave de nível muito alto (LSHH-002 e LSHH-005) e nível muito baixo (LSLL-002 e LSLL-005) com *set* de 6,15m e 1,0m, respectivamente.

Caso o *set* de nível baixo seja atingido, será acionado um intertravamento que desliga os motores das bombas B-02A/B. Os tanques possuem ainda transmissor e indicador de nível tipo pressão diferencial, LIT-003 e LIT-006, respectivamente para os tanques TQ-01 e TQ-02.

<sup>5</sup> O material utilizado foi do fabricante da Realflex. Ver anexo 7.

Na saída do tanque deve-se encontrar uma válvula esfera normalmente aberta NA. A linha de sucção do tanque até a bomba possui diâmetro de 3 in e classe de pressão de 150, ou seja, a pressão máxima suportada nesta linha é de 150 psi.

Para o filtro tipo cesto simplex de 3”, o monitoramento é realizado por um indicador e transmissor de pressão diferencial, PDIT-004A/B, com alarme de pressão diferencial alta (PDAH) disponível no supervísório com *set* de 0,2 kgf/cm<sup>2</sup>. Ao alarmar pressão diferencial alta o operador deverá providenciar a limpeza do elemento filtrante.

As bombas B-02A/B possuem botoeira local com função liga-desliga, HS-008 e HS-009, respectivamente. Os motores das bombas funcionam por acionamento elétrico e possuem indicação liga/desliga/status de falha, XIH-003/XIL-003/XA-003 para bomba B-02A e XIH-008/XIL-008/XA-008 para a bomba B-02B.

A linha de descarga que conecta a bomba a um mangote possui diâmetro de 3” e classe de pressão de 150. Nesta linha há um *vent* com válvula esfera que deve permanecer normalmente fechado NF. Deve possuir ainda um manômetro, PI-005A/B, para acompanhamento da pressão local. A água segue para uma linha onde há transmissor indicador de pressão, PIT-006, que conta com alarme de pressão de alta (PAH) e alarme de pressão de baixa (PAL) disponíveis no supervísório com *set* de pressões manométricas de 3,6 kgf/cm<sup>2</sup> e 2,7 kgf/cm<sup>2</sup>, respectivamente. Nesta linha, a água receberá injeção de produto químico para por fim ser lançada num carretel.

No caso destes *sets* serem alcançados, as chaves de baixa e alta pressão (PSL-006 e PSH-006, respectivamente) acionam os intertravamentos que desligam os motores das bombas B-02A/B.

#### **4.1.2. Sistema de alimentação de gás**

Para a produção de vapor, os geradores, como equipamentos térmicos que são, tem por finalidade transformar água no estado líquido em vapor de água, para isso é utilizado calor oriundo da queima de combustíveis. O combustível utilizado em EV-A é o gás natural com título de 80% vindo diretamente do gasoduto a uma vazão de 15000 m<sup>3</sup>/d e pressão manométrica de 70 kgf/cm<sup>2</sup>. A composição do gás fornecida pelo cliente está apresentada a seguir.

**Tabela 19:** Corrente de gás de processo<sup>6</sup>

<b>Características</b>	<b>Resultado</b>	<b>Unidade</b>
Nitrogênio	1,02	% molar
H <sub>2</sub> S	8,00	ppm/v
Metano	76,33	% molar
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	0,13	% molar
Etano	10,21	% molar
Propano	6,44	% molar
Iso-Butano	1,41	% molar
n-butano	2,11	% molar
Iso-pentano	0,61	% molar
n-pentano	0,65	% molar
Decano	0,00	% molar
Heptano	0,20	% molar
Hexano	0,65	% molar
Nonano	0,01	% molar
Octano	0,22	% molar
Oxigênio	0,01	% molar

O sistema de abastecimento de gás consiste em dois estágios de redução de pressão (ERP): Estação de redução de alta pressão e Estação de redução de baixa pressão. A ERP de *alta* deverá ser instalada nas proximidades do gasoduto e deve reduzir a pressão de no máximo 70 para 20 kgf/cm<sup>2</sup>. A ERP de *baixa* deve estar localizada dentro das estações de vapor e deve reduzir a pressão de 20 kgf/cm<sup>2</sup> para uma faixa de 1,5 a 2,5 kgf/cm<sup>2</sup>. Após passagem pelas estações de redução de pressão o gás segue para um vaso separador, cujo dimensionamento não é escopo deste trabalho mas tem como função principal retirar toda fração de líquido da corrente de gás que deve seguir para o gerador.

Na etapa de abastecimento de gás, deve ser previsto o dimensionamento das linhas de passagens do gás por simulação observando o comportamento deste frente às quedas de pressão ao longo do processo, como também avaliar a formação de condensado, o sistema de alívio do vaso separador e por fim projetar o sistema de automação e instrumentação da estação, principalmente no sentido de controlar as pressões nas ERP's.

<sup>6</sup> A folha de dados completa fornecido pelo cliente encontra-se no Anexo 8.

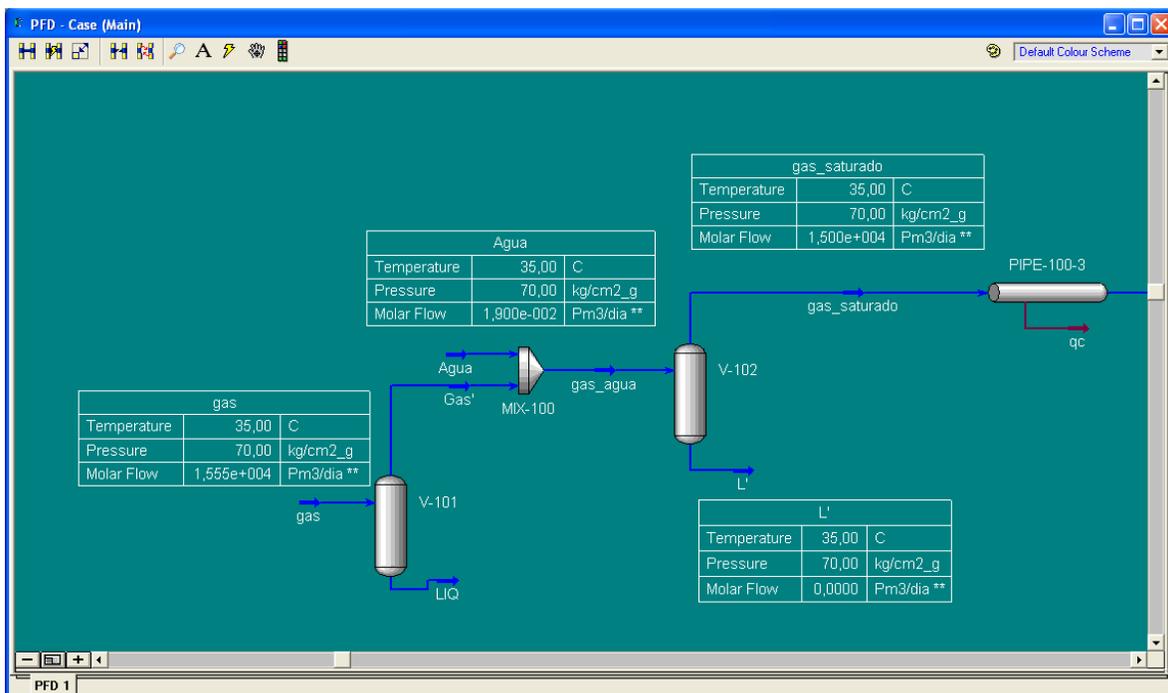
#### 4.1.2.1. Dimensionamento das linhas das estações de redução de pressão

Diferentemente do que é realizado para o escoamento de líquido, o escoamento de um gás deve ser avaliado mais minuciosamente uma vez que são possíveis comportamentos peculiares e que podem comprometer seriamente o processo tais como a formação de hidratos, em caso de altas pressões e baixas temperaturas, e a condensação. O próprio equilíbrio líquido-vapor e o fato do escoamento ser compressível deve ser um parâmetro controlado.

Para tanto, no dimensionamento das linhas de gás utilizou-se como critério a velocidade erosional ou máxima para linha, ou seja a velocidade limite de escoamento e perda de carga para que o gás percorra a tubulação sem que haja rompimento da mesma. A simulação do escoamento do gás foi realizada com o auxílio do software Hysys®.

O primeiro passo para simulação foi saturar o gás com água a mesma temperatura de tal forma que não houvesse vazão de líquido na saída da corrente resultante que segue para separador. O gás já saturado deve sair do gasoduto, conforme informado, e entrar na ERP de alta onde deve ocorrer a primeira avaliação da velocidade erosional para o dimensionamento da tubulação.

**Figura 7:** Saturação do gás na entrada de EV-A



Esta avaliação é feita da seguinte maneira: Inicialmente é estimado um certo diâmetro de teste para a simulação. Ao adentrar no duto, o gás irá se deslocar a uma determinada velocidade para aquele diâmetro definido. De mesma maneira o gás terá uma densidade associada a ele naquelas condições. Com o valor obtido de densidade na entrada do duto, é calculada a velocidade erosional. Caso a velocidade fornecida pelo simulador para o diâmetro escolhido seja menor que a máxima permitida, o diâmetro escolhido inicialmente pode ser utilizado. A velocidade máxima<sup>7</sup> é obtida através da seguinte fórmula:

$$V = \frac{146}{(\rho)^{0,5}}$$

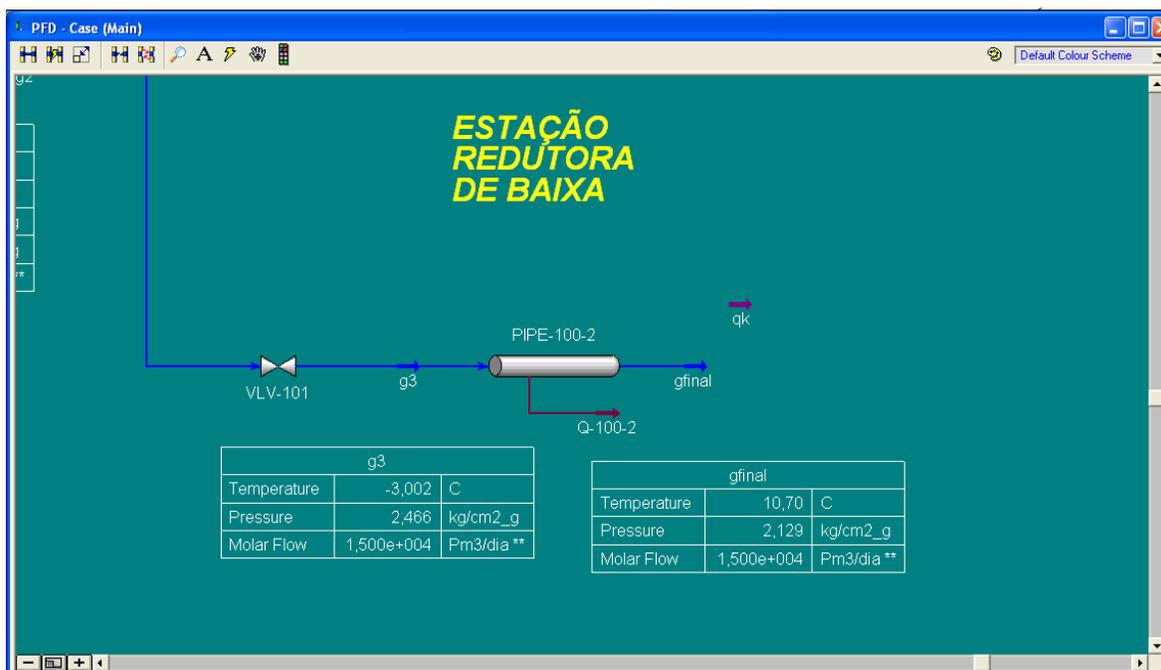
Após este primeiro duto, que representa a entrada da estação, ocorre então a passagem pela ERP de alta, cuja queda de pressão é representada pela presença da válvula. Depois desta passagem, como as condições do gás mudaram, há necessidade de uma nova simulação para a tubulação pós ERP de *alta*. Da mesma maneira, após a passagem pela ERP de *baixa*, que é a ultima avaliação pois é o duto que segue para o gerador.

**Figura 8:** Estação de redução de pressão de *alta*



<sup>7</sup> Valor retirado do Livro Campbel, vol II, constante da bibliografia.

**Figura 9:** Estação redutora de pressão de *baixa*



**Tabela 20:** Dados da simulação para dimensionamento de linhas de gás.

Corrente	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Velocidade da simulação (m/s) <sup>8</sup>	Velocidade Máxima (m/s)
Entrada da ERP <i>alta</i>	80,76	4,32	16,25
Saída da ERP <i>alta</i>			
Entrada da ERP de <i>baixa</i>	17,31	25,54	35,09
Saída da ERP de <i>baixa</i>	3,49	25,00	78,03

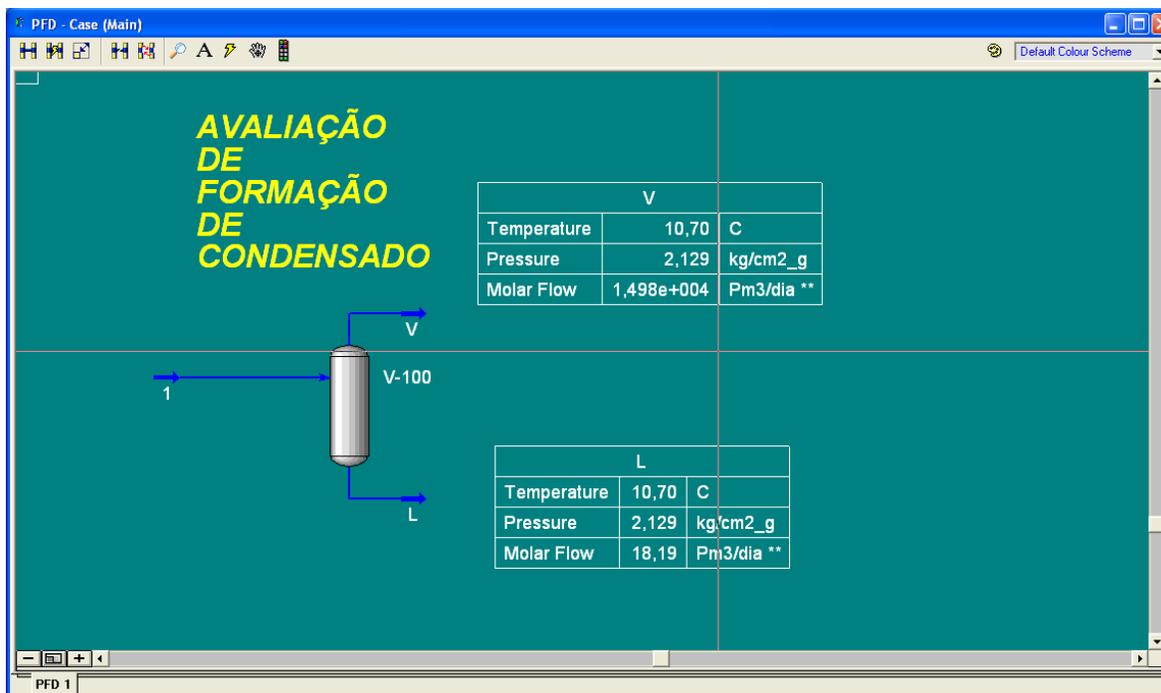
Conforme observado na tabela, nenhum dos valores de velocidade ultrapassa as velocidades máximas permitidas o que viabiliza o uso da tubulação nos diâmetros adequados. Entretanto, para tubulações industriais não é usual a utilização de dutos com um diâmetro de 1 polegada, para tanto aos trechos foi acrescida uma polegada ao diâmetro já utilizado. Lembrando que os dados utilizados para esta avaliação foram os que ofereceram melhores resultados.

<sup>8</sup> Na entrada da ERP de *alta*, diâmetro de 1 polegada, Sch 80. Na saída da ERP de *alta*, entrada da ERP de *baixa* diâmetro de 1 polegada, Sch 40. Na saída da ERP de *baixa* diâmetro de 2 polegadas, Sch 40. Para 1 polegada, o simulador não permitia resolução.

#### 4.1.2.2. Avaliação da formação de condensado e sistema de alívio

Conforme já foi citado no item 4.1.2. o dimensionamento do vaso depurador não é escopo deste trabalho, entretanto foi feita uma avaliação de formação de condensado na saída da ERP de *baixa* e a do melhor sistema de alívio para o vaso.

**Figura 10:** Avaliação de formação de condensado



As simulações feitas apontaram pouca condensação do gás nas correntes, cerca de 18,0 m<sup>3</sup>/d, em relação à vazão total de gás na entrada (15000 m<sup>3</sup>/d), mesmo fazendo uso de critérios rigorosos.

No que se refere ao sistema de alívio, o cliente possui especificações técnicas<sup>9</sup> baseadas na NR-13 que definem qual o melhor alívio para vasos separadores de acordo com os seguintes parâmetros:

- Inflamabilidade;
- Toxicidade;
- Pressão;
- Duração;

<sup>9</sup> Esta especificação está presente nas referências.

- Frequência;
- Vazão.

O vapor de gás é considerado inflamável, pois somente hidrocarbonetos gasosos recebem esta classificação. Quanto a toxicidade, de acordo com a tabela 19 é possível observar que o gás possui 8,00 ppm de H<sub>2</sub>S, o que caracteriza-o como tóxico. Referente a pressão, esta é baixa, pois apresenta uma pressão absoluta de projeto de aproximadamente 0,35 kgf/cm<sup>2</sup> que corresponde a 4,79 psig, logo abaixo de 5 psig que é o critério estabelecido. A duração de abertura é emergencial, pois a sua duração deve ser inferior a 15 minutos. Referente a frequência o descarte é eventual, uma vez que só deve ser efetuado em caso de falha total dos demais controladores de pressão. Por fim, apenas vazões superiores a 100.000 nm<sup>3</sup>/d são consideradas altas, o que caracteriza como vazão pequena.

Portanto, o melhor sistema de alívio<sup>10</sup> para as características apresentadas é um vent de baixa velocidade.

#### 4.1.2.3. Automação e instrumentação

Inicialmente, o gás passa por uma estação de redução de alta pressão, cujo projeto contempla um sistema “trem de gás<sup>11</sup>”. No início da linha há válvula de dupla retenção seguida por válvulas esfera que devem ser mantidas normalmente abertas NA. Há ainda válvulas de drenagem e vent do tipo esfera que devem estar normalmente fechadas NF. Na linha que segue deverá ser instalado um manômetro indicando a pressão local. Nesta encontra-se ainda um orifício medidor de vazão onde é feito também o controle de pressão.

O controle de pressão será realizado por um transmissor indicador de pressão (PDIT-002) com *set* de 84 kgf/cm<sup>2</sup> – 20% de folga em relação à pressão máxima estabelecida. Em caso de valores muito acima do *set* especificado, é disparado um intertravamento que aciona a válvula de bloqueio (SDV-001) impedindo a entrada do gás na ERP de alta.

Após passagem pela SDV, o gás deve seguir por um de dois tramos idênticos, sendo um reserva do outro para caso haja ocorrência de danos. Estas linhas devem contar com filtro tipo Y. A perda de carga no filtro com passagem de gás pode ser determinada com os

---

<sup>10</sup> Ver anexo 9.

<sup>11</sup> Os sistemas trem de gás combinam vários instrumentos de segurança e monitoramento, como válvulas de corte, reguladores de pressão, válvulas de alívio, interruptores de pressão, válvulas de ventilação – vent's, medidores de pressão, etc. Ver anexo 9.

parâmetros de vazão e pressão do gás. Conforme tabela presente no anexo 10. Este filtro possui *set* 0,23 kgf/cm<sup>2</sup>, para retenção de possíveis sólidos que possam interromper a operação. Há ainda uma válvula controladora de pressão PCV-001A/B que deve promover a redução na ERP de *alta*. Entre o filtro e a PCV e após esta há drenos e vent's de válvulas esfera que devem permanecer normalmente fechados NF.

Na saída dos tramos deve haver um manômetro, PI-002, para acompanhamento da pressão local, e também um indicador de temperatura, TI-001 e um PSH para monitoramento de altas pressões disponível no supervisório com *set* de 18 kgf/cm<sup>2</sup>. Ao alarmar uma pressão acima do *set*, deve ser disparado um intertravamento que fecha a SDV-001 impedindo a passagem de gás pela linha e aberta uma válvula de segurança de pressão com descarte para atmosfera, PSV-001, a jusante ao PSH-001.

Com a redução de pressão, na saída da ERP de *alta* o gás segue por uma linha onde há um manômetro indicador de pressão local, PI-003, seguido por uma válvula esfera que deve ser mantida normalmente aberta NA.

Nesta entrada deve ser feito o monitoramento da vazão por um orifício de restrição de vazão, seguido por uma válvula, SDV-002, a qual deve estar normalmente aberta NA e cujo controle é feito por acionadores que em caso de altas pressões, disparam alarme (PDAH-402A/B) e intertravamento para o fechamento da válvula.

O gás segue, então por dois tramos idênticos, sendo um reserva do outro. Neles há um filtro tipo cesto, FT-001A/B, com *set* de 0,47 kgf/cm<sup>2</sup>, a fim de que sejam retidas partículas sólidas que se encontrem na corrente ou mesmo coalescência de pequenas gotas. Nos filtros a queda de pressão é monitorada por transmissor indicador de pressão diferencial (PDIT-005A/B). Caso a queda exceda o *set* estipulado, é disparado um alarme que avisa ao operador que o tramo deve ser invertido para que haja a limpeza do elemento filtrante.

O filtro possui ainda uma linha de descarte para partículas retidas de 1". Na entrada da linha, imediatamente na saída do filtro, há um válvula esfera que deve ser mantida normalmente fechada NF. A linha conecta o filtro a uma caixa de drenagem fechada para onde os sólidos devem ser encaminhados.

Com a passagem pelo filtro, o gás segue para a válvula redutora de pressão em ERP de *baixa*. Após a redução de pressão, o gás deve ser encaminhado para um vaso separador à

jusante. À montante do vaso encontra-se uma válvula esfera que deve permanecer normalmente aberta NA.

No vaso, ocorre a separação do condensado. O estudo do gás apresentou baixa propensão à formação de condensado (0,75 m<sup>3</sup>/h, conforme simulação).

As operações de controle e segurança do vaso são realizadas por controladores de nível e de pressão. O vaso é equipado com visor direto de nível, LG-001, transmissores indicadores de nível do tipo radar, LIT-001 com alarme para nível baixo, LAL-002, e para nível alto, LAH-002, com *set* de 0,150m e 0,55m, respectivamente. O vaso possui também chave para nível muito baixo, LSSL-002, e chave para nível muito alto, LSHH-002, com *set* de 0,1m e 0,66m, respectivamente. No caso de nível muito baixo é acionado um intertravamento que fecha a válvula SDV-002 impedindo passagem de gás pela ERP de baixa. Em caso de nível muito baixo, fecha a SDV-002.

O vaso também possui controle de pressão que é realizado por um transmissor indicador de pressão com alarme para alta pressão PAH-007 (*set* de 2,81 kgf/cm<sup>2</sup>) e chave para pressões muito altas, PSHH-007 (*set* de 3,0 kgf/cm<sup>2</sup>) e alarme para baixa pressão (PAL-007 com *set* de 2,08 kgf/cm<sup>2</sup>), e chave para pressão muito alta (PSLL-007 com *set* de 1,96 kgf/cm<sup>2</sup>), caso estes *sets* sejam atingidos, é fechada a válvula SDV-002 na entrada da ERP de *baixa* interrompendo a passagem do fluxo de gás.

O gás deve seguir para a parte superior do vaso e o condensado se depositar ao fundo. O gás livre de líquido sai do vaso e segue para o gerador de vapor. Caso o nível esteja muito alto e seja atingido o nível de entrada de gás, há uma saída no fundo do vaso com válvulas que abrem uma linha para passagem do líquido e que finda no descarte do condensado. O comando é acionado por um intertravamento que é disparado por indicadores de nível alto (LSHH-002). Para nível de líquido muito baixo (LSSL-002), é disparado o intertravamento que fecha a válvula de escoamento de líquido. A mesma que é aberta em caso de nível alto. A linha de descarte de líquido conta ainda com um orifício limitador de vazão (FO-002) a fim de evitar que pela abertura da passagem, escape gás na saída juntamente com o líquido. O condensado segue para a drenagem.

A montante do gerador de vapor, o gás passa por um filtro tipo Y com *set* 0,2 kgf/cm<sup>2</sup>. No gerador água e vapor irão produzir vapor saturado para injeção em poços.

No topo do gerador, há a saída de vapor úmido em condição de pressão manométrica máxima de 106 kgf/cm<sup>2</sup> e temperatura de saturação 313 °C, com título de 80%. A linha de saída conta com controle de vazão realizado por um sensor de vazão e por um transmissor de vazão.

Com os parâmetros dimensionados, devem ser produzidos 10 m<sup>3</sup>/h de vapor para injeção nos poços. A linha que segue do gerador de vapor até o poço é controlada por indicadores de pressão e vazão, PI-009/011/013) e FIT-005/007/009, respectivamente.

#### 4.1.2.3. Implantação de sistema de drenagem

Para o condensado retido no vaso separador e partículas retidas nos filtros deve ser previsto um sistema de drenagem de acordo com as normas de legislação ambiental.

Os sistemas de drenagem de fluido são utilizados para a retirada de fluido excedente de uma operação e para o descarte programado deste de acordo com os parâmetros ambientais de legislação. Segundo a NB 14605, os sistemas de drenagem são classificados de acordo com o efluente a que se deseja tratar. Neste relatório será abordado apenas o sistema de drenagem de rejeito oleoso.

O sistema de drenagem de rejeito oleoso refere-se ao sistema em que são enviadas correntes aquosas cuja presença de hidrocarbonetos é constante, podendo conter sólidos suspensos e dissolvidos além de outros contaminantes.

Para esta drenagem, a coleta e escoamento do fluido deve sempre ser feito por meio de um sistema selado e enterrado. O sistema de escoamento deve ser por gravidade em direção a estação de tratamento de efluentes, caso haja.

Os sistemas de drenagem podem ser do tipo automático ou manual, ambos devem conter um sistema de detecção da interface óleo/água. No sistema manual deve haver um visor que permita ao operador observar a esta interface, enquanto no sistema automático há presença de sensores de interface água/óleo e controlador lógico programável (CLP).

Para EV-A, foi escolhido implantar um sistema de drenagem fechado do tipo caixa selada, com visor local de nível que permita ao operado observar a interface óleo/água, conforme recomendado. A partir desse sistema, o efluente pode ser recolhido em caminhões. O dimensionamento da caixa não é escopo deste trabalho.

#### **4.1. Outras atividades realizadas**

Além do projeto apresentado neste relatório, também foram desenvolvidas diversas atividades no segmento de engenharia de processos durante o período de estágio. Abaixo segue uma breve descrição destas atividades.

##### **4.1.1. Utilização de *software* para simulação**

Em todo o decorrer do estágio, foi necessária a utilização do software Hysys v. 7.2 para o dimensionamento e avaliação dos processos juntamente com a planilha iterativa em Excel © 2007. Este conhecimento adquirido proporcionou, mesmo as atividades tendo-se limitado ao escritório na consultoria de projeto, vivenciar a ocorrência dos processos químicos. Por exemplo, foram feitas simulações quanto a possível formação de hidratos numa linha de passagem de gás. Sendo a formação de hidratos altamente nociva e por conseguinte indesejada no transporte de gás, com as simulações foi possível garantir ao cliente que para a situação exposta não havia risco de formação e quais seriam as situações que favoreceriam a ocorrência de hidratos na linha. Outra situação importante é que por vezes era necessário fazer a caracterização do óleo e isso tornou-se possível com a utilização do simulador.

##### **4.1.2. Elaboração de fluxogramas de Engenharia e de Processos**

Visando a formação ampla de um engenheiro de processo, foi possível durante o estágio realizado a utilização do *software* AutoCad© 2007 para a elaboração de fluxogramas de engenharia, como os apresentados nos anexos deste relatório, bem como a elaboração de fluxogramas de processo diretamente nesta ferramenta de desenho. A experiência proporcionou além de aprendizado extra que seria a própria utilização do AutoCad© bem como a aplicação dos conhecimentos da engenharia química frente a avaliação e elaboração dos fluxogramas de processo.

##### **4.1.3. Elaboração de documentos**

Devido ao estágio estar relacionado à área de consultoria e projetos, foi possível aprender a elaborar diversos documentos de emissão de projetos. Ao solicitar um projeto ou

a avaliação de um já existente, a empresa que realiza a emissão, no caso a Petroeng, deve emitir diversos documentos a respeito de equipamentos e inclusive a descrição dos processos. Neste aspecto, foi possível aprender a elaborar diversos documentos, tais como:

- Memória de cálculo – MC – que explica desde a bibliografia até a metodologia utilizada no dimensionamento de equipamentos, por exemplo MC's de bombas eram frequentemente emitidas;
- Folha de Dados – FD – refere-se basicamente a um determinado equipamento presente no processo e suas condições de operação com base em uma MC realizada;
- Lista de linhas – aponta as linhas existentes no processo, explicando sua origem/destino, diâmetro e o fluido que circula por elas;
- Memorial descritivo – MD - o qual deve descrever minuciosamente como ocorre o processo, todas as entradas/saída, quedas de pressão, instrumentos, etc.

Logo, foi possível aprender de uma forma ampla e simples o trabalho de engenheiros projetistas dentro da engenharia de processos.

#### **4.1.4. Determinação de gradiente hidráulico e golpe de aríete**

A elaboração da memória de cálculo com a avaliação do gradiente hidráulico e do golpe de aríete pode ser considerada um dos maiores desafios enfrentados durante o estágio em questão. Apesar da formação generalista de um engenheiro químico, a abordagem dos termos em questão ainda não tinha sido conhecida. A memória de cálculo consistia em avaliar a situação crítica em que se poderia ocorrer o golpe de Aríete, que trata-se de uma sobrepressão gerada nas tubulações devido ao fechamento de válvulas ou interrupção de funcionamento de bombas, estas sobrepressões podem levar inclusive ao rompimento da tubulação. Para o gradiente hidráulico, o desafio era avaliar as quedas de pressão em toda tubulação desde a saída da adutora até a chegada na estação que deveria ser abastecida, observando o perfil geológico da adutora. O maior desafio estava no fato de que não havia documentação ou avaliação semelhante, tendo-se que elaborar toda a documentação pela primeira vez de forma que foi possível aprender que o trabalho de um engenheiro de

processamento não limita-se apenas ao conteúdo aprendido na universidade, mas em todo conhecimento que pode ser buscado, adquirido e aplicado tendo como base aquele conteúdo.

#### **4.1.5. Revisão de documentos**

A revisão de documentos trata-se da parte mais crítica dentro dos trâmites de emissão de projeto, pois ao revisar um documento e emití-lo quaisquer erros que se encontrem neste não serão de responsabilidade de quem os elaborou, mas de quem realizou a emissão. Esta atividade permitiu desenvolver o senso crítico de correção bem como o amadurecimento das atividades, uma vez que era preciso total domínio do tema avaliado para realizar as correções. Foram feitas revisões em memórias de cálculo, fluxogramas de engenharia e fluxogramas de processo.

---

---

## ***CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES***

---

---

## 5. CONCLUSÕES

O estágio curricular obrigatório realizado completou a parte curricular necessária para finalização do curso de Engenharia Química e possibilitou a integração entre os ambientes acadêmico e profissional que cercam as atividades de um estudante de engenharia química, minimizando as barreiras existentes entre o conhecimento aprendido na universidade e a atuação profissional como Engenheiro Químico. O contato entre o aluno e a empresa Petroeng permitiu benefício amplo a ambos no tocante ao conhecimento que foi possível adquirir em relação ao aluno e no contato com o profissional em formação, referente à empresa.

Estagiar na área de consultoria e projetos dentro da Engenharia Química permitiu compreender os primeiros passos para elaboração de uma planta de indústria química de modo a não apenas conhecer o processo químico mas dimensionar e avaliar equipamentos e parâmetros fundamentais a seu funcionamento. Outro aspecto importantíssimo refere-se ao fato do conhecimento relativo às documentações envolvidas num processo de emissão de projetos. Trabalhar diretamente com grandes clientes de respaldo internacional inclusive, como a Petrobrás, possibilitou adquirir uma maior responsabilidade frente a prazos de projetos e frente às normas brasileiras para elaboração destes. Com a elaboração e emissão de documentos, sejam os mais simples como um dimensionamento de equipamento ou no mais complexo como a descrição operacional e os fluxogramas, foi possível um amadurecimento do senso crítico de elaboração de projetos e atendimento as correções dos clientes.

A falta de conhecimento aprofundado no simulador pode ser destacada como um entrave ao desenvolvimento inicial das atividades, isto, pois, durante a formação, não houve um contato mais intenso com simuladores uma vez que a universidade não possuía licença para a utilização do programa. Entretanto esta falta de conhecimento serviu como ponto de partida para um maior interesse no funcionamento do simulador e permitindo inclusive simular diversos processos.

No que diz respeito à empresa, foi bastante proveitoso poder estagiar em uma empresa como a Petroeng, principalmente pois o setor de processos contava uma pequena equipe de

funcionários, apenas uma engenheira química e um desenhista projetista o que permitiu trabalhar com diversos projetos de uma maneira rápida visando sempre a produtividade. Nesta empresa também é desenvolvido o aspecto de proatividade do estudante, no qual ele deve recorrer a todas as informações e setores responsáveis por elas, mesmo em casos em que só detém o escopo do projeto. Como aspecto negativo, pode-se citar o fato de mesmo sendo necessárias informações extras para o desenvolvimento do trabalho, a empresa não fornecer subsídios para sua realização total, como bibliografia, internet e profissionais correlatos.

O aspecto mais importante do estágio foi possibilitar a vivência do aluno com o ambiente de trabalho em projetos e gerar nele um sentimento de autonomia na execução de suas atividades bem como no que diz respeito às relações interpessoais, provendo o amadurecimento da postura de um profissional ético e competente.

---

---

***CAPÍTULO 6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS***

---

---

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT- NB-14605/2000: Posto de serviço – Sistema de drenagem oleosa

APARECIDO, J.B. *Mecânica dos fluidos compressíveis*. Especialização em tecnologia do gás, Campo Grande, 2005.

BEGA, E. A. *Instrumentação Industrial*. Editora Interciência, Rio de Janeiro, 2011.

CAMPBELL, J. M. *Gas Conditioning and Processing – The Equipment Modules Vol. 2*. USA, 1985.

CRANE. *Flow of Fluids Through Valves, Fittings, and Pipe*. USA, 1988.

FALCON, R.; MATTOS, E. E. *Bombas Industriais*. Editora Interciência, Rio de Janeiro, 1998.

FOX, R.W; MCDONALD, A. T; PRITCHARD, P. J. *Introdução à mecânica dos fluidos*. Editora LTC, Rio de Janeiro, 2006.

MARTINS, E; GUITARRARI, M. *Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos em acordo com a NBR 14725-4 – BISSULFITO DE AMÔNIO*. Epa Química – Núm. SSM-00-FQ-001-01, 2011.

MEDEIROS, G. G. *Introdução ao processamento de gás natural*. Natal, 2011.

NEWCHEM, *Ficha de informações de segurança de produtos químicos – Bissulfito de amônio*. FISPQ, nº 002.

NR-13/2008: Caldeiras e vasos de pressão.

PURIFILTROS, *Catálogo de filtros tipo cesto simplex*. Disponível em: <[www.purifiltros.com.br](http://www.purifiltros.com.br)>. Acesso em: 25 de novembro de 2012.

*Recommended Practice for Design and Installation of Offshore Production Platform Pipe Systems*, American Petroleum Institute, 1991.

RIBEIRO, M. A. *Medição de petróleo e gás natural*. Salvador, 2003.

THOMAS, J. E. *Fundamentos da engenharia de petróleo*. Editora Interciência, Rio de Janeiro, 2001.

VALDEMAN, B; FOLLY, R; SALGADO, A. *Dinâmica, Controle e Instrumentação de processos*. Editora UFRJ, Rio de Janeiro, 2008.

## Anexos

## Anexo 1- Significado das letras de identificação – ABNT (NBR-8190)

	Primeira Letra		Letras subsequentes		
	Variável medida ou inicial	Modificadora	Função de informação ou Passiva	Função Final	Modificadora
<b>A</b>	Analizador	-	Alarme	-	-
<b>B</b>	Chama de queimador	-	Indefinida	Indefinida	Indefinida
<b>C</b>	Condutividade elétrica	-	-	Controlador (12)	-
<b>D</b>	Densidade ou massa específica ( <i>Density</i> )	Diferencial	-	-	-
<b>E</b>	Tensão elétrica	-	Elemento primário	-	-
<b>F</b>	Vazão ( <i>Flow</i> )	Razão (fração)	-	-	-
<b>G</b>	Medida dimensional	-	Visor	-	-
<b>H</b>	Comando Manual ( <i>Hand</i> )	-	-	-	-
<b>I</b>	Corrente Elétrica	-	Indicador	-	-
<b>J</b>	Potência	Varredura ou seletor	-	-	-
<b>L</b>	Nível ( <i>Level</i> )	-	Lâmpada piloto	-	-
<b>M</b>	Umidade ( <i>Moisture</i> )	-	-	-	-
<b>N</b>	Indefinida	-	Indefinida	Indefinida	Indefinida
<b>O</b>	Indefinida	-	Orifício de restrição	-	-
<b>P</b>	Pressão ou Vácuo	-	Ponto de teste	-	-
<b>Q</b>	Quantidade ou Evento	Integrador ou totalizador	-	-	-
<b>R</b>	Radioatividade	-	Registrador ou Impressor	-	-
<b>S</b>	Velocidade ou frequência ( <i>Speed</i> )	Segurança	-	Chave	-
<b>T</b>	Temperatura	-	-	Transmissor	-
<b>U</b>	Multivariável	-	Multifunção	Multifunção	Multifunção
<b>V</b>	Viscosidade	-	-	Válvula	-
<b>W</b>	Peso ou Força ( <i>weigh</i> )	-	Poço	-	-
<b>X</b>	Não classificada	-	Não classificada	Não classificada	Não classificada
<b>Y</b>	Indefinida	-	-	Relé ou computação	-
<b>Z</b>	Posição	-	-	Elemento final de controle não classificado	-

## Anexo 2- Ficha técnica do bissulfito de amônio fornecida pela NewChem®.



NEWCHEM INDÚSTRIA QUÍMICA LTDA

**Ficha de Informações de  
Segurança de produtos Químicos**  
FISPQ nº 002
**Produto: Bissulfito de Amônio****9 – Propriedades Físico-Químicas**

Estado físico:	líquido
Cor:	amarelo claro esverdeado.
Odor:	característico odor picante de SO <sub>2</sub>
Peso Molecular:	99,11
Fórmula:	NH <sub>4</sub> HSO <sub>3</sub>
Ponto de congelamento:	-12 °C
Flash Point:	Não inflamável >93 °C
Densidade (D <sub>4</sub> ):	1,320
Densidade vapor (ar=1):	<1,0
Viscosidade (cps 21°C):	30
Pressão de Vapor:	35 (mmHg)
Solubilidade em água:	Solúvel
pH :	3,5 a 5,5
Ponto de inflamação:	Não inflamável
Perigo de explosão:	Não aplicável
Taxa de evaporação:	< 1,0

**10 – Estabilidade e Reatividade**

**Estabilidade:** Decompõe-se por aquecimento, com liberação de SO<sub>2</sub>.

**Matérias a evitar:** substâncias oxidantes.

**Reações perigosas:** Extremamente reativo com substâncias oxidantes.

**Produtos perigosos da decomposição:** Na decomposição do produto há a geração de SO<sub>2</sub> (gás tóxico).

**11 – Informações Toxicológicas****Tipo de contato VAPOR**

**Síndrome tóxica** PREJUDICIAL, SE INALADO.

**Tratamento** MOVER PARA O AR FRESCO. SE A RESPIRAÇÃO FOR DIFICULTADA OU PARAR, DAR OXIGÊNIO OU FAZER RESPIRAÇÃO ARTIFICIAL.

**Tipo de contato LÍQUIDO**

**Síndrome tóxica** IRRITANTE PARA A PELE. IRRITANTE PARA OS OLHOS. PREJUDICIAL, SE INGERIDO.

## Anexo 3 – Folha de dados completa para bomba ZB-01A/B

PRODUTO:	BISSULFITO DE AMONIO		TAG :	ZB-01A/B		
SERVIÇO:	BOMBA DOSADORA		OBRA :	IMPLANTAÇÃO DE GV		
CONDIÇÕES DE SERVIÇO			UNIDADES	PROJETO	NORMAL	MÍNIMA
VAZÃO			m3/h	0,0	0,0	
TEMPERATURA			°C	35,0	35,0	
VISCOSIDADE			cP	30,00	30,00	
PRESSÃO DE VAPOR			mcl	0,38	0,38	
MASSA ESPECIFICA			Kg/m3	1320,0	1320,0	
Hs - ALTURA ESTÁTICA SUCÇÃO			mcl			
P1 - P.ABS.RESERVATORIO SUCÇÃO			mcl	7,83	7,83	
ΔPts - PERDAS TUBULAÇÃO SUCÇÃO			mcl	0,04	0,04	
ΔPes - PERDAS EQUIPAM./INSTRUM.			mcl			
Ps = Hs + P1 - ΔPts - ΔPes			mcl	7,79	7,79	
NPSHtd - TEOR.DISPONIVEL = Ps-Pv			m	7,41	7,41	
%NPSHtd - M. SEGURANÇA			1,00	1,00	1,00	
NPSHd = NPSHtd - %NPSHtd			m	6,41	6,41	
Hr - ALTURA ESTÁTICA RECALQUE			mcl			
P2 - P.ABS. RESERVAT. RECALQUE			mcl	31,69	31,69	
ΔPtr - PERDAS TUBULAÇÃO RECALQUE			mcl	0,07	0,07	
ΔPer - PERDAS EQUIPAM./INSTRUM.			mcl			
ΔPvc - PERDA NA VALV.DE CONTROLE			mcl			
%ΔPtr - M.DE SEGURANÇA			15	0,01	0,01	
Pr=Hr+P2+ΔPtr+ΔPer+ΔPvc+%ΔPtr			mcl	31,77	31,77	
ΔH - ALTURA MANOMETRICA = Pr-Ps			mcl	23,98	23,98	
ΔP - PRESSÃO DIFERENCIAL			Kgf/cm2	3,2	3,2	
BHP =	0,0	ΔPvc - PERDA NA VALV. DE CONTROLE				
RPM =		TIPO =				
Eficiência estimada =	70,0	RAZÃO Qmáx/Qnor=				
Eficiência calculada =	15,0	ΔP =		#VALOR!	(mcl)	



## Anexo 5 – Ficha técnica do fabricante Purifil para filtros.



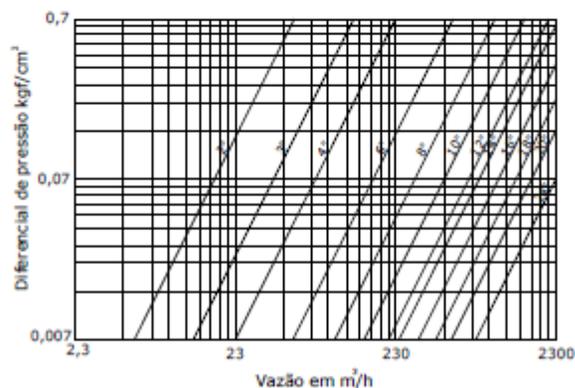
## MATERIAIS CONSTRUTIVOS

DESCRIÇÃO	AÇO CARBONO	AÇO INOXIDAVEL
Corpo	A53-B / A106-B	A-312
Entrada e saída	A53-B / A106-B	A-312
Chapas de reforço do bocal	A-285 Gr.C	A-240
Flanges	A-105	A-182
Cap	A-234 WPB / A-285 Gr.C	A-403 WP/ A-240
Dreno	A-105	A-182
Cesto	A-240 Gr.304	A-240 Gr.304
Vedação	BUNA-N	BUNA-N

## ELEMENTOS FILTRANTES - PERFURAÇÕES E TELAS

PERFURAÇÕES	CESTOS REVESTIDOS
Chapa Ø 0,5 mm - 20% A.A.	Malha 100 - 34% A.A.
Chapa Ø 0,8 mm - 23% A.A.	Malha 80 - 36% A.A.
Chapa Ø 1,2 mm - 27% A.A.	Malha 60 - 34% A.A.
Chapa Ø 1,6 mm - 26% A.A.	Malha 40 - 46% A.A.
Chapa Ø 2,4mm - 32% A.A.	Malha 20 - 23% A.A.
Chapa Ø 3,2 mm - 36% A.A.	
Chapa Ø 4,0 mm - 40% A.A.	
Chapa Ø 4,8 mm - 42% A.A.	
Chapa Ø 6,35 mm - 36% A.A.	

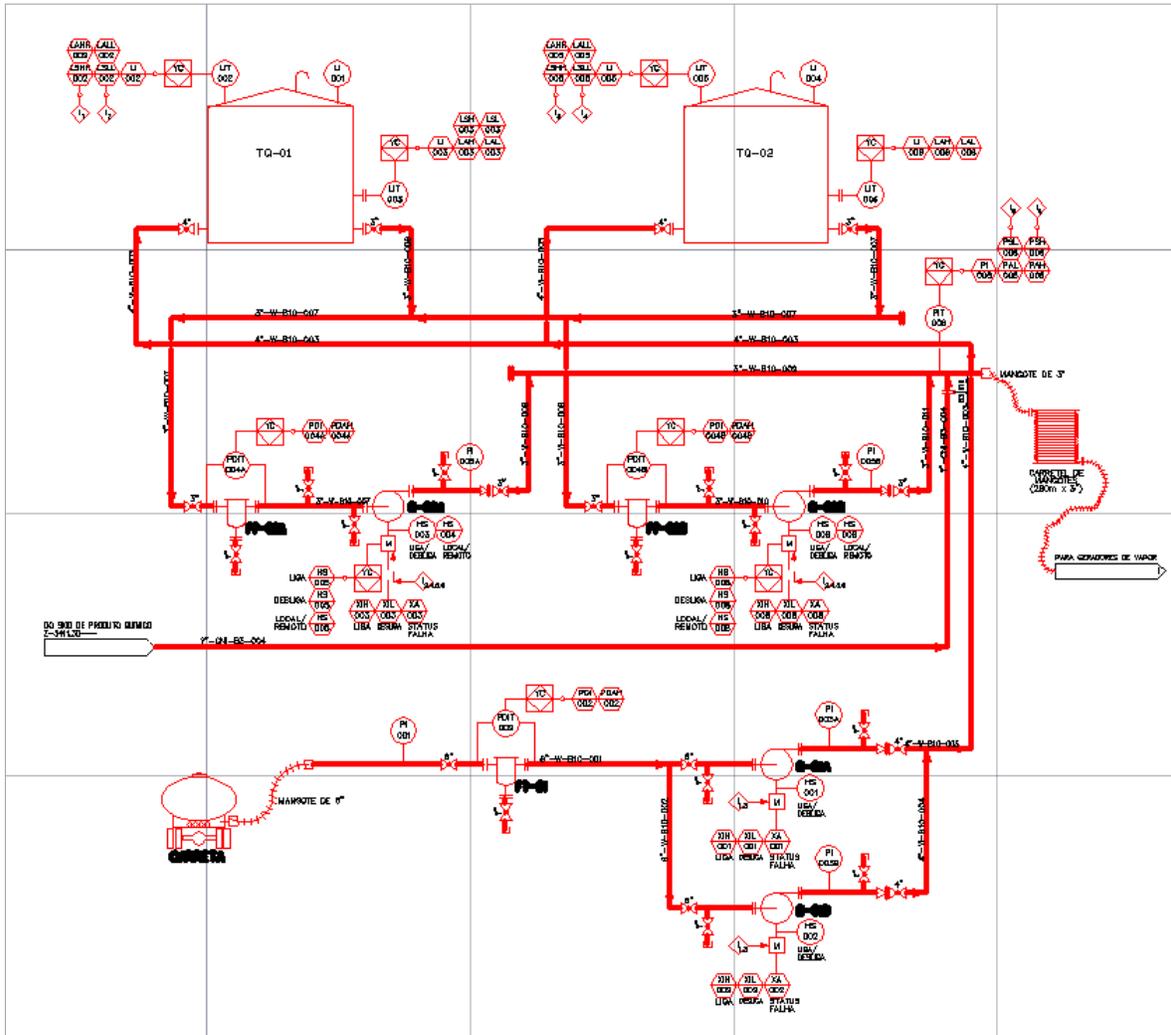
## GRÁFICO VAZÃO x DIFERENCIAL DE PRESSÃO



R: Alameda das Catelas, 683 - Jd. Simas - CEP: 18055-177 - Sorocaba - S.P.  
 Fone/Fax: + 55 (15) 3217-1974 - e-mail: purifil@purifil.com.br - www.purifil.com.br

4/6

Anexo 6 – Fluxograma de tancagem de água



Anexo 7 – Tabela de perda de carga no mangote fornecida pela fabricante *RealFlex*.

Vazão $m^3/h$	Diâmetro Interno (em polegadas)								
	1/2"	5/8"	3/4"	1"	1 1/4"	1 1/2"	2"	2 1/2"	3"
	Perda de pressão em PSI - 20m de mangueira								
0.1	0.26								
0.3	1.98	0.66	0.28						
0.6	5.09	1.69	0.71						
1.1	18.2	6.08	2.53	0.62	0.21	0.09			
2.3	65.3	21.8	9.06	2.22	0.75	0.31	0.08		
3.4		46.6	19.4	4.76	1.61	0.66	0.16	0.05	
4.5		79.4	33.0	8.14	2.72	1.12	0.28	0.09	
5.7			50.2	12.3	4.16	1.71	0.42	0.14	
6.8			70.9	17.4	5.88	2.41	0.59	0.20	0.09
7.9			93.2	22.8	7.74	3.17	0.77	0.26	0.11
9.1				29.3	9.91	4.07	1.00	0.33	0.14

Vazão $m^3/h$	Diâmetro Interno (em polegadas)								
	1/2"	5/8"	3/4"	1"	1 1/4"	1 1/2"	2"	2 1/2"	3"
	Perda de pressão em PSI - 20m de mangueira								
51.1							24.1	8.20	3.38
56.8							29.3	9.97	4.12
62.4							35.0	11.9	4.89
68.1							41.0	13.9	5.74
73.8							47.6	16.1	6.69
79.5							54.6	18.5	7.68
85.2							62.0	21.1	8.73
90.8							70.2	23.8	9.78
102.2								29.5	12.2
113.5								35.8	14.8
136.3								50.2	20.7

Vazão $m^3/h$	Diâmetro Interno (em polegadas)								
	1/2"	5/8"	3/4"	1"	1 1/4"	1 1/2"	2"	2 1/2"	3"
	Perda de pressão em PSI - 20m de mangueira								
159.0								66.9	27.6
181.7								86.0	35.4
204.4									43.8
227.1									53.4
249.8									63.7
272.5									74.8
295.2									86.6

Fonte: <<http://www.realflex.com.br/br/subpages/tabelas.php>>

## Anexo 8 – Dados da corrente de gás.

## 16.1. COMPOSIÇÃO DO GÁS INDUSTRIAL

M02 - CORRENTE-GÁS DE PROCESSO			
CARACTERÍSTICAS	MÉTODO	RESULTADO	UNIDADE
NITROGENIO	D 1945	1,02	% molar
H2S	D 5504	8,00	ppm/v
METANO	D 1945	76,33	% molar
DIOXIDO DE CARBONO (CO2)	D 1945	0,13	% molar
ETANO	D 1945	10,21	% molar
PROPANO	D 1945	6,44	% molar
ISO-BUTANO	D 1945	1,41	% molar
N-BUTANO	D 1945	2,11	% molar
ISO-PENTANO	D 1945	0,61	% molar
N-PENTANO	D 1945	0,65	% molar
DECANO	D 1945	0,00	% molar
HEPTANO	D 1945	0,20	% molar
HEXANO	D 1945	0,65	% molar
NONANO	D 1945	0,01	% molar
OCTANO	D 1945	0,22	% molar
PONTO DE ORVALHO, 1 ATM	D 5454	-6,00	Grau C
OXIGÊNIO	D 1945	0,01	% molar

## Notas:

Os dados da amostra foram fornecidos pela RPCC – REFINARIA POTIGUAR CLARA CAMARÃO.

Local: UP - EM\_SUL\_MOS - EMED AREA SUL MOSSORO  
 Tipo: AMOSTRA DE LINHA  
 Executante: RPCC - REFINARIA POTIGUAR CLARA CAMARAO  
 Número da Amostra: 4084958  
 Data/Hora do recebimento: 05/08/2012 08:51:00  
 Finalidade: MONITORAMENTO  
 Data/Hora da amostragem: 05/08/2012 08:50:00  
 Solicitante: UN-RNCE-PROD RN - UNIDADE DE NEGOCIO RIO GRANDE DO NORTE E CEARA -  
 PRODUCAO RN

Fonte: Petrobras.

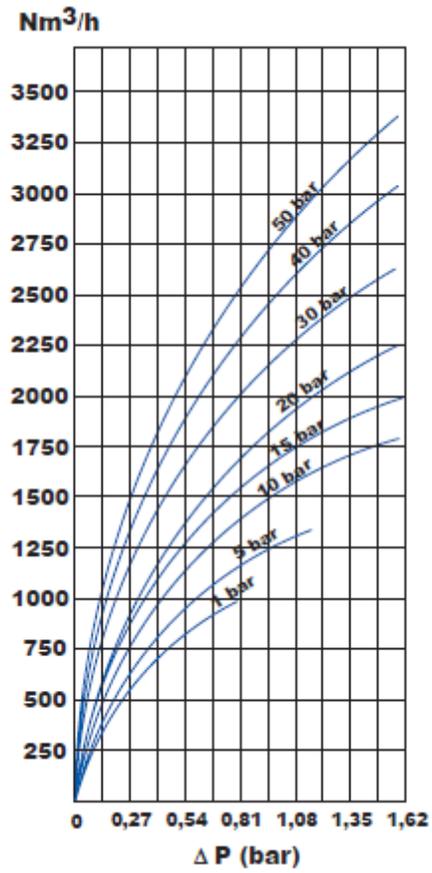
## Anexo 9 – Sistema de alívio para vasos

Pressão	Duração	Frequência	Vazão	Sistema Mínimo
alta	contínua	operacional	grande	Tocha multiponto
baixa	contínua	operacional	grande	Tocha multiponto
Alta	emergencial	operacional	grande	Tocha multiponto
Baixa	emergencial	operacional	grande	Tocha multiponto
Alta	contínua	eventual	grande	Vent de Alta Velocidade
Baixa	contínua	eventual	grande	Tocha
Alta	emergencial	eventual	grande	Vent de Alta Velocidade
Baixa	emergencial	eventual	grande	Tocha
Alta	contínua	operacional	pequena	Vent de Alta Velocidade
Baixa	contínua	operacional	pequena	Vent Assistido
Alta	emergencial	operacional	pequena	Vent de Alta Velocidade
Baixa	emergencial	operacional	pequena	Vent Assistido
Alta	contínua	eventual	pequena	Vent Alta Velocidade (1)
Baixa	contínua	eventual	pequena	Vent Assistido
Alta	emergencial	eventual	pequena	Vent Baixa Velocidade
Baixa	emergencial	eventual	pequena	Vent Baixa Velocidade

Tabela 2 – Descarte de Hidrocarbonetos Inflamáveis e tóxicos

Fonte: Especificação técnica, ET-3000.00-1000-940-PCI-002, PETROBRAS.

Anexo 10 – Gráfico de perda de carga em filtro com passagem de gás



Anexo 11 – Fluxograma de injeção de vapor

