



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE

CENTRO DE TECNOLOGIA – CT

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO – DPET



CURSO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO – CEP

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**PROJETO DE UM SISTEMA DE TRATAMENTO DA ÁGUA
PRODUZIDA DE RESERVATÓRIOS DE PETRÓLEO PARA SUA
ADEQUAÇÃO AO CONSUMO HUMANO**

Larissa Cristina da Silva Martins

Orientador: Prof. Dr. Wilaci Eutrópio Fernandes Júnior

Dezembro de 2015

LARISSA CRISTINA DA SILVA MARTINS

**PROJETO DE UM SISTEMA DE TRATAMENTO DA ÁGUA
PRODUZIDA DE RESERVATÓRIOS DE PETRÓLEO PARA SUA
ADEQUAÇÃO AO CONSUMO HUMANO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte dos requisitos para obtenção do Grau em Engenharia de Petróleo pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

Aprovado em ____ de _____ de 2015.

Prof. Dr. Wilaci Eutrópio Fernandes Júnior
Orientador – UFRN

Prof. Dra. Carla Wilza Souza de Paula Maitelli
Membro Examinador – UFRN

Prof. Dr. Lindemberg de Jesus Nogueira Duarte
Membro Examinador – UFRN

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Deus, aos meus pais, Cláudia e Edilson, a minha irmã, Lorena, ao meu namorado Chou En-Lai e ao meu orientador, Wilaci Eutrópio.

AGRADECIMENTOS

A Deus, primeiramente, pelo dom da vida, por se fazer presente em todas as etapas dela, me dar força e determinação nos momentos de maior dificuldade, além das várias graças concedidas no decorrer da caminhada.

A toda minha família, em especial meu pai, minha mãe e irmã, por me transmitirem apoio, incentivo, coragem e amor, e, principalmente, por serem meu exemplo de vida.

Ao meu namorado Chou En-Lai Allan Dias Monteiro, pelo carinho, compreensão e ajuda, em todas as oportunidades desse trajeto, sempre me incentivando e apoiando, além ser meu exemplo profissional.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Wilaci Eutrópio Fernandes Júnior, por aceitar conduzir meus passos nessa trajetória, por seus ensinamentos, pela confiança depositada em mim, seus conselhos e sua paciência.

À Prof. Dra. Carla Wilza Souza de Paula Maitelli, por sempre estar disposta a ajudar, aconselhar e apoiar, pelo incentivo e auxílio na tomada de decisões ao longo do tempo, que culminaram no meu amadurecimento profissional.

Ao Prof. Dr. Lindemberg de Jesus Nogueira Duarte, pela dedicação a mim concedida, pela confiança depositada e disponibilidade.

Aos meus queridos amigos, em especial Ana Rafaelly, Clara Tavares, Davi Braga, Leonardo Ataíde e Rafael Randel, pela paciência, principalmente, pelo companheirismo, parceria e pelos momentos de dificuldade superados juntos, para que pudéssemos sempre entregar os nossos melhores resultados.

Ao corpo docente do Departamento de Engenharia de Petróleo, pela dedicação e pelos valiosos ensinamentos e conhecimento compartilhados com excelência.

Aos meus amigos de graduação que de forma direta ou indireta contribuíram para meu crescimento profissional e dividiram comigo todos os momentos dessa árdua caminhada.

Ao Instituto de Desenvolvimento Sustentável e Meio Ambiente – IDEMA, em especial aos que compõem o Núcleo de Análise e Licenciamento de Atividades Petrolíferas – NUPETR, pela colaboração e atenção para a realização da pesquisa do presente trabalho.

RESUMO

Este trabalho descreve e apresenta um projeto conceitual de um sistema de tratamento para a água produzida do petróleo. A água associada à produção de petróleo, também conhecida como água produzida, é o maior efluente gerado pelas empresas responsáveis pela exploração e produção de petróleo. A adequação da água produzida para o consumo humano surgiu como uma alternativa para diminuir a quantidade de água descartada diariamente pelas empresas, que necessitam acondicionar e tratar de forma correta, para não provocar impactos ao meio ambiente. Esta água que é disposta na Estação de Tratamento das empresas, possui em sua composição elevados teores de sais, óleo dissolvidos, metais pesados e substância tóxicas, que impedem o seu reuso de forma direta. Para que a água produzida seja reutilizada, deve-se haver o tratamento, visando à adequação ao destino final em que será utilizada e a especificação exigida pela legislação ambiental em vigor. Dessa forma, o presente trabalho tem a finalidade de desenvolver um projeto de um sistema de tratamento para reaproveitamento da água produzida que é recebida no polo industrial de uma empresa, visando utilizá-la para abastecimento de cidades vizinhas à de instalação da companhia, para consumo da população nas atividades domésticas. A metodologia utilizada no projeto do sistema de tratamento contemplou equipamentos capazes de remover os elementos indesejáveis da água produzida, tornando-a adequada para o reuso pela população, e utilizou dados reais da água disposta na Estação de Tratamento da empresa e das cidades que a receberão depois de tratada, bem como a especificação mais adequada para utilização da água tratada no consumo humano, de acordo com as normas ambientais vigentes. Além disso, de posse desses resultados, pode-se desenvolver estudos voltados para reduzir quantitativamente os efeitos nocivos ocasionados pela presença de alguns elementos na água produzida e projetar outros equipamentos para o tratamento, objetivando aumentar a eficiência do sistema como um todo.

Palavras-chave: Água Produzida, Tratamento, Reuso, Legislação Ambiental, Consumo Humano.

ABSTRACT

This work describes and presents a conceptual project of a treatment system for the oil produced water. The water associated with oil production, also known as produced water, it is the largest effluent generated by the companies responsible for oil exploration and production. The adequacy of water produced for human consumption has emerged as an alternative to reduce the amount of water discharged daily by companies that need to condition and treat correctly, to not cause environmental impacts. This water is disposed at the treatment plant of companies, has in its composition high salt content, dissolved oil, heavy metals and toxic substances, which prevent their reuse directly. So the water produced is reused, it should be the treatment, aiming at adapting to the final destination where it will be used and the specification required by environmental legislation. Thus, this study aims to develop a design of a treatment system for reuse of produced water that is received in the industrial center of a company in order to use it to supply neighboring towns to the company's installation, for consumption of the population in household activities. The methodology used in the treatment system project included equipment capable of removing the undesirable elements of produced water, making it suitable for reuse by the population, and used current data of disposed water in the company's treatment plant and the cities that receive after treatment, as well as the most suitable specification for use of treated water for human consumption, in accordance with current environmental standards. In addition, possession of these results, we can develop studies aimed to quantitatively reduce the harmful effects caused by the presence of certain elements in the water produced composition and other processing equipment, in order to increase the whole system efficiency.

Keywords: Produced Water, Treatment, Reuse, Environmental Law, Human Consumption.

Sumário

Sumário.....	7
1. Introdução.....	14
2. Objetivos	17
2.1 Objetivos Gerais.....	17
2.2 Objetivos Específicos.....	17
3. Aspectos Teóricos	19
3.1 Água Produzida	19
3.1.1 Origem	19
3.1.2 Composição	20
3.1.3 Problemática e Impactos Ambientais da Água Produzida.....	21
3.2 Tratamento da Água Produzida	24
3.2.1 Pré-tratamento	25
3.2.2 Etapa de Separação do Óleo Livre	26
3.2.3 Tecnologias comumente utilizadas para tratamento do óleo emulsionado na água	27
3.3 Utilização da água produzida tratada para consumo humano	36
3.4 Legislação ambiental e qualidade da água para consumo humano	38
3.5 Avaliação de toxicidade da água produzida e seus constituintes	40
4. Materiais e Métodos.....	42
4.1 Caracterização da empresa.....	42
4.1.1 Sistema atual de descarte ou reuso	45
4.2 Caracterização da água produzida disposta	49
4.3 Especificação para o destino.....	51
4.3.1 Consumo humano	51
4.3.2 Utilização econômica, social e ambiental.....	52
4.4 Processos de tratamento x Tratamento adequado	52
5. Resultados e Discussões.....	55
5.1 Água produzida x Água tratada para o reuso.....	55
5.2 Contribuição para a escolha do método	57
5.3 Projeto do Sistema de Tratamento	60
5.4 Destino da água tratada e suas especificações	64

5.5	Benefícios para a empresa	65
6.	Conclusão	68
	Referências Bibliográficas.....	70

Lista de Figuras

Figura 1: Comportamento dos fluidos nas condições de reservatório e superfície.	20
Figura 2: Sistemas de gradeamento.	25
Figura 3: Separador Trifásico do tipo horizontal.	26
Figura 4: Flotador a ar induzido na forma vertical.	28
Figura 5: Flotador a ar dissolvido na forma vertical.	28
Figura 6: Mecanismos de Tratamento de Emulsão Óleo/Água.	29
Figura 7: Princípio de Funcionamento de um Hidrociclone.	30
Figura 8: Localização geográfica do polo industrial de Guamaré.	42
Figura 9: Polo industrial de Guamaré, Rio Grande do Norte.	43
Figura 10: Planta isométrica da ETE do polo industrial de Guamaré.	44
Figura 11: Instalações do polo industrial de Guamaré.	45
Figura 12: Dique de recebimento do efluente no polo industrial de Guamaré.	46
Figura 13: Planta da estação de tratamento de efluentes de Guamaré após a implementação do projeto	59
Figura 14: Sistema de tratamento de água produzida para reuso em consumo humano	60
Figura 15: SAO da estação de tratamento de óleo de Guamaré - Visão 1.	61
Figura 16: SAO da estação de tratamento de óleo de Guamaré - Visão 2.	61
Figura 17: Flotador da Estação de Tratamento de Efluentes do polo industrial de Guamaré.	61
Figura 18: Injeção de desemulsificante na AP antes da passagem pelo flotador.	61
Figura 19: Bacia de Lodo da Estação de Tratamento de Efluentes do polo industrial de Guamaré – Visão 1	62
Figura 20: Bacia de Lodo da Estação de Tratamento de Efluentes do polo industrial de Guamaré – Visão 2.	62
Figura 21: Processo de Osmose e Osmose Inversa	63
Figura 22: Sistema de Tratamento da AP por filtros - Visão 1.	66
Figura 23: Sistema de Tratamento da AP por filtros - Visão 2.	66
Figura 24: Ponto de descarte da AP no emissário submarino da Praia do Mito.	66

Lista de Tabelas

Tabela 1: Diferentes Processos de Separação por Membranas.	33
Tabela 2: Principais processos de tratamento da água produzida.	36
Tabela 3: Valores máximos permitidos de parâmetros presentes na AP para consumo humano (Classe 1).	47
Tabela 4: Valores máximos dos compostos orgânicos presentes na AP para fins de consumo humano (Classe 1).....	48
Tabela 5: Ensaio referente ao agregado orgânico presente na água de produção	49
Tabela 6: Ensaio referente aos parâmetros presentes na água de produção	49
Tabela 7: Ensaio referente aos compostos inorgânicos presentes na água de produção	50
Tabela 8: Ensaio referente aos compostos orgânicos presentes na água de produção ...	50
Tabela 9: Ensaio referente aos parâmetros ecotoxicológicos presentes na água de produção	51
Tabela 10: Ensaio referente aos parâmetros - comparação	55
Tabela 11: Ensaio referente aos compostos inorgânicos – comparação.....	56
Tabela 12: Ensaio referente aos compostos orgânicos - comparação	57
Tabela 13: Elementos que não estão de acordo com as concentrações exigidos pelo CONAMA.	57

Lista de Unidades, Símbolos e Abreviaturas

Lista de Abreviaturas

ANP – Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis;

AP – Água Produzida

BRS – Bactérias Redutoras de Sulfato

BTEX – Grupo de compostos formado pelos hidrocarbonetos Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e Xileno

CAERN – Companhia de Águas e Esgotos

CBM – Metano Gerado nas Camadas do Carvão Ativado (*Coal Bed Methane*)

CO – Monóxido de Carbono

CO₂ - Dióxido de Carbono

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

CWA – Lei da Água Limpa (*Clean Water Act*)

DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio

EPA – agência de proteção Ambiental (*Environmental Protection Agency*)

ETAP – Estação de Tratamento de Água Produzida

ETE – Estação de Tratamento de Efluentes

ETO – Estação de Tratamento de Óleo

H₂S – Ácido Sulfídrico;

HPA – Compostos Policíclicos Aromáticos;

IDEMA – Instituto de Desenvolvimento Sustentável e Meio Ambiente

MCL – Níveis Máximos de Contaminantes (*Maximum Contaminants Levels*)

MN – Micro Filtração

MRON – Materiais Radioativos de Ocorrência Natural

NF – Nano Filtração

Offshore – Produção de Petróleo no Mar

OI – Osmose Inversa

Onshore – Produção de Petróleo em Terra

OR – Osmose Reversa

PSM – Processo de Separação por Membranas

RN – Rio Grande do Norte

SAO- Separador Água-Óleo

TDS – Total de Sólidos Dissolvidos (*Total Dissolved Solids*)

THP – Total de Hidrocarbonetos de Petróleo

TOG – Teor de Óleos e Graxas

UF – Ultra Filtração

UTPF – Unidade de Tratamento e Processamento de Fluidos

UIC - Controle da Injeção Underground (*Underground Injection Control*);

V.M.P – Valores Máximos Permitidos

Lista de Unidades e Símbolos

atm – Atmosfera (unidade de pressão);

°C – Graus Celsius;

mm – Milímetro;

m – Metro;

m² - Metro quadrado;

m³ - Metro cúbico;

mg/L- Miligrama por litro;

µm – Micro metro;

uT – Unidade de Turbidez;

uH – Unidade de Hazen de cor;

ΔP – Diferencial de Pressão

Capítulo 1

Introdução

1. Introdução

A indústria petrolífera no cenário mundial atual é de grande importância para que se possa atender de forma eficaz a demanda de energia, o que ocasiona uma busca constante pela obtenção de petróleo e de gás natural e sua otimização.

A exploração de petróleo gera como principal efluente a água produzida, tema bastante preocupante no cenário atual. A água associada ao petróleo pode conter diversos resíduos, desencadeando complicações ao meio ambiente. Em geral, a água produzida possui volumes de produção muito maiores que o próprio petróleo, o que juntamente com a complexidade de sua composição necessita de atenção, fazendo com que a água produzida requeira cuidados específicos, relacionados com aspectos técnicos, operacionais e ambientais.

Para que se tenha uma maximização do custo-benefício para a empresa responsável pela produção após o tratamento adequado, as corporações procuram encontrar a melhor forma para deposição e tratamento da água produzida, já que, com o aparecimento da lei de crimes ambientais (Lei 6938/1998), a empresa que produz o resíduo é responsável pela sua deposição e deve realizar o procedimento de forma correta, para que não ocorram impactos ao meio ambiente, o que torna possível sua posterior reutilização.

Atualmente, parte da água produzida do polo industrial da PETROBRAS de Guamaré vem sendo descartada via emissário submarino, enquanto outra é utilizada para recuperação de petróleo.

A reutilização de água produzida de petróleo para diversas finalidades hoje é uma alternativa viável para redução de gastos excessivos, em relação ao cenário mundial atual de escassez desse recurso não-renovável; além de ajudar a resolver um problema que as indústrias petrolíferas enfrentam todos os dias e ainda têm dificuldade para solucionar. A insuficiência de água é um problema que será enfrentado pelo mundo nas próximas décadas e no Brasil, a crise hídrica já se iniciou; situação que não pretende melhorar nos próximos meses. Como possibilidade para o reaproveitamento da água produzida tem-se o consumo humano, já que, somada a necessidade de novas fontes de água devido à crise hídrica, precisa-se de um meio para resolver o problema da produção de grandes volumes de água produzida associada ao petróleo.

Nesse contexto, o trabalho realizado pretende realizar um estudo teórico para desenvolver um projeto conceitual de tratamento e reuso da água produzida descartada pela empresa PETRÓLEO BRASILEIRO S/A - PETROBRAS, situada na cidade de Guamaré/RN, de forma que o efluente, após o tratamento apropriado, seja utilizado para consumo humano.

Assim, com a finalidade de analisar a água de produção após o tratamento específico para consumo humano, serão estudados e avaliados os limites de contaminantes permitidos pela legislação em vigor, que apresenta as instruções ambientais para a adequação da água produzida para o consumo humano, bem como o método que melhor se enquadre para tratamento.

Capítulo 2

Objetivos

2. Objetivos

2.1 Objetivos Gerais

Elaborar um projeto conceitual de um sistema de tratamento para adequação da água produzida de reservatórios de petróleo descartadas pelo polo industrial da empresa PETRÓLEO BRASILEIRO S/A - PETROBRAS em Guamaré/RN e seu reuso, advinda da confluência de vários campos de petróleo terrestres, com a finalidade de sua posterior utilização para consumo humano, sendo distribuída nas cidades de Guamaré, Diogo Lopes e Galinhos.

2.2 Objetivos Específicos

Identificar os requisitos necessários (características físico-químicas) da água produzida desse polo para que seja utilizada como fonte de água potável, estando adequada as leis ambientais vigentes.

Definir e avaliar se o sistema de tratamento da água produzida escolhido, irá obter a eficiência necessária e viabilidade para implantação do projeto em questão.

Capítulo 3

Aspectos Teóricos

3. Aspectos Teóricos

3.1 Água Produzida

3.1.1 Origem

A produção de água é uma realidade inerente a produção de petróleo. A geração desse efluente depende de diversos fatores, dos quais são incluídos a proximidade de mananciais e o tipo de formação, o que significa que mesmo sendo produzida na grande maioria dos poços de petróleo, pode acontecer a não associação e posterior produção dessa água ao óleo.

A origem dessa água produzida é de grande relevância, tendo em vista que a composição desse efluente é influenciada diretamente por esse fator, além do procedimento de extração e da qualidade do óleo.

A partir da matéria orgânica depositada com sedimentos, têm-se origem o petróleo. Para que haja a acumulação de uma reserva de petróleo, faz-se necessário que após seu processo de geração em um ambiente com temperatura adequada, ocorra a migração para rochas permeáveis adjacentes, e que estas possuam em suas estruturas armadilhas geológicas, que interrompem o seu movimento. Após a concentração do petróleo, apesar de sua segregação da água, ainda pode haver contato com aquíferos. Dessa forma, percebe-se que há diversas formas de produção de água, que incluem: água presente nos reservatórios (depende da saturação mínima para que ela se torne móvel), contato com aquíferos (podem estar adjacentes às formações portadoras de hidrocarbonetos) e água injetada em projetos que visam aumentar a recuperação de óleo (THOMAS, 2004).

É comum que os reservatórios produzam óleo, gás natural e água. Quando esses fluidos chegam a superfície, há separação, o que leva o óleo e o gás às refinarias.

A figura 1 mostra os fluidos quando estão contidos no reservatório e quando eles são levados para a superfície.

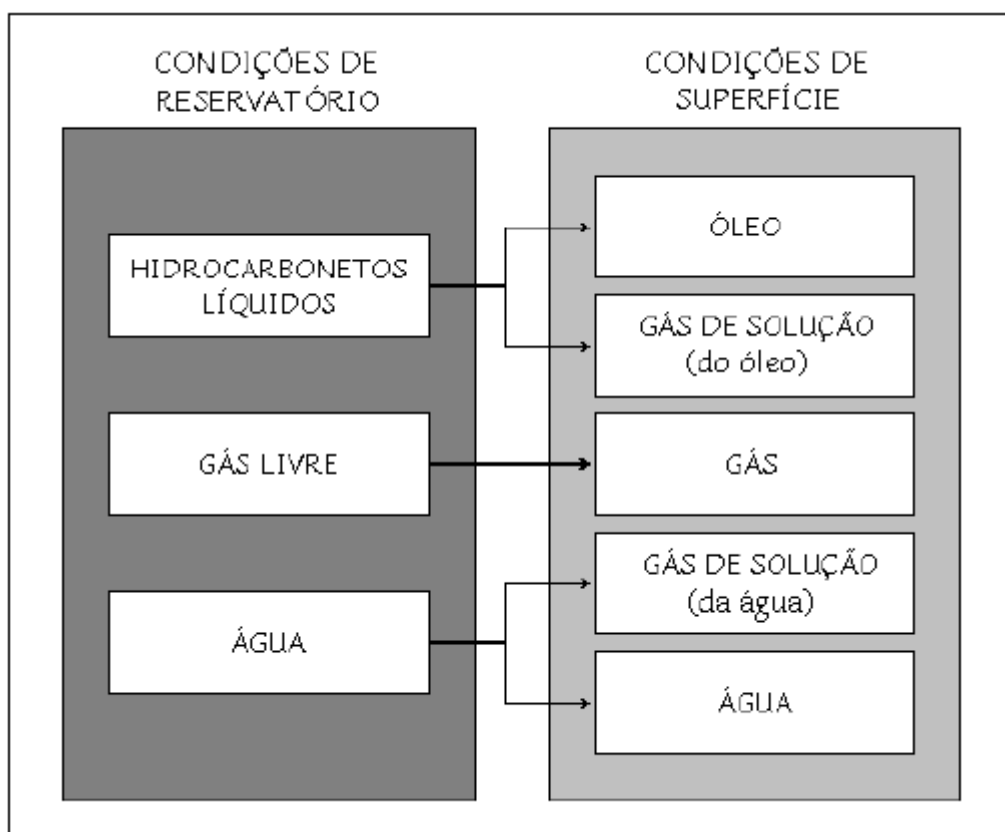


Figura 1: Comportamento dos fluidos nas condições de reservatório e superfície.

Fonte: Thomas (2011)

A principal razão para que se faça necessário o estudo para descarte ou reuso da água produzida é sua produção em grande escala, já que a maioria dos poços de petróleo produz esse efluente. Inicialmente a produção ocorre em pequenas quantidades; entretanto, quando a pressão diminui nas extremidades do reservatório devido a produção contínua, ocorre um rearranjo dos fluidos dentro dele, o que provoca uma alteração no nível do contato óleo/água. Como resultado disso, a água chega ao poço e ocorre sua produção, necessitando de separação do óleo que será utilizado e de seu posterior tratamento.

3.1.2 Composição

A água associada ao petróleo é caracterizada por conter quantidades variadas de teor de sais, compostos orgânicos que incluem hidrocarbonetos dissolvidos, ácidos, fenóis, produtos químicos decorrentes dos processos de produção e/ou tratamento (desemulsificantes, antiespumantes), sólidos em suspensão (areia, lodo, argilas, outros silicatos, gipsita), metais pesados e gases (CO , CO_2 e H_2S). Além disso, pode haver presença de fluidos descartáveis provenientes de outros processos, como metais pesados, componentes com algum tipo de radiação e altas concentrações de cloretos.

Segundo FERNANDES JR (2006), a água produzida pode ser encontrada em duas configurações:

- 1) Livre – constitui uma fase diferente da fase óleo, não estando profundamente associado a este. Ocorre quando o diâmetro da gota favorece a coalescência. É uma mistura instável que pode ser separada por decantação;
- 2) Emulsionada – mistura íntima, relativamente instável entre óleo e água decorrente do cisalhamento do óleo em bomba, válvulas e equipamentos, formando gotículas muito pequenas.

A água de produção tem uma composição diversificada, o que inclui a presença de sais solúveis. Água com altos níveis destes sais podem causar diversos inconvenientes; que podem ser relacionados com atividades industriais: corrosão, incrustação e entupimento dos equipamentos (NUNES, 2013). É importante salientar que os sais presentes na água de produção alteram a solubilidade de hidrocarbonetos na mesma: a solubilidade diminui com o aumento da salinidade e aumenta com a temperatura (Araújo apud Lima, 1996). A erosão das rochas e as interações da água injetada com a formação provocam a presença de sólidos na água produzida.

As composições química, biológica e física da água produzida estão intimamente relacionadas com as características do petróleo em que ela está associada, além da formação geológica e da localização geográfica do reservatório (STEWART & ARNOLD, 2011), já que esta água esteve em contato com o campo gerador de óleo durante milhões de anos, para que houvesse o processo que origina o petróleo (Cenpes, 2005).

3.1.3 Problemática e Impactos Ambientais da Água Produzida

Sendo a água produzida um subproduto gerado da produção de petróleo e gás, há necessidade de tratamento para atender as especificidades ambientais, operacionais ou da atividade produtiva, visto que como efluente, a composição da água associada ao petróleo tem elevado potencial poluidor ao meio ambiente. O impacto ambiental causado é avaliado pelos componentes e suas respectivas quantidades presentes na caracterização e pela localização onde o efluente será descartado.

Segundo MOTTA et al (2013), os elementos a seguir, quando presentes na composição da Água Produzida (AP), podem causar impactos de grande relevância aos rios, lagos e mares, o que pode provocar contaminação de aquíferos e do solo, resultando em problemas à fauna e a flora do local:

Minerais dissolvidos da formação:

Metais Pesados: podem estar presentes metais como o cádmio, cromo, cobre, chumbo, mercúrio, níquel, prata e zinco (UTVIK, 2003). O principal problema da presença de metais pesados na água produzida está relacionado a sua toxicidade ao ser humano, já que eles possuem capacidade de bioacumulação na cadeia alimentar.

Sólidos Suspensos: constituídos por compostos como sólidos da formação (areia, silte, argila e carbonatos), produtos de corrosão e incrustação, bactérias, ceras e asfaltenos. Sua presença pode interferir na auto purificação de rios, ocasionar depósitos de lama, danificar pontos de pesca e causar impactos visuais aos mananciais. Também estão ligados a toxicidade da água, devido a presença de componentes nocivos.

Materiais Radioativos: a principal fonte de radioatividade são as incrustações da produção, possuindo como principal íon rádio. Não há indícios de riscos elevados de manuseio de água produzida com elementos radioativos. Entretanto, assim como os metais pesados, há bioacumulação desses materiais em peixes e crustáceos.

Óleo:

É composto por uma mistura de vários produtos, que inclui benzeno, tolueno, etilbenzeno e xileno (BTEX), hidrocarbonetos poliaromáticos (HPA). Os hidrocarbonetos são altamente insolúveis em água, o que resulta em uma maior parte de óleo na forma dispersa na água. O óleo pode estar presente na água com as seguintes formas:

Óleo livre: óleo na forma dispersa em grandes gotas na água, o que facilita sua remoção através de separadores gravitacionais, já que é formado praticamente só por hidrocarbonetos insolúveis. Os problemas acarretados por esse tipo de formação na água estão relacionados a má visibilidade de águas superficiais, alteração no sabor da água e toxicidade aos peixes, diminuindo sua proliferação.

Óleo emulsionado: óleo na forma dispersa em pequenas gotas na água, além de também ser praticamente formado por hidrocarbonetos insolúveis. Entretanto, devido ao diâmetro de sua gota, é mais difícil de ser retirado da água e pode ter efeitos tóxicos agudos.

Óleo insolúvel: sua composição inclui os hidrocarbonetos menos solúveis em água, como BTEX e fenóis.

Compostos químicos residuais da produção:

São formados por compostos utilizados na produção com a finalidade de prevenir ou tratar problemas de operação, como os inibidores de corrosão, de incrustação, biocidas, desemulsificantes. (MOTTA *et al.*, 2013)

Sólidos da Produção:

São originados por sólidos da formação (argila, areia, silte) e produtos de incrustação, corrosão, bactérias, ceras e asfaltenos.

Gases dissolvidos:

Os principais gases presentes na água produzida são o gás natural, CO₂ e H₂S. Os problemas causados pela presença desses gases na AP incluem corrosão e incrustação. Entretanto, a remoção de alguns deles, como CO₂ e H₂S pode ocasionar o aumento do pH, resultando em formação de precipitado. O O₂ é um gás que não está presente naturalmente, mas é incorporado a água produzida quando levada a superfície, o que pode causar oxidação (STEWART & ARNOLD, 2011).

Micro-organismos:

Poucos micro-organismos conseguem sobreviver na AP, devido a presença de compostos altamente tóxicos. Ainda assim, pode haver ocorrência de BRS e bactérias anaeróbias.

Salinidade:

A alta salinidade da água tem maior impacto quando se trata da irrigação, já que pode provocar improdutividade do solo para agricultura. Além disso, há influência em problemas com águas usadas para consumo humano (além da agricultura), como mananciais de água doce, aquíferos, lagos e rios.

Em instalações *onshore* ou *offshore*, a água produzida deve ser tratada de acordo com a legislação ambiental em vigor. Entretanto, só esse seguimento de tratamento não garante que os principais parâmetros da AP para adequação ao consumo humano serão resolvidos. Assim, a água produzida se torna imprópria para o consumo humano devido a problemas causados pela sua composição, que incluem: toxicidade, alteração no sabor da água e bioacumulação na cadeia alimentar, todos efeitos nocivos ao ser humano.

Quando um campo produtor é autorizado a funcionar pelo órgão responsável para exercer essa atividade, também é incluída a redução de resíduos da água produzida. A composição da água produzida é geralmente conhecida, o que facilita a utilização de um tratamento físico-químico. No entanto, deve-se analisar anteriormente os elementos tóxicos para não incrementar a sua quantidade na composição da AP pela utilização de produtos químicos. Além disso, há análise do sistema de produção com a finalidade de se escolher o melhor produto para o processo em questão. Tem-se um leque de produtos que são usados na maioria dos casos, para suas finalidades específicas:

- ✓ Quebradores de emulsão, usados para a recuperação de óleo;
- ✓ Inibidores de corrosão (que podem ser tóxicos);
- ✓ Inibidores de parafina (quando se sabe de sua formação);
- ✓ Preventivos de crostas (para evitar formação de carbonatos e sulfatos);
- ✓ Depressores de hidratos (geralmente etanol ou glicol).

Ainda hoje, a água produzida do petróleo é jogada em diversas áreas, que incluem as áreas de preservação ambiental e permanente, ocasionando a contaminação de aquíferos, lençóis freáticos, solo para agricultura, além da toxicidade ao ser humano. Sendo tratada de forma adequada, além de reduzir a contaminação do meio ambiente, a AP pode abastecer cidades com baixo índice pluviométrico, além daquelas com poucos mananciais e com poços constituídos por água salobra.

3.2 Tratamento da Água Produzida

Para que se escolha o método de tratamento da água produzida, deve-se analisar os compostos que se deseja remover. Os compostos a serem removidos, por sua vez, dependem do fim em que será utilizada essa água.

Assim, o tratamento da água produzida pode ser realizado visando as seguintes finalidades: remoção de óleo livre ou disperso, bactérias, metais pesados, sais, gases dissolvidos, sólidos resultantes da produção, materiais radioativos, agentes de incrustação, dureza, entre outros. Para que haja adequação da água produzida com presença dos elementos supracitados para o consumo humano como forma de reuso, deve haver a utilização de diversos processos físicos, químicos e biológicos.

O processo de tratamento da água produzida do petróleo que chega a estação de tratamento de óleo com sólidos, óleo livre, óleo emulsionado, gases, metais pesados, bactérias e sais, geralmente inclui duas fases:

1. Separação de gases, sólidos e óleo livre (dispersões grosseiras, diâmetro da gota maior que 150 μm).
2. Separação de óleo emulsionado (diâmetro da gota entre 50 e 150 μm).

Em geral, após essas fases, a água é adequada de acordo com o seu destino final. Segundo CARVALHO (2015), pode haver uma etapa de pré-tratamento antes de ocorrer as etapas utilizadas em geral para tratamento de efluentes líquidos.

3.2.1 Pré-tratamento

A etapa de pré-tratamento é levada em consideração no processo para evitar que haja problemas com os equipamentos da planta de tratamento. Por esse motivo, há pouco efeito na diminuição de DBO_5 (5-25%), já que nessa etapa do processo objetiva-se a retirada apenas de sólidos em suspensão e acondicionamento da AP para posterior tratamento. Podem ser utilizados os seguintes mecanismos:

- ✓ Gradeamento – Remove sólidos em suspensão e corpos flutuantes que podem danificar bombas, válvulas e registros. O espaço das barras é de 50 a 150 μm . A figura 2 (CARVALHO, 2015) representa diferentes tipos de sistemas de gradeamento.

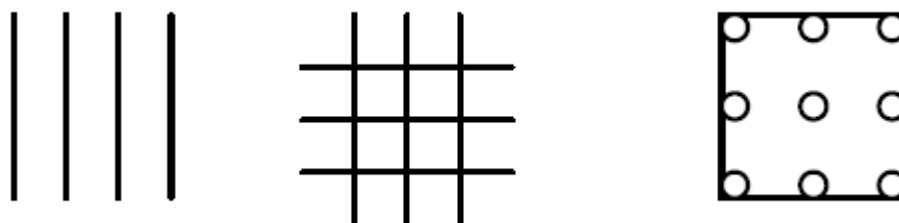


Figura 2: Sistemas de gradeamento.

Fonte: CARVALHO (2015)

- ✓ Peneiras - Separação por tamanho de partículas; processo mecânico.
- ✓ Desarenadores ou caixas de areia – Retirada de areia e outros materiais abrasivos do fluxo principal. A utilização desse mecanismo protege as bombas contra abrasão e entupimento ou obstáculos em dutos e válvulas. Existem dois tipos: de fluxo horizontal e aerados.
- ✓ Equalização: Se caracteriza como uma técnica para melhoria da eficiência de processos posteriores. Consiste num tanque com aeração e agitação, o que evita

odores (aerobiose) e deposição de sólidos. Pode se localizar anteriormente ao despejo da carga no corpo receptor, anteriormente ao sistema de coleta ou anteriormente ao tratamento químico ou biológico.

3.2.2 Etapa de Separação do Óleo Livre

A etapa de separação de óleo livre geralmente utiliza o Separador Água-Óleo como equipamento para tal fim.

A principal função do Separador Água-Óleo é separar o óleo livre da água residuária, sólidos suspensos e gases dissolvidos, além do óleo que foi emulsificado de forma mecânica (SOARES, 2013). Esse equipamento utiliza a gravidade como forma de separação, através da diferença de densidades entre os líquidos. O óleo e o gás ficam na superfície por possuir densidade específica menor que a da água, enquanto que os sólidos encharcados com óleo e sedimentos se depositam no fundo do Separador (CARVALHO, 2015). Esse equipamento é o tradicionalmente mais utilizado devido a sua simplicidade. No entanto, o Separador Água-Óleo não consegue separar substâncias solúveis, partículas muito pequenas e óleo emulsificado quimicamente, o que necessita de um outro tipo de processo para se obter melhor eficiência. A figura 3 mostra um exemplo de Separador Trifásico do tipo horizontal:

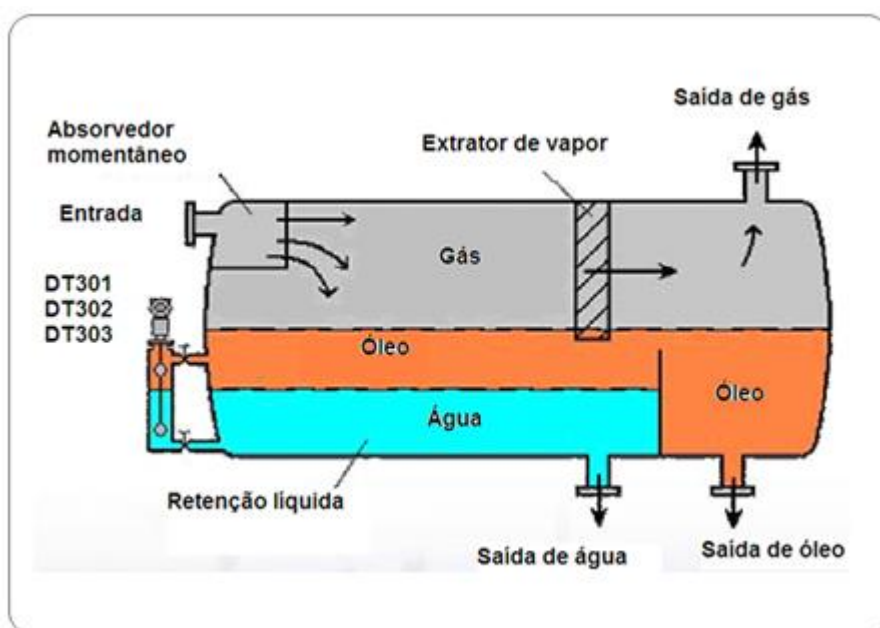


Figura 3: Separador Trifásico do tipo horizontal.

Fonte: <http://www.smar.com/brasil/artigo-tecnico/medicao-de-nivel>

3.2.3 Tecnologias comumente utilizadas para tratamento do óleo emulsionado na água

Os processos mais utilizados de tratamento da água de produção que vem dos reservatórios de óleo e gás incluem a flotação a ar/gás, que deve ser precedida pela adição de produtos químicos desemulsificantes, hidrociclones, sistemas de filtração e PSM's (Processo de Separação por Membranas). Para que se atinja uma melhor eficiência final de separação os métodos supracitados são utilizados em conjunto.

Segundo FERNANDES JR. (2006), a flotação a ar utiliza a gravidade como forma de separação, já que a densidade da fase que se deseja remover sendo menor que a do líquido de suspensão possibilita a sua flutuação para a superfície. Através da formação de bolhas ao redor da partícula de em questão, ela se torna mais leve, o que favorecer a execução do processo (SOARES, 2013).

A flotação a ar tem desvantagens relacionadas ao custo dos desemulsificantes utilizados antes de seu tratamento e a geração de lodo, que requer um descarte adequado. (STEWART & ARNOLD, 2011).

Há dois tipos de flotação a ar/gás, que para serem definidas dependem da forma como o ar/gás é inserido no processo e o tipo de equipamento: flotação a ar/gás induzido e flotação a ar/gás dissolvido.

A flotação por ar/gás induzido utiliza um compressor para gerar as bolhas (mecanicamente) e injetar ar/gás na célula de flotação. São formadas gotas com diâmetro entre 700 e 1500 μm , ocasionando a colisão entre as partículas de óleo e as bolhas de ar/gás, além de tornar o gás e o líquido altamente misturados (SOARES, 2013). A figura 4 mostra um esquema de um flotador a ar induzido na forma vertical:

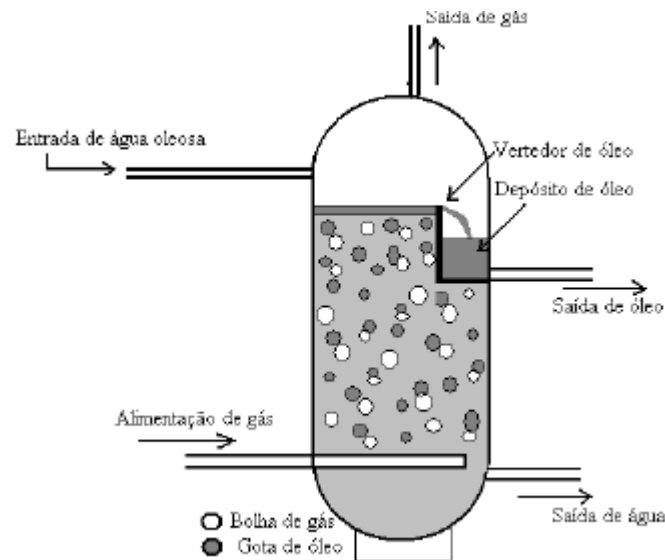


Figura 4: Flotor a ar induzido na forma vertical.

Fonte: Souza (2009)

A flotação a ar/gás dissolvido é o método mais eficaz e mais utilizado em campos terrestres. Diferentemente do flotor a ar/gás induzido, esse tipo de flotor satura previamente com ar/gás sob pressão o efluente a ser tratado. Inicialmente, há aumento da solubilidade do ar, fazendo com que a mistura água e ar seja bruscamente expandida devido a saturação do efluente. Logo após, acontece o processo inverso: ao passar pela válvula redutora de pressão, reduz-se a pressão e conseqüentemente há também redução da solubilidade do ar na água. Assim, quando a pressão sobre o líquido é reduzida, o ar/gás dissolvido é descomprimido em bolhas extremamente pequenas (microbolhas), que aderem e suspendem a matéria e o óleo para a superfície. A figura 5 mostra o esquema de um flotor a ar dissolvido:

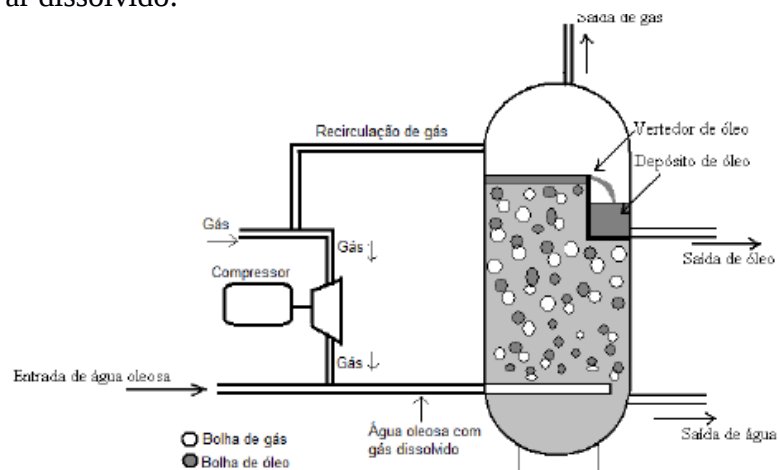


Figura 5: Flotor a ar dissolvido na forma vertical.

Fonte: Souza (2009)

Para que ocorra a desestabilização de uma emulsão, são utilizados quatro diferentes processos (SHAW, 1975):

- ✓ Coagulação: neutralização da carga da partícula;
- ✓ Floculação: agrupamento de partículas coaguladas ou desestabilizadas a fim de formar massas maiores ou flocos;
- ✓ Sedimentação/flotação (*creaming*): movimentação gravitacional das gotas para a superfície da fase contínua em função da diferença de densidade entre as duas fases. A integridade física das gotas é mantida;
- ✓ Coalescência: junção das gotas com integridade física destruída e aumento do diâmetro.

A figura 6 mostra os mecanismos de tratamento de emulsão óleo/água:

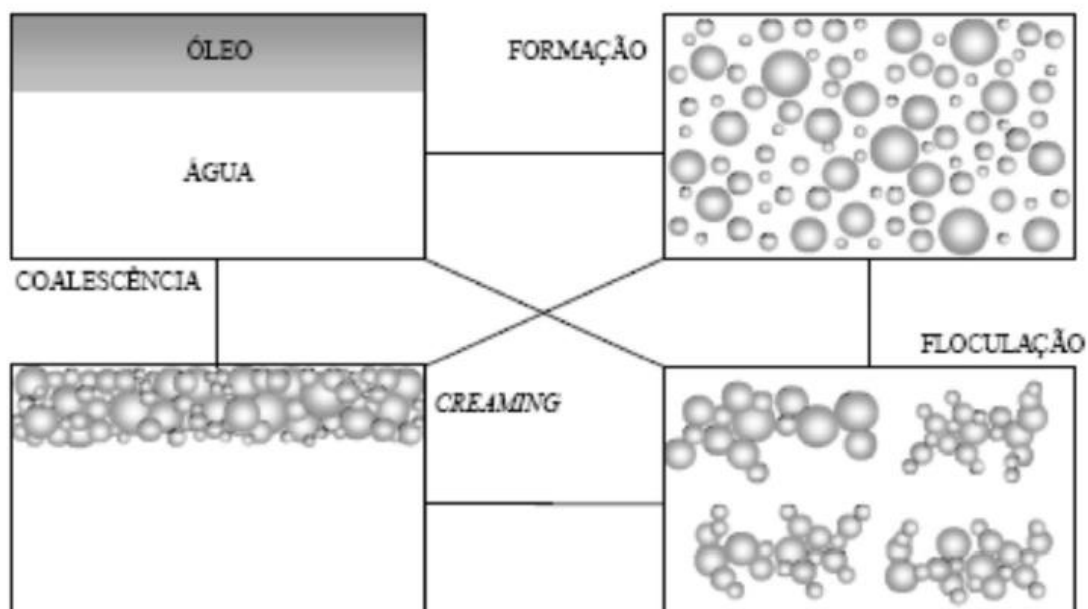


Figura 6: Mecanismos de Tratamento de Emulsão Óleo/Água.

Fonte: Fernandes Jr.(2006)

Os hidrociclones aceleram o processo de separação do óleo (SOARES, 2013), já que são destinados a separação sólido-líquido, sólido-sólido, líquido-líquido e gás-líquido. No caso da separação óleo-água (líquido-líquido), eles geralmente são instalados após os separadores trifásicos ou, em alguns casos, após os tratadores

eletrostáticos (NUNES, 2013). Segundo FERNANDES JR. (2006), o princípio de funcionamento dos hidrociclones inclui os seguintes passos:

- 1º: A água produzida com óleo emulsionado é bombeada a baixa pressão para o hidrociclone;
- 2º: Geração de um movimento espiral descendente, devido a forma do equipamento e a força da gravidade, além do fluxo gerado anteriormente;
- 3º: Produção de uma zona de muito baixa pressão devido ao espaçamento no centro;
- 4º: Formação de uma corrente ascendente no centro, pela diminuição da área;
- Atuação forte de duas forças: força centrífuga e força de arraste central.
- 5º: As partículas de menor densidade são arrastadas para o centro e saíam pela parte superior;
- 6º: As partículas mais densas saíam pela base do hidrociclone.

Devido a utilização da força centrífuga como método para separação da água do óleo, após a ocorrência dos passos anteriores, a água tratada sai pela base do hidrociclone e a parte líquida contendo em sua maioria óleo sai pela parte superior, sendo denominada de rejeito. A figura 7 avalia esquematicamente a funcionalidade de um hidrociclone:

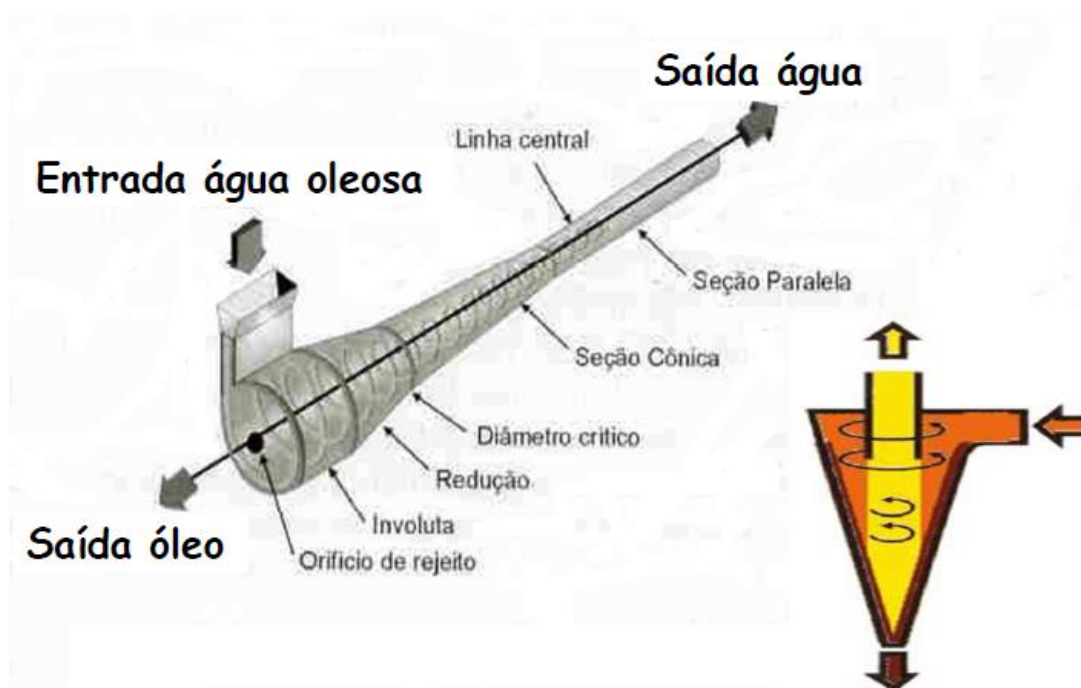


Figura 7: Princípio de Funcionamento de um Hidrociclone.

Fonte: Fernandes Jr. (2006)

Entre as vantagens dos hidrociclones se encontram o pequeno tamanho e o baixo peso, os baixos tempos de residência, a baixa manutenção e o baixo acompanhamento operacional, a variação na posição de instalação (vertical ou horizontal), a ausência de partes móveis e de influência provocada pelo balanço, além da admissão de variações na vazão. Entretanto, as desvantagens incluem a remoção de apenas parte do óleo emulsionado, fazendo com que a concentração de TOG na saída seja superior a 20 mg/L, além da facilitação da deposição de sais incrustantes nas paredes dos liners, necessitando de injeção de anti-incrustantes.

A filtração é um processo físico-químico e/ou biológico (filtros lentos) que separa as impurezas em suspensão na água, através de sua passagem por um meio poroso. Para que o mecanismo em questão funcione corretamente, é necessária a ação conjunta de três fenômenos: transporte, aderência e desprendimento das partículas em suspensão que se pretende remover. As partículas se movem ao longo das linhas de corrente, o que se chama de regime de escoamento laminar. Para que as partículas sejam removidas é necessário que os mecanismos de transporte desviem suas trajetórias, conduzindo-as à superfície dos grãos (coletores) do meio filtrante, e as forças que tendem a mantê-la aderida ao coletor superem as que atuam do sentido de desprendê-las. Para melhorar a eficiência do processo pode-se promover a floculação prévia e/ou aumentar a granulometria do meio filtrante, já que o tamanho dos grãos e do vazio entre eles tem grande influência na remoção da matéria em suspensão e no desempenho hidráulico do filtro.

O Processo de Separação por Membranas (PSM) é utilizado para diversas finalidades que incluem a produção de água potável a partir de água do mar, filtração de efluentes para recuperação de compostos, para concentrar, purificar ou fracionar soluções sensíveis a temperatura. A grande importância desse tipo de mecanismo é a sua capacidade de tratar efluentes com altos teores de óleo em emulsão e de partículas com tamanhos pequenos e médios (MOTTA *et al.*, 2013).

Segundo HABERT *et al.*, 2006, as membranas podem ser definidas como “uma barreira que separa duas fases e que restringe total ou parcialmente o transporte de uma ou várias espécies químicas presentes nas fases”. Isso significa que, essas películas extremamente finas permitem a passagem do solvente e retém o soluto de uma solução, devido a presença de poros abertos em seu mecanismo (FERNANDES JR., 2014).

Devido a sua diversidade nas aplicações e êxito na retirada de partículas que não podem ser removidas em outros tipos de processos, o Processo de Separação por

Membranas é o principal método empregado para tratamento da água produzida do petróleo, com a finalidade de deixá-la adequada ao consumo humano.

O princípio de funcionamento do Processo de Separação por Membranas pode levar em consideração a filtração tangencial, a retenção por tamanho ou afinidade físico-química ou ainda a utilização de um gradiente como força motriz (gradiente de concentração, de potencial elétrico, de pressão de vapor ou de pressão hidráulica). O gradiente mais utilizado para tratamento de água é o de pressão hidráulica, sendo dividido em quatro categorias, de acordo com os materiais que podem ser retidos e seus pontos de corte. As categorias e suas possíveis aplicações são (MOTTA *et al.*, 2013):

- ✓ Microfiltração (μF): separação de sólidos suspensos;
- ✓ Nanofiltração (nF): separação de macromoléculas;
- ✓ Ultrafiltração (uF): geralmente utilizada na separação de íons multivalentes de íons univalentes;
- ✓ Osmose Inversa/Reversa (OI/OR): separação de componentes dissolvidos e iônicos.

A ampla gama de separação por tipo de película do PSM permite que sejam utilizadas várias membranas para aplicações diferentes, acarretando em uma melhor adequação da água produzida ao destino final; o consumo humano no presente trabalho. A tabela 1 exemplifica a utilização do PSM, o diferencial de pressão utilizado por cada categoria e os materiais que podem ser removidos dos efluentes.

Tabela 1: Diferentes Processos de Separação por Membranas.

(Fonte: Habert *et al.*, 2006)

Processo	Força Motriz (ΔP)	Material Retido	Aplicações
Microfiltração (MF)	0,5 – 2 atm	Material em suspensão, Bactérias	· Esterilização bacteriana · Concentração de células
Ultrafiltração (UF)	1 – 7 atm	Colóides, Macromoléculas	· Recuperação de pigmentos · recuperação de óleos
Nanofiltração (NF)	5 – 25 atm	Sais bivalentes solúveis e em suspensão	· Purificação de enzimas · Biorreatores a membrana
Osmose Inversa (OI)	15 - 80 atm	Todo material solúvel em suspensão	· Dessalinização de águas · Concentração de sucos e frutas

A microfiltração facilita o êxito dos processos que ocorrem em sequência na planta, já que possui a capacidade de reter a fase emulsionada e os sólidos suspensos (SOARES, 2013). Assim como a microfiltração, a ultrafiltração é principalmente utilizada na separação sólido/líquido e eliminação de partículas. No entanto, se utilizada junto a adsorção sobre carvão ativado em pó, a ultrafiltração além de deter partículas minerais e orgânicas e partículas biológicas equivalentes a algas, bactérias e vírus, pode eliminar moléculas orgânicas dissolvidas (NUNES, 2013). De acordo com Lin (2008), se combinadas com um processo de troca iônica, as membranas de ultrafiltração deixam a água tratada com uma excelente qualidade, permitindo seu descarte e reuso.

Para melhorar a qualidade da água antes do processo de osmose inversa, foi utilizada uma membrana de nanofiltração acoplada com uma unidade de adsorção em carvão ativado, como forma de pré-tratamento (SILVA, 2010). A nanofiltração é geralmente utilizada para abrandamentos, e, em parte, para desmineralizar água salobra ou pouco salina. No caso da osmose inversa, é possível reter sais e compostos orgânicos solúveis, o que gera uma corrente permeada com qualidade suficiente para ser reutilizada ou aplicada para diversos fins, como o consumo humano.

Dentre os processos supracitados, consegue-se uma boa remoção de compostos dissolvidos utilizando a nanofiltração ou osmose reversa, teoricamente. No entanto, devido à necessidade da osmose reversa utilizar elevadas pressões de operação, a nanofiltração é o processo de maior aplicabilidade na remoção de compostos dissolvidos (NUNES, 2013).

O teor de sal contido na água é de fundamental importância para o consumo humano. O mecanismo de osmose reversa é capaz de reter elevadas quantidades de sais e deixar a água praticamente isenta de moléculas inorgânicas de baixa massa molar como sódio, cálcio e magnésio. No entanto, diferentemente de outras atividades de reuso, a ausência dessas substâncias pode causar problemas para a população humana. Quantidades excessivas de sódio (principalmente), magnésio e cálcio, podem afetar negativamente a vida humana, já que acarretam problemas para o desenvolvimento de crianças, além de riscos com relação a saúde também de adultos. Dessa forma, após o Processo de Separação de Membranas por Osmose Inversa, pode haver necessidade de equalizar as concentrações de cálcio, magnésio e outros nutrientes para fins de consumo humano, já que a água produzida tem como principal característica o alto nível de salinidade (LIRA SOARES, 2013).

Apesar de todas as vantagens apresentadas pelo Processo de Separação de Membranas (relativamente simples, energeticamente econômico, práticos, efluentes com boa qualidade), há ocorrência de alguns fatores que limitam esses processos, que incluem:

- ✓ Polarização da concentração
- ✓ Incrustações / Bioincrustações
- ✓ Alto custo das membranas
- ✓ Baixas concentrações afluente de óleo (< 10 ppm)
- ✓ Temperaturas baixas (< 45° C)
- ✓ Destino dos rejeitos da membrana
- ✓ Controle do pH (7,5)

A polarização da concentração consiste na formação de um gradiente de concentração na camada de solução imediatamente adjacente à superfície da membrana (MOTTA *et al.*, 2013), ocasionado pelo fluxo convectivo do soluto em direção a membrana (SOARES, 2013). Esse fenômeno é intrínseco ao processo e representa um aumento na resistência a permeação através da membrana que, dessa forma, reduz o fluxo e sua seletividade (MOTTA *et al.*, 2013). A polarização da concentração é um processo de natureza reversível, mas se ocorrer de forma intensa pode ocasionar efeitos irreversíveis, como as incrustações e as bioincrustações. Outros fatores ocasionados pela polarização da concentração são a queda do fluxo do permeado, bloqueio de poros, aumento da resistência à passagem de solvente e perda de seletividade devido à passagem de soluto através da membrana (FRITZMANN *et al.*, 2007).

A deposição de partículas, adsorção de substâncias orgânicas e precipitações de sais na superfície das membranas ou dentro delas ocasionam o fenômeno de incrustação. Se a incrustação ocorrer devido ao material orgânico e micro-organismos, tem-se o fenômeno de bioincrustação (SILVA, 2010). A incrustação pode causar perda irreversível da permeabilidade das membranas. Pode-se remover alguns compostos causadores de incrustação por meios físicos, como a retrolavagem e agitação a ar. No entanto, alguns desses compostos só podem ser removidos por limpeza química, que é uma parte integrante do processo operacional de um sistema de membranas, apresentando um impacto elevado na eficiência e aspectos econômicos do processo.

Para aprimoramento da eficiência do Processo de Separação por Membranas estão sendo pesquisadas novas tecnologias, que incluem a membrana cerâmica a base de argilas de baixo custo, como caolim e outras (VASANTH, PUGAZHENTHI, UPPALURI, 2011). Além disso, há outras linhas de pesquisa, em termos de modificação da membrana, que visa aumentar sua permeabilidade.

Mesmo que o Processo por Separação de Membranas apresente diversas desvantagens, a aplicação desse sistema como substituição ou mesmo conjugado com os sistemas tradicionais, são uma alternativa bastante robusta para o tratamento da água produzida do petróleo com a finalidade de adequá-la ao consumo humano.

A tabela 2 abaixo mostra uma comparação entre os principais processos de tratamento da água produzida do petróleo, levando em consideração da sua aplicabilidade até suas desvantagens.

Tabela 2: Principais processos de tratamento da água produzida.

Fonte: Stewart & Arnold (2011)

	Membranas	Hidrociclones	Flotadores	Separadores gravitacionais convencionais	Separadores gravitacionais de placa
Princípio operacional	Filtração	Separação gravitacional aprimorada	Flotação a gás natural	Separação gravitacional	Coalescência + separação gravitacional
Capacidade de remoção, em diâmetro de gota (μm)	1	10 a 30	10 a 20	100 a 150	30 a 50
Requerimento de áreas superficiais	Baixo	Baixo	Baixo	Elevado	Elevado
Requerimento por produtos químicos	Não	Não	Sim	Não	Não
Aplicação em instalações de tratamento de AP	Onshore e offshore	Offshore	Onshore e offshore	Onshore	Onshore
Principais desvantagens	Fouling e necessidade por limpeza química	Bloqueio da porta de rejeito por areia ou incrustação e erosão por areia	Pouco efeito em gotas em 2 e 5 μm ; uso de químicos e geração de lodo	Tamanho e peso muito elevados: baixa eficiência para diâmetro de gotas menores	Tamanho e peso elevados

3.3 Utilização da água produzida tratada para consumo humano

Para que se tenha uma qualidade de água adequada ao consumo humano, o planejamento se torna uma atividade essencial na execução dessa atividade; já que percebe-se a necessidade de sua reutilização, através da observação da escassez desse recurso natural e da crise hídrica sofrida pelo Brasil nos últimos anos. O reaproveitamento de água produzida a partir do petróleo possibilita não só o volume gerado, mas também deve ser enquadrada para fornecer os nutrientes necessários para o desenvolvimento de um ser e proporcionar seu bem estar. Além disso, o reuso dessa água pode oferecê-la em lugares afetados pela crise hídrica.

Segundo a edição 154 da Super Interessante (Julho de 2000), um exemplo para a reutilização da água como consumo humano está na cidade de Orange Country, na Califórnia, Estados Unidos. Há mais de 20 anos o lençol subterrâneo da cidade é abastecido por esgoto purificado, o que além de preencher o lençol, evita a contaminação

por água do mar que ocorreu nos anos 60 devido a superexploração pela irrigação desse aquífero.

Outros lugares também reutilizam água de esgoto para consumo humano, como disse o professor e pesquisador Ivanildo Hespanhol, segundo experiência que teve na República da Namíbia, continente africano. Segundo ele, há 40 anos já se trata esgotos domésticos para fins potáveis. Percebe-se que assim como o esgoto pode ser tratado e reutilizado de forma potável, o mesmo pode ser realizado com a água produzida do petróleo. Hoje, esse efluente já é reutilizado de diversas formas, que incluem a reinjeção em poços e a geração de vapor para recuperação do óleo e a irrigação. No caso da irrigação, é válido salientar que assim como a água produzida, esgoto tratado também é reutilizado para tal fim. Segundo matéria da globo do dia 01/06/2012, a cidade de Tel Aviv, em Israel, tem 100% da água reaproveitada, através de um complexo de tratamento que a recupera; e ainda: após toda a purificação por processos físicos, químicos e biológicos, a água percorre 100 km até o deserto de Neguev e irriga várias plantações.

Na Califórnia, o distrito de Cawelo manteve um contrato de 1996 até 2011 de compra de água produzida do petróleo tratada dos campos da empresa Chevron para revender aos fazendeiros irrigarem campos com 20 tipos de frutas, hortaliças e cereais. De acordo com a Petrobras (2008), a água produzida passa por uma planta de tratamento que possui separador água-óleo, flotador a ar dissolvido, aeração e filtro casca de noz. Além da atuação na área de irrigação, a empresa Chevron atua em campos em San Ardo, também na Califórnia, onde utiliza um sistema composto por um separador água-óleo, flotação a ar dissolvido, aeração, filtro casca de noz, osmose inversa e “wetland” (unidades receptoras de efluentes de várias origens), sistema parecido com o indicado no presente trabalho para purificação da água produzida e adequação ao consumo humano. Após passar por esse sistema, a água é utilizada para geração de vapor e para recarga do aquífero raso.

Após os diversos exemplos supracitados de reuso de água, percebe-se que esse fato é imensamente importante para a sociedade. Sendo assim, para que esse efluente seja enquadrado de acordo com as normas vigentes para reuso, devem ser realizados diversos processos, até que a água tratada seja misturada com a água de sistemas de abastecimento usuais das cidades de Guamaré, Galinhos e Diogo Lopes, já que após purificada, essa água apresenta uma caracterização próxima ou igual aos requisitos da qualidade da água exigidos para consumo humano.

Os processos que ocorrem durante a produção e algumas características intrínsecas como as características dos poços, volume de produção, formação e localização do reservatório ocasionam mudanças nas características da água produzida. No entanto, no presente trabalho a água produzida utilizada será a já especificada pelo polo industrial de Guamaré para descarte, que é feito via emissário submarino. Dessa forma, após todos os processos que já ocorrem para adequar a água para descarte, esse efluente será readequado para fins de consumo humano. Apesar de todos os tratamentos realizados, incluindo a especificação para descarte e para consumo humano, a água produzida do petróleo pode não se encontrar dentro dos padrões de qualidade, sendo necessária a monitoração constante dos parâmetros físicos, químicos e biológicos, indicando ou não a necessidade desse efluente passar novamente por algum tratamento já realizado.

3.4 Legislação ambiental e qualidade da água para consumo humano

Os padrões de água são controlados por meio da Lei da Água Limpa (CWA – *Clean Water Act*), tida como critério essencial para a descarga de água e/ou poluentes na água de superfície. A Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA – *Environmental Protection Agency*) administra essa Lei federal, sendo os órgãos governamentais responsáveis por implementá-la, fazendo com que haja atendimento dos padrões e monitoramento do sistema. As águas de abastecimento público possuem contaminantes que, segundo a CWA, são listados em 90, devendo ser controlados para se adequarem aos limites legais (níveis máximos de contaminantes – MCL). As normas MCL incluem a contaminação biológica, desinfetantes, orgânica e produtos químicos inorgânicos e radionuclídeos. Os contaminantes CBM da água que são produzidos em sua maioria se constituem de produtos químicos inorgânicos, sendo medidos separadamente com os sólidos totais dissolvidos (TDS). Além das águas de superfície, a EPA é responsável pelo controle das águas subterrâneas, através do programa de controle da injeção Underground (UIC) (LIRA SOARES, 2013).

O uso da água para consumo humano possui normas específicas para a salinidade, toxicidade e sodicidade. Alguns compostos são responsáveis primários por aumentar a salinidade da água, além de possuir níveis elevados de sólidos totais dissolvidos. São eles: cálcio, magnésio, cloreto e sódio. Ocorre que o excesso desses elementos, ou seja, o

desequilíbrio nos níveis de alguns parâmetros da água ou o desenvolvimento de micro-organismos devido a sua não purificação implicam em efeitos tóxicos ao ser humano, podendo causar uma sintomatologia ampla, que por vezes é confundida com outros tipos de infecção/doenças, além de acometer diversas vias metabólicas.

Os sistemas de tratamento para água produzida devem possuir alta eficiência e baixo custo de operação e manutenção para que se tornem viáveis. Ocorre que o método de tratamento da AP depende fortemente de fatores como a localização do reservatório, o volume de água gerado, a sua composição, o destino final e os limites da legislação em vigor.

Para que a água produzida possa ser reutilizada há um fator de fundamental importância: a remoção de seus contaminantes. Os limites máximos de contaminantes presentes na água de reuso são influenciados diretamente pela legislação e finalidade de reuso (geração de vapor, consumo humano, reinjeção, irrigação). A concentração de sal na água para consumo, por exemplo, recomendada pela Organização Mundial da Saúde é de 250 mg/L a 500 mg/L, segundo a EPA. Enquanto isso, para geração de vapor, esse limite se encontra no intervalo entre 50 e 12.000 mg/L. É válido salientar que na água produzida, a presença de cloreto está na faixa de 2.000 a 210.000 mg/L (SOARES, 2013). Outros compostos podem se fazer presentes, como o óleo, produtos químicos, metais pesados, radioatividade, dependendo do campo produtor, percebendo-se a importância da especificação da AP para seu destino final.

A especificação da água para consumo, no Brasil, é dada pela Resolução 357/2005 do CONAMA, sendo que, no presente trabalho, após tratamento a água produzida de petróleo será transformada em Classe 1 dentro das Águas Doces, ou seja, necessitará apenas de tratamento simplificado para posterior abastecimento e consumo humano. Já a água que sai da empresa, é enquadrada pela Petrobras para lançamento de efluentes, de acordo com a Resolução 430/2011 do CONAMA, que complementa a Resolução 357/2005, visto que após tratamento, essa água é descartada via emissário submarino.

Na Resolução 357 do CONAMA de 17 de março de 2005 encontram-se as normas para classificação da água doce de classes 1, 2 e 3 (teor de cloreto total inferior a 250 mg/L), sendo essa a legislação nacional específica para monitoramento dos parâmetros de qualidade da água. A Resolução supracitada possui a classificação dos corpos de água e as diretrizes ambientais para seu enquadramento para abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional ou avançado.

3.5 Avaliação de toxicidade da água produzida e seus constituintes

Os efeitos ambientais causados pela água produzida quando é descartada são em sua maioria avaliados pela toxicidade e quantificação de compostos orgânicos e inorgânicos. Os impactos causados ao meio ambiente devem-se aos contaminantes encontrados na composição da água produzida. Quando há o descarte desse efluente, como no caso do polo industrial de Guamaré, via emissário submarino, ainda pode haver contaminantes dissolvidos. Do mesmo modo, alguns deles podem sair de solução. É admitido que os efeitos causados pelos contaminantes que continuam em solução são mais nocivos ao meio ambiente do que os que tendem a sair dela (LIRA SOARES, 2013).

Os fatores primordiais para escolha do sistema de tratamento da AP são, em geral, a salinidade e o teor de óleo presentes. O termo óleo é empregado na indústria de petróleo como o material orgânico que pode incluir hidrocarbonetos alifáticos e aromáticos, fenóis e ácidos carboxílicos. Na água produzida, esse material pode se encontrar na forma dispersa e/ou na forma dissolvida (OLIVEIRA & OLIVEIRA, 2000).

Segundo LIRA SOARES (2013), vários estudos foram realizados a fim de avaliar os efeitos da toxicidade da água produzida. Evidenciou-se que os maiores influenciadores na toxicidade da AP são os hidrocarbonetos aromáticos e os fenóis alquilados. O benzeno, por exemplo, é um hidrocarboneto aromático que possui sua elevada toxicidade inerente a vida de introdução, sendo apenas associada à sua ação direta sobre o organismo e, além dos produtos derivados da sua biotransformação. São exemplos o benzeno epóxido (resultante da primeira reação de biotransformação), uma substância altamente reativa e instável, e a 1,4-benzoquinona, prováveis responsáveis pela mielotoxicidade do benzeno.

A Resolução 357/2005 do CONAMA faz referência em sua classificação de água doce do tipo 1, 2 e 3 os índices de aceitabilidade do benzeno. O valor máximo para concentração do benzeno é de 0,005 mg/L. Outro hidrocarboneto aromático, o tolueno, não é contemplado na Resolução e, para as classes das águas salinas e salobras, não são mencionados os teores máximos para esses componentes (ANDRADE, 2009).

Os efeitos dos diferentes contaminantes presentes na água são complexos e, em alguns casos não são compreendidos totalmente. Pode haver inúmeras reações para o mesmo de contaminantes. Sabe-se, sem restrições, que ao ser consumida sem estar purificada, a água pode causar sérios problemas a saúde, devido a sua alta toxicidade quando não tratada.

Capítulo 4

Materiais e Métodos

4. Materiais e Métodos

Para que se elabore um projeto conceitual de um sistema de tratamento para reuso da água produzida a metodologia empregada tem como base a caracterização da indústria (empresa) geradora, que inclui parte do sistema já utilizado por ela, além da adição de novos equipamentos, a caracterização e volume disponível da água produzida e a frequência com que ela é recebida. Com as informações supracitadas, são avaliadas as tecnologias mais utilizadas e que sejam viáveis em termos econômicos e operacionais para que a água chegue a especificação desejada. Dessa forma, foram avaliados os diversos processos de tratamento utilizados na indústria, chegando-se ao que se melhor adequou para a especificação da água com a finalidade de reutilizá-la para consumo humano.

4.1 Caracterização da empresa

A empresa está localizada no município de Guamaré/RN, situada na Rodovia RN 221, KM 25, a cerca de 180 Km de Natal e 8 Km da cidade de Guamaré, sendo ilustrada através das figuras 8 e 9.



Figura 8: Localização geográfica do polo industrial de Guamaré.

Fonte: Petta et al. (1997)

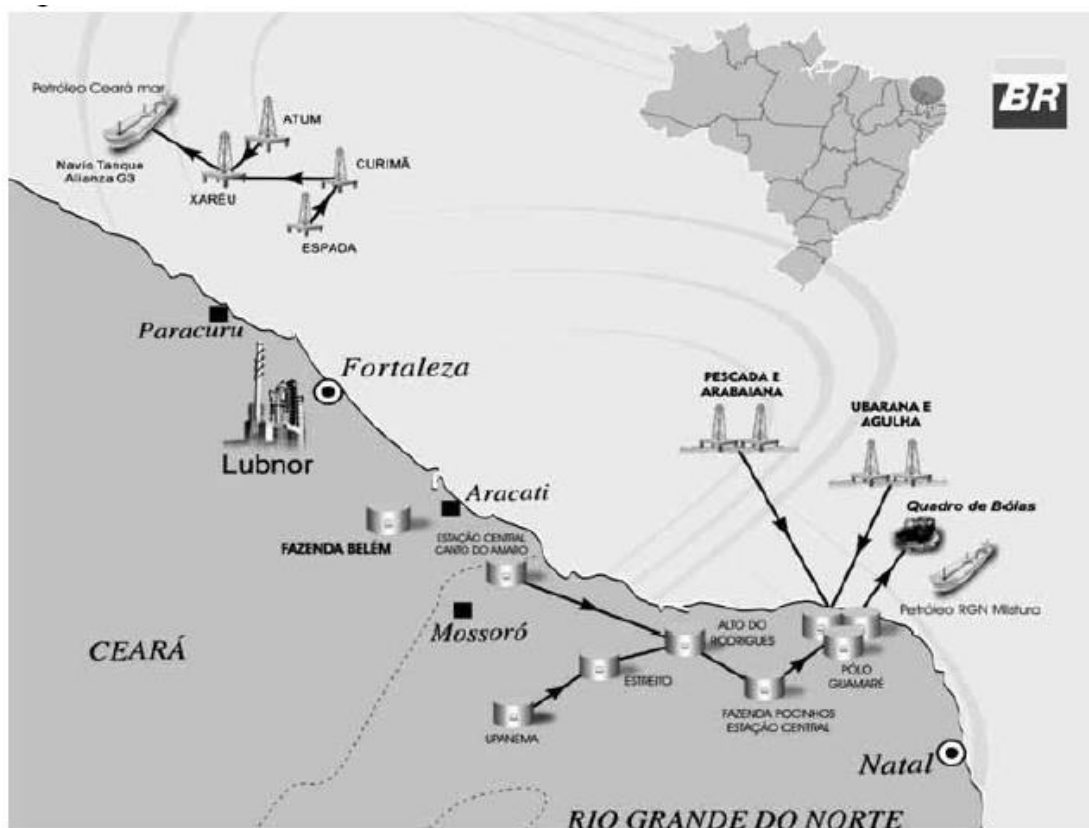


Figura 9: Polo industrial de Guamaré, Rio Grande do Norte.

Fonte: Neto (2010)

Segundo SILVA DA NÓBREGA (2001), o polo industrial de Guamaré possui uma área de cerca de 2.250 Mm², como mostrado através da planta baixa da figura 10, integrado a toda movimentação de óleo e gás da região e foi construído com o intuito de beneficiar toda a produção terrestre e marítima (Campos marítimos: Pescada, Ubarana, Agulha, Aratum e Arabaiana). É importante salientar que a área descrita é ocupada por todo o polo industrial de Guamaré, apesar da planta baixa mostrada na figura representar apenas a área da UTPF, já que esse é o princípio do presente trabalho.

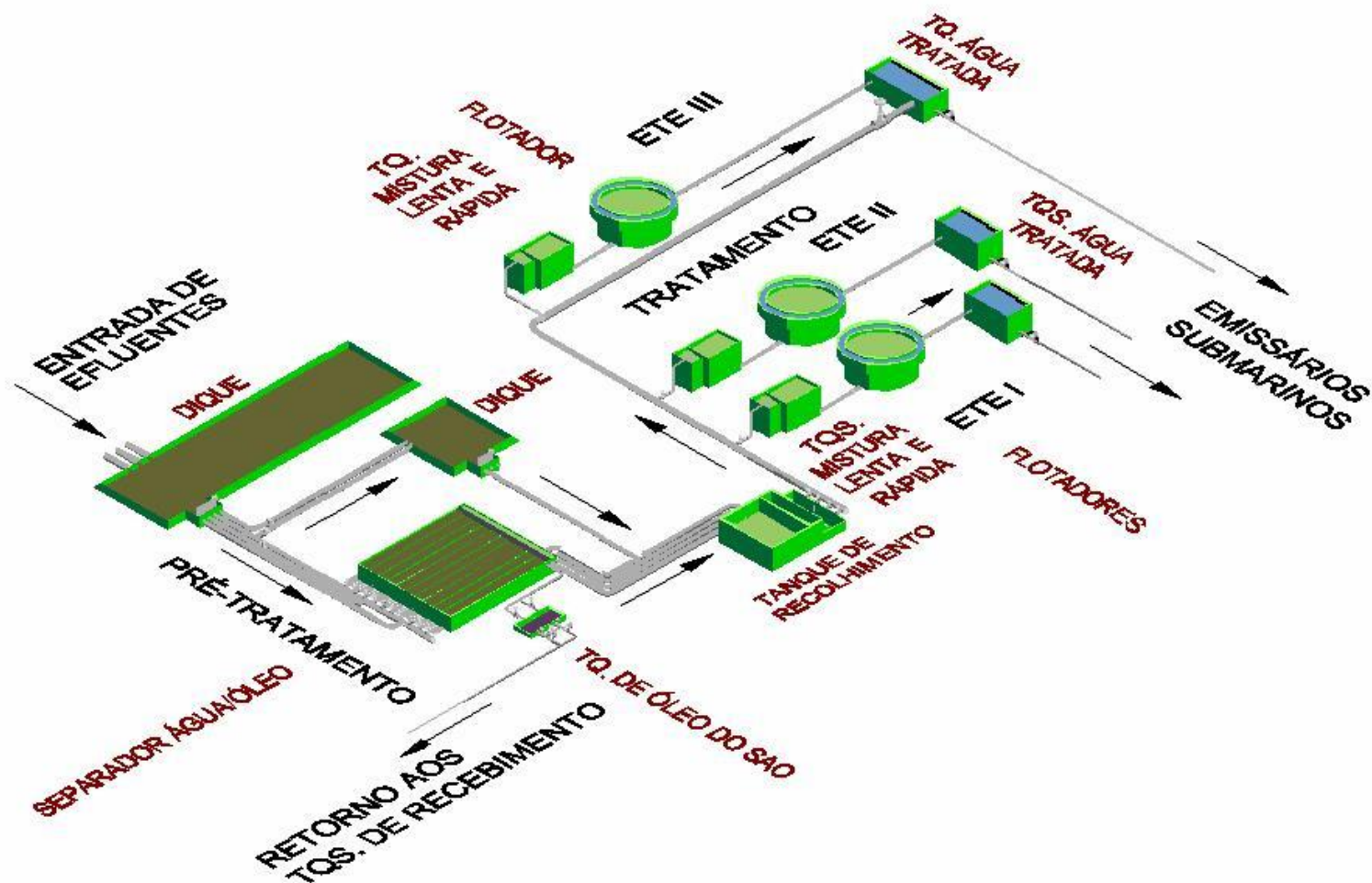


Figura 10: Planta isométrica da ETE do polo industrial de Guamaré.

Fonte: Acervo pessoal do IDEMA (2015)

O polo industrial de Guamaré é constituído por diversas instalações industriais da Petrobras, compreendendo a UO-RNCE, que incluem:

- ✓ Refinaria Potiguar Clara Camarão: produz nafta petroquímica, querosene de aviação e gasolina automotiva (desde setembro de 2010), tornando o Rio Grande do Norte o único estado do país autossuficiente na produção de todos os derivados do petróleo. Possui uma capacidade de 6000 m³/dia, sendo composta por duas unidades de destilação atmosféricas: U-260 e U-270 (diesel e QAV), uma unidade de tratamento cáustico regenerativo: U-280 e uma unidade de produção de gasolina: UGG - U-280-A.
- ✓ Estação de Tratamento de Óleo: recebe e trata cerca de 115 mil barris de petróleo diariamente.
- ✓ Estação de Compressores: recebe 2.200.000 m³ de gás natural por dia, e os comprime para que possam ser fracionados. É a maior estação de compressores da América Latina.
- ✓ Unidade de Processamento de Gás Natural: fraciona o gás natural, produzindo GLP, C5+ e gás industrial. A produção local de GLP é de cerca de 310 ton/dia

(26.000 botijões/dia), enquanto que a de gás industrial é de 730.000 Mm³/dia. O gás industrial é vendido para toda a região através do gasoduto "Nordestão".

- ✓ Estação de Tratamento de Efluentes: realiza o tratamento de toda a água e resíduos do processo de acordo com as normas ambientais, antes de descartá-los na natureza via emissário submarino.

A imagem 11 mostra as instalações do polo industrial de Guamaré.



Figura 11: Instalações do polo industrial de Guamaré.

Fonte: Schneider (2015)

4.1.1 Sistema atual de descarte ou reuso

Os resíduos líquidos que são gerados nas atividades de exploração e perfuração de poços da região são levados até a UTPF do polo industrial através de um caminhão sugador e são descarregados em uma carreta tanque para transporte. De acordo com informações do acervo pessoal do Instituto de Desenvolvimento Sustentável e Meio Ambiente do Rio Grande do Norte – IDEMA/RN, do trimestre de 1º de novembro de 2014 a 31 de janeiro de 2015, o efluente foi descartado no mar via emissários submarinos I e II numa vazão média de 82.869 m³/dia, ou seja, essa é a quantidade quase que total de água produzida recebida para tratamento, visto que há pouca perda após a retirada de óleo livre na ETO.

De acordo com dados fornecidos pelo IDEMA, a disposição da água produzida é feita inicialmente em um dique na Estação de Tratamento de Óleo, o que ocasiona a separação da água livre do óleo devido à diferença de densidade entre os líquidos (essa separação pode ocorrer em horas ou dias), de forma que a água se posiciona em baixo e o óleo na parte superior. A figura 12, mostra o 1º dique que recebe o efluente na UTPF de Guamaré:



Figura 12: Dique de recebimento do efluente no polo industrial de Guamaré

Fonte: Acervo pessoal do IDEMA (2015)

Em sua composição, a água produzida que chega até a Estação de Tratamento de Água Produzida em Guamaré possui compostos orgânicos, inorgânicos, metais pesados e outros elementos que se não houver remoção, inviabilizam a sua reutilização, bem como o seu descarte.

Para que esse efluente possa ser reutilizado para consumo (Classe 1), a tabela 3 apresenta os padrões exigidos baseada nos Valores Máximos Permitidos, V. M. P., de acordo com as Resoluções 357 e 430 do CONAMA, sendo esta última a que faz referência aos efluentes, mencionando que para reutilizá-los a partir de fontes poluidoras deve-se seguir as normas e padrões indicados nesta portaria.

Tabela 3: Valores máximos permitidos de parâmetros presentes na AP para consumo humano (Classe 1).

Fonte: CONAMA (2005)

Parâmetros	V.M.P	Unidades
Materiais Flutuantes, inclusive espumas não naturais	Virtualmente Ausentes	-
Óleos e Graxas	Virtualmente Ausentes	mg/L
Cor Verdadeira	Nível de Cor Natural	Pt/L
Corantes Provenientes de Fontes Antrópicas	Virtualmente Ausentes	-
DBO	3	mg/L
Gosto/Odor	Virtualmente Ausentes	-
OD	Não inferior a 6	mg/L O ₂
pH	6,0 – 9,0	-
Resíduos Sólidos Objetáveis	Virtualmente Ausentes	-
Turbidez	40	uT

A tabela 4 apresenta as normas ligadas aos padrões inorgânicos que deve-se seguir segundo o CONAMA.

Tabela 4: Valores máximos dos compostos orgânicos presentes na AP para fins de consumo humano (Classe 1).

Fonte: CONAMA (2005)

PADRÕES – CONAMA 357	
Parâmetros Inorgânicos	Valor Máximo (mg/L)
Alumínio dissolvido	0,1
Antimônio	0,005
Arsênio total	0,01
Bário total	0,7
Berílio total	0,04
Boro	0,5
Cádmio total	0,001
Chumbo total	0,01
Cianeto livre	0,005
Cloreto total	250
Cloro residual total (combinado + livre)	0,01
Cobalto total	0,05
Cobre dissolvido	0,009
Cromo total	0,05
Ferro dissolvido	0,3
Fluoreto total	1,4
Fósforo total (ambiente lêntico)	0,020
Fósforo total (ambiente intermediário, com tempo de residência entre 2 e 40 dias, e tributários diretos de ambiente lêntico)	0,025
Fósforo total (ambiente lótico e tributários de ambientes intermediários)	0,1
Lítio total	2,5
Manganês total	0,1
Mercúrio total	0,0002
Níquel total	0,025
Nitrato	10
Nitrito	1
Nitrogênio amoniacal total	3,7 para $\text{pH} \leq 7,5$ 2 para $7,5 < \text{pH} \leq 8$ 1 para $8 < \text{pH} \leq 8,5$ 0,5 para $\text{pH} > 8,5$
Prata total	0,01
Selênio total	0,01
Sulfato total	250
Sulfetos (como H_2S não dissociado)	0,002
Urânio total	0,02
Vanádio total	0,1
Zinco total	0,18

4.2 Caracterização da água produzida disposta

As tabelas 5, 6, 7 e 8 exibem as análises físico-químicas que se referem aos parâmetros orgânicos e inorgânicos presentes na água produzida com traços de óleo, que é recebida pela UTPF do polo industrial de Guamaré. Os dados apresentados foram fornecidos pela empresa em análise nesse presente trabalho, PETROBRAS, ao órgão ambiental estadual competente, IDEMA, relacionados à composição da AP em um trimestre, de 1º de fevereiro de 2015 a 31 de abril de 2015, sendo a coleta realizada no dia 29 de abril de 2015, no ponto N6 – Saída da ETE (emissário), e estas informações enviadas no dia 12 de agosto de 2015, pela química de petróleo Andressa Mendes Costa.

O Teor de Óleos e Graxas (TOG) foi monitorado através de ensaio analítico instrumental, apresentando concentração média apresentada na tabela 5 abaixo, com desvio padrão de 5,1.

Tabela 5: Ensaio referente ao agregado orgânico presente na água de produção

Fonte: Acervo Pessoal do IDEMA (2015)

Parâmetro	Resultados	Unidade
Óleos e Graxas (TOG)	14,1	mg/L

Tabela 6: Ensaio referente aos parâmetros presentes na água de produção

Fonte: Acervo pessoal do IDEMA (2015)

Parâmetros	Situação	Unidades
DBO 5 (entrada)	70,90	mg/L
DBO 5 (saída)	40,71	mg/L
DQO	112	mg/L
Material Sedimentável	< 0,1	ml/L
Oxigênio dissolvido	0,37	mg/L
pH	7,09	-
Salinidade (NaCl)	1088,46	mg/L
Sólidos Suspensos	9,14	mg/L
Sólidos Totais Dissolvidos	1837	mg/L
Temperatura	38	°C
Turbidez	2,45	UNT

Tabela 7: Ensaio referente aos compostos inorgânicos presentes na água de produção

Fonte: Acervo pessoal do IDEMA (2015)

Parâmetros	Resultados (mg/L)
Arsênio total	< 0,0057
Bário total	< 0,5
Boro total	< 0,2
Cádmio total	< 0,0002
Chumbo total	< 0,0034
Cianeto livre	< 0,0025
Cianeto total	< 0,0025
Cobre dissolvido	< 0,0001
Cromo hexavalente	< 0,0012
Cromo trivalente	< 0,0012
Estanho total	< 0,0240
Ferro dissolvido	0,55
Fluoreto total	1,746
Índice de Fenóis	0,484
Manganês dissolvido	0,161
Mercurio total	< 0,0002
Níquel total	< 0,0012
Nitrato	0,4671
Nitrito	< 0,1665
Nitrogênio Amoniacal Total	0,62
Prata total	< 0,0008
Selênio total	< 0,0069
Sulfeto	0,43300
Zinco total	< 0,0009

Tabela 8: Ensaio referente aos compostos orgânicos presentes na água de produção

Fonte: Acervo pessoal do IDEMA (2015)

Parâmetros	Situação	Unidades
Benzeno	0,329	mg/L
Clorofórmio	< 0,0003	mg/L
Dicloroeteno	< 0,0003	mg/L
Estireno	< 0,0003	mg/L
Etilbenzeno	0,0160	ml/L
Tetracloreto de carbono	< 0,0003	mg/L
Tricloroeteno	< 0,0003	mg/L
Tolueno	0,398	mg/L
Xileno	0,148	mg/L
HTP	2350	µg/L
HTA	54,27	µg/L
n-Alcanos	< 25	µg/L

Foi realizada análise ecotoxicológica de toxicidade para 1º e 2º níveis tróficos, da amostra coletada, segundo a tabela 9 a seguir, onde os resultados permaneceram dentro dos valores praticados historicamente.

Tabela 9: Ensaio referente aos parâmetros ecotoxicológicos presentes na água de produção

Fonte: Acervo pessoal do IDEMA (2015)

Parâmetros	Situação	Unidades
Lythechinus variegatus	9,21	CENO nível 1 (%)
S. costatun	8,72	CENO nível 2 (%)
Lythechinus variegatus	18,42	CEO nível 1 (%)
S. costatun	17,45	CEO nível 2 (%)
Mysidophis juniae	35,05	CL 50 nível 1 (%)
V. fischeri	> 81,9	CL 50 nível 2 (%)

4.3 Especificação para o destino

4.3.1 Consumo humano

O destino esperado para a água tratada será o consumo humano. As cidades que receberão essa água serão Guamaré (cidade de instalação do polo industrial), Diogo Lopes e Galinhos.

As cidades de Diogo Lopes Galinhos e Guamaré possuem, respectivamente, uma população de cerca de 5000, 2159 e 12404 habitantes, respectivamente. Utilizando uma média de gasto por pessoa de 250 L/dia, ou 0,25 m³/dia, tem-se que as cidades citadas, respectivamente, gastam 1250 m³/dia, 539 m³/dia e 3101 m³/dia. Sabendo-se que a UTPF do polo industrial de Guamaré descarta 87.505 m³/dia de água produzida tratada via emissário submarino, percebe-se que todas as cidades podem ser abastecidas diariamente e ainda pode-se estocar água devido à grande quantidade que restará após o processo de tratamento.

Na análise de resultados e discussões todos os dados relacionados à população e a empresa serão mostrados e explicados de forma mais clara.

4.3.2 Utilização econômica, social e ambiental

A necessidade de tratamento para descarte da água produzida aumenta a cada vez que há aumento na produção de petróleo da empresa, ocasionando a precisão de expandir a área das estações de tratamento, além de seus próprios equipamentos. A construção de novas áreas e expansão das já existentes requer um alto investimento, devido ao aluguel de equipamentos e mão-de-obra especializada. A ideia de reutilizar a água vem como uma alternativa para solucionar os custos altos para seu tratamento diário, e à medida que sai da empresa, acaba por ser descartada via emissário submarino. Com a escolha sugerida de reaproveitar essa água para consumo humano têm-se uma alternativa para a alta salinidade das águas consumidas pela população, principalmente da cidade de Galinhos, já que seus poços artesianos se encontram muito próximos ao mar, somada a necessidade de água, em meio à crise hídrica que o Brasil vem sofrendo, o que oferece a oportunidade da empresa auxiliar as pessoas que vivem nas cidades supracitadas e ainda obter vantagens econômicas em cima do projeto descrito.

A implementação do presente trabalho na empresa abre oportunidades para grandes benefícios econômicos e sociais, como o índice de geração de empregos, aquecimento da economia regional pela comercialização dessa água, valorização da produção de petróleo como meio para geração da água que será tratada e demanda de mão-de-obra qualificada.

Além dos benefícios econômicos e sociais, não se pode deixar de mencionar os ganhos ambientais, sejam eles advindos da extinção de descarte da água via emissário submarino, como da não retirada da água para consumo de poços artesianos, racionando-a para casos em que aconteça falha no sistema ou de alto uso pela população em virtude da ocorrência de eventos ou outros fatos nas cidades.

4.4 Processos de tratamento x Tratamento adequado

A seleção de um método ou de um conjunto de métodos para o sistema de tratamento da água produzida acontecerá em função da composição da água produzida e a especificação que se deseja.

Como opção para tratamento da AP em campos terrestres, como no presente trabalho, tem-se:

- ✓ Separadores gravitacionais convencionais;
- ✓ Separadores gravitacionais de placa;
- ✓ Filtros;
- ✓ Flotadores;
- ✓ Membranas.

Dentre os processos supracitados, os que exigem grandes áreas superficiais são os separadores gravitacionais convencionais e os de placa. Apenas os flotadores e o Processo de Separação por Membranas necessitam de produtos químicos em sua atividade.

Em relação a remoção de óleo em diâmetro de gota (μm), os que possuem maior êxito, entre os que foram mencionados, são os separadores gravitacionais convencionadas, em seguida os separadores de placa, os flotadores, os filtros e por fim, as membranas.

Para a escolha do Processo Por Separação de Membranas, necessita-se de prévio conhecimento prévio do que é preciso tirar da água para adequação a finalidade selecionada. A escolha do método mais adequado vai a partir da existência de íons monovalentes e sais dissolvidos.

Capítulo 5

Resultados e Discussões

5. Resultados e Discussões

Neste capítulo são relacionados os sistemas de tratamento da água disposta na UTPF do polo industrial de Guamaré, além da análise e escolha do método para a composição da água e reuso para consumo humano.

5.1 Água produzida x Água tratada para o reuso

A água produzida que sai para descarte e a água adequada para reutilização podem ser comparadas para a finalidade de consumo humano. Dessa forma, as tabelas 10, 11 e 12 a seguir mostram a comparação entre caracterização da água produzida com especificação de descarte da UTPF do polo industrial de Guamaré e os valores máximos permitidos da água tratada para ser reutilizada de acordo com a Resolução 357/2005 do CONAMA.

Tabela 10: Ensaio referente aos parâmetros - comparação

Fonte: Acervo pessoal do IDEMA (2015) / CONAMA (2005)

Parâmetros	Composição Atual	Composição CONAMA
DBO 5 (entrada)	70,90 mg/L	3 mg/L
DBO 5 (saída)	40,71 mg/L	3 mg/L
DQO	112 mg/L	-
Material Sedimentável	< 0,1 ml/L	-
Oxigênio dissolvido	0,37mg/L	Não inferior a 6 mg/L
pH	7,09	De 6 a 9
Salinidade (NaCl)	1088,46 mg/L	-
Sólidos Suspensos	9,14 mg/L	Virtualmente Ausentes
Sólidos Totais Dissolvidos	1837 mg/L	500 mg/L
Temperatura	38 °C	-

Tabela 11: Ensaio referente aos compostos inorgânicos – comparação

Fonte: Acervo pessoal do IDEMA (2015) / CONAMA (2005)

Parâmetros	Composição Atual	Composição CONAMA
Arsênio total	< 0,0057 mg/L	0,01 mg/L
Bário total	< 0,5 mg/L	0,7 mg/L
Boro total	< 0,2 mg/L	0,5 mg/L
Cádmio total	< 0,0002 mg/L	0,001 mg/L
Chumbo total	< 0,0034 mg/L	0,01 mg/L
Cianeto livre	< 0,0025 mg/L	0,005 mg/L
Cianeto total	< 0,0025 mg/L	250 mg/L
Cobre dissolvido	< 0,0001 mg/L	0,009 mg/L
Cromo hexavalente	< 0,0012 mg/L	Obs (Cromo total): 0,05 mg/L
Cromo trivalente	< 0,0012 mg/L	Obs (Cromo total): 0,05 mg/L
Estanho total	< 0,0240 mg/L	-
Ferro dissolvido	0,55 mg/L	0,3 mg/L
Fluoreto total	1,746 mg/L	1,4 mg/L
Índice de Fenóis	0,484 mg/L	Obs (Fenóis totais): 0,003 mg/L
Manganês dissolvido	0,161 mg/L	Obs (Manganês total): 0,1 mg/L
Mercúrio total	< 0,0002 mg/L	0,0002 mg/L
Níquel total	< 0,0012 mg/L	0,025 mg/L
Nitrato	0,4671 mg/L	10 mg/L
Nitrito	< 0,1665 mg/L	1 mg/L
Nitrogênio Amoniacal Total	0,62 mg/L	3,7 mg/L para $\text{pH} \leq 7,5$ 2 mg/L para $7,5 < \text{pH} \leq 8$ 1 mg/L para $8 < \text{pH} \leq 8,5$ 0,5 mg/L para $\text{pH} > 8,5$
Prata total	< 0,0008 mg/L	0,01 mg/L
Selênio total	< 0,0069 mg/L	0,01 mg/L
Sulfeto	0,43300 mg/L	0,002 mg/L
Zinco total	< 0,0009 mg/L	0,18 mg/L

Tabela 12: Ensaio referente aos compostos orgânicos - comparação

Fonte: Acervo pessoal do IDEMA (2015) / CONAMA (2005)

Parâmetros	Composição atual	Composição CONAMA
Benzeno	0,329 mg/L	0,005 mg/L
Clorofórmio	< 0,0003 mg/L	-
Dicloroetano	< 0,0003 mg/L	-
Estireno	< 0,0003 mg/L	0,02 µg/L
Etilbenzeno	0,0160 ml/L	90 µg/L
Tetracloroeto de carbono	< 0,0003 mg/L	0,002 mg/L
Tricloroetano	< 0,0003 mg/L	0,03 mg/L
Tolueno	0,398 mg/L	-
Xileno	0,148 mg/L	300 µg/L
HTP	2350 µg/L	-
HTA	54,27 µg/L	-
n-Alcanos	< 25 µg/L	-

Analisando as tabelas apresentadas acima (tabelas 10, 11 e 12), observou-se que alguns parâmetros apresentaram-se elevados quando comparados com a Resolução 357/2005 do CONAMA. Dessa forma, a tabela 13 apresenta os parâmetros que devem ser eliminados ou reduzidos para que a água se torne apropriada para o consumo humano (Classe 1).

Tabela 13: Elementos que não estão de acordo com as concentrações exigidos pelo CONAMA.

Fonte: CONAMA (2005)

Benzeno	Estireno	Fluoreto Total	Nitrito	Sólidos Totais Dissolvidos
DBO 5 (entrada)	Etilbenzeno	Índice de Fenóis	Oxigênio Dissolvido	Sulfetos
DBO 5 (saída)	Ferro dissolvido	Manganês Dissolvido	Sólidos Suspensos	Xileno

5.2 Contribuição para a escolha do método

A escolha do método adequado ocorre em função da composição da água produzida e de alguns requisitos para que haja a instalação do novo processo de separação na Estação de Tratamento de Efluentes já existente na empresa, além de sistema de monitoramento para água tratada, tubulações e bombas para distribuí-las para as cidades de Guamaré, Diogo Lopes e Galinhos. Um planejamento acertado é fundamental para que

se evite prejuízos a empresa, além de especificar o efluente de acordo com as leis de reuso para o consumo humano.

Entre os requisitos que auxiliaram na escolha do método estão:

- ✓ Área e energia disponíveis para a instalação dos equipamentos de monitoramento (Figura 13);
- ✓ Área disponível para implantação dos tubos e bombas para carrear a água para as cidades de Diogo Lopes, Galinhos e Guamaré (Figura 13);
- ✓ Características da água disposta;
- ✓ O PSM é um método relativamente simples, energeticamente econômico, prático e produz um efluente com boa qualidade;
- ✓ O processo de Osmose Inversa absorve os íons metálicos, os sais em solução e os íons monovalentes presentes na água produzida;
- ✓ A quantidade de água produzida tratada é suficiente (total + 30% do total) para atender as necessidades das três cidades (Diogo Lopes, Galinhos e Guamaré) em relação ao abastecimento de água e ao consumo da população.

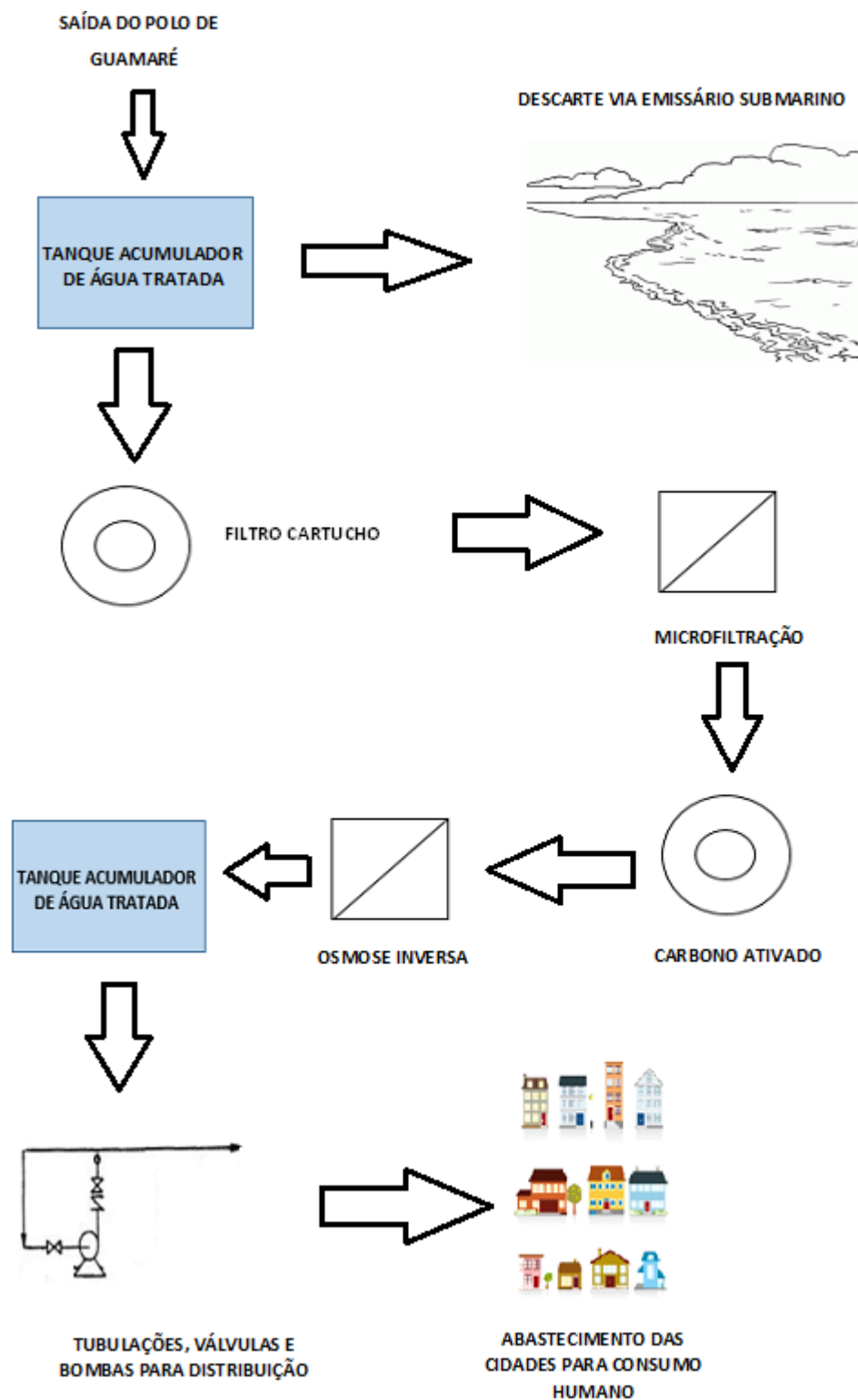


Figura 13: Planta da estação de tratamento de efluentes de Guararé após a implementação do projeto

5.3 Projeto do Sistema de Tratamento

Para que sejam atendidas as especificações do CONAMA para a finalidade de reuso desejada, o sistema de tratamento sugerido para a água produzida que é recebida pelo polo industrial de Guamaré, deverá ser constituído de um novo sistema igual ao que já existe na empresa, acrescido de filtros do Processo de Separação por Membranas, que neste caso serão dois: Microfiltração e Osmose Inversa. Todo este processo é representado na figura 14 abaixo:

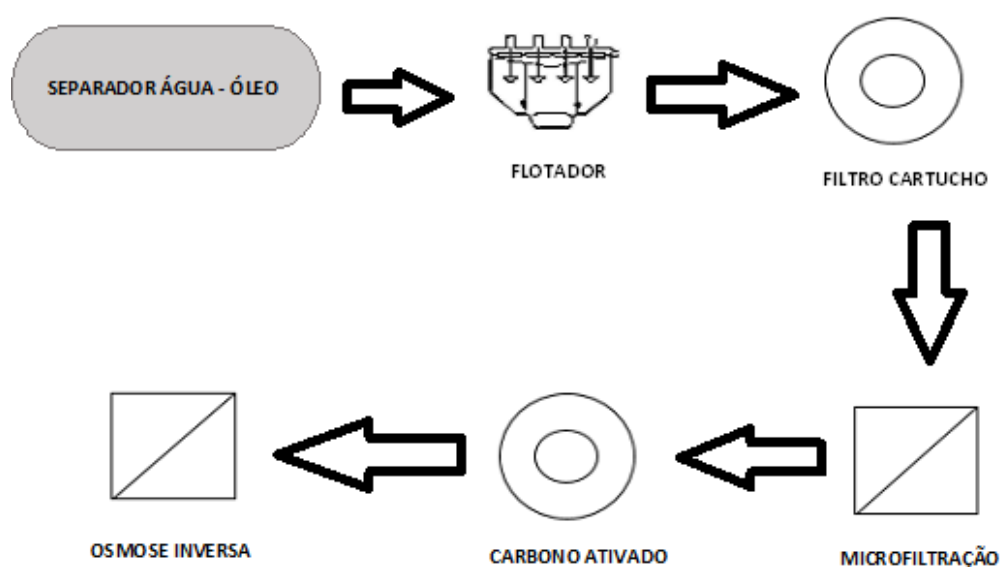


Figura 14: Sistema de tratamento de água produzida para reuso em consumo humano

Após o tratamento que ocorre na UTPF do polo industrial de Guamaré, a água produzida que seria descartada será enviada para um novo processo, que se inicia nos filtros e termina com a saída da água da membrana do processo de osmose inversa. No polo industrial de Guamaré, o processo de tratamento se inicia no Separador Água-Óleo (SAO). No SAO são removidos os sólidos suspensos e óleo livre. Entretanto, na saída do Separador ainda há óleo emulsionado, de forma que nesse ponto do processo a água possui cerca de 200 mg/L de óleo residual. As figuras 15 e 16 ilustram o SAO que é utilizado na Estação de Tratamento de Óleo do polo industrial de Guamaré:



Figura 15: SAO da estação de tratamento de óleo de Guamaré – Visão 1

Fonte: Acervo pessoal do IDEMA (2015)



Figura 16: SAO da estação de tratamento de óleo de Guamaré – Visão 2

Fonte: Acervo pessoal do IDEMA (2015)

Logo após, a água, já livre da maior parcela de óleo, segue para o flotador a ar dissolvido, com o objetivo de reter sólidos dissolvidos e outra parcela de óleo. Esse equipamento possui a capacidade de deter uma grande quantidade de sólidos no lodo, o que reduz o volume de água que será descartada junto com o lodo, além da porção que continuará o tratamento na Estação de Tratamento de Água Produzida. A figura 17 ilustra o flotador utilizado na Estação de Tratamento de Efluentes. É válido salientar que antes de passar pelo flotador, é injetado na água um desemulsificante, através dos tanques de mistura rápida e lenta. Essa substância facilita o processo que ocorre no flotador. A injeção do desemulsificante é representada na figura 18.



Figura 17: Flotador da Estação de Tratamento de Efluentes do polo industrial de Guamaré

Fonte: Acervo pessoal do IDEMA (2015)



Figura 18: Injeção de desemulsificante na AP antes da passagem pelo flotador

Fonte: Acervo pessoal do IDEMA (2015)

Depois da passagem pelo flotador, a água oleosa é depositada em um tanque chamado de bacia de lodo, de acordo com a figura 19. Percebe-se que a chamada “borra” do óleo fica em um lado da bacia, enquanto que a água oleosa é separada em outra parte dela, voltando para o início do processo do tratamento, como mostrado na figura 20. O óleo que fica na bacia é sugado através de um caminhão, levando-o para descarte ou incineração. O óleo livre que é removido Através do Separador Água-Óleo e do Flotador é enviado para as refinarias ou diretamente comercializado, enquanto os sólidos seguem para o tanque de resíduos ou para incineração.



Figura 19: Bacia de Lodo da Estação de Tratamento de Efluentes do polo industrial de Guamaré – Visão 1

Fonte: Acervo pessoal do IDEMA (2015)



Figura 20: Bacia de Lodo da Estação de Tratamento de Efluentes do polo industrial de Guamaré – Visão 2

Fonte: Acervo pessoal do IDEMA (2015)

Após a remoção dos compostos mencionados, a água passará através de dois tipos diferentes de filtros, além de um procedimento do Processo de Separação por Membranas, a microfiltração, como formas de pré-tratamento para a osmose inversa. Para que não haja entupimento das membranas na osmose inversa, a água de alimentação deve possuir um baixo teor de sólidos, objetivo esse da utilização de filtros (o que também inclui a microfiltração) como pré-processo. Os filtros eliminarão os sólidos que ainda se encontram em suspensão, moléculas orgânicas, cromatos e sulfetos e cloro. Além disso, a água que é descarregada deles é praticamente isenta de moléculas inorgânicas de baixa massa molar como sódio, cálcio e magnésio.

Em seguida, a água passará pela membrana que utiliza como princípio de funcionamento a osmose inversa, de forma que sua passagem é forçada através de um

gradiente de pressão, na qual os íons não conseguem atravessar. A membrana semipermeável é composta de um material orgânico polimérico, com uma camada de aproximadamente 2 μm de espessura, relativamente pouco porosa em comparação ao restante da estrutura. Através dos poros da membrana a única substância que consegue atravessar é água, de forma que o líquido que se tem como resultado desse processo é água pura. Em contrapartida, a solução contaminada, com o passar do tempo do tratamento, torna-se cada vez mais concentrada em sal (cloreto e cloro residual) e metais dissolvidos (bário, boro, cobre e cromo). Os métodos de osmose e osmose inversa são representados através da figura 21.

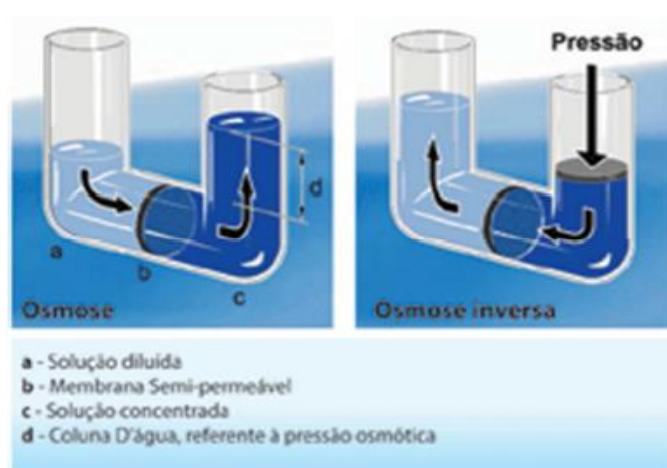


Figura 21: Processo de Osmose e Osmose Inversa

Fonte: Fernandes Jr. (2006)

Uma substância altamente venenosa e tóxica e que pode dar origem ao gás cianídrico (HCN), o cianeto, possui extrema importância de remoção. Esse processo pode ocorrer através da oxidação com o cloro, de modo que a reação desse elemento ou de íons em meio alcalino, ocasiona a formação de gás carbônico e nitrogênio. Após a oxidação dos cianetos pela reação descrita, os metais tornam-se insolúveis na forma de hidróxidos.

A remoção dos elementos nitrito e nitrato é realizada através da desnitrificação com a redução dos íons a gás nitrogênio.

Através da planta isométrica após a implantação do projeto, como mostrado na figura 11, é possível observar que há a implantação de um tanque para acumulação de água, bombas e tubulações para posterior distribuição e abastecimento para consumo humano nas cidades de Diogo Lopes, Galinhos e Guamaré.

5.4 Destino da água tratada e suas especificações

O destino final da água após o tratamento será para consumo humano. No cenário atual em que se encontra o Brasil, em termos da crise hídrica, o reuso da água produzida de petróleo aparece como alternativa para o problema do abastecimento. Além disso, a qualidade em que se encontra a água em algumas cidades, como a de Galinhos, é prejudicada devido à localização de instalação de seus poços artesianos, geralmente muito próximos ao mar, acarretando uma elevada salinidade na água que chega a população.

Para que se chegue a especificação final da água, o projeto conta com a instalação de filtros e membranas, para utilização no sistema de tratamento, além de um tanque para armazenamento da água tratada, bombas e tubulações para distribuição.

Segundo dados do acervo pessoal do IDEMA/RN, o volume médio de efluente descartado via emissário submarino pela Unidade de Tratamento e Processamento de Fluidos, é de aproximadamente 87.505 m³/dia. Sabendo que as cidades de Diogo Lopes, Galinhos e Guamaré, possuem, de acordo com dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, respectivamente, uma população de 5000, 2159 e 12404 habitantes, e que cada uma delas consome, em média, 0,25 m³/dia (de acordo com SANASA, CAMPINAS), tem-se um consumo aproximado, por dia, em cada cidade de:

- ✓ Diogo Lopes: 1250 m³
- ✓ Galinhos: 539 m³
- ✓ Guamaré: 3101 m³

O que equivale a um total de 4890 m³/dia de consumo nas três cidades em que serão distribuídas a água tratada. Para que se tenha uma margem no caso de falhas no tratamento, na distribuição ou recebimento dessa água a partir da UTPF ou até de grande utilização por parte da população devido a eventos que podem ocorrer na região, faz-se um tratamento em 30% a mais da água, que corresponde a um valor de 1467 m³/dia. Somando todos esses valores, para que as cidades sejam abastecidas corretamente conforme a necessidade de cada uma delas, tem-se um total de 6357 m³/dia. Levando em consideração o valor que se tem de vazão de água para descarte, após a sua distribuição, ainda resta um volume de 81.147 m³/dia, que pode ser utilizado se confirmada a viabilidade, para outras cidades.

Inicialmente, para o projeto em análise, é aconselhada a distribuição apenas para as cidades supracitadas, como forma de manter o lucro da empresa sobre o presente

trabalho, sem que haja grandes prejuízos após a implantação do mesmo, já que haverá necessidade de investimento através do planejamento realizado.

5.5 Benefícios para a empresa

O sistema de tratamento para a água produzida que é recebida pela UTPF do polo industrial de Guamaré é uma alternativa para diminuir o grande volume de água que é tratado para descarte via emissário submarino, o que de certa forma não fornece nenhuma utilidade para a população. Em relação aos números, apesar da empresa precisar investir inicialmente na instalação de um tanque para armazenamento da água tratada, bombas e tubulações para sua distribuição para as cidades, além de parte de um novo sistema de tratamento (filtros e membranas), pode haver lucro quanto a comercialização da água tratada, análise essa que deverá feita junto a Companhia de Água e Esgotos do Rio Grande do Norte – CAERN, além de se tratar de uma ação de utilidade pública, frente a atual crise hídrica brasileira.

Utilizando como base (sabendo que nas cidades de destino da água tratada os valores são alterados), para se ter uma média de comercialização de água, uma conta de consumo de água/esgoto e serviços de um apartamento do bairro de Ponta Negra, em Natal, Rio Grande do Norte, no mês de setembro de 2015, tem-se que até 10 m³, custa R\$ 30,96 a unidade, e de 11 a 15 m³, R\$ 3,45 por m³. Utilizando a relação, para se ter apenas um conceito de valores, a quantia de R\$ 30,96 a cada 10 m³, por aproximação, as cidades pagariam, por dia:

- ✓ Diogo Lopes: consome 1250 m³/dia, o que geraria uma quantia de R\$ 12.500, 00;
- ✓ Galinhos: consome 539,75 m³/dia, gerando uma quantia de aproximadamente R\$ 5.400,00;
- ✓ Guamaré: consome 12404 m³/dia, gerando uma receita de cerca de R\$ 124.000,00.

Isso significa que, por mês, essas cidades geraria um total de aproximadamente R\$ 4.257.000,00. É importante salientar que esses valores são fictícios, sendo utilizados apenas para gerar uma ideia ao empreendedor de receitas geradas a partir da implantação do projeto, apresentando os ganhos que a empresa pode ter, apenas com um investimento inicial citado anteriormente.

Outra observação importante a ser feita é que, no mês de junho de 2015, a empresa pediu ao IDEMA/RN, de acordo com informações que constam em seu sistema

peçoal, uma Renovação de Licença de Operação para as instalações do polo industrial de Guamaré, o que inclui a Estação de Tratamento de Água Produzida, Estação essa onde está sendo implantado um sistema de filtros, o que diminuirá os custos de investimento inicial que haviam sido propostos para a empresa. As figuras 22 e 23 mostram o sistema instalado pela Petrobrás:



Figura 22: Sistema de Tratamento da AP por filtros - Visão 1

Fonte: Acervo pessoal do IDEMA (2015)



Figura 23: Sistema de Tratamento da AP por filtros - Visão 2

Fonte: Acervo pessoal do IDEMA (2015)

A principal ideia do reuso para consumo da água tratada pela Petrobras, seria a comercialização com a CAERN, além de fornecer uma alternativa para abastecimento das cidades, sendo essa uma ação de utilidade pública, de forma que o descarte via emissário submarino que é realizado pela empresa na praia do Mito, após a comprovação da viabilidade do projeto, pode ser totalmente extinto, pela implantação em outras cidades. A figura 24 mostra o ponto de descarte via emissário na Praia do Mito.



Figura 15: Ponto de descarte da AP no emissário submarino da Praia do Mito

Fonte: Acervo pessoal do IDEMA
(2015)

Capítulo 6

Conclusão

6. Conclusão

Da água produzida analisada no presente trabalho foram obtidas as seguintes conclusões:

A água produzida que está disposta na Unidade de Tratamento e Processamento de Fluidos do polo industrial de Guamaré ainda não pode ser reutilizada para consumo humano devido a atual composição em que se encontra.

Ao comparar a água produzida com especificação para descarte com a qualidade da água exigida pelo CONAMA para consumo humano, observou-se que os elementos benzeno, DBO₅ (entrada e saída), estireno, etilbenzeno, ferro dissolvido, fluoreto total, índice de fenóis, manganês dissolvido, nitrito, oxigênio dissolvido, sólidos suspenso, sólidos totais dissolvidos, sulfetos e xileno estão em quantidades acima do permitido pela Resolução, o que necessita de um sistema de tratamento adequado para correção dessa desconformidade. Além disso, de acordo com as informações da composição dessa água produzida, há presença de parâmetros ecotoxicológicos, exigindo um tratamento conforme a necessidade de remoção desses compostos.

Os métodos e equipamentos mais adequados para compor um sistema de tratamento de água produzida do petróleo são: separador água-óleo, tanques lento e rápido, flotador a ar dissolvido, filtros e osmose inversa. A escolha desses métodos ocorreu através da capacidade de cada um deles remover diferentes compostos que possuem um limite máximo permitido pela legislação para presença na composição da água ou que não podem estar presentes.

A implantação do projeto por meio da instalação de bombas, tubulações e de membranas para o processo de osmose inversa, é uma alternativa para evitar os custos da empresa para que ocorra apenas o descarte via emissário submarino, de forma que a comercialização da água de forma potável se tornasse um meio lucrativo, gerando benefícios econômicos, sociais e ambientais.

Como recomendação para trabalhos futuros, sugere-se a escolha de métodos para redução dos elementos que após os processos utilizados no presente trabalho não diminuiram a sua quantidade, além dos parâmetros ecotoxicológicos que devem ser removidos de acordo com a concentração que se deve possuir ou não. Além disso, deve-se recomenda-se a realização da análise econômica do projeto em questão, para comprovação da viabilidade do presente trabalho.

Referências Bibliográficas

Referências Bibliográficas

BARROS JR., L. M. B., Estudo da Influência de Compostos Recalcitrantes na Remoção de Matéria Orgânica Biodegradável no Tratamento de Efluente de Refinarias de Petróleo, Tese (Doutorado), Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, PPGEQ, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2008.

BOM DIA BRASIL, Governos ignoraram alertas sobre crise d'água, dizem cientistas. Disponível em: <<http://g1.globo.com/bom-dia-brasil/noticia/2015/02/governos-ignoraram-alertas-sobre-crise-dagua-dizem-cientistas.html>>. Acesso em 15 de março de 2015.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), Resolução nº 357 de março de 2005. Ministério do Meio Ambiente, Brasília, 2005.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), Resolução nº 430 de maio de 2011. Ministério do Meio Ambiente, Brasília, 2011.

CIESP, Conservação e reúso da Água: Manual de orientações para o setor industrial. Disponível em: <<http://www.ciesp.com.br/pesquisas/conservacao-e-reuso-de-agua-manual-de-orientacoes-para-o-setor-industrial/>>. Acesso em 21 de agosto de 2015.

CARVALHO, D. D., Apostila. Disponível em: <http://www.eq.ufrj.br/graduacao/aulas/eew200_denizedias/apostilasgae.pdf>. Acesso em 13 de outubro de 2015.

EXAME, O que vai acontecer se São Paulo ficar realmente sem água? Disponível em: <<http://exame.abril.com.br/brasil/zoom/o-que-voce-precisa-saber-sobre-a-crise-da-agua/>>. Acesso em 16 de abril de 2015.

FANTÁSTICO, Água de reúso pode ser a solução para crise hídrica, dizem especialistas. Disponível em: <<http://g1.globo.com/fantastico/noticia/2015/02/agua-de-reuso-pode->

ser-solucao-para-crise-hidrica-dizem-especialistas.html>. Acesso em 15 de março de 2015.

FERNANDES JUNIOR, W. E. Projeto e Operação em Escala Semi-industrial de um Equipamento para Tratamento de Águas Produzidas na Indústria do Petróleo Utilizando Nova Tecnologia: Misturador-Decantador à Inversão de Fases. Tese (Doutorado em Engenharia Química), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2006.

FONSECA, L. P., Estudo das Variáveis Operacionais do Processo de Separação, Petróleo-Água, Utilizando Flotação por Ar Dissolvido, Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Alagoas, 2010.

FRITZMANN, C., LÖWENBERG, J., WINTGENS, T. State-of-the Art of Reverse Osmosis Desalination, *Desalination*, v. 216, pp. 1-76, 2007.

GUEDES, I. M. G., Mapeamento da Área de Influência dos Dutos de Gás e Óleo do Pólo de Guamaré (RN), Relatório (Graduação em Geologia), Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

HABERT, C.A., BORGES, C.P., NOBREGA, R., Processos de Separação por Membranas. Rio de Janeiro: E-papers, 2006.

JORNAL DA GLOBO, Empresas tratam esgoto e conseguem reutilizar água. Disponível em: <<http://g1.globo.com/jornal-da-globo/noticia/2014/09/empresas-tratam-esgoto-e-conseguem-reutilizar-agua.html>>. Acesso em 15 de março de 2015.

LIMA, A.F. Caracterização e Estudo da Bioconversão da Matéria Orgânica Dissolvida em Efluentes da Petrobrás no Rio Grande do Norte. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 1996.

MEDEIROS, N. M., Remoção de Metais da Água de Produção Utilizando Tensoativo, Monografia (Graduação em Engenharia Química), Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2013.

MORAES, N. A., Comparação entre Planejamento Estatístico Experimental e Análise Dimensional em Operações de Mistura e Separação para Sistemas Óleo-Água, Tese (Doutorado), Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, PPGEQ, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2011.

MOTTA, A. R. P., BORGES, C. P., KIPERSTOK, A., ESQUERRE, K. P. Tratamento de Água Produzida para Óleo por Membranas, Engenharia Sanitária Ambiental, v.18 n.1, 15-26, 2013.

NÓBREGA, G. A. S., Determinação do teor de umidade do gás natural usando um dispositivo com adsorção, Monografia (Graduação em Engenharia Química), Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2001.

NUNES, S. K. S., Tratamento de Água de Produção de Petróleo visando o Aproveitamento na Obtenção de Barrilha, Tese (Doutorado), Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, PPGEQ, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2013.

OLIVEIRA, R. C. G., OLIVEIRA, M. C. K. Remoção de Contaminantes Tóxicos dos Efluentes Líquidos Oriundos da Produção de Petróleo no Mar. Boletim Técnico: Petrobras, Rio de Janeiro, 2000.

PETROBRAS. Missão técnica. Relatório Executivo Final, Ed. Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Miguez de Mello (CENPES), 2008.

PLANETA COPPE, Membrana permite reutilização da água em plataformas e na irrigação. Disponível em: <<http://www.planeta.coppe.ufrj.br/artigo.php?artigo=772>>. Acesso em 27 de agosto de 2015.

PORTAL R7, Apagão, falta d'água e tarifa alta: início caótico de 2015 provoca revolta. Disponível em: <<http://noticias.r7.com/brasil/apagao-falta-dagua-e-tarifa-alta-inicio-caotico-de-2015-provoca-revolta-20012015>>. Acesso em 16 de abril de 2015.

PREZI, Opções de tratamento para água de produção de petróleo. Disponível em: <<https://prezi.com/kiim9csk-81h/possivel-tratamento-para/>>. Acesso em 13 de julho de 2015.

ROCHA, A. P. B., A Atividade Petrolífera e a Dinâmica Territorial no Rio Grande do Norte: uma análise dos municípios de Alto do Rodrigues, Guamaré e Mossoró, Tese (Doutorado), Programa de Pós-graduação em Geografia, PPGeo, Universidade Federal de Pernambuco, 2013.

SANASA, CAMPINAS. Disponível em: <<http://www.sanasa.com.br/document/noticias/764.pdf>>. Acesso em 20 de março de 2015.

SANTANA, D. C., Extração de Metais Pesados de Efluentes da Indústria do Petróleo Utilizando Derivados de Óleos Vegetais como Extratantes, Tese (Doutorado), Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, PPGEQ, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2008.

SANTANA, A. V. M., Otimização do Processo de Flotação de Emulsão Óleo/Água através do Planejamento Fatorial Completo, Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, PPGEQ, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2012.

SILVA, J. C., Desenvolvimento de Processo Integrado Utilizando Processos de Separação por Membrana e Adsorção em Carvão Ativado para o Tratamento de Água Associada à Produção de Petróleo, Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2010.

SILVA, A. J. C., Tratamento Eletroquímico de Efluentes da Indústria de Petróleo, Dissertação (Mestrado em Ciências Naturais), Programa de Pós-graduação em Ciências Naturais, PPGCN, Universidade do Estado do Rio Grande do Norte, 2013.

SMAR, Medição de nível. Disponível em: <<http://www.smar.com/brasil/artigo-tecnico/medicao-de-nivel>>. Acesso em 02 de junho de 2015.

SOARES, L. L., Projeto Conceitual de um Sistema de Tratamento e Reaproveitamento da Água Produzida de Petróleo Disposta em um Aterro Industrial Real, Monografia (Graduação em Engenharia de Petróleo), Departamento de Engenharia de Petróleo, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2013.

STEWART, M., ARNOLD, K., Produced Water Treatment Field Manual. Part 1 - Produced Water Treating Systems, p. 1-134, 2011.

THOMAS, J. E. Fundamentos de Engenharia de Petróleo. Petrobras. Rio de Janeiro: Interciência, 2004.