



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PETRÓLEO

**PROPOSTA DE TRATAMENTO DE ÁGUA PRODUZIDA DO
PETRÓLEO UTILIZANDO ENERGIA SOLAR VISANDO
DESSEDENTAÇÃO ANIMAL NO NORDESTE BRASILEIRO**

Lucas Bernhard Maisel

Dezembro, 2020

NATAL, RN

Lucas Bernhard Maisel

**PROPOSTA DE TRATAMENTO DE ÁGUA PRODUZIDA DO
PETRÓLEO UTILIZANDO ENERGIA SOLAR VISANDO
DESSEDENTAÇÃO ANIMAL NO NORDESTE BRASILEIRO**

Trabalho apresentado ao Curso de
Engenharia de Petróleo da Universidade
Federal do Rio Grande do Norte como
requisito parcial para a obtenção do título
de Engenheiro de Petróleo.

Orientador (a): Dr. Wilaci Eutrópio Fernandes Júnior

Dezembro, 2020

NATAL, RN

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Sistema de Bibliotecas - SISBI
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Maisel, Lucas Bernhard.

Proposta de tratamento de água produzida do petróleo utilizando energia solar visando dessedentação animal no nordeste brasileiro / Lucas Bernhard Maisel. - 2020.

76 f.: il.

Monografia (graduação) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia de Petróleo, Natal, RN, 2020.

Orientador: Prof. Dr. Wilaci Eutrópio Fernandes Jr.

1. Tratamento de água - Monografia. 2. Energia solar - Monografia. 3. Dessedentação animal - Monografia. I. Fernandes Júnior, Wilaci Eutrópio Fernandes. II. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 628.16

Orientador (a): Dr. Wilaci Eutrópio Fernandes Júnior

**PROPOSTA DE TRATAMENTO DE ÁGUA PRODUZIDA DO
PETRÓLEO UTILIZANDO ENERGIA SOLAR VISANDO
DESSEDENTAÇÃO ANIMAL NO NORDESTE BRASILEIRO**

Natal, 04 de dezembro de 2020

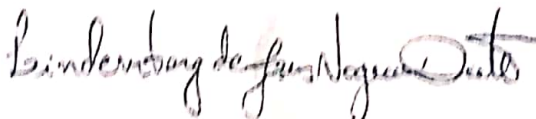
O(n) aluno(n) **LUCAS BERNHARD MAISEL**, foi considerado(a) aprovado(a) no seu trabalho de conclusão para obtenção do título de **Formação em Engenharia de Petróleo**.

Banca examinadora formada por:



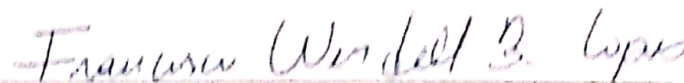
Prof. Dr. Wilaci Eutrópio Fernandes Júnior

Orientador (a) - UFRN



Prof. Dr. Lindemberg de Jesus Nogueira Duarte

Membro examinador(a) - UFRN



Prof. Dr. Francisco Wendell Bezerra Lopes

Membro examinador(a) - UNP

MAISEL, Lucas Bernhard. Tratamento de água produzida do petróleo aplicado à dessedentação animal utilizando energia solar no nordeste brasileiro. 2020. 77 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Petróleo, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Brasil, 2020.

Palavras-Chaves: Tratamento de água, dessedentação animal, energia solar

Orientador: Prof. Dr. Wilaci Eutrópio Fernandes Júnior

RESUMO

A água produzida é o efluente com maior volume na produção de petróleo em campos maduros, caso da maioria dos campos da bacia Potiguar. Devido ao seu grande volume e baixo valor comercial, é considerado pelas empresas como um problema na produção, devido não apenas ao volume gerado, mas à necessidade de tratamento para que a água seja descartada ou reutilizada. Esta água poderia estar sendo utilizada no combate à escassez hídrica que de tempos em tempos assola a região semiárida do nordeste brasileiro, mas esbarra no alto custo do tratamento da mesma. Este trabalho apresenta uma proposta de planta de tratamento que a água tratada seja utilizada na dessedentação animal no município de Serra do Mel no interior do Rio Grande do Norte, onde a viabilização do projeto será discutida a partir do dimensionamento de um sistema de painéis fotovoltaicos a fim de redução de custos operacionais. A planta de tratamento foi proposta a partir da caracterização da água produzida em campos terrestres no Rio Grande do Norte e pela qualidade da água necessária para que possa ser utilizada na dessedentação animal. O sistema de painéis foi dimensionado a partir de dados de irradiação solar local e dados de consumo energético no tratamento proposto. Além disso, foi feita uma análise econômica através do software *System Advisor Model* (SAM), que apresentou um tempo de retorno de investimento de 6,5 anos em relação aos gastos de implementação dos sistema de painéis fotovoltaicos.

MAISEL, Lucas Bernhard. Tratamento de água produzida do petróleo aplicado à dessedentação animal utilizando energia solar no nordeste brasileiro. 2020. 77 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Petróleo, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Brasil, 2020.

Keywords: Water Treatment, Stock Watering, Solar Energy

Tutor: Prof. Dr. Wilaci Eutrópio Fernandes Júnior

ABSTRACT

Produced water is the effluent with the highest flow rate in mature oilfields oil production, situation for the most of the fields at the Potiguar basin. Due to its large volume generated and low commercial value, the PW is considered an issue by oil producers, also for its treatment necessity to be discarded or reutilized. This water could be being used to combat the water drought that periodically hit the semi-arid region of the Brazilian northeast, but due to treatments high costs it is not possible This study proposes a water treatment plant that suits the produced water to be used on stock watering in Serra do Mel, a city on the countryside of Rio Grande do Norte state in Brazil, where the viability is aimed by reducing costs through the sizing of a PV system capable of supply energetically the PW treatment. The treatment was defined taking into account the produced water quality of onshore oilfields at the Potiguar basin and the quality demanded by law to this water be used on stock watering. The PV system was defined using solar irradiation data and from the energy consumed by the proposed treatment. Additionally, an economic analysis was made through the System Advisor Model software, returning a payback period of 6,5 years to the PV system installation costs.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, avô, irmã, sobrinho e a minha namorada, pelo incentivo, carinho e confiança em mim.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais por toda a confiança em mim depositada durante toda minha vida, apoiando e incentivando toda e qualquer decisão minha.

À minha irmã que mesmo morando longe se faz presente por conversas quase diárias e incentivo demonstrado em toda minha vida.

Ao meu sobrinho que mesmo não sabendo ainda de sua importância é quem me dá a certeza que tudo está bem independente da situação.

Ao meu avô por ser o maior incentivador de estudos que conheço, apoiando qualquer decisão minha academicamente.

A minha namorada por todo carinho, paciência e carinho dados em todos os momentos que necessito e nos que não necessito.

A todos os meus amigos, fundamentais para que todos os momentos se tornem mais leves e fáceis de serem contornados.

Aos professores do curso de engenharia de petróleo por todo conhecimento adquirido durante esses anos de graduação.

A Universidade Federal do Rio Grande do Norte, que me proporcionou as condições necessárias para que esse trabalho fosse finalizado.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Objetivos gerais:	14
1.2 Objetivos específicos	14
2 ASPECTOS TEÓRICOS	16
2.1 Petróleo e sua origem:	16
2.2 Água produzida:	19
2.2.1 Composição da água produzida	20
2.3 Impacto ambiental do descarte de água	22
2.4 Uso da água produzida	25
2.5 Legislação ambiental para descarte	28
2.6 Tratamento da água produzida	31
2.7 Energia solar fotovoltaica	40
2.8 Dessedentação animal	44
3 MATERIAS E MÉTODOS	47
3.1 Caracterização do campo	47
3.1.1 Localização e instalações:	47
3.1.2 Volumes produzidos	48
3.2 Consumo animal de água	49
3.3 Caracterização da água produzida	50
3.4 Comparação água produzida x água para dessedentação	51
3.5 Caracterização do sistema de painéis fotovoltaicos	52
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	54
4.1 Considerações para a escolha do tratamento	54
4.2 Planta de tratamento final	58
4.3 Destino da água tratada	59
4.4 Consumo e custo energético da osmose reversa:	61
4.5 Dimensionamento de sistema de painéis fotovoltaicos on-grid:	61

4.6 Benefícios para a empresa produtora:	63
5 CONCLUSÕES	64
6 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	66
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Processo de formação do petróleo	17
Figura 2 - Reservatório de óleo e gás	19
Figura 3 - Separador gravitacional	32
Figura 4 - Processo de coagulação e floculação	33
Figura 5 - Funcionamento de um flotador	34
Figura 6 - Funcionamento de um hidrociclone.....	35
Figura 7 - Esquemático de filtro	36
Figura 8 - Funcionamento de membranas	37
Figura 9 - Processos de separação por membrana (PSM)	37
Figura 10 - Processo de osmose reversa.....	39
Figura 11 - Mapa de irradiação solar do Brasil	41
Figura 13 - Efeito fotovoltaico	43
Figura 14 - Fatores determinantes para o consumo de água animal.....	45
Figura 15 - Localização do campo de Andorinha.....	48
Figura 16 - Fluxograma com tratamentos alternativos.....	57
Figura 17 - Fluxograma com planta de tratamento final	58
Figura 18. Produção mensal de energia.....	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição do petróleo cru.....	16
Tabela 2 - Tipos de coletores solares.....	42
Tabela 3 - Valores máximos permitidos para a dessedentação animal	45
Tabela 4 - Dados de produção do campo de Andorinha em maio de 2020.....	49
Tabela 5 - Consumo diário de água de diversos rebanhos	49
Tabela 6 - Tamanho dos rebanhos no município de Serra do Mel.....	50
Tabela 7 - Parâmetros físico-químicos da água produzida.....	50
Tabela 8 - Comparação entre a água produzida e os valores máximo permitidos por lei.....	51
Tabela 9 - Dimensionamento sistema on-grid.....	62

LISTA DE ABREVIATURAS E/OU SIGLAS

ANEEL – Agência nacional de energia elétrica
ANP – Agência nacional de petróleo
AP – Água produzida
API – American Petroleum Institute
BTEX – Benzeno, Tolueno, Etil benzeno e Xileno
c-Si – Silício cristalino
CONAMA – Conselho Nacional do Meio ambiente
COT – Carbono Orgânico Total
CPV – Células fotovoltaicas concentradora
DBO – Demanda bioquímica de oxigênio
DQO – Demanda química de oxigênio
EMBRAPA – Empresa brasileira de pesquisa agropecuária
ETAP - Estação de tratamento de água produzida
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
MF – Microfiltração
NF – Nanofiltração
OD – Oxigênio dissolvido
OR – Osmose reversa
pH – Potencial Hidrogeniônico
PPM – Parte por milhão
PSM – Processo de separação por membranas
PV – Fotovoltaica
RAO – Razão Água/Óleo
SAM – System Advisor Model
TOG – Teor de óleos e graxas
UF – Ultrafiltração
VMP – Valor máximo permitido

LISTA DE SÍMBOLOS E/OU UNIDADES

Å – Angstrom

µm – Micro metro

atm – Atmosfera

CaCO₃ – Carbonato de cálcio

cm – Centímetro

H₂S – Sulfeto de hidrogênio

kg – Quilograma

km – Quilômetro

km² – Quilômetro quadrado

kW – Kilowatt

kWh – Kilowatt-hora

kWh/bbl – Kilowatt-hora por barril

kWh/m² - Kilowatt-hora por metro quadrado

kWh/m³ – Kilowatt-hora por metro cúbico

L – Litro

L/dia – Litros por dia

m³ – Metro cúbico

mD – Millidarcy

mg/L – Miligrama por litro

ml/L – Mililitro por litro

Mm³ – Milhões Metro cúbico

MW – Megawatt

NaCl – Cloreto de sódio

Pt/L – Parte por litro

R\$ - Reais

R\$/kWh – Reais por kilowatt-hora

UNT – Unidade de medida para turbidez

W/m² - Watt por metro quadrado

1 INTRODUÇÃO

A indústria petrolífera continua sendo motor de desenvolvimento para diversos países ao redor do mundo, porém com a crescente preocupação com o meio ambiente o mundo passa por um processo de mudança de matriz energética, passando das fontes de energia não renováveis para um uso futuro majoritário de fontes de energia renováveis.

Durante todo o processo de produção de petróleo, o chamado poço ao posto, existe o risco de poluição ao meio ambiente. Desde o processo de perfuração de poços com a geração de efluentes contaminados, até a queima de combustíveis fósseis existem riscos e consequências ambientais. Um dos maiores problemas a serem enfrentados pelas empresas produtoras de óleo e gás é justamente a produção de água produzida, que durante a vida produtiva do poço é produzida em forma livre ou dissolvida no petróleo. Em muitos poços, a produção de água é muito superior à de petróleo, chegando a ser responsável em até 98% do volume gerado pelo reservatório (NEFF, 2011).

O problema reside na composição da água, que pode conter diversos elementos nocivos ao meio ambiente e à saúde. Entre os principais contaminantes da água podemos citar: metais pesados; petróleo livre e dissolvido; alta salinidade; sólidos em suspensão; materiais radioativos; entre outros (NUNES, 2013). Qualquer um desses elementos pode vir a causar danos caso a água não receba um tratamento adequado antes de ser descartada ou reutilizada. Para garantir que isto não aconteça, o CONAMA determinou através das Resoluções 357/2005 e 430/2011 os valores máximos permitidos para cada um dos possíveis contaminantes presentes na corrente de água. A Resolução 357/2005 determina também a classificação das águas e seus possíveis usos, especificando a qualidade para cada um deles.

Tendo em vista a função essencial da água para a preservação de ecossistemas e preservação da vida (TELLES & COSTA, 2010), o ato de tratar e dar um uso para uma água contaminada que viria a ser descartada é um ato de responsabilidade ambiental. Não apenas ambiental, mas também social, visto que a escassez de recursos hídricos atinge populações de diversas partes do planeta. Inclusive a região do semiárido nordestino, que apesar de sofrer com secas ocasionalmente, possui um grande volume de água produzida gerada por seus campos muitas vezes já maduro de petróleo.

A questão trabalhada neste estudo é como tornar esse grande volume de água produzida em uma água que possa ser utilizada, mais especificamente para a dessedentação de animais no município de Serra do Mel, que é aonde fica localizado o campo de Andorinha, campo que realiza o descarte de toda a água que produz. O campo está localizado a 30 km da cidade de Mossoró, no estado do Rio Grande do Norte. Para tornar possível essa adequação, será proposto a partir da comparação de análises da água de campos da bacia Potiguar com os valores máximos permitidos pela resolução CONAMA, uma planta de tratamento de água que reduza ou elimine os contaminantes com valores acima ao permitido, tornando-a apta para o consumo animal.

Essa adequação através do tratamento, apesar de ser viável tecnicamente, ainda é muito dispendiosa. Os custos de implementação, operação e manutenção principalmente dos processos de separação por membrana são os principais contribuintes na conta final. Um desses gastos é o consumo energético, que é altíssimo no processo da osmose reversa devido à necessidade de bombeamento a altas pressões. É neste ponto que este trabalho busca uma alternativa que reduza os custos para a operação.

Para isto, será dimensionado um sistema de painéis fotovoltaicos capaz de suprir energeticamente a operação da estação de tratamento de água produzida (ETAP). Para este fim, será utilizado o software *System Advisor Model* (SAM) que a partir do consumo energético, eficiência dos painéis solares, custo de energia no local e dados de irradiação solar no local, faz o estudo de quantos painéis são necessários para o fim, além de fazer uma análise econômica calculando o tempo de retorno de investimento que é a implementação do sistema de painéis fotovoltaicos.

1.1 Objetivos gerais:

Desenvolver um projeto de tratamento de água produzida que a torne adequada para a dessedentação de animais, utilizando energia solar como fonte de energia no processo de osmose reversa.

1.2 Objetivos específicos

- Analisar os dados da caracterização da água produzida e quais estão em desacordo com a Resolução CONAMA 357/2005;
- Definir quais os tratamentos adequados para a remoção dos contaminantes, visando a adequação da água para a dessedentação animal;
- Dimensionar um sistema de painéis fotovoltaicos a fim de suprir energeticamente o processo da osmose reversa no tratamento.

2 ASPECTOS TEÓRICOS

2.1 Petróleo e sua origem

De maneira simples e direta, o petróleo pode ser definido como uma substância oleosa, inflamável, mais densa que a água e com uma cor que varia entre o castanho-claro e preto (SZKLO, 2005). Definição extremamente simplificada de uma substância complexa, constituída majoritariamente por hidrocarbonetos, ou seja, carbono e hidrogênio, porém que pode conter outras inúmeras outras substâncias orgânicas como nitrogênio, oxigênio e enxofre e até substâncias inorgânicas, como metais e sais de ácidos orgânicos.

Cada petróleo terá em sua composição uma quantidade variada dos componentes descritos acima, com cadeias de hidrocarbonetos que podem possuir de um carbono (metano) até mais de sessenta carbonos e com porcentagens diferentes de outros compostos. Esta “mistura” é que vai definir a qualidade e aparência do petróleo, ou melhor dizendo, do hidrocarboneto, que pode ir de gás (metano, etano, etc.) até sólido (betume). Na tabela 1, temos a composição habitualmente encontrada:

Tabela 1 - Composição do petróleo cru

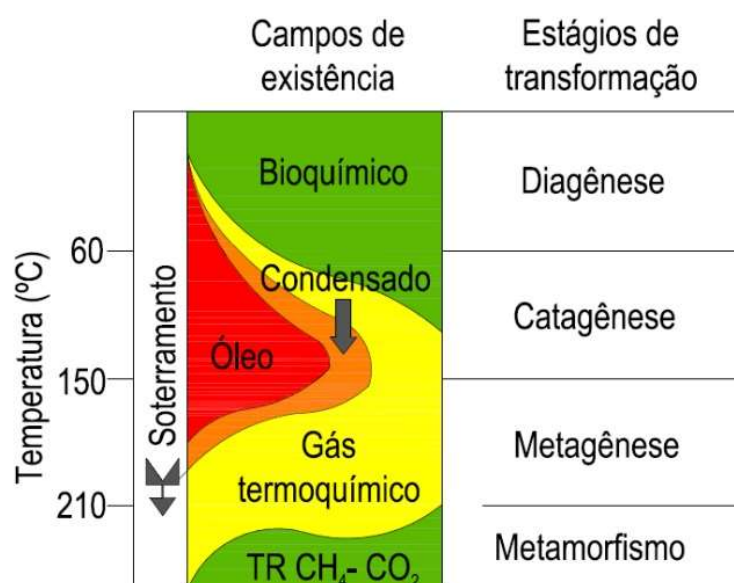
Hidrogênio	11 - 14%
Carbono	83 - 87%
Enxofre	0,06 – 8%
Nitrogênio	0,11 – 1,7%
Oxigênio	0,1 – 2%
Metais	Até 0,3%

Fonte: THOMAS, 2004

Tal diversidade provém da singularidade de condições que cada petróleo foi formado. A formação vai depender de três fatores principais: teor de carbono orgânico total (COT), altas temperaturas e altas pressões. Sem algum desses fatores, é impossível que o petróleo seja formado. Inicialmente é necessário que matéria orgânica seja acumulada junto à sedimentos e com o passar de milhares de anos essa camada seja sobreposta por outras camadas de sedimentos e demais formações geológicas. Com o aprofundamento da camada que detém camada orgânica, conseqüentemente existe o aumento de pressão e de temperatura, criando as condições ideais para a formação de petróleo.

A primeira etapa para a geração de petróleo é a diagênese, onde após a deposição da camada sedimentar a matéria orgânica, que deve possuir valores entre 0,5 a 1% (WISNIEWSKI, 2010) para ter potencial de geração de petróleo, passa por processos físicos e químicos até formar o querogênio. O querogênio é definido como uma fração insolúvel de matéria orgânica e suas características químicas e físicas dependem de tipo de matéria orgânica a partir de que ele foi criado, que pode ter origem marinha, terrestre ou lacustre e é o que determinará a qualidade do petróleo final. Com o incremento de pressão e temperatura o querogênio passa pelas etapas da catagênese e da metagênese. Na primeira serão formados óleo, condensado e gás úmido e na outra serão formados o metano e um resíduo carbonoso. O processo é demonstrado pela figura 1.

Figura 1 - Processo de formação do petróleo



Fonte: IGEOLOGICO (2020)

Mesmo que as condições descritas acima tenham sido atendidas e o petróleo ou gás tenham sido gerados, isso não é garantia que existirá um poço de petróleo. Para que isso ocorra, é impreterível a existência dos seguintes elementos:

- Rocha geradora e migração do petróleo

É na rocha geradora que acontece todas as etapas descritas anteriormente na formação do petróleo. Deve possuir alto teor de carbono orgânico total e ser capaz de migrar o óleo até a rocha reservatório (migração primária) e subsequentemente até as trapas (migração secundária). A migração ocorre devido ao gradiente de pressão entre a camada da rocha geradora com a rocha reservatório, que proporciona a criação de microfraturas entre elas e a migração das fases do hidrocarboneto.

- Rocha reservatório

São rochas que possuem porosidade e permeabilidade adequadas à acumulação de petróleo, são geralmente arenitos ou rochas carbonáticas. Porosidade é a porcentagem “vazia” da rocha, onde as fases líquidas e gasosas podem se acumular e a permeabilidade é em grosso modo como os poros se conectam, que é o que permite que exista o fluxo de petróleo dentro do reservatório, possibilitando sua produção.

- Trapas

São falhas ou camadas de rochas impermeáveis que aprisionam o petróleo nas rochas reservatório. Suas maiores ocorrências são as trapas estruturais, estratigráficas e hidrodinâmicas. Parte da formação de características físico-químicas do petróleo e gás são geradas durante o período que o petróleo se encontra preso nas trapas, sendo fundamentais para o produto final. A figura 2 apresenta um esquemático de um reservatório com suas rochas.

Figura 2 - Reservatório de óleo e gás



Fonte: CBIE (2018)

2.2 Água produzida

Com menor valor comercial, a água produzida é muitas vezes dissociada da produção de óleo e gás, sendo tratada majoritariamente como um problema e não um ativo dentro da cadeia de produção. A água produzida dentro da vida produtiva de um poço de petróleo tem duas origens distintas, pode ou ser fruto do aprisionamento de água nas formações ou pode já ser fruto da água que é injetada nos reservatórios para manutenção de pressão no poço (NEFF, 2011).

A primeira dessas é conhecida também como água conata ou de formação (VEIL, 2004) e assim como o petróleo, é um fluido que deriva de atividades orgânicas ocorridas em formações rochosas e fica aprisionado nas armadilhas. Com a migração do petróleo, essa água que é menos densa se deposita na parte inferior do reservatório e durante a vida útil do poço a sua produção aumenta (ELKINS, 2005), pois vai penetrando na zona produtora do reservatório.

A segunda é proveniente da injeção de água nos reservatórios com o intuito de manter a pressão e conseqüentemente a produção do poço, pode ser uma água doce ou até mesmo água já produzida, com o acréscimo de aditivos. A totalidade de água produzida pode ser bem maior do que o volume de óleo produzido, com uma razão de água/petróleo (RAO) pode chegar até 98% no fim da vida produtiva do poço de petróleo (NEFF, 2011).

E assim como o petróleo, a qualidade e quantidade de água depende de vários fatores presentes na formação do reservatório (VEIL, 2004), além de poder variar conforme a depleção do poço, seja através do aumento da quantidade ou a adição de produtos químicos presentes na água injetada. Na próxima sessão será explorada a composição e quais os elementos são de maior preocupação para quem lida com a água produzida.

2.2.1 Composição da água produzida

De acordo com BADER (2007), a composição da água depende das características da formação e dos aditivos adicionados ao reservatório durante a fase produtiva do poço. Entre os principais aditivos, pode-se citar: inibidores de corrosão, biocidas, desemulsificantes, dispersantes, inibidores de incrustação, coagulantes, floculantes, antiespumantes, inibidores de deposição de parafina/asfaltenos (NUNES, 2013).

Os aditivos nada mais são do que produtos químicos que tem o papel de maximizar e possibilitar a produção de óleo e gás, impedindo transtornos durante todo o ciclo de produção dos hidrocarbonetos. Juntamente com os componentes adicionados artificialmente ao reservatório, os outros componentes presentes na água produzida são fruto das características do reservatório e sua formação (STEWART, 2011).

Os principais constituintes da água produzida são descritos abaixo:

- Sais e íons inorgânicos

A salinidade da água produzida é geralmente bastante elevada, chegando a valores de até 300 ppm, contrastando com salinidades de 32 a 36 ppm das águas do mar. Essa alta concentração é devido à dissolução dos sais da formação rochosa durante o tempo que a água se encontra em reservatório. O que torna a água produzida mais densa que a água marinha (FARAG & HARPER, 2014).

Os principais íons inorgânicos presentes na água, são, respectivamente: sódio, cloretos, cálcio, magnésio, potássio, sulfatos, brometos, bicarbonatos e iodetos (NEFF, 2011).

- Ácidos orgânicos

Os ácidos orgânicos presentes na água produzida são as carboxilas de cadeias alifáticas ou de hidrocarbonetos aromáticos. São responsáveis por grande parcela do teor total de carbono presente na água produzida, e entre os principais componentes desse grupo, podemos citar os ácidos fórmico, acético, propanóico, butanoico, pentanoico e hexanoico. Com os dois primeiros citados com maior abundância e sua presença é inversamente proporcional ao peso molecular (NEFF, 2011).

- Hidrocarbonetos

Os hidrocarbonetos são os componentes produzidos na água produzida de maior preocupação ambiental durante o descarte e nunca são retirados 100% durante o tratamento (JOHNSEN, 2004). Pode estar presentes em duas formas distintas na água, podendo ser disperso ou dissolvido. O hidrocarboneto disperso pode ser retirado de maneira mais simples, comumente utilizando o diferencial de densidade entre o hidrocarboneto e a água para facilitar a sua separação. Já o dissolvido possui uma maior complexidade de tratamento. De acordo com NEFF, (2011), os principais hidrocarbonetos presentes na água produzida são os seguintes:

- **BTEX:** Grupo de maior presença na água produzida, constituem hidrocarbonetos que possuem um anel aromático como benzeno, tolueno, etil benzeno e xileno.
 - **Aromáticos policíclicos:** Diferentemente dos BTEX, esse grupo de hidrocarbonetos possui mais de um anel aromático, são considerados a maior preocupação no descarte da água devido a sua toxicidade e sua difícil retirada do ambiente marinho (NEFF, 1987).
 - **Fenóis:** Por fim, temos os fenóis que possuem ligadas ao seu anel aromático uma ou mais hidroxilas. Entre os fenóis mais abundantes na água produzida, temos o fenol, metil-fenol e o dimetil fenol.
-
- Metais

A concentração e a composição dos metais na água produzida são únicas para cada poço, e dependem majoritariamente da geologia e da idade de onde o petróleo e gás foram formados

(VEIL, 2004). Geralmente possuem concentrações maiores às encontradas na água do mar e os principais metais encontrados na água produzida são zinco, chumbo, ferro, manganês e bário.

- Elementos radioativos

Provenientes do decaimento radioativo do urânio e tório presentes em materiais argilosos e rochas, os elementos radioativos de ocorrência natural mais abundantes na água produzida são o Rádio-226 e Rádio-228 (UTVIK, 2003).

- Bactérias

A água produzida apesar de sua toxicidade pode conter algumas bactérias anaeróbicas e redutoras de sulfatos (MOTTA, 2013).

- Sólidos produzidos

Provenientes majoritariamente da formação rochosa, a água produzida pode conter diversos sólidos dispersos tais como areia, argila, carbonatos e demais materiais que estão presentes na formação. Além de alguns sólidos serem provenientes de algumas operações no poço, como os propantes em operações de fraturamento hidráulico.

2.3 Impacto ambiental do descarte de água

A definição dada pela CONAMA na resolução N° 01/1986 em seu primeiro artigo é de que impacto ambiental é qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente, afetam:

- I – a saúde, a segurança e o bem-estar da população;
- II – as atividades sociais e econômicas;
- III – a biota;

IV – as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente;

V – a qualidade dos recursos ambientais

Tendo em mente a definição de impacto ambiental, pode-se afirmar que o descarte da água sem o adequado tratamento se encaixa na definição dada, visto que a água produzida pode provocar a poluição de corpos d'água, contaminação de aquíferos, danos ao solo (salinização), danos à flora e à fauna, danos à saúde humana e danos ao reservatório (VIEIRA, 2011). A gravidade do impacto é bastante variável e depende de diversos fatores, caso a água seja descartada em um curso de água de baixo volume, é mais provável que este ambiente sofra mais do que caso o descarte seja feito em um ambiente marítimo. Além deste fator, as seguintes variáveis também são fundamentais na avaliação do impacto causado: Propriedades físico-químicas dos componentes da água, temperatura, teor de material orgânico dissolvido, ácidos húmicos, presença de contaminantes orgânicos e fatores do bioma que a água foi descartada (VEIL, 2004).

Considerando efeitos a longo prazo, os constituintes da água produzida que apresentam maior risco à natureza são os hidrocarbonetos aromáticos, metais pesados e os materiais radioativos (ELKINS, 2005). Outro constituinte de grande risco é a salinidade da água. Os principais riscos inerentes a cada um dos constituintes supracitados são:

- Hidrocarbonetos aromáticos:

Após o descarte realizado em corpos d'água, os componentes aromáticos podem ser compartimentados (evaporados, dispersos e sedimentados), biodegradados, bioacumulados, bioconcentrados ou eliminados através de outros produtos menos tóxicos ao meio ambiente (ELKINS, 2005). O destino de maior preocupação é a bioacumulação e bioconcentração dos hidrocarbonetos aromáticos, devido a entrada desses elementos na cadeia de alimentação dos organismos presentes no local de descarte, que pode chegar até o consumo de humanos. A ingestão e contato com esses componentes aromáticos pode resultar em:

- Narcose (alteração do estado de consciência);
- Fototoxicidade (irritação e queimadura da pele);
- Disrupção endócrina;

- Mutação genética;
- Surgimento de células cancerígenas;
- Malformação congênita

Apesar de diversos efeitos adversos possíveis, a contaminação geralmente ocorre apenas perto do local de descarte da água, não sendo observado efeitos tóxicos além de 50 metros além do ponto de descarte (FROST, 1998). Efeitos crônicos (duradouros) não são esperados devido ao descarte indevido dessas substâncias.

- Fenóis:

Os fenóis são anéis de benzeno com uma hidroxila ligada a um de seus seis carbonos. Quando exposto na natureza, os outros 5 carbonos reagem rapidamente com metis carbonos e formam metil fenóis (alquilfenóis) e fenóis halogenados, que são substâncias presentes na natureza (NEFF, 2002). Os alquilfenóis são as substâncias de maior preocupação de descarte, devido ao seu poder de alteração hormonal (disrupção endócrina) em peixes que pode causar mudanças irreversíveis.

E apesar de serem substâncias que podem ser facilmente dispersadas e ficarem com baixas concentrações no ambiente de descarte elas tem alto poder de bioacumulação de bioconcentração em organismos vivos.

- Metais pesados:

A presença de metais na água produzida está relacionada com a interação com a formação geológica do reservatório, que pode atingir concentrações bem mais altas às achadas na natureza. O maior impacto relacionado aos metais vem da sua ingestão, que por possuírem toxicidade alteram a configuração do organismo que o está consumindo, os órgãos mais sensíveis ao consumo de metais são os rins, trato gastrointestinal e o cérebro (BARROS, 2001). Além dos efeitos imediatos de sua ingestão, os metais pesados podem se acumular nas células e tecidos dos microrganismos e adentram na cadeia alimentar, causando efeitos adversos para

todos os organismos da cadeia. Individualmente falando, os principais metais presentes na água produzida e seus efeitos são:

- Chumbo: Sintomas comuns são danos ao cérebro, convulsões, mudança de comportamento e possível falecimento.
 - Cádmio: Causa problemas ósseos, irritação gastrointestinal e é cancerígeno.
 - Bário: Causa bloqueios nervosos, vaso constrição e aumento de pressão sanguínea.
 - Zinco: É uma substância cancerígena e pode inibir crescimento de organismos marinhos
 - Ferro: Pode provocar cefaleia, convulsões, náuseas, vômitos, febre, suor, hipotensão e choque anafilático (WAITZBERG, 1990).
 - Manganês: Problemas em fígados, rins e pulmões
- Materiais radioativos:

Existe a possibilidade de precipitação dos isótopos de rádio e estrôncio que podem bioacumular no ambiente onde foi feito o descarte da água produzida. Os principais organismos afetados são os crustáceos e os peixes, que podem sofrer mutações devido ao consumo de material radioativo.

- Salinidade

O descarte indevido da água produzida com alta salinidade pode causar grandes alterações no meio o qual houve o descarte. Uma alta salinidade está diretamente ligada com a infertilização de solos devido à salinização e é possível que lençóis freáticos sejam atingidos por essa água e se torne imprópria para a irrigação, consumo humano e animal. Outro problema que pode ocorrer é a incrustação do sal em aves e em facilidades de produção, que pode causar não só danos ao meio ambiente, mas também materiais (VIEIRA, 2016).

2.4 Uso da água produzida

Vista geralmente como um custo durante a produção de hidrocarbonetos, a água produzida historicamente é descartada ou reutilizada da maneira mais barata possível pelas

empresas exploradoras de petróleo. Atualmente, com a preocupação da escassez de água doce para diversos usos, têm se utilizado a água produzida numa diversa gama de aplicações. A escolha do uso da água produzida dependerá da localização do poço, regulamentação local, viabilidade técnica e custos envolvidos.

Devido a facilidade e a necessidade, o destino mais comum da água produzida é a reinjeção no reservatório a qual foi produzida, ou até mesmo em outro reservatório do mesmo campo. A injeção de água serve como mecanismo de recuperação secundária de óleo, onde a água ajuda a manter a pressão no reservatório e manter o fluxo de hidrocarbonetos até a superfície. Caso nem toda a água seja utilizada ou não exista a necessidade de uma recuperação secundária, a água pode ou ser descartada em corpos d'água ou remanejada para outras atividades, explicitadas abaixo:

- Reinjeção no poço:

É o destino mais comum da água produzida por diminuir a quantidade de resíduo gerado e criar um reaproveitamento da água produzida, tornando o que poderia ser um custo em uma matéria prima para a produção de óleo através da recuperação secundária (MOTTA, 2013). Exige apenas um tratamento preliminar antes da reinjeção pois suas características mudam na superfície, segundo BADER (2007).

Sua possibilidade de aplicação depende ainda assim de alguns fatores, dos quais podemos destacar a compatibilidade da água com o reservatório e também se o reservatório se encontra isolado horizontal e verticalmente, para que não haja a contaminação de aquíferos ou formações rochosas adjacentes (GWPRF, 2003).

- Represamento:

O represamento da água produzida consiste na formação de pequenas represas através da criação de diques que permitem que a água seja depositada, possui tamanhos que podem variar de 1 acre até centenas de acres e podem ter diversos usos. O mais comum é que a água seja depositada e através da evaporação seja feito o seu descarte, apesar de que algumas represas podem ser utilizadas para criação de peixes, dessedentação animal, tanque para armazenamento ou até mesmo para recreação (GWPRF, 2003).

Só é possível dar este destino para a água produzida em regiões onde existe o espaço para a construção dos diques e o solo tenha baixa permeabilidade, impossibilitando a infiltração rápida e profunda ao solo. Outro fator determinante é o clima, que deve ser adequado para fazer a evaporação e que não possua um alto índice pluviométrico, já que as chuvas podem fazer com que ocorra o transbordamento e uma possível contaminação em outras áreas próximas.

- Irrigação:

Uma alternativa em especial para áreas mais áridas, é a utilização da água produzida para a irrigação de culturas. A maior barreira para o uso é a qualidade da água, que segundo OTTON, 2006 pode causar degradação do solo e contaminação de corpos d'água caso não haja um tratamento adequado. Em contrapartida, outras diversas aplicações já foram realizadas com sucesso e a qualidade das culturas se mantiveram, como na utilização para produção de tomates (MARTELL et al, 2013).

Os contaminantes que mais restringem a utilização da água para a irrigação são os metais pesados, como ferro, manganésio e bário e também a alta salinidade da água produzida. Onde os sais presentes impossibilitam que a planta consiga puxar a água do solo (GWPRF, 2003). E mesmo que com tratamento que diminua o teor de sais da água, é necessário que a cultura seja resistente à salinidade, o conjunto de fatores citados acima impossibilita que exista uma utilização mais ampla da AP para a irrigação.

- Uso animal

O uso da AP para animais pode ser realizado de duas maneiras, pode servir como água para dessedentação animal, ou servir como habitat para peixes. O fator de maior preocupação é a quantidade de sólidos dissolvidos totais na água, que deve ser menor que 1.000,0 mg/L (GWPRF, 2003), apesar de que segundo VEIL, 2004 os animais conseguem se acostumar com valores maiores e valores de até 7.000,0 mg/L podem causar diarreia nos animais mas não é suficiente para mata-los.

Conforme já mencionado no uso para represamento, a AP serve também como habitat para peixes e algumas aves. Num caso onde a AP foi utilizada para criação de tilápia, os animais

atingiram pesos maiores do que os animais num grupo de controle com água doce porém foram reportadas algumas mortes no grupo, apesar da causa da morte não ter sido especificada, impossibilitando a identificação de qual componente foi o mais prejudicial aos peixes (JACKSON AND MYERS, 2002).

- Uso industrial:

Adicionalmente, em locais onde água subterrânea e de corpos d'água são escassas, a AP pode substituí-las em algumas aplicações industriais com ou sem a necessidade de tratamento prévio (VEIL, 2004). A seguir, alguns exemplos de aplicações já utilizadas:

- Controle de poeira em estradas: Utilização da água produzida para controle de poeira em estradas sem pavimentação.
- Combate de incêndio: Pode ser utilizada no combate à incêndio em regiões com pouca disponibilidade de água. De acordo com GWPRF (2003) foi utilizada no estado americano de Colorado durante incêndios no verão de 2002.
- Uso na indústria de petróleo: Segundo Peacock (2002), a água produzida foi utilizada numa produção no estado americano do Novo México para a produção de fluido de perfuração com base de água.
- Lavagem de veículos: Segundo GWPRF (2003), a lavagem de veículos feito com água produzida é realizada por alguns órgãos e agências americanas que obrigam a lavagem de veículos sempre que irá para outro local.
- Geração de energia: Utilizada na geração de vapor em facilidades da ChevronTexaco no estado americano da Califórnia, com volumes de 360.000,00 bpd (BROST, 2002).

Quando o custo envolvido no tratamento para a utilização da água nas funções descritas acima é considerado alto a solução mais viável é o descarte em corpos receptores, principalmente no mar. Para cada uso a qualidade da água tratada deve ser diferente, as diretrizes para o descarte são definidas pelas Resoluções CONAMA N° 430/2011 e CONAMA N° 357/2005.

2.5 Legislação ambiental para descarte

Caso a reutilização da água produzida não seja possível ou desejada, esse efluente será descartado na natureza. A regulamentação para tal descarte é de responsabilidade do Conselho

Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) que define as diretrizes e regras ambientais a nível nacional. A fiscalização e regras especiais são definidas por órgãos estaduais e até mesmo municipais, que se adequam à realidade local.

No que tange ao descarte de água produzida, os instrumentos regulatórios a serem levados em consideração são as Resoluções CONAMA 357/2005 e a CONAMA 430/2011, a primeira em seu artigo primeiro fala:

“Esta Resolução dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento dos corpos de água superficiais, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes.”

Essa Resolução trata basicamente sobre os limites do despejo de efluentes para cada tipo de corpo d’água, que são classificados conforme suas possíveis utilizações. A resolução CONAMA 430/2011 surgiu como complemento da Resolução 357/2005 e segundo seu artigo primeiro, tem como diretriz:

“Esta Resolução dispõe sobre condições, parâmetros, padrões e diretrizes para gestão do lançamento de efluentes em corpos de água receptores, alterando parcialmente e complementando a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA.”

No que trata ao descarte da água produzida, a Resolução 430/2011 complementa acrescenta como parâmetro para despejo o valor máximo de 20 mg/L de óleos minerais.

De acordo com a Resolução 357/2005 a água pode ser classificada conforme os seguintes parâmetros:

- I. Águas doces: águas com salinidade igual ou inferior a 0,5 %
- II. Águas salobras: águas com salinidade superior a 0,5 % e inferior a 30 %
- III. Águas salgadas: águas com salinidade igual ou superior a 30 %

Dentro de cada uma dessas categorias existe uma subclassificação de classes da água, e para cada classe e classificação conforme a sua salinidade, existem usos diversos que podem ser feitos com essa água. Para esse estudo, que visa a utilização da AP para dessedentação animal, a água deve estar conforme os padrões das águas doces classe 3, que podem ter os seguintes usos:

- a) ao abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional ou avançado
- b) à irrigação de culturas arbóreas, cerealíferas e forrageiras
- c) à pesca amadora
- d) à recreação de contato secundário; e
- e) à dessedentação de animais.

De acordo com o artigo 16 da Resolução CONAMA 357/2005 a água doce classe 3 deve seguir as seguintes condições e padrões:

- a) não verificação de efeito tóxico agudo a organismos, de acordo com os critérios estabelecidos pelo órgão ambiental competente, ou, na sua ausência, por instituições nacionais ou internacionais renomadas, comprovado pela realização de ensaio ecotoxicológico padronizado ou outro método cientificamente reconhecido;
- b) materiais flutuantes, inclusive espumas não naturais: virtualmente ausentes;
- c) óleos e graxas: virtualmente ausentes;
- d) substâncias que comuniquem gosto ou odor: virtualmente ausentes;
- e) não será permitida a presença de corantes provenientes de fontes antrópicas que não sejam removíveis por processo de coagulação, sedimentação e filtração convencionais;
- f) resíduos sólidos objetáveis: virtualmente ausentes;
- g) coliformes termotolerantes: para o uso de recreação de contato secundário não deverá ser excedido um limite de 2500 coliformes termotolerantes por 100 mililitros em 80% ou mais de pelo menos 6 amostras, coletadas durante o período de um ano, com frequência bimestral. Para dessedentação de animais criados confinados não deverá ser excedido o limite de 1000 coliformes termotolerantes por 100 mililitros em 80% ou mais de pelo menos 6 amostras, coletadas durante o período de um ano, com frequência bimestral. Para os demais usos, não deverá ser excedido um limite de 4000 coliformes termotolerantes por 100 mililitros em 80% ou mais de pelo menos 6 amostras coletadas durante o período de um ano, com periodicidade bimestral. A E. Coli poderá ser determinada em substituição ao parâmetro coliformes termotolerantes de acordo com limites estabelecidos pelo órgão ambiental competente;
- h) cianobactérias para dessedentação de animais: os valores de densidade de cianobactérias não deverão exceder 50.000 cel/ml, ou 5mm³/L;
- i) DBO 5 dias a 20°C até 10 mg/L O₂;
- j) OD, em qualquer amostra, não inferior a 4 mg/L O₂;
- k) turbidez até 100 UNT;
- l) cor verdadeira: até 75 mg Pt/L; e,
- m) pH: 6,0 a 9,0

Além disso, são definidos limites máximos para parâmetros orgânicos e inorgânicos. Caso a água produzida atenda a todos os padrões e condições ela poderá ser utilizada para as funções descritas anteriormente, inclusive a dessedentação animal.

2.6 Tratamento da água produzida

Com o passar do tempo, os poços de petróleo começam a produzir cada vez mais água, que pode chegar a ser responsável por 99% da produção total do poço. Com esses grandes volumes, se faz fundamental o tratamento da água produzida, que possui dois objetivos principais. O primeiro é a recuperação de óleo livre e emulsionado presente na corrente da água, já o segundo objetivo é adequar a água para possível descarte ou reuso.

A qualidade final da água será determinada pela destinação final do efluente, e todo o processo de tratamento será definido a fim de adequar os parâmetros da água produzida para os valores máximos definidos na legislação. Além disso, nada adianta se o tratamento não for técnica e economicamente viável, sendo necessário levar em consideração fatores como volumes de água envolvidos, composição da água e a localização do campo.

O tratamento para adequação da utilização do uso da água para diversos fins pode ter os seguintes objetivos:

- I. Remoção de compostos orgânicos solúveis; remoção de óleo de forma dispersa;
- II. Remoção de sólidos suspensos; desinfecção, para remoção de algas e bactérias;
- III. Turbidez e areia;
- IV. Remoção de gases dissolvidos, como hidrocarbonetos leves, dióxido de carbono e gás sulfídrico;
- V. Dessalinização, para remover sais dissolvidos;
- VI. Abrandamento, para remoção de dureza;
- VII. Remoção de material radioativo;
- VIII. Adsorção de sódio, é adicionado cálcio e magnésio para reuso na irrigação.

Segundo SOARES (2013), para que os objetivos acima sejam alcançados, são empregados diferentes processos químicos, físicos e biológicos para que os componentes

supracitados sejam removidos ou removidos da água produzida. Na maioria dos casos, a remoção se dará a partir da combinação entre tratamentos.

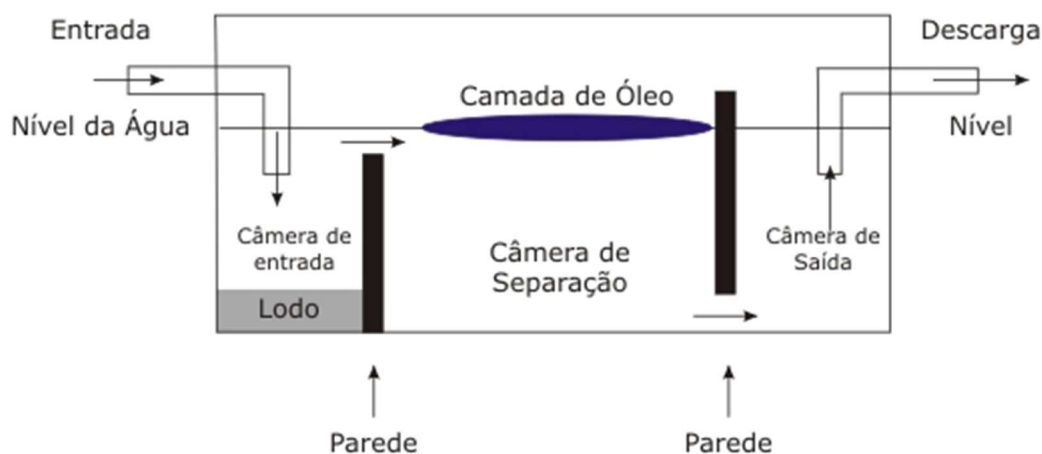
Os tratamentos mais difundidos são: separadores gravitacionais, hidrociclones, flotação, floculação, filtração, adsorção, processo de separação por membrana, entre outros.

- **Separadores gravitacionais:**

Os separadores gravitacionais são tanques que a partir da diferença de densidade entre as fases presentes na água produzida, fazem a separação do óleo livre (diâmetro superior a 150 μm) e dos sedimentos presentes na corrente. Tem a função de diminuir a velocidade da corrente e consequentemente aumentar o tempo que o óleo tem para emergir e as partículas sólidas de decantarem para o fundo do tanque.

Serve como etapa inicial do tratamento primário, que geralmente é sucedido pelos processos de coagulação/floculação e depois a flotação, processos que já servem para a retirada de óleo emulsionado, o qual não é retirado pelos tanques gravitacionais. A figura 3 apresenta o funcionamento de um separador gravitacional.

Figura 3 - Separador gravitacional



Fonte: NATURALTEC (2020)

- **Coagulação e Floculação:**

Esses processos têm como objetivo o agregamento de pequenas partículas coloidais em partículas maiores, que são mais facilmente retiradas devido ao seu maior peso. Os coloides são substâncias que possuem uma carga elétrica que gera uma força de repulsão e impede a aglomeração e subsequentemente a sedimentação.

A coagulação é um processo que visa a desestabilização elétrica dos coloides a partir da adição de coagulantes, agitação, calor e passagem de corrente elétrica. A sua utilização é considerada prática e gera efluentes de boa qualidade, porém, o custo dos coagulantes é geralmente alto e o volume de lodo gerado no processo é grande (CACHEIRA, 2012).

A floculação é o processo que busca agregar as partículas já eletricamente desestabilizadas pelo processo da coagulação. Os floculantes são geralmente polímeros que se ligam a essas partículas criando flocos com maior peso e volume, o que viabiliza sua remoção através da decantação e facilita a sua retirada por filtros. Os processos de coagulação e floculação são apresentados pela figura 4.

Figura 4 - Processo de coagulação e floculação



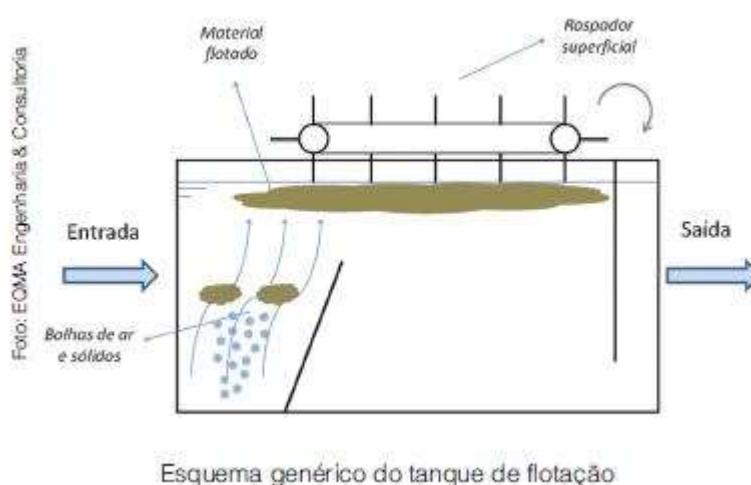
Fonte: ENERGIAQUIMICA, 2015

- **Flotação:**

Flotação é um método de tratamento que visa a retirada de partículas de óleo emulsionado (diâmetro $< 50 \mu\text{m}$) e pequenas partículas sólidas que não foram retiradas nos processos anteriores. Para isso, é introduzida uma corrente de bolhas de gás na água produzida que colidem com as partículas de óleo suspensas e sólidos, diminuindo assim a sua densidade e aumentando a sua flutuação. Os particulados junto com as bolhas formam uma espuma na superfície da água, que pode ser facilmente retirada.

A flotação pode ser dividida entre flotação a gás dissolvido e flotação a gás induzido. Suas diferenças estão na maneira que as bolhas são geradas e conseqüentemente o tamanho das bolhas. O processo com gás induzido consiste na injeção direta de uma corrente de gás no fundo da câmara de flotação, enquanto na flotação a ar dissolvido as bolhas são criadas a partir da queda de pressão após a injeção de uma corrente de água que possui ar dissolvido. A queda de pressão faz com que as bolhas se desprendam da corrente líquida e colidam com óleo dissolvido e leve-o até a superfície. O esquemático de um flotador é apresentado na figura 5.

Figura 5 - Funcionamento de um flotador



Fonte: REVISTA TAE, 2013

A eficiência do tratamento depende da diferença de densidade entre a água e seus contaminantes, temperatura de operação e tamanho da bolha criada, que quanto menores e mais bem distribuídas, melhor (CASADAY, 1993). Além disso, possui maior eficiência caso seja feito coagulação/floculação. Quando combinado com esses processos, a flotação pode retirar contaminantes de 3 a 5 μm (NETL, 2014).

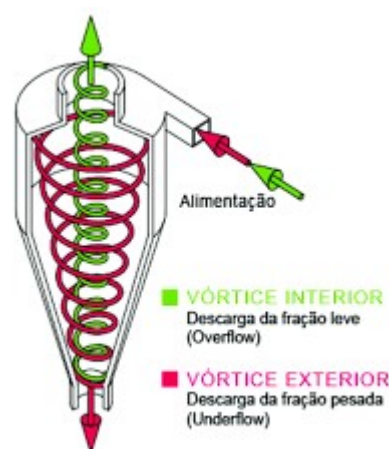
- **Hidrociclones:**

O tratamento por hidrociclones visa a separação de componentes com diferentes densidades dentro da corrente da água produzida. Pode separar partículas com tamanhos entre 5 e 15 μm , porém é ineficiente ao tratamento de substâncias dissolvidas na água (HAYES, 2004). Seu princípio de funcionamento, segundo Thomas (2001) é:

A água oleosa é introduzida sob pressão tangencialmente no trecho de maior diâmetro do hidrociclone, sendo direcionada internamente em fluxo espiral em direção ao trecho de menor diâmetro. Este fluxo é acelerado pelo contínuo decréscimo de diâmetro, criando uma força centrífuga que força os componentes mais pesados (água e sólidos) contra as paredes. Devido ao formato cônico do hidrociclone e ao diferencial de pressão existente entre as paredes e o centro, ocorre na parte central do equipamento, um fluxo axial reverso. Esta fase líquida central contendo óleo em maior proporção é denominada rejeito.

Na figura 6, temos a representação de como funciona um hidrociclone.

Figura 6 - Funcionamento de um hidrociclone



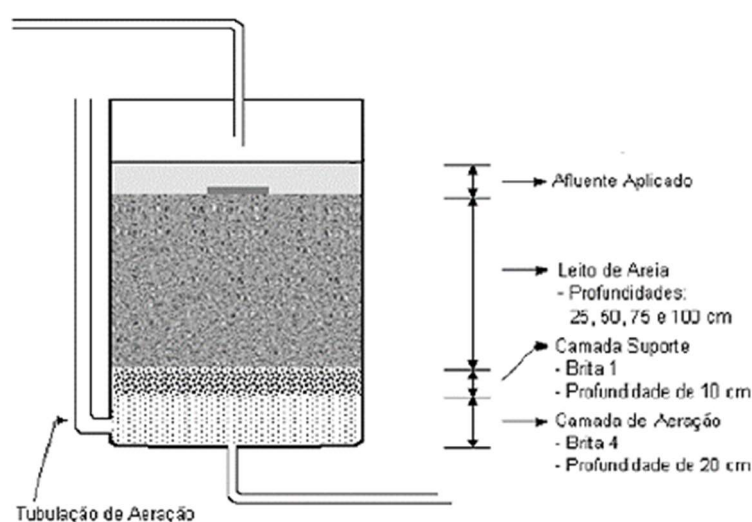
Fonte: AKW, 2018

Suas principais vantagens consistem na sua simplicidade e praticidade, ocupam pouco espaço físico e por isso são amplamente utilizados em plataformas offshore. Possui vida útil longa por ser constituído de uma peça única e não demandar peças que possam ser degradadas facilmente.

- **Filtração:**

O processo de filtração consiste na passagem da água produzida em um meio poroso que através do bloqueio mecânico e ações biológicas retêm os sólidos suspensos presentes na água. O meio filtrante pode ser de areia, carvão ativado, argila, cascas de noz, entre outros, e a escolha depende do resultado final da água que é desejado. Filtros de argila por exemplo são bons para remoção de partículas orgânicas como DBO e DQO, além de metais, amônia, odores e cloro. Já filtros de carvão além de retirarem cor, odores, matéria orgânica, removem também óleos (CAMMAROTA, 2011). Os filtros mais utilizados são os de areia e os de carvão ativado (TONETTI et al, 2004). A figura 7 apresenta o funcionamento de um filtro.

Figura 7 - Esquemático de filtro



Fonte: BARRADINHO *et al*, 2018

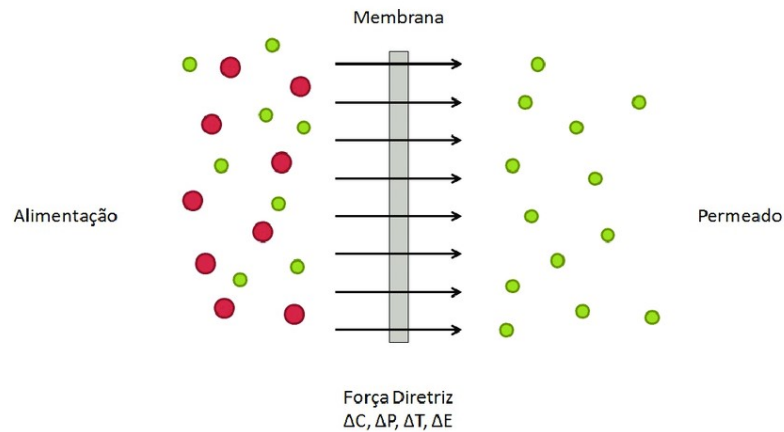
A eficiência de filtração vai depender do tamanho dos grãos e o distanciamento entre eles, além da vazão de água que entrará no sistema. Na figura a seguir vemos um esquemático de como funciona um filtro:

- **Tratamento por membranas:**

Os processos por separação por membranas (PSM) são métodos onde se aplica uma força matriz que pode ser: gradiente de potencial elétrico ou químico, diferencial de pressão ou concentração num fluido, forçando a sua passagem por uma membrana com pequenos poros,

os quais retêm particulados presentes na água (NUVOLARI, COSTA, 2010). A figura 8 explicita o princípio de funcionamento do PSM.

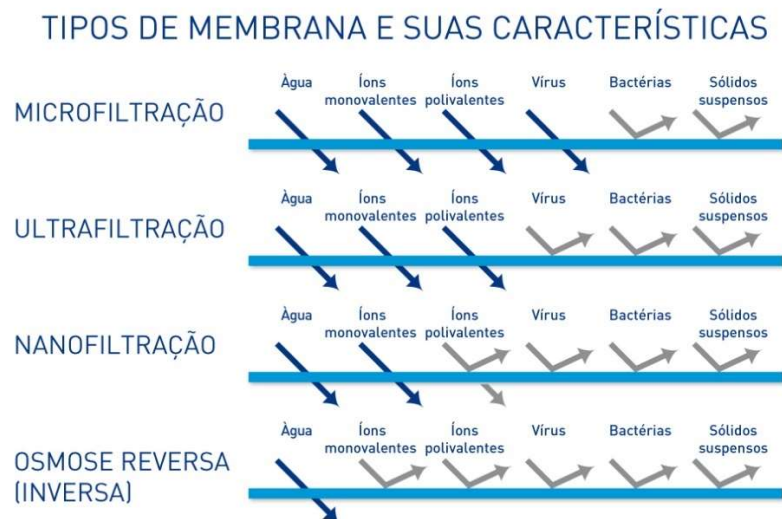
Figura 8 - Funcionamento de membranas



Fonte: MULDER, 1996

É considerada uma variação dos processos de filtração explicados anteriormente, sua diferença está no tamanho dos poros. Os principais PSM são a microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração e a osmose reversa, mostrados na figura 9.

Figura 9 - Processos de separação por membrana (PSM)



Fonte: PENTAIR, 2020

- **Microfiltração:**

A microfiltração é um processo usado majoritariamente para a remoção de sólidos com tamanhos entre 0,08-2,0 μm e conseqüentemente a redução de turbidez da água produzida. Funciona como um método intermediário entre o tratamento preliminar e remoção de sólidos maiores e um processo de separação com membranas com poros menor, como a osmose reversa (OR) e a nanofiltração (RPSEA, 2009).

As membranas são feitas geralmente de cerâmica ou polímeros, a primeira possui maior eficiência de remoção, maior compatibilidade química com a água produzida, porém possui maior custo inicial. O tamanho dos poros da membrana varia entre 0,1-1,0 μm e para que o fluido possa passar pela tela, é necessário que se atinja um diferencial de pressão entre 0,5 – 2,0 atm (HABERT, 2006).

▪ **Ultrafiltração:**

A ultrafiltração possui princípios de funcionamento bem similares aos da microfiltração, onde se usa uma tela que peneira pequenos componentes da AP. A diferença está no tamanho dos particulados retirados, que para a UF fica numa faixa entre 0,005 – 0,2 μm , o que remove macromoléculas, bactérias, vírus, coloides e algumas proteínas (NUVOLARI E COSTA, 2010).

O tamanho dos seus poros varia de 0,001 – 0,1 μm e o diferencial de pressão que deve ser aplicado é de 1 – 7 atm (HABERT, 2006). Assim como a MF, é utilizado como pré-tratamento para a NF e a OR, aumentando a eficiência do processo e a vida útil do tratamento (COLLARES, 2004).

▪ **Nanofiltração:**

De acordo com NUVOLARI E COSTA (2010) o processo de nanofiltração é utilizado quando o tratamento de ultrafiltração + osmose reversa não é viável. Seu uso é feito quando se almeja a retirada de partículas com diâmetro de 0,001 – 0,01 μm , isso inclui a diminuição da cor, dureza, sulfatos, nitratos, sódio, íons, metais, radionuclídeos etc.

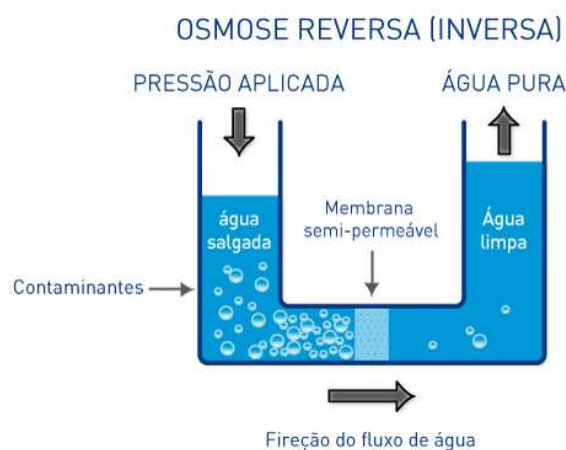
Seu princípio de funcionamento não depende apenas da barreira física (peneira) para retenção das partículas, depende também do potencial elétrico e princípio de difusão. Seus poros têm tamanho entre 5,0 – 10,0 Å e o diferencial de pressão necessário para seu

funcionamento é de 5 – 25 atm (HABERT, 2006). Seus principais usos são para a dessulfatação da AP para injeção em poços e a desmineralização para uso municipal (WILF, 2007).

▪ Osmose reversa

A osmose é um processo em que dois meios, um concentrado e um diluído, são separados por uma fina membrana e devido à pressão osmótica, haverá um fluxo de água do lado diluído para o lado concentrado, até que se atinja um equilíbrio osmótico, com iguais concentrações de cada lado da membrana, processo representado pela figura 10.

Figura 10 - Processo de osmose reversa



Fonte: PENTAIR, 2020

A osmose reversa (OR) tem como objetivo inverter o fluxo natural através da aplicação de altas pressões no lado da solução concentrada, forçando a passagem da AP para o lado diluído do sistema, com a retenção das partículas na membrana. Esse tratamento retém partículas com tamanhos entre 0,0001 – 0,001 μm e retira da água sais dissolvidos (cálcio, magnésio, cloretos, fluoretos, sulfatos), pesticidas, dureza, bactérias, vírus, protozoários, contaminantes orgânicos e até íons e átomos com baixo peso molecular. A remoção destes componentes resulta numa água com alto grau de pureza que pode ser utilizada para diversas aplicações (TARGUETA, 2016).

Suas principais desvantagens são o alto consumo elétrico necessário, devido à alta pressão aplicada no lado concentrado (15 – 80 atm) e a sensibilidade e fragilidade da membrana,

que requer um pré-tratamento para remoção de particulados maiores, que poderiam vir a danificar a membrana.

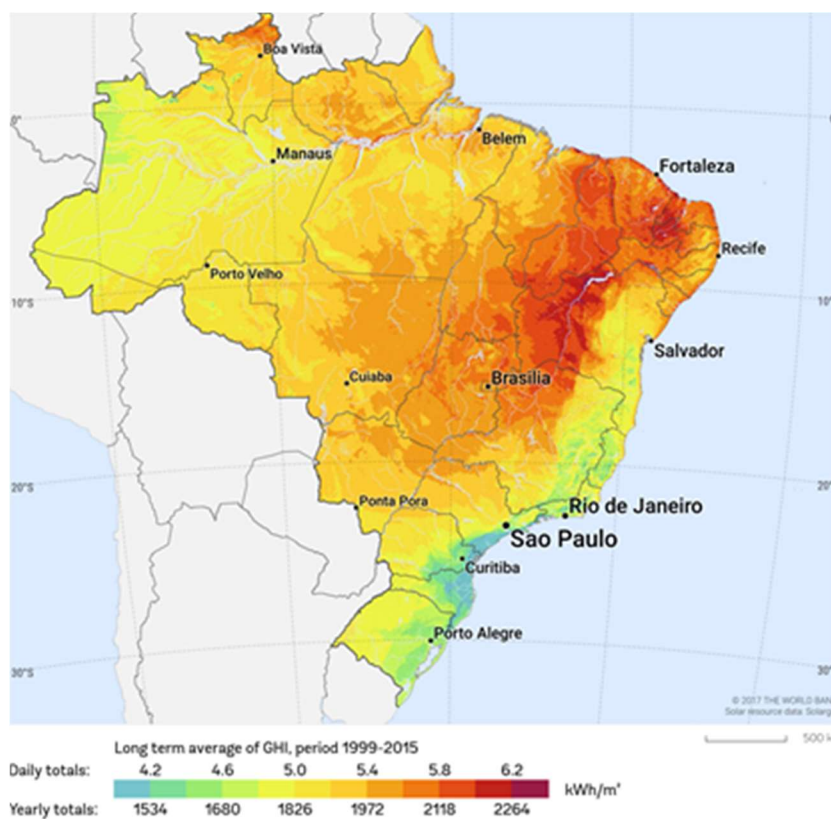
2.7 Energia solar fotovoltaica

O sol encontra-se hoje numa posição promissora como fonte energética de um futuro energeticamente sustentável. É considerado não apenas uma fonte inesgotável de energia, mas também como a precursora da existência de todos os outros tipos de energia existentes, conforme é explicado pelo CRESESB (2014):

É a partir da energia do Sol que se dá a evaporação, origem do ciclo das águas, que possibilita o represamento e a conseqüente geração de eletricidade (hidroeletricidade). A radiação solar também induz a circulação atmosférica em larga escala, causando os ventos. Petróleo, carvão e gás natural foram gerados a partir de resíduos de plantas e animais que, originalmente, obtiveram a energia necessária ao seu desenvolvimento, da radiação solar. As reações químicas às quais a matéria orgânica foi submetida, a altas temperaturas e pressões, por longos períodos de tempo, também utilizaram o Sol como fonte de energia. É também por causa da energia do Sol que a matéria orgânica, como a cana-de-açúcar, é capaz de se desenvolver, fazer fotossíntese para, posteriormente, ser transformada em combustível nas usinas.

Devido às dimensões continentais do Brasil, cada região apresenta um valor diferente de média anual de irradiação solar incidente, porém devido à nossa colocação geográfica, são valores considerados altos, com médias que variam entre 4,2 e 6,7 kWh/m², com os maiores valores sendo atingidos na região semiárida do nordeste brasileiro (PEREIRA et al, 2006), como mostrado na figura 11 abaixo.

Figura 11 - Mapa de irradiação solar do Brasil



Fonte: GLOBAL SOLAR ATLAS, 2020

A Seguir, são melhores explicados as utilizações mais comuns para a engenharia da energia solar: a energia solar térmica e a energia solar fotovoltaica.

- **Energia solar térmica:**

A energia heliotérmica tem a função de aproveitar os raios solares para o aquecimento de um fluido ou gás. Este fluido aquecido pode ter as mais diversas aplicações, desde a geração de vapor para movimentar turbinas e gerar energia elétrica, até o simples aquecimento da água de uma casa. Os responsáveis pela captação dos raios e aquecimento dos fluidos são os coletores solares, que dependendo de seus princípios de funcionamento e geometrias conseguem realizar um maior ou menor aquecimento do fluido.

Existem dois tipos de coletores solares, os não-concentradores e os concentradores. O primeiro realiza o aquecimento do fluido na mesma superfície na qual os raios solares incidem, fato que não permite que ocorra um grande aquecimento do fluido. Já o segundo tipo, utiliza

placas que concentram os raios em uma única superfície, o que acarreta numa grande concentração de raios solares em uma região pequena, o que pode aquecer o fluido até temperaturas bastante elevadas.

Os principais tipos de coletores solares são apresentados na tabela 2 a seguir, juntamente com a temperatura que eles conseguem elevar o fluido e a taxa de concentração.

Tabela 2 - Tipos de coletores solares

Motion	Collector type	Absorber type	Concentration ratio	Indicative temperature range (°C)
Stationary	Flat plate collector (FPC)	Flat	1	30-80
	Evacuated tube collector (ETC)	Flat	1	50-200
	Compound parabolic collector (CPC)	Tubular	1-5	60-240
Single-axis tracking	Linear Fresnel reflector (LFR)	Tubular	10-40	60-250
	Parabolic trough collector (PTC)	Tubular	15-45	60-300
	Cylindrical through collector (CTC)	Tubular	10-50	60-300
Two-axes tracking	Parabolic dish reflector (PDR)	Point	100-1000	100-500
	Heliostat field collector (HFC)	Point	100-1500	150-2000

Fonte: NISHITH *et al*, 2014

Além da divisão quanto onde é realizada o aquecimento do fluido, existe a divisão quanto a mobilidade do equipamento. Eles podem ser estacionários, ter movimentação em um eixo ou em dois eixos. Como o próprio nome já diz, o primeiro não se move e possui menor aproveitamento da luz solar. O segundo e terceiro se movimentam conforme o sol se move durante o dia, porém um realiza movimentos norte-sul ou leste-oeste enquanto o outro consegue ter mais liberdade de movimentação, podendo se mover em dois eixos, aproveitando melhor os feixes solares. A seguir será apresentado com mais detalhes o funcionamento dos coletores concentradores e seu princípio de funcionamento.

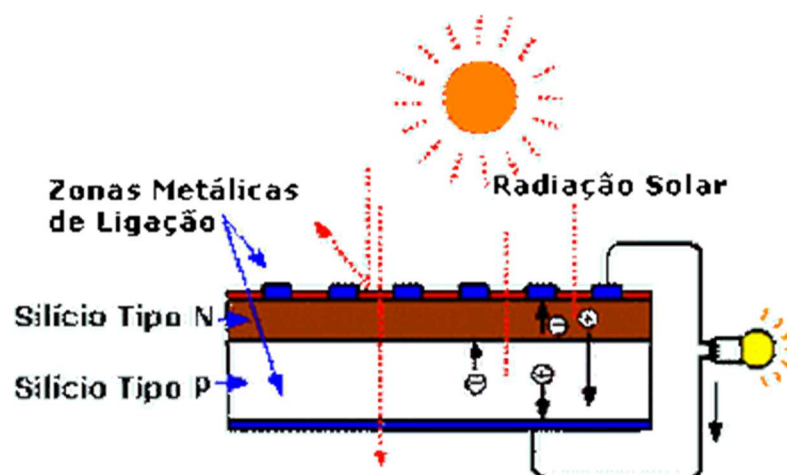
Coletores concentradores conseguem elevar a temperaturas mais elevadas o fluido a ser aquecido, isso porque através da reflexão ou refração da radiação solar. (KALOGIROU, 2014). Por conseguir chegar a diversas temperaturas, podem ser amplamente utilizados em diversas aplicações, inclusive na que foi estudada neste artigo. Outra vantagem é o custo por área menor que os coletores não concentradores.

- **Energia solar fotovoltaica:**

Responsáveis pela conversão da radiação solar direta em eletricidade, as células fotovoltaicas comerciais foram criadas em 1954 nos laboratórios da Bell Telephone. Eles funcionam absorvendo a luz por um material semicondutor que perde elétrons em contato com

a luz solar, que conseqüentemente produz corrente elétrica, processo representado pela figura 13. O somatório de inúmeras células juntas é considerado um painel fotovoltaico, que contém também uma placa metálica para captar as correntes produzidas e enviá-las aos inversores, equipamento encarregado de transformar a corrente contínua gerada em corrente alternada, que será utilizada na distribuição de energia para sistemas de distribuição em rede.

Figura 12 - Efeito fotovoltaico



Fonte: ECB, 2020

A energia gerada pelos painéis pode ser utilizada em duas maneiras distintas, um fora da rede, isolado da rede de distribuição elétrica, que necessita de baterias para acumular energia. E um sistema on-grid, que é integrado à rede de distribuição de energia da região. Um sistema conectado pode ser dividido em três categorias, de acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) (2015), que são:

- Microgeração: Potência instalada inferior a 75kW
- Minigerção: Potência instalada entre 75kW e 5MW
- Usinas de energia: Potência instalada maior que 5 MW

Existem diferentes gerações de painéis (PINK & BUUSE, 2012), cada uma delas aplicando diferentes tecnologias, são as seguintes:

- Primeira geração: tecnologia de silício cristalino (c-Si) à base de wafers (pequenas porções de material semiconductor). Tipo de painel que se aplica comercialmente.

- Segunda geração: Baseado em tecnologias PV de filme fino. Eles estão sendo testados no mercado
- Terceira geração: Utilização de células fotovoltaicas concentradoras (CPV) e células fotovoltaicas orgânicas. Eles ainda estão em testes de laboratório

A tendência para o futuro é de um maior aproveitamento das gerações mais novas, devido ao maior potencial de atingir maior eficiência do que os painéis de primeira geração, que apresentam eficiência de 17%, com picos de 20% para alguns painéis específicos. Na realidade, esse número é um pouco menor devido a alguns fatores como sujeira, variação da radiação solar, perdas de cabos elétricos e temperaturas mais altas do que o esperado. A eficiência é dada pela energia gerada por um metro quadrado do painel (W/m^2), uma eficiência de 100% corresponde a 1000 W/m^2 .

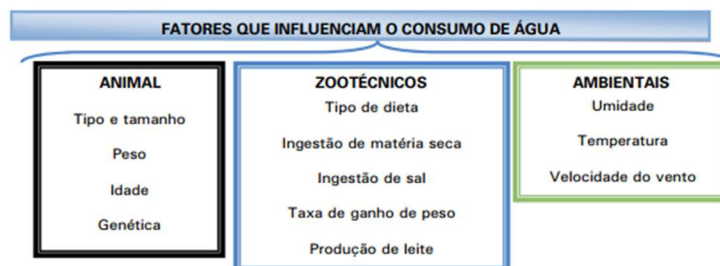
Seguindo o aumento da eficiência há também a redução do preço da geração de energia solar, por exemplo, a Alemanha diminuiu os preços das instalações residenciais em 75% em 11 anos (WIRTH, 2015), e estima-se que dobrando a produção acumulada, a queda de preços chegue em torno de 24 % (PESALA, 2012). Como consequência desses fatores, combinados com um apelo mundial de uso de mais energia limpa, a produção de energia fotovoltaica deverá ser de 1539 Twh em 2040, um aumento de 810% em comparação com a produção de 2014, de acordo com o World Energy Outlook (WEO, 2016). Esse incremento foi dado para um cenário pessimista, esse número pode ser ainda maior com mais incentivos.

2.8 Dessedentação animal

Água constitui em torno de 60 a 70% do corpo de um animal, sendo responsável por diversas funções, tais como: manutenção de fluidos e balanço iônico; digestão, absorção e metabolização de nutrientes; excreção de matéria e calor do corpo; criação de ambiente para gestação de fetos; e transporte de nutrientes para o corpo. Sendo necessário que a dessedentação seja capaz de suprir a necessidade de consumo de água desses animais (EMBRAPA, 2013).

O consumo de água de um animal é a soma de um conjunto de fatores que influenciam diretamente em suas necessidades. O gasto total de água dos animais é a soma da quantidade expelida na urina, fezes e leite; suor; e pela evaporação no sistema respiratório e na superfície do animal. A figura 14 mostra os principais fatores envolvidos:

Figura 13 - Fatores determinantes para o consumo de água animal



Fonte: EMBRAPA, 2013

Porém, a quantidade de água que é dada para o animal não é o único fator a ser considerado. É preciso que a qualidade da água seja boa o suficiente para que a saúde dos animais seja mantida. Os principais fatores e os limites máximos para que a água seja utilizada para a dessedentação encontram-se na tabela 3:

Tabela 3 - Valores máximos permitidos para a dessedentação animal

Parâmetro	VPM*
Sólidos totais dissolvidos	1.000,0 ppm
Nitratos	44,0 ppm
Nitritos	10,0 ppm
Sulfatos	500,0 ppm
pH	Entre 6,0 e 8,0
Coliformes fecais	10 a cada 100 ml
Alumínio	0,5 ppm
Arsênio	0,05 ppm
Bário	10,0 ppm
Boro	5,0 ppm
Cádmio	0,05 ppm
Cromo	0,1 ppm
Cobalto	1,0 ppm
Cobre	1,0 ppm
Flúor	2,0 ppm

Ferro	2,0 ppm
Chumbo	0,015 ppm
Manganês	0,05 ppm
Mercúrio	0,01 ppm
Níquel	0,25 ppm
Selênio	0,05 ppm
Vanádio	0,1 ppm
Zinco	5,0 ppm

Fonte: LOOPER, 2002

A escolha da fonte da água é um fator que dependerá da localização da fazenda que tem o rebanho, quantidade e qualidade da água disponível, risco ambiental e custo de uso (captação e distribuição) (EMBRAPA, 2013). As principais fontes são:

- Rios, riachos e córregos;
- Lagos e lagoas;
- Nascentes;
- Poços;
- Captação de água da chuva;
- Água ofertada por companhias de saneamento ou poços comunitários;

Cada uma delas possui suas vantagens e desvantagens, e a possibilidade da dessedentação ser feita com água produzida tratada abre outra opção de fonte de água, que por exemplo pode ser utilizada em regiões longe de fontes naturais de água e onde as companhias de saneamento não alcançam.

3 MATERIAS E MÉTODOS

Para que seja elaborado o projeto de um sistema de tratamento de água produzida onde a água tratada sirva para a dessedentação animal no interior do Rio Grande do Norte, utilizou-se como base a caracterização da indústria (empresa) geradora, assim como a caracterização e volume da água produzida. Com tais informações, avaliou-se as tecnologias disponíveis mais indicadas para a adequação da água. Assim, foram analisados diversos processos de tratamento disponíveis na indústria, até que se escolheu o que melhor se adequou para a especificação da água com a finalidade de dessedentação animal.

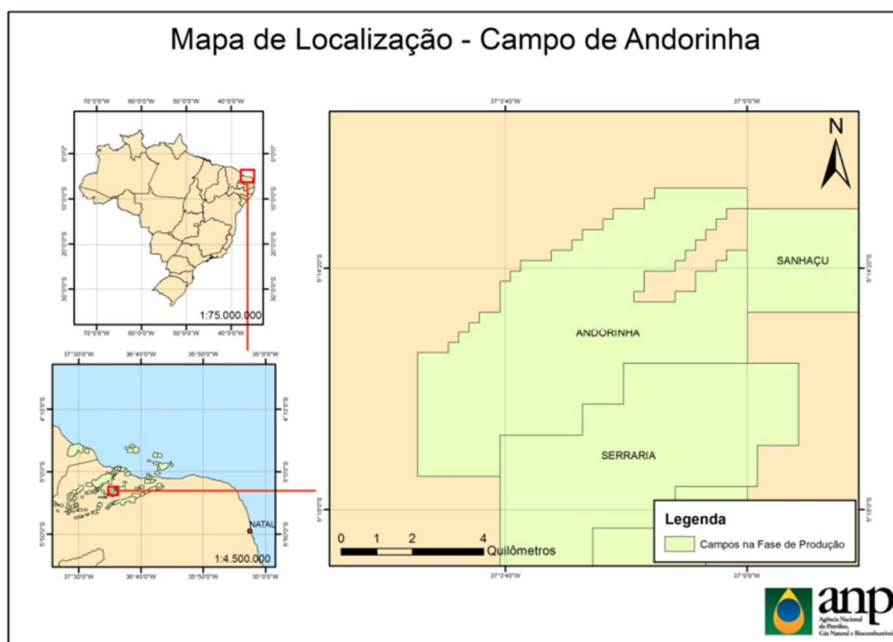
A fim de tornar o projeto mais sustentável e economicamente viável, foi feito um dimensionamento de uma unidade de geração de energia solar fotovoltaica que conseguisse suprir o consumo energético do sistema de tratamento proposto. Foi feita uma análise de um sistema integrado a rede e outra com o uso de baterias.

3.1 Caracterização do campo

3.1.1 Localização e instalações:

O campo de Andorinha possui uma área de desenvolvimento de 39,99 km², situando-se na parte emersa da bacia Potiguar, localizado a cerca de 30,4 km a leste da cidade de Mossoró e ao norte do município de Assú, no estado do Rio Grande do Norte. A figura 15 mostra a localização do campo.

Figura 14 - Localização do campo de Andorinha



Fonte: ANP, 2016

O campo possui 9 poços perfurados, onde 3 deles encontram-se atualmente produzindo e 01 serve para a realização de descarte da água produzida. Os demais poços encontram-se abandonados ou arrasados.

O campo possui duas estações de produção, instaladas nos poços 1-GALP-0001-RN e 6-GALP-0038-RN, que contam com tanques de armazenamento e de teste, além de possuírem *manifold* para receber a produção dos poços adjacentes. Nas estações é realizada a separação primária dos efluentes, fazendo a separação da água livre e permitindo um tempo de residência para a quebra máxima das emulsões óleo-água. O óleo produzido é transferido para a empresa compradora do óleo. Enquanto a água livre é descartada através da injeção no reservatório.

Os principais reservatórios do campo são arenitos flúvio-deltáicos da formação Alagamar, com porosidade que varia entre 12,7% e 24,9% e permeabilidades de 2,81 mD a 1810 mD, saturados com óleos leves com API entre 35° e 37°. Os principais mecanismos de produção são o influxo de água, a expansão de rocha e fluido e posteriormente através do gás em solução. Atualmente, também não é realizada a injeção de fluidos com propósito de recuperação secundária (ANP, 2016).

3.1.2 Volumes produzidos

A seguir, a tabela 4 mostra os dados de produção total do campo em maio de 2020, com dados de produção de óleo, gás e água. Além do volume de água produzida descartada.

Tabela 4 - Dados de produção do campo de Andorinha em maio de 2020

Volume produzido de óleo	80,6 m ³
Volume produzido de gás natural	1,612 Mm ³
Volume produzido de água	1.218,4 m ³
Volume descartado de água	1.218,4 m ³

Fonte: ANP (2020)

Como explicitado na tabela, atualmente todo o volume de água produzido está sendo descartado, sem ter uma utilização nem propósito. Sendo atualmente apenas um custo para a empresa produtora, quando poderia possivelmente sendo utilizada para outros fins, que serão analisados adiante.

3.2 Consumo animal de água

O consumo diário de água de um animal depende de vários fatores, como: temperatura do ambiente, umidade, peso e tamanho do animal, idade e tipo de dieta são alguns exemplos. A tabela 5 mostra o consumo máximo que bovinos, aves e suínos podem vir a ter:

Tabela 5 - Consumo diário de água de diversos rebanhos

Animal	Consumo
Bovino de corte (Até 455 kg)	78,0 L/dia
Bovino de leite	64,0 L/dia
Aves	0,27 L/dia
Suínos	30,0 L/dia

Fonte: EMBRAPA, 2013

Para este trabalho, serão considerados os rebanhos do município de Serra do Mel, onde está localizado o campo de Andorinha. Foi escolhido o município mais próximo também para facilitação da logística, onde o custo para transporte até as fazendas seria menor, podendo ser

levado em consideração também a construção de adutoras para levar a água tratada para os pecuaristas. A tabela 6 contém o tamanho dos rebanhos no município.

Tabela 6 - Tamanho dos rebanhos no município de Serra do Mel

Animal	Tamanho rebanho	Consumo diário
Bovino de corte	1.075 cabeças	83.850,0 L
Aves	2.000 cabeças	540,0 L
Suínos	144 cabeças	4.320,0 L
	Consumo diário total:	88.710 L

Fonte: Censo agropecuário IBGE, 2017

O consumo real deve ser consideravelmente menor, pois nem todos os animais terão o consumo máximo que foi utilizado no cálculo. Foi utilizado o maior valor para garantir que não falte o fornecimento.

3.3 Caracterização da água produzida

A tabela 7 mostra a caracterização da água do campo de Fazenda Pocinhos na bacia potiguar, com dados encontrados nos trabalhos de Fernandes Júnior (2006), Lima (1996) e Carvalho (2011), além de dados da ANP (2016). Os dados visam a definição do tratamento mais adequado para que a água seja utilizada na dessedentação animal. Está sendo considerada essa água devido ao não fornecimento de dados reais pela indústria e por ser da mesma formação geológica do campo de Andorinha (formação Alagamar), o que indica características similares.

Tabela 7 - Parâmetros físico-químicos da água produzida

Parâmetros	Resultados
Cloretos	296,2 mg/L
Salinidade (NaCl)	488,10 mg/L
pH	7,95
Sólidos totais dissolvidos	1.460,0
Dureza total (CaCO ₃)	375,21

Sulfato	2,61 mg/L
Óleos e graxas	2.000,0 mg/L
Ferro	0,4 mg/L
H ₂ S	21,94 mg/L

Fonte: Fernandes Júnior (2006), Lima (1996), Carvalho (2011) e ANP (2016)

3.4 Comparação água produzida x água para dessedentação

A água que é objeto de análise, a produzida pela Fazenda Pocinho não está adequada para a utilização na dessedentação animal, quando comparada com os valores máximos permitidos apresentados pela Resolução CONAMA 357/2005 e pelos parâmetros indicados pela indústria agropecuária. A definição dos parâmetros em desacordo com os valores ideais é fundamental para a determinação do tratamento a ser realizado. A tabela 8 apresenta um comparativo entre a água do campo, os parâmetros exigidos pela CONAMA e pela indústria agropecuária.

Tabela 8 - Comparação entre a água produzida e os valores máximo permitidos por lei

Parâmetros	Resultados	VMP*
Cloretos	296,2 mg/L	250,0 mg/L
Salinidade (NaCl)	488,10 mg/L	0,5%
pH	7,95	6,0 – 9,0
Sólidos totais dissolvidos	1.460,0 mg/L	500,0 mg/L
Dureza total (CaCO ₃)	375,21	-
Sulfato	2,61 mg/L	250,0 mg/L
Óleos e graxas	2.000,0 mg/L	Ausentes
Ferro	0,4 mg/L	5,0 mg/L
H ₂ S	21,94 mg/L	0,002 mg/L

Fonte: Resolução CONAMA 257/2005 e LOOPER, 2012

O tratamento visará a correção dos valores maiores aos permitidos, seja por lei ou pelas práticas na indústria. Foi considerado os menores VMP, com o intuito de garantir a melhor qualidade de água que será dada aos animais.

Os únicos parâmetros que não serão necessários fazer correção são o pH e a dureza da água, que segundo LOOPER (2012) não afeta a saúde do animal, independentemente do seu valor.

3.5 Caracterização do sistema de painéis fotovoltaicos

O sistema composto por painéis fotovoltaicos será gerado através do *System Advisor Model* (SAM), um software gratuito que não apenas dimensiona, mas também faz uma análise econômica de projetos na área de energias renováveis. Ele funciona a partir do fornecimento de dados técnicos e de dados de custo de energia no local onde os painéis serão instalados. A seguir temos os parâmetros utilizados na geração do sistema de painéis.

- **Painel fotovoltaico:**

O painel foi escolhido a partir de parâmetros técnicos e disponibilidade no mercado local. A escolha é feita a partir de uma base de dados existente dentro do software que disponibiliza todos os dados técnicos, além do preço.

O painel selecionado foi o Canadian Solar Inc. CS3U-405MS, que possui eficiência máxima de até 21%.

- **Inversor:**

O inversor possui o papel de transformar a corrente contínua em corrente alternada, para que possa ser incorporada à rede de distribuição de energia local. Foi escolhido o inversor Ingecon Sun 6 TL U M 240 Vac (240V) devido à sua disponibilidade no mercado e por sua tensão de saída.

O SAM também apresenta uma base de dados para os inversores, com dados técnicos e valores.

- **Irradiação solar:**

Os dados de irradiação solar presente no local são os da localização do campo. O SAM possui uma ferramenta onde estes dados podem ser adquiridos a partir das coordenadas do local onde será feita a instalação dos painéis. Sendo assim, temos os valores reais de irradiação solar para o campo de Andorinha.

▪ **Tarifa de energia:**

A tarifa de energia foi escolhida tendo como base o tipo de cliente que estará fazendo a instalação dos painéis, com tarifas fornecidas pela concessionária de energia do local (COSERN). Neste caso, para um cliente tipo A e tarifação horo sazonal verde, que é aplicada para clientes que possuem alto consumo energético, temos os seguintes valores:

- ❖ Tarifa para consumo fora do horário de pico = 0,27 R\$/kWh
- ❖ Tarifa para consumo no horário de pico = 1,79 R\$/kWh

O horário de pico considerado é entre as 18:00h e 21:00h. No software é possível definir a tarifa individualmente para cada hora do dia.

▪ **Consumo de energia do sistema:**

O consumo de energia serve para dimensionar a quantidade de painéis e quanto seria a economia na conta de luz mensalmente. Foi utilizado o consumo energético para o tratamento de osmose reversa, por ser o processo que mais consome energia na planta de tratamento proposta.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Considerações para a escolha do tratamento

A definição do sistema de tratamento final é produto da qualidade da água produzida e da destinação pretendida. Isso não exclui outros pontos que devem ser levados em consideração antes da construção da planta de tratamento. Entre os principais fatores, deve-se considerar os seguintes:

- Área para instalação;
- Acesso e consumo de energia;
- Vazão da água
- Volume necessário no destino
- Capacidade de processamento da planta
- Sistema de tubulação disponível para o transporte da água.

Apenas levando em consideração todos os fatores mencionados anteriormente é que será possível ter uma planta de tratamento que não vá ter falhas durante a sua operação, evitando prejuízos e gastos desnecessários.

Cada um dos parâmetros acima do permitido pela legislação demanda um tipo de tratamento específico, que deve ser levado em consideração para as definições para os métodos de tratamento. A seguir, os tratamentos mais adequados para cada item da Tabela 8:

- Metais (Ferro):

A remoção de metais pode ser feita através de dois processos, pela oxidação e posterior precipitação, ou pelo processo de absorção. A oxidação consiste na injeção de produtos oxidantes, que em contato com os compostos metálicos o transformam em metais insolúveis na água.

Um oxidante que pode ser utilizado é o dióxido de cloro, que além de ajudar na oxidação e precipitação dos metais é um floculante, que ajuda na remoção de odor e sabor indesejáveis.

Caso nesse processo não seja feita a remoção total, os metais dissolvidos podem ser retirados nas etapas de PSM, seja a nanofiltração ou a osmose reversa.

- Sólidos:

O processo de remoção de sólidos está presente desde a etapa inicial do tratamento, quando há a separação dos sólidos maiores e mais pesados no tanque de separação gravitacional. Os sólidos menores são retirados após o processo de coagulação/floculação e posterior flotação.

Os processos subsequentes envolvem a retenção devido a algum meio que retenha os sólidos, e a eficiência estará diretamente ligada ao tamanho dos poros envolvidos nesses processos. A primeira filtração é feita pelos filtros, que dependendo do material do meio filtrante obterá eficiências diferentes. Filtros de argila por exemplo possuem tamanho de poros menores, retendo uma maior quantidade de sólidos.

Por fim, o restante dos sólidos é retido nos processos de micro e ultrafiltração, que removem particulados com tamanhos de 0.01 a 0.1 μm

- Salinidade:

O principal método para a remoção da quantidade de sais dissolvidos na AP é a osmose reversa, que pode retirar até 99,4% da quantidade de sais (RPSEA, 2009). A eficiência do processo vai depender de um pré-tratamento bem realizado, visto a fragilidade das membranas e seu alto custo de aquisição, operação e manutenção.

- Cloretos e sulfatos:

A remoção desses componentes está diretamente ligada à diminuição da salinidade da água, tendo como principal método de remoção a aplicação da osmose reversa, que retira também do efluente íons monovalentes, bivalentes e polivalentes.

- H_2S :

A remoção do H₂S da corrente de água é feita inicialmente pelo processo de flotação, que consegue retirar em até 90% do contaminante (BURKE, 2000), quando é feito o processo de coagulação/floculação em conjunto. O que remanesce na corrente de água, pode ser posteriormente retirado nos processos de nanofiltração ou osmose reversa, que tem uma eficiência de remoção acima dos 99%.

- Teor de óleos e graxas (TOG):

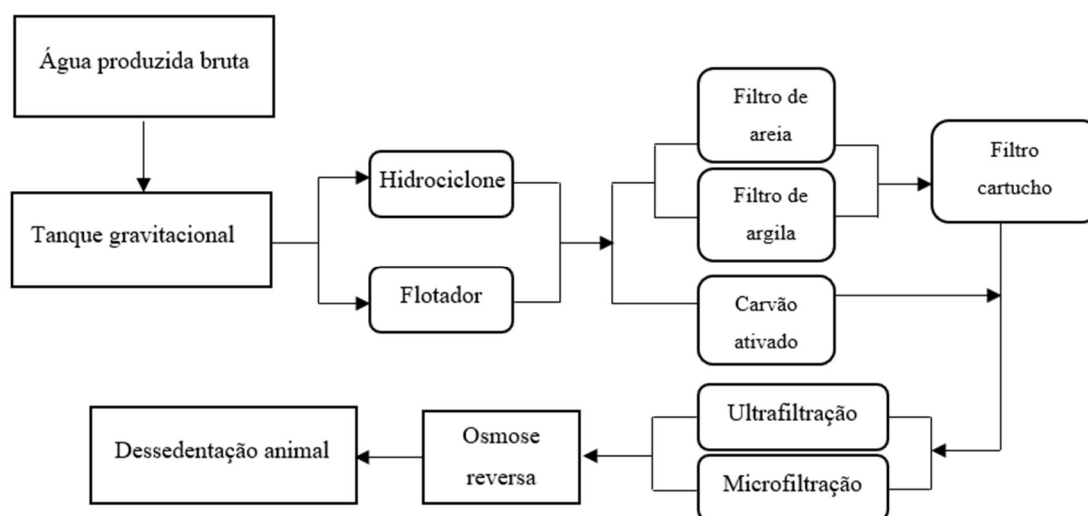
A diminuição do teor de óleos e graxas começa pelos tanques gravitacionais, onde parte do contaminante é retirado após ocorrer a separação devido às diferentes densidades da água e do óleo. Restando apenas partículas menores de óleo, que serão retiradas posteriormente.

Os processos de coagulação/floculação em conjunto com a flotação são uma etapa essencial para a remoção do óleo residual. Podendo alcançar a remoção em até 93% (BURKE, 2000) do óleo presente no efluente, o que representa partículas com tamanhos entre 3 to 5 µm (NETL, 2014).

O óleo remanescente é retirado pelo processo de filtração, que consegue retirar em até 90% dos valores de óleos e graxas (RPSEA, 2009).

A figura 16 apresenta as opções de tratamento que poderiam ser seguidos:

Figura 15 - Fluxograma com tratamentos alternativos



Fonte: Elaboração do autor

Após a passagem do efluente pelo tanque gravitacional água-óleo o teor de óleo livre pode chegar a valores de até 200 ml/L, além de remover boa alguns sólidos em suspensão. Na sequência há a necessidade de remoção das partículas de óleo dispersas e de sólidos dissolvidos, o que é atingido com a aplicação de hidrociclones ou flotadores a ar dissolvido, o último em conjunto da adição de coagulantes e floculantes.

A remoção do óleo remanescente, que se encontra dissolvido, e de finas partículas sólidas dissolvidas como metais precipitados, são removidos na etapa de filtração. O processo de filtração é realizado em duas etapas, na primeira a água passa por um filtro ou de areia ou de argila e a segunda é a passagem por um filtro do tipo cartucho, que possui tamanho de poros menor, impedindo a passagem de sólidos e óleo com diâmetros menores ainda. Em alternativa aos filtros de areia ou argila, pode ser utilizado o filtro de carvão ativado, que não requer a passagem por um segundo tipo de filtro e possui bons valores de absorção de compostos orgânicos, além da remoção de particulados sólidos e óleos e graxas.

Após a filtração, a água estará praticamente sem sólidos e óleos, restando majoritariamente íons, óxidos metálicos, ácidos orgânicos e sais. Todos esses componentes poderiam ser retirados pelo processo da osmose reversa, porém demandaria bastante de sua membrana e terminaria num processo sem tanta eficiência e com as membranas danificadas em um curto período. Para evitar esses danos, os processos de micro ou ultrafiltração são utilizados como um pré-tratamento, visto que eles têm capacidade de remover parcialmente alguns dos

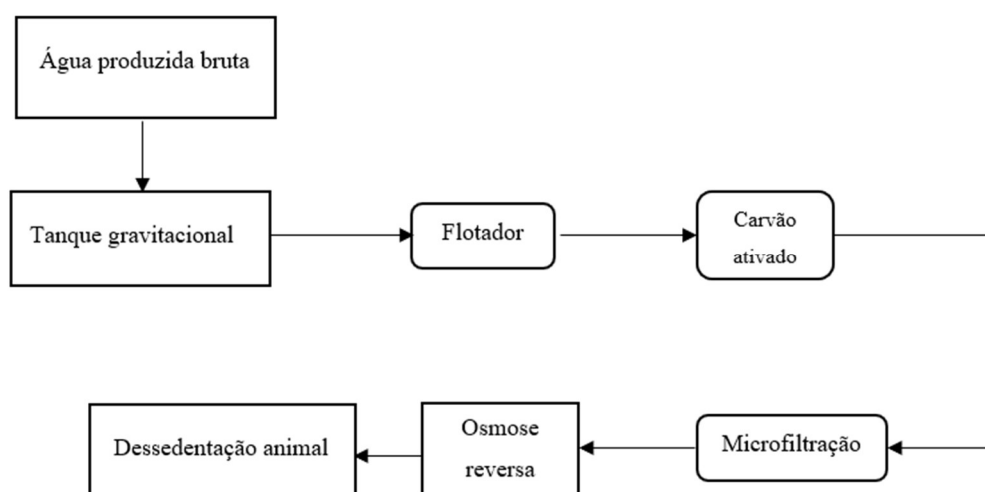
componentes supracitados. A determinação do método a ser utilizado dependerá da qualidade da água que chega em suas telas.

Por fim, o processo da osmose reversa, que é utilizado para remoção de salinidade, radionuclídeos, compostos orgânicos e inorgânicos, dureza, metais e minerais. Após o fim do processo, a água estará pronta para ser utilizada.

4.2 Planta de tratamento final

Após avaliação das opções de tratamento, os procedimentos mais adequados foram mantidos, removendo os tratamentos menos viáveis. O resultado da seleção realizada se encontra na figura 17:

Figura 16 - Fluxograma com planta de tratamento final



Fonte: Elaboração do autor

O tratamento deve se iniciar com a passagem da água produzida por um tanque gravitacional, visando a retirada de óleo livre e de sólidos dispersos, que chegam a valores de até 200 mg/L e 800 mg/L, respectivamente. Posteriormente, a água deve passar por processos que removam partículas que o tratamento pelo separador não é capaz de retirar, seja por um flotador ou por hidrociclones.

Para esta aplicação, foi preferível a utilização do sistema de flotadores a ar dissolvido, devido à sua ampla utilização, baixo custo e alta eficiência. É importante ressaltar que a eficiência só será máxima caso ocorra a injeção de coagulantes e floculantes na corrente da

água, o que aumentará o tamanho dos particulados do óleo. A eficiência de remoção de óleos pode chegar a 93%, o que deixaria o a água em sua saída com TOG de até 14 mg/L, além de remover em até 90% o H₂S atingindo um valor no produto de 2,19 ml/L. Adicionalmente, é interessante que o floculador seja o dióxido de cloro que ajudaria na oxidação e precipitação de metais, facilitando assim a sua retirada. Os hidrociclones, apesar de seu tamanho reduzido não foram escolhidos por não terem boa capacidade de remoção de óleos dissolvidos e graxas (HAYES, 2004).

Para o processo de filtração foi escolhido o filtro de carvão ativado, que possui além de pequenos poros que retém óleos e graxas e sólidos dissolvidos, a capacidade de adsorção de gases e solutos. O carvão ativado pode ser reutilizado diversas vezes após passar por processos de desentupimento e mantendo sua alta eficiência e baixo custo de operação. Os outros filtros poderiam ser utilizados, porém devido a necessidade da utilização de dois processos distintos (filtro de areia/argila + filtro cartucho) se torna um processo que demanda mais atenção e cuidados do que quando comparado com um processo de uma etapa só (filtro de carvão ativado).

Na sequência, se faz necessária a passagem da corrente de água por um processo de filtração, que tem como objetivo tratar a água para evitar danos nas membranas da osmose reversa. Por ser uma etapa de pré-tratamento, a utilização do processo de microfiltração já se mostra suficiente para a remoção de substâncias danosas às membranas.

Por fim, o processo da osmose reversa se faz necessário para a remoção da salinidade, dureza, compostos orgânicos e inorgânicos, íons, metais e minerais que não foram retidos nas etapas anteriores do tratamento. Após a passagem pelas membranas, a água tratada se encontra adequada para a realizar a dessedentação de animais, com todos os parâmetros com valores menores aos exigidos pela lei.

4.3 Destino da água tratada

Após finalizado o tratamento, a água será enviada para as propriedades que possuam animais para sua dessedentação, muito provavelmente através de caminhões para fazer o transporte.

A equação a seguir mostra qual será o volume final de água após o tratamento realizado, que terá volume reduzido devido à não recuperação de toda a água nos processos de tratamento. Os dados de eficiência foram retirados de RPSEA (2009).

1. Cálculo do volume final de água:

$$\text{Volume final de água (m}^3\text{)} = \text{Volume inicial (m}^3\text{)} \times E_{f_{SAO}} \times E_{f_{Flotador}} \times E_{f_{Filtro}} \times E_{f_{MF}} \times E_{f_{OR}}$$

$$\text{Volume final de água (m}^3\text{)} = 1.218,4 \text{ m}^3 \times 1 \times 1 \times 1 \times 0,9 \times 0,6$$

$$\text{Volume final de água (m}^3\text{)} = 657,3 \text{ m}^3 \text{ por mês ou } 21,93 \text{ m}^3 \text{ por dia}$$

Já a equação abaixo calcula quantos animais podem ser beneficiados pelo tratamento da água. Será considerado bovinos por possuírem função de produção de leite e servem como animais de corte, contribuindo de maneiras diversas para a vida local.

2. Cálculo de cabeças de gado beneficiadas pelo tratamento de água:

$$\text{Cabeças de gado} = \frac{\text{Volume de água tratado diário } \left(\frac{L}{\text{dia}}\right)}{\text{Consumo diário de água por bovinos } \left(\frac{L}{\text{dia}}\right)}$$

$$\text{Cabeças de gado} = \frac{21.930,0 \frac{L}{\text{dia}}}{78,0 \frac{L}{\text{dia}}}$$

$$\text{Cabeças de gado} = 281$$

O tratamento de uma água que atualmente encontra-se utilizada apenas para o descarte poderia fazer a dessedentação de pelo menos 281 bovinos, número que com certeza é maior, visto que foi considerado o maior consumo previsto para esse tipo de animal. O tratamento da água de um campo pequeno, com apenas 4 poços produtores é capaz de fornecer água para 26% do rebanho bovino do município de Serra do Mel, caso o tratamento seja expandido para campos maiores, grande parte dos rebanhos do interior do estado poderiam utilizar águas tratadas da produção de petróleo.

O maior empecilho para a aplicação do tratamento proposto é o alto custo, principalmente das tecnologias de PSM, que além de utilizarem equipamentos caros, demandam um alto consumo de energia. No tópico a seguir, será feito o cálculo de quanta

energia é gasta no processo de OR e feito um dimensionamento de painéis solares on-grid para avaliar a redução de custos com o passar do tempo.

4.4 Consumo e custo energético da osmose reversa:

A osmose reversa possui um alto custo de implementação e de manutenção, muito devido ao alto consumo energético necessário para bombear o fluido entre as membranas a pressões altas. O consumo energético foi retirado do trabalho realizado por XU *et al* (2009), que estima um gasto de 0,67 kWh/bbl ou 5,62 kWh/m³. A equação a seguir mostra o consumo total no mês:

1. Consumo total mensal:

$$\text{Consumo energético (kWh)} = \text{Consumo OR (kWh/m}^3\text{)} \times \text{Vazão mensal (m}^3\text{)}$$

$$\text{Consumo energético (kWh)} = 5,62 \text{ kWh/m}^3 \times 657,3 \text{ m}^3$$

$$\text{Consumo energético (kWh)} = 3694,55 \text{ kWh}$$

O custo total mensal da energia gasta pela osmose reversa é baseado com a tarifa da concessionária local, dado em R\$/kWh. O consumidor, neste caso uma empresa que estaria fazendo o tratamento de água é considerado um cliente do tipo A, operando num modelo tarifário Horo sazonal verde. Neste sistema, o custo da energia é diferente entre os horários de pico e os demais horários do dia, o horário de pico é entre 18:00 h as 21:00 h e o custo é de 1,78 R\$/kWh. Para o resto do dia, a tarifa é de 0,27 R\$/kWh.

4.5 Dimensionamento de sistema de painéis fotovoltaicos on-grid:

O dimensionamento do sistema on-grid foi realizado no software aberto *System Advisor Model (SAM)*, que utiliza os dados de consumo energético, dados do painel escolhido e os dados do inversor para determinar quantos painéis seriam necessários para suprir o consumo energético mensal do sistema proposto.

Além da quantidade dos painéis e da área necessária para sua instalação, o software retorna em quanto tempo o valor presente líquido se tornaria positivo. Na tabela 9 temos os resultados:

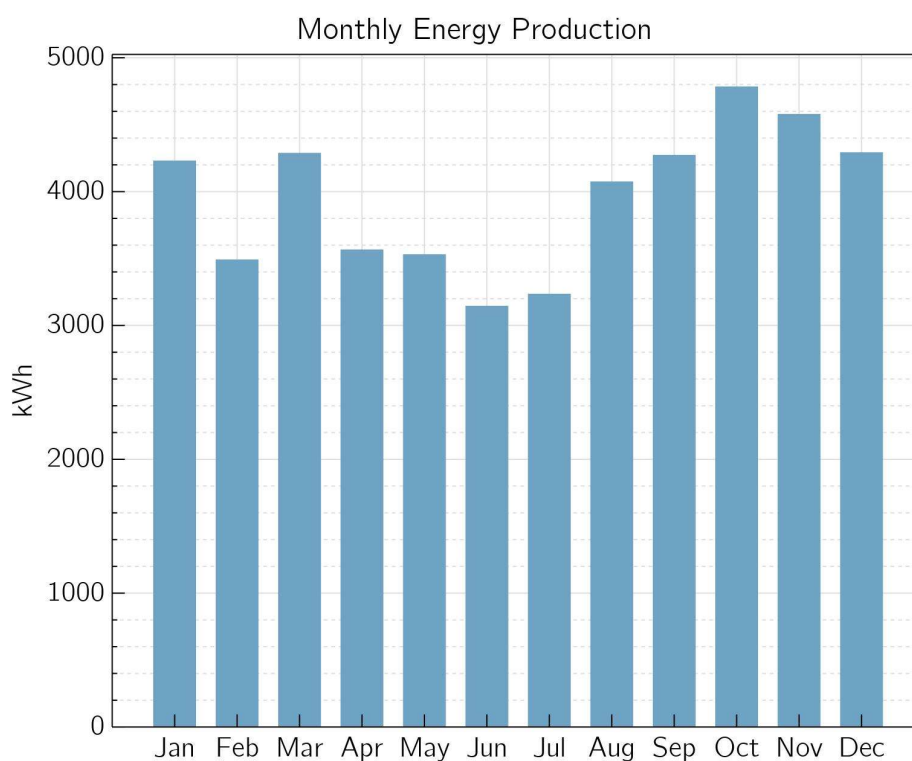
Tabela 9 - Dimensionamento sistema on-grid

Parâmetro	Resultado
Número de painéis	48
Número de inversores	4
Área requerida pelos painéis	138,2 m ²
Tempo de retorno do investimento	6,5 anos

Fonte: Autoria Própria

A produção de energia mensal com o sistema proposto, pode ser vista no gráfico de figura 18 a seguir:

Figura 17. Produção mensal de energia



Fonte: SAM, 2020

A geração total no ano é de 47.510,0 kWh, o suficiente para suprir energeticamente o consumo apresentado pelo processo de osmose reversa.

4.6 Benefícios para a empresa produtora

O sistema descrito neste trabalho poderia vir a trazer uma redução de custos e até possivelmente lucro à empresa. Atualmente o destino da água é o descarte através da injeção em reservatórios, o que não gera retorno nenhum para a companhia, apenas gastos.

O tratamento visando o tratamento da água e subsequente venda para pecuaristas locais pode mudar o status da água produzida de custo para ativo dentro da companhia. Resolvendo não apenas o problema do que fazer com esse efluente, mas também podendo ser fonte de receitas em períodos onde o preço do petróleo esteja baixo demais para que haja a produção no local.

Para os pecuaristas e população local, o desenvolvimento de um sistema de tratamento de água onde a água possa ser utilizada por animais pode ser motor de desenvolvimento local, por dar garantia de que independentemente de condições de escassez hídrica, haverá água para os rebanhos e manutenção da produção de leite e produção de carne.

5 CONCLUSÕES

Intrínseca à produção de óleo, a geração de água produzida é um problema para as empresas produtoras de petróleo devido ao seu baixo valor comercial e necessidade de tratamento, seja para adequação ao descarte ou para o reuso. A água analisada neste trabalho possui parâmetros com valores acima aos permitidos por lei para o uso na dessedentação animal, fazendo-se necessária a determinação de um sistema de tratamento que remova ou reduza esses valores para os limites previstos.

A determinação dos métodos foi baseada numa comparação entre os dados das análises físico-químicas da água produzida e os VMP pelas Resoluções CONAMA, que permitiu que o tratamento focasse nesses parâmetros.

Definidos os parâmetros passíveis de tratamento, o sistema escolhido inclui as seguintes tecnologias de tratamento: Separador gravitacional, coagulação/floculação e posterior passagem pelo flotador a ar dissolvido, filtração por carvão ativado, microfiltração e osmose reversa.

A planta de tratamento garante que a água estará adequada para a dessedentação de 281 cabeças de gado por mês, porém a viabilidade econômica não é garantida devido ao alto custo de implementação, operação e manutenção dos equipamentos, em especial as membranas da osmose reversa.

Parte desse custo é devido ao alto consumo energético necessário para o bombeamento da água a altas pressões. Para redução dos custos, foi proposto um sistema de painéis fotovoltaicos que suprisse energeticamente a operação da osmose reversa.

O sistema é capaz de em 6,5 anos retornar o investimento realizado na implementação dos painéis, através da alta redução na conta de energia. Esse período é bem inferior ao de vida útil de um painel, isso significa que o sistema de tratamento terá um baixo custo de energia por vários anos.

Além da redução de custo, haverá o lucro na venda da água tratada para os estabelecimentos agropecuários da região e redução dos custos de descarte. O sistema de tratamento e de painéis fotovoltaicos apresentados tem potencial de gerar benefícios econômicos, sociais e ambientais, através da redução de custos, garantia de água numa região

atingida por secas e um aproveitamento de água feito de maneira sustentável, com a utilização de energias renováveis.

6 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros recomenda-se que seja feito um estudo de viabilidade econômica mais abrangente, levando em consideração todos os custos de implementação, manutenção e operação presentes na planta proposta.

A realização de análises físico-químicas de água do campo de estudo traria mais segurança para a escolha dos métodos de tratamento realizados. Além disso, pode-se realizar um estudo com um sistema de geração de energia solar *off-grid*, que poderia viabilizar tecnicamente o tratamento em áreas remotas que não tem acesso a energia, reduzindo assim os custos de transporte da água.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKW, Hidrociclones. Disponível em: < [Hidrociclones AKA-VORTEX – AKW Equipamentos e Processos Ltda. \(akwauv.de\)](http://www.akw.com.br/Hidrociclones_AKA-VORTEX_-_AKW_Equipamentos_e_Processos_Ltda_(akwauv.de))>. Acesso 15 de Novembro de 2020

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução Resoluçãoativa no 687, de 24 de novembro de 2015

ANP. Andorinha, 2016. Disponível em: < [\(Microsoft Word - Sumario Executivo Externo Andorinha retifica\347\343o.docx\) \(anp.gov.br\)](http://www.anp.gov.br/sumario-executivo-externo-andorinha-retifica/347/343o.docx)> Acesso em: 28 de agosto de 2020.

ANP. Produção mensal de hidrocarbonetos Bacia Potiguar, 2020. Disponível em <<http://www.anp.gov.br/wwwanp/dadosestatisticos>> Acesso em: 20 de agosto de 2020.

BADER, M.S.H. (2007) Seawater versus produced water in oil-fields water injection operations. Desalination, v. 208, n. 1-2, p. 159-168

BARRADINHO, Daniel. Et al. **Avaliação da viabilidade da implantação do sistema de reuso de águas cinza e pluviais em residências**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Ano 03, Ed. 11, Vol. 04, pp. 05-25 Novembro de 2018. ISSN:2448-0959

BARROS JUNIOR, L. M. Biosorção de metais pesados presentes em águas de produção da indústria de petróleo. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) Programa de PósGraduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2001

BENSADOK, K; BELKACEM, M; NEZZAL, G. Treatment of Cutting Oil/Water Emulsion by Coupling Coagulation and Dissolved Air Flotation. Desalination, v. 206, p. 440–448, 2007

BORGES, B. B. G. Tratamento da água produzida do petróleo para injeção em mananciais. 2017. 78 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Petróleo, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Brasil, 2017

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), Resolução nº 001 de janeiro de 1986. Ministério do Meio Ambiente, Brasília, 1986

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

BROST, D.F., 2002, “Water Quality Monitoring at the Kern River Field”, presented at the 2002 Groundwater Protection Council Produced Water Conference, Colorado Springs, CO, Oct. 16-17.

BURKE D., Application of the Anoxic Gas Flotation Process, www.pacificbiomass.org/documents/AD_OverViewOf_AGF_ByDennisBurke.pdf, 2000

CACHEIRA, C. S; SANTOS, J. P. S; FARIA, J. P. N; VARANDAS, M. M; SILVA, M. F. de C. R. P; COSTA, M. A. P. Processo de coagulação – floculação. 2012, 20 f. Projeto FEUP. Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente. Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, 2012

CARVALHO, Patrícia Cristina Puglia de. Caracterização de água produzida na indústria de petróleo para fins de descarte e otimização do processo de separação óleo/água. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2011

CASADAY A.L., *Advances in Flotation Unit Design for Produced Water Treatment*, 1993, Society of Petroleum Engineers

CBIE, O que é campo de petróleo?. Disponível em: < [O QUE É CAMPO DE PETRÓLEO? – CBIE](#)>. Acesso 28 de Novembro de 2020

COLLARES, Stonesmogene. *Avaliação do Uso de Recursos Hídricos em Refinarias de Petróleo: Um Estudo de Caso na Petrobrás*. 2004, 150 p. Dissertação (Mestrado em Sistema de Gestão), Universidade Federal Fluminense, Niterói

CRESESB. Centro de Referência para Energia Solar e Eólica. *MANUAL DE ENGENHARIA PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS*. Rio de Janeiro: 2014. 530f

CURBELO, F.D.S. *Estudo da Remoção de Óleo em Águas produzidas na Indústria de Petróleo, por Adsorção em Coluna Utilizando a Vermiculita Expandida e Hidrofobizada*. Dissertação de pós-graduação em engenharia química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal/RN, 2002

ECB, Efeito Fotovoltaico. Disponível em: < [Efeito fotovoltaico - Energia Solar \(weebly.com\)](#)>. Acesso 28 de Novembro de 2020

ELKINS, P.; VANNER, R.; FIREBRACE, J. 2005. *Management of produced water on offshore oil installations: A comparative assessment using flow analysis*. Policy Studies Institute (PSI) Working Paper, London, 89p

EMBRAPA, *Consumo de Água na Produção Animal*, 2013. Disponível em: < [PROCIJCPP2013.00165.pdf \(embrapa.br\)](#)>. Acesso em 13 de agosto de 2020

ENERGIAQUIMICA, A Química no Tratamento de Água e Efluente. Disponível em: < [A Química no Tratamento de Água e Efluente – energiaquimica \(wordpress.com\)](http://www.energiaquimica.wordpress.com)>. Acesso 20 de Novembro de 2020

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

FROST, T.K., JOHNSEN, S., UTVIK, T.I.R., 1998 Produced water discharges to the North Sea, Fate and Effects in the water column; OLF (Oljeindustriens Landsforening) December 1998, <http://www.olf.no/static/en/rapporter/producedwater/>

GLOBAL SOLAR ATLAS. Disponível em: < <https://globalsolaratlas.info/>>. Acesso 19 de Novembro de 2020

GWPRF (2003). Handbook on coal bed methane produced water: Management and beneficial use alternatives. Ground Water Protection Research Foundation, U.S. Department of Energy, and U.S. Bureau of Land Management.

HABERT, C.A.; BORGES, C.P.; NOBREGA, R. Processos de separação por membranas. Rio de Janeiro: E-papers, 181 p, 2006.

HAYES D.A. T., Overview of Emerging Produced Water Treatment Technologies, 11th Annual International Petroleum Conference, Albuquerque, NM, 2004

HENDERSON, S.B., S.W. GRIGSON, P. JOHNSON ; B.D. RODDIE 1999. Potential impact of production chemicals on toxicity of produced water discharges in North Sea Oil Platforms. Marine Pollution Bulletin 38(12): 1141-1151

IBGE, Censo Agropecuário, 2017. Disponível em: < <https://cidades.ibge.gov.br/>>. Acesso 28 de Setembro de 2020

IGEOLOGICO, Geologia do Petróleo: Querogênio. Disponível em: < <http://igeologico.com.br/geologia-do-petroleo-querogenio/>>. Acesso 28 de Novembro de 2020

JACKSON L., MYERS J. (2002). Alternative use of produced water in aquaculture and hydroponic systems at naval petroleum reserve No. 3. Proceedings. The 2002 Ground Water Protection Council Produced Water Conference, Colorado Springs, CO, USA. October 16–17, 2002

JOHNSEN, S., T.I. RØE UTVIK, E. GARLAND, B. DE VALS; J. CAMPBELL. 2004. Environmental fate and effects of contaminants in produced water. SPE 86708. Paper presented at the Seventh SPE International Conference on Health, Safety, and Environment in Oil and Gas Exploration and Production. Society of Petroleum Engineers, Richardson, TX. 9 pp

KALOGIROU, S. A. Solar energy engineering: processes and systems. 2. ed. Academic Press-Elsevier, 2014. 819 p

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.

LIMA, V. A. B. de. Estudo do tratamento de água produzida visando a irrigação de plantas oleaginosas para uso na produção de biodiesel. 2017. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Petróleo, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Brasil, 2017

LOOPER, M. L.; WALDNER, D. N. Water for Dairy Cattle. Las Cruces: New Mexico University, 2002. Guide D-107

MADAENI, S. S. The application of membrane technology for water disinfection. *Water Research*, 1999, 33.2: 301-308

MARTEL-VGWPRFES, J.F.; FOROUGHBAKCHK-POURNAVAB, Rahim; BENAVIDES-MENDOZA, Adalberto. Produced waters of the oil industry as an alternative water source for food production. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 2016, 32.4: 463-475. Disponível em: <<http://www.scielo.org.mx/pdf/rica/v32n4/0188-4999-rica-32-04-00463.pdf>>.

MARTEL-VGWPRFES J. F., BENAVIDES-MENDOZA A., VALDEZAGUILAR L. A., JUÁREZ-MALDONADO A., RUIZ-TORRES N. A. (2013). Effect of the application of produced water on the growth, the concentration of minerals and toxic compounds in tomato under greenhouse. *J. Environ. Prot.* 30, 138. DOI: 10.4236/jep.2013.47A016

MOTTA, A. R. P.; BORGES, C.P.; KIPERSTOK, A.; ESQUERRE, K.P; ARAÚJO, P.M; BRANCO, L. P. N. Tratamento de Água Produzida de Petróleo para Remoção de Óleo por Processos de Separação por Membranas: Revisão. *Eng. Sanit. Ambient.*, Brasil, v.18, n.1, jan/mar, 2013, p15-26.

MULDER, M. *Basic Principles in Membran Technology*. 2ª edição. Dordrecht, The Netherlands. Kluwer Academic Publisehres, 1996

NATURALTEC, Separadores água-óleo. Disponível em: < [Tratamento Preliminar - Separadores Água - Óleo | NaturalTec](#)>. Acesso 20 de Novembro de 2020

NEFF, J.; LEE, K.; DeBLOIS, E.M. 2011-a. *Produced water: Overview of composition, fates and effects*. Cap. 1 In: *Produced water, environmental risks and advances in mitigation technologies*. Lee, K. & Neff, J. (eds.). Springer Science, 608p

NEFF, J.M., N.N. RABALAIS,; D.F. BOESCH. 1987. Offshore oil and gas development activities potentiGWPRFy causing long-term environmental effects.Pages 149-174 In: D.F.

Boesch and N.N. Rabalais, eds., Long-Term Effects of Offshore Oil and Gas Development, London, Elsevier Applied Science Publishers.

NETL (2014) Fact sheet - Domestic use. National Energy Technology Laboratory. [Online]. <http://www.netl.doe.gov/research/coal/crosscutting/pwmis/tech-desc/domuse>

NISHITH B. D., SHIREESH B. K., SANTANU B. Optimization of design radiation for concentrating solar thermal power plants without storage. Department of Energy Science and Engineering, Indian Institute of Technology Bombay, Powai, Mumbai, India. p. 98 – 112, 2014.

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

NUVOLARI, Ariovaldo; COSTA, Regina Helena Pacca. Tratamento de efluentes. In: TELLES, Dirceu D"Alkmin; COSTA, Regina Helena Pacca (coord). Reúso da água: conceitos, teoria e práticas. São Paulo: Blucher, 2010. Cap. 6

OTTON J. K. (2006). Environmental aspects of producedwater salt releases in onshore and coastal petroleum-producing areas of the conterminous U.S. - a bibliography. U.S. Geological Survey.

PEACOCK, P., 2002, "Beneficial Use of Produced Water in the Indian Basin Field: Eddy County, NM," presented at the 2002 Groundwater Groundwater Protection Council Produced Water Conference, Colorado Springs, CO, Oct. 16-17.

PENTAIR, Osmose Reversa. Disponível em: < [Pentair - Tecnologia de membrana para facilitar a osmose reversa | X-Flow](#)>. Acesso 19 de Novembro de 2020

PENTAIR, Tecnologia de Membrana. Disponível em: < [Pentair - Membranas e tecnologia de membrana | X-Flow](#)>. Acesso 19 de Novembro de 2020

PEREIRA, E. B.; et al. Atlas Brasileiro de Energia Solar. 1. Ed. São José dos Campos: Swera, 2006,60p

PESALA, B. Solar Photovoltaics: Semiconductors, 1(4), 2012.

PINKSE, J., & VAN DEN BUUSE, D. The Development and Commercialization of solar PV Technology in the Oil Industry. Energy Policy, 40(1), 11–20, 2012.

REVISTA TAE, O Trabalho da Flotação e Aeração. Disponível em: < [O Trabalho Da Flotação E Aeração - Especializada em tratamento de água e efluentes \(revistatae.com.br\)](http://www.revistatae.com.br)>. Acesso 15 de Novembro de 2020

ROSA, A. J.; CARVALHO, R. DE S.; XAVIER, J. A. D. Engenharia de reservatórios de Petróleo. 2006. 808f. Rio de Janeiro: Interciência: Petrobras

RPSEA, Project 07122-12. Technical Assessment of Produced Water Treatment Technologies. 1ª edição, 2009

SANTANA, A. V. M. de. Otimização do processo de flotação de emulsão óleo/água através do planejamento fatorial completo. Natal, 2012. 97 f. Dissertação (Mestrado). Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN

SILVA, A. L. F.; FILHO, J. E. S.; RAMALHO, J. . V. da S.; MELO, M. V.; LEITE, M. de M.; BRASIL, N. I.; PEREIRA JUNIOR, O. de A.; OLIVEIRA R. C. G.; ALVES, R. P.; COSTA, R. F. D.; KUNERT, R.; GOMES, W. Universidade Petrobras: Processamento Primário de Petróleo. Escola de Ciências e Tecnologias E&P. p. 5, 2007

SILVA, C. R. R. Água Produzida na Extração de Petróleo. 2000. Monografia do Curso de Especialização em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais na Indústria, Escola Politécnica, Departamento de Hidráulica e Saneamento, 2000

SOARES, L.L. Projeto conceitual de um sistema de tratamento e reaproveitamento da água produzida de petróleo disposta em um aterro industrial real. 2013. 55 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Monografia) – Engenharia de Petróleo, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013

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

SZKLO, S. A. Fundamentos do Refino do Petróleo. 1. Ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2005

TARGUETA, J. P.; SANTANA, N. da S. O desafio contemporâneo da gestão de água na indústria: um estudo de caso sobre o tratamento de água de produção na indústria petrolífera. 2016. 86 f. Trabalho de conclusão de curso (Monografia) – Engenharia Química, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2016

TELLES, D. D; COSTA, R. P. Reúso Da água: conceitos, teorias e práticas, 2º ed. Editora Blucher. São Paulo, 2010

THOMAS, J.E. et al. *Fundamentos da Engenharia de Petróleo*. 2 ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2001

TONETTI, A. L.; FILHO, B. C.; STEFANUTTI, R.; FIGUEIREDO, R. F. O emprego do filtro de areia no pós-tratamento de efluente de filtro anaeróbio. Sanare. Revista Técnica da Sanepar, Curitiba, v.21, n.21, p. 42-52, jan./jun. 2004

UTVIK, T.I., 2003 “Compositions and Characteristics of Produced Water in the North Sea.” Produced Water Workshop, Aberdeen, Scotland, March 26-27.

VEIL, J.A.; PUDER, M.V.; ELCOCK, D.; REDWEIK Jr.,R.J. 2004. *A white paper describing produced water from production of crude oil, natural gas and coal bed methane*. Argonne National Laboratory/US Department of Energy, 87p

VIEIRA, V. M. *Água produzida no Segmento onshore de petróleo–caracterização de cenários na Bahia e prospecção de soluções para gerenciamento*. Dissertação de Mestrado 2011. Centro de pesquisa em geofísica e geologia, Instituto de Geociências. Universidade Federal da Bahia. Salvador–BA

XU, P; CATH, T; WANG, G; DREWES J;E; DOLNICAR S., Critical assessment of implementing desalination technology, 2009, Water Research Foundation, Denver, CO.

WAITZBERG, D.L. *Nutrição enteral e parenteral na prática clínica*. São Paulo, SP – Livraria Atheneu, 1990

WILF M., The Guidebook to Membrane Desalination Technology, 1st ed., Desalination Publications, L'Aquila, 2007

WIRTH, H. Recent Facts about Photovoltaics in Germany. Fraunhofer ISE Report, 1(August), 1–92, 2015

WISNIEWSKI A., Geologia do Petróleo. Disponível em: <https://albertowj.files.wordpress.com/2010/03/geologia_do_petroleo.pdf>

WORLD ENERGY OUTLOOK 2016, doi:10.1787/weo-2016-en.