



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA E TECNOLOGIA
CENTRO DE ENGENHARIAS
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA QUÍMICA

CÍNTIA ANDRADE COSTA FONSÊCA

**PROJETO DE SISTEMA DE SEPARAÇÃO PRIMÁRIA E TRATAMENTO DE
ÁGUA PRODUZIDA**

MOSSORÓ/RN

2021

CÍNTIA ANDRADE COSTA FONSÊCA

**PROJETO DE SISTEMA DE SEPARAÇÃO PRIMÁRIA E TRATAMENTO DE
ÁGUA PRODUZIDA**

Relatório de Estágio Obrigatório apresentado à
Universidade Federal Rural do Semi-Árido
como requisito para obtenção do título de
Bacharela em Engenharia Química.

Orientadora: Prof^a. Dra. Geraldine Angélica
Silva da Nóbrega

MOSSORÓ/RN

2021

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

F676p Fonsêca, Cíntia Andrade Costa.
Projeto de Sistema de Separação Primária e
Tratamento de água produzida / Cíntia Andrade
Costa Fonsêca. - 2021.
45 f. : il.

Orientadora: Geraldine Angélica Silva da
Nóbrega.
Relatório (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia
Química, 2021.

1. Separação primária. 2. Tratamento de água
produzida. 3. Tanque. I. Nóbrega, Geraldine
Angélica Silva da , orient. II. Título.

CÍNTIA ANDRADE COSTA FONSÊCA

**PROJETO DE SISTEMA DE SEPARAÇÃO PRIMÁRIA E TRATAMENTO DE
ÁGUA PRODUZIDA**

Relatório de Estágio Obrigatório apresentado a
Universidade Federal Rural do Semi-Árido
como requisito para obtenção do título de
Bacharela em Engenharia Química.

Defendida em: 17 / 09 / 2021.

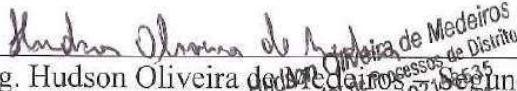
BANCA EXAMINADORA

GERALDINE ANGELICA SILVA Assinado de forma digital por GERALDINE
ANGELICA SILVA DA NOBREGA:02201080488
Dados: 2021.09.18 22:51:25 -03'00'

Prof^ª. Dr^ª. Geraldine Angélica Silva da Nóbrega – Presidente – UFERSA

IZABELLY LARISSA LUCENA:65070720368 Assinado de forma digital por IZABELLY LARISSA LUCENA:65070720368
Dados: 2021.09.18 10:04:56 -03'00'

Prof^ª. Dr^ª. Izabelly Larissa Lucena – Primeiro membro – UFERSA


Eng. Hudson Oliveira de Medeiros
Coordenador de Ensino de Engenharia de Alimentos
CREARN 210218635
POTIGUAR E&P S/A

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela luz e por não me permitir desistir mesmo com muitas dificuldades, persistindo e perseverando sempre.

Agradeço a meus pais e minha família pelo apoio, força, suporte e incentivo durante toda a jornada.

Agradeço a Valécio Duarte, e também a pessoas como Davi Diego, Jadson Lucas, Maria Eduarda, Jéssyca Carla e Maria do Céu, foram essenciais na caminhada. Agradeço o companheirismo, ajuda, tempo, dedicação, companhia, força, apoio, compartilhamento de explicações, estudos, dúvidas, incertezas.

Agradeço a meu supervisor Eng.^o Hudson Oliveira pelos ensinamentos, orientação, apoio, experiências, esclarecimento de dúvidas durante o estágio e no desenvolvimento do Relatório de estágio. Agradeço também a Ariel Marinho, colega de trabalho que compartilhou sua experiência e conhecimento, ajudou, atendeu a dúvidas durante o período de estágio e a Eng.^a Indira Costa, colega de trabalho que esclareceu dúvidas, compartilhou conhecimento, ajudou e apoiou durante o período de estágio. São pessoas que se tornaram verdadeiros amigos.

Agradeço a empresa Potiguar E&P pela oportunidade, pela experiência e conhecimentos compartilhados por todos os colaboradores e colegas de trabalho.

Agradeço a professora Dr^a Geraldine Angélica pela orientação e atenção durante a construção e defesa desse trabalho.

Agradeço a todos os professores que foram essenciais para orientação, compreensão e aprendizado das disciplinas. Pela disponibilidade e atenção de atender dentro e fora de sala de aula, permitindo uma formação íntegra e digna.

Agradeço também aos professores Dr^o Zilvam Melo e Dr^a Izabelly Lucena, orientadores do Projeto de Pesquisa que participei durante todo o curso, agregou muito conhecimento e proporcionou diversos frutos.

Agradeço a empresa Júnior Síntesis Jr. Consultoria e Projetos em Engenharia Química e todos os seus membros pelas experiências, aprendizado e crescimento vivenciados.

Agradeço a Banca Examinadora pela disponibilidade e atenção.

Agradeço a todos que fizeram parte da história, que estiveram presentes em algum momento ou de alguma forma, obrigada por acreditarem em mim, por ajudarem, incentivarem, apoiarem e sonharem junto comigo.

*"Só se vê bem com o coração. O essencial
é invisível aos olhos".*

Antoine de Saint-Exupéry

RESUMO

Esse trabalho visa abordar o projeto de implementação de um Sistema de Separação Primária (Tanque de Lavagem) e Tratamento de Água Produzida por flotação em Estações Coletoras de petróleo da bacia Potiguar, com o intuito de utilizar a água na injeção dos poços injetores, responsáveis por preservar a pressão nos reservatórios do campo, e assim aumentar o fator de recuperação de óleo do campo. Para o Sistema de Separação Primária, será avaliado um tanque padrão de 348 m³ para ser adequado a função de Tanque de Lavagem. E para o sistema de Tratamento de água produzida será utilizado um sistema de flotação composto por Tanque Flotador e injeção de polieletrólito. Assim, foi feita a descrição das características dos Sistemas e os cálculos de dimensionamento.

Palavras-chave: separação primária; tratamento de água produzida; tanque.

ABSTRACT

This work will approach the implementation project of a Primary Separation System (Washing Tank) and Water Treatment Produced by Flotation in Oil Collecting Stations in the Potiguar Basin, in order to use water in the injection of injection wells, responsible for preserve pressure in the field's reservoirs, and thus increase the field's oil recovery factor. For the Primary Separation System, a standard 348 m³ tank will be evaluated to be suitable for the Wash Tank function. And for the produced water treatment system, a flotation system composed of a Flotation Tank and polyelectrolyte injection will be used. Thus, the description of the characteristics of the systems and the design calculations were made.

Keywords: primary separation; produced water treatment; tank.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquemático completo com Sistema de separação primária, tratamento e injeção de água produzida.....	15
Figura 2 - Representação do Tanque de Lavagem e sifão	26
Figura 3 - Representação do Tanque Flotador e sifão	36

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Propriedades dos fluidos	18
Quadro 2 - Vazões de produção	18
Quadro 3 - Vazões para a avaliação	19
Quadro 4 - Tubo indutor do Tanque de Lavagem	27
Quadro 5 - Fluxo no Tanque de Lavagem.....	30
Quadro 6 - Fluxo no Tanque Flotador	30
Quadro 7 - Tubo indutor do Tanque Flotador	37

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LGE	Líquido gerador de espuma
SIA	Sistema de injeção de água produzida
TO	Tratador de óleo
TOG	Teor de óleos e graxas
TQ	Tanque

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
2.1. Processo	14
2.2. Tanque de Lavagem.....	15
2.3. Tanque Flotador e flotação	16
3. METODOLOGIA	17
3.1. Cálculos	17
3.1.1. Hidráulica do Tanque de Lavagem e sifão	17
3.1.1.1. Bases e premissas	18
3.1.1.2. Cálculo do sifão do Tanque de Lavagem	20
3.1.1.3. Cálculo do vertedor do sifão	21
3.1.1.3.1. Cálculo da cota do bocal de água produzida no sifão.....	21
3.1.1.3.2. Cálculo da carga hidráulica para o novo bocal de óleo do Tanque de Lavagem....	21
3.1.1.3.3. Cálculo do nível de óleo no Tanque de Lavagem.....	22
3.1.1.3.4. Cálculo da cota do bocal de saída de água do sifão	22
3.1.1.3.5. Cálculo da perda de carga entre o Tanque e o sifão	24
3.1.1.3.6. Cálculo da carga hidráulica para o bocal vertedor do sifão com 10 polegadas...	25
3.1.1.3.7. Cálculo do Tubo Indutor do Tanque de Lavagem	26
3.1.1.4. Condição Normal de Produção	27
3.1.2. Hidráulica do Tanque Flotador e sifão	28
3.1.2.1. Bases e premissas	28
3.1.2.2. Cálculo do Nível de Transbordo do Tanque Flotador.....	28
3.1.2.3. Dimensões do Tanque Flotador.....	29
3.1.2.4. Cálculo do sifão do Tanque Flotador	29

3.1.2.5.	Cálculo do vertedor do sifão	31
3.1.2.5.1.	Cálculo da cota do bocal de água produzida no sifão	31
3.1.2.5.2.	Cálculo da carga hidráulica para o novo bocal de óleo do Tanque Flotador.....	31
3.1.2.5.3.	Cálculo do nível de óleo no Tanque Flotador.....	32
3.1.2.5.4.	Cálculo da cota do bocal de saída de água do sifão.....	32
3.1.2.5.5.	Cálculo da perda de carga entre o Tanque e o sifão	33
3.1.2.5.6.	Cálculo da carga hidráulica para o bocal vertedor do sifão com 10 polegadas... ..	35
3.1.2.6.	Cálculo do Tubo Indutor do Tanque Flotador.....	36
3.1.2.7.	Condição Normal de Produção	37
4.	RESULTADOS	38
5.	CONCLUSÃO	41
	REFERÊNCIAS	42

1. INTRODUÇÃO

A água produzida corresponde a toda a água carregada junto com o óleo durante a produção do petróleo. Em geral, a quantidade que acompanha o gás é pequena, mas quantidades maiores acompanham o óleo na sua produção, podendo alcançar proporções consideráveis, especialmente em campos de produção de petróleo que se aproximam do fim de suas vidas produtivas (FEITOSA, 2015).

A água produzida é potencialmente perigosa ao meio ambiente por causa dos vários elementos que a compõe e apresenta de um modo geral, características muito corrosivas aos equipamentos de superfície e aos de subsuperfície, devido à elevada salinidade e elevados teores de gases dissolvidos (H_2S e CO_2), sólidos em suspensão e óleo residual. A combinação de um ou mais desses elementos e a quantidade e as características do local onde o efluente for descartado devem ser levados em conta para avaliar um possível impacto ambiental. Poderá ocorrer poluição em rios, mares, lagos, contaminação em aquíferos e do solo, danos à flora e à fauna (CHAGAS et al., 2014).

Os componentes inorgânicos da água produzida são similares aos encontrados na água do mar. Os elementos inorgânicos mais abundantes são os íons cloreto, sódio, cálcio, magnésio, amônia e sulfeto (GABARDO, 2014; OGP, 2005).

O tratamento e o descarte inadequado de água produzida podem gerar danos significativos para os residentes, animais e vegetação locais. A água produzida pode também conter elevados níveis de sal e, se lançada ao solo, pode ser extremamente prejudicial ao crescimento das plantas nos ecossistemas locais (TSALIK; SCHIFFRIN, 2005; SANTOS; VIEIRA; BERGAMASCO, 2013).

Há uma real necessidade em realizar o devido tratamento da água produzida a fim de enquadrar tal efluente em níveis de exigência dos padrões ambientais. Dessa forma, tal tratamento de água irá proporcionar uma recuperação significativa do óleo ainda presente, e ainda permitirá o condicionamento da água produzida para ser posteriormente injetada ou descartada (FEITOSA, 2015).

Os tratamentos aplicados à água produzida são de extrema importância para a redução das concentrações de diversos compostos químicos tóxicos e nocivos ao meio ambiente. Atualmente, as tecnologias de tratamento disponíveis melhoraram significativamente. Parte dessa melhora se deve às regulamentações ambientais, assim como a iniciativa da própria indústria (BORGES, 2017).

O objetivo de tratar esse efluente é atingir os parâmetros necessários para descarte, reinjeção para recuperação secundária ou em alguma outra estrutura geológica para disposição (BORGES, 2017).

Neste trabalho será abordado o projeto de implementação de um Sistema de Separação Primária (Tanque de Lavagem) e Tratamento de água produzida por flotação em Estações Coletoras de petróleo da bacia Potiguar. Para o Sistema de Separação Primária, será avaliado um tanque padrão de 348 m³ para ser adequado a função de Tanque de Lavagem. E para o sistema de Tratamento de água produzida será utilizado um sistema de flotação composto por Tanque Flotador e injeção de polieletrólito. Tem-se o intuito de utilizar a água na injeção dos poços injetores, responsáveis por preservar a pressão nos reservatórios do campo, e assim aumentar o fator de recuperação de óleo do campo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Processo

Com a implantação do projeto a produção de líquido será escoada dos vasos separadores de produção para o *header* de entrada do Tanque de Lavagem, para o qual será avaliado um tanque padrão de 348 m³ para ser adequado a função de Tanque de Lavagem. No Tanque de Lavagem ocorrerá o tratamento primário, que consiste na separação água/óleo, auxiliado por sistema de dosagem química. O óleo separado no Tanque de Lavagem será encaminhado para os Tanques de produção, de onde é encaminhado para o oleoduto.

A água separada no Tanque de Lavagem será enviada para a Estação de tratamento de água produzida, onde iniciará o processo de tratamento por um Sistema de flotação no Tanque Flotador. Este tanque promoverá a retirada de óleo e graxas da corrente de água produzida, a partir de flotação ocasionada por injeção de polieletrólito, reduzindo o TOG da corrente de água para valores inferiores a 10 ppm.

Após o tratamento por flotação a água será direcionada para o tanque pulmão de água produzida, de onde as bombas de carga dos filtros encaminharão o fluxo para filtragem filtros de areia e, em sequência, para os filtros cartuchos, para eliminação de sólidos e redução do TOG para valores inferiores a 2 ppm.

Após filtração a água será armazenada em Tanque pulmão de água tratada de onde será utilizado para o sistema de injeção. O sistema de retrolavagem dos filtros de areia utilizará água tratada para limpeza dos filtros.

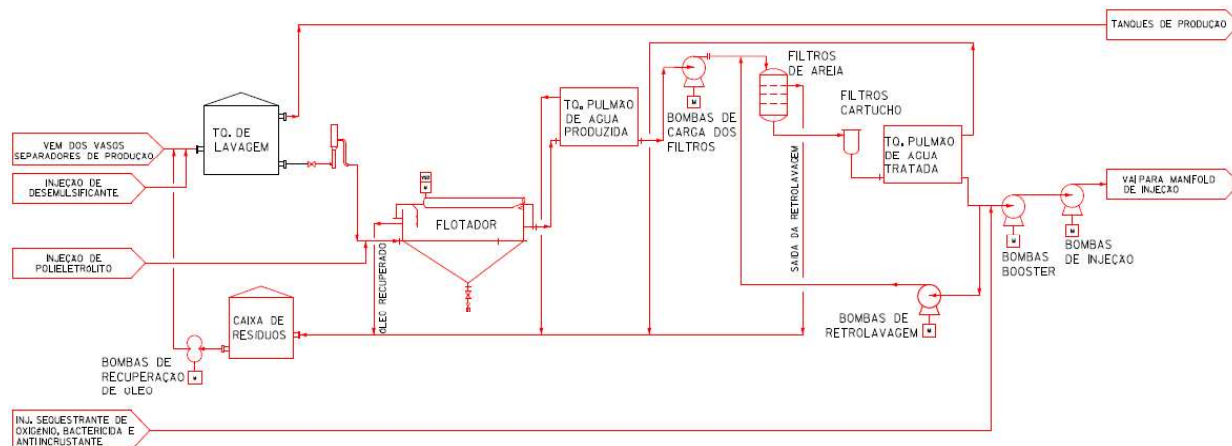
O sistema de injeção de água será composto por bombas *boosters* e bombas de injeção que encaminhará água para o *manifold* de injeção da Estação.

O óleo separado no Flotador, ou nos extravasores do tanque de água tratada e produzida serão enviados para caixa de resíduos, onde um conjunto de bombas encaminharão o fluxo para a entrada do Tanque de Lavagem.

A dosagem química será feita a partir da injeção de desemulsificante para quebra da emulsão a montante do Tanque de Lavagem, pela injeção de polieletrólito na entrada do Flotador, injeção de sequestrante de oxigênio, bactericida e anti-incrustante antes das bombas *booster* do Sistema de injeção de água produzida (SIA).

Tem-se a representação do Sistema completo de separação primária, tratamento e injeção de água produzida na **Figura 1**.

Figura 1 - Esquemático completo com Sistema de separação primária, tratamento e injeção de água produzida



Fonte: Autoria própria (2021)

2.2. Tanque de Lavagem

O Tanque de Lavagem é um tipo de separador gravitacional atmosférico utilizado para o tratamento de petróleo. Neste equipamento, quando a quantidade de gás é elevada no fluxo de entrada, são instalados separadores de gás a montante, de forma que a carga líquida que

chega ao tanque encontra-se apenas saturada com gás nas condições de operação (JÚNIOR, 2011).

A carga líquida, contendo petróleo, água e desemulsificante, é admitida pela região inferior através de um distribuidor, imerso no seio da água, sob a interface água-petróleo (JÚNIOR, 2011).

O petróleo, fluido com densidade menor, migra para a parte superior do tanque e formando nesta região uma camada de petróleo mais emulsão. Nesta camada estratificada os estratos possuem diferentes frações de petróleo, cuja concentração de água decresce ao se aproximar do topo do tanque. A água, fluido mais denso, acrescida das gotas coalescidas, flui em sentido contrário, configurando-se, assim, o movimento dos fluidos neste processo de segregação gravitacional (JÚNIOR, 2011).

Uma característica a destacar neste modelo de tanque é que a carga de fluidos produzidos chega ao interior do tanque através de um distribuidor imerso no leito de água livre e estes ascendem atravessando a camada de água. O contato íntimo destes fluidos com a água produzida proporciona o contato das gotículas de água da emulsão com a massa de água, auxiliando assim o fenômeno da coalescência (JÚNIOR, 2011).

2.3. Tanque Flotador e flotação

Para o tratamento da água oleosa e da água produzida pode ser utilizado um Flotador Industrial. O Flotador Industrial tem a finalidade de abaixar o TOG a níveis aceitáveis para a legislação vigente (NASCIMENTO, 2019).

Entre as técnicas aplicáveis ao tratamento de água produzida, a flotação tem se mostrado eficiente em remover óleo emulsionado. Para isso, pode ser utilizado um Flotador Industrial, que tem a finalidade de abaixar o TOG a níveis aceitáveis para a legislação vigente (SANTOS, 2017).

A técnica da flotação é normalmente auxiliada pela quebra da emulsão com adição de coagulantes e/ou polímeros floculantes. O processo de coagulação / floculação visa remover o material coloidal e partículas finas que sedimentam lentamente. Os coloides são materiais com propriedades elétricas que geram uma força de repulsão impedindo a aglomeração e sedimentação, o que dificulta a remoção por processos físicos tradicionais (GOMES, 2009; MACHADO; MEDINA; COSTA, 2019).

A coagulação consiste em realizar a desestabilização das forças elétricas que interagem entre as partículas da solução, assim desestabiliza os coloides. Através da adição de produtos químicos específicos, ocorre a anulação das forças repulsivas. A adição de coagulantes é muito utilizada por ser prática e fornecer um efluente com boa qualidade. Desse modo, na indústria petroquímica, são utilizados como coagulantes os polieletrólitos, policloreto de alumínio (PAC) (FEITOSA, 2015).

Já a floculação será a aglutinação de tais partículas em torno de núcleos formados pela coagulação. A floculação atua na agregação das partículas neutralizadas na coagulação, formando flocos com a ajuda de um floculante, em geral um polímero, que se liga às partículas. Os flocos aumentam de peso e tamanho viabilizando a decantação por ação da gravidade e a remoção por decantação ou filtração (FEITOSA, 2015; BORGES, 2017).

A flotação visa a remoção de partículas em suspensão ou flutuantes nos casos em que a densidade da fase dispersa é menor do que a da fase contínua. Esse tipo de sistema recupera o resíduo de óleo através de separação gravitacional (BORGES, 2017).

3. METODOLOGIA

Primeiramente, foi feita uma revisão bibliográfica dos principais tópicos. Em seguida, foram feitos os cálculos referentes ao dimensionamento de um Sistema de Separação Primária (Tanque de Lavagem), em que foi avaliado um tanque padrão de 348 m³ para a função de Tanque de Lavagem e dimensionamento de um Sistema de flotação composto por Tanque Flotador e injeção de polieletrólito. Foram realizados cálculos de escoamento, definindo cotas entre equipamentos. Além disso, foram elaboradas representações dos sistemas.

3.1. Cálculos

Os cálculos foram feitos referentes ao Tanque de Lavagem e o Tanque Flotador.

3.1.1. Hidráulica do Tanque de Lavagem e sifão

Nesse caso, foi avaliado um tanque padrão de 348 m³ para a função de Tanque de Lavagem. A avaliação contemplou o ponto de vista hidráulico e de tempos de residência de

separação gravitacional natural, considerando as vazões de produção do campo apresentadas. Nos tópicos seguintes tem-se os cálculos referentes ao Tanque de Lavagem e sifão.

3.1.1.1. Bases e premissas

a. Considerado que a posição do sifão será a uma distância linear não superior a 5 metros do Tanque de Lavagem.

b. Dimensões do Tanque de Lavagem:

- Diâmetro: 7.637 mm;
- Altura total: 7.612 mm;
- Bocal de entrada: 337 mm;
- Bocal da Câmara de Espuma (LGE): 7.048 mm.

c. Dados de Processo

No **Quadro 1** estão descritos os dados de processo referentes aos fluidos.

Quadro 1 - Propriedades dos fluidos

BSW		90 %
Temperatura		20 – 35 °C
Água	Massa Específica (ρ_A)	998 kg/m ³
	Viscosidade (μ_A)	0,6 cP
Óleo	Massa Específica (ρ_o)	828,2 kg/m ³
	Viscosidade (μ_o)	4,7 cP

Fonte: Autoria própria (2021).

No **Quadro 2** estão descritas as vazões de trabalho.

Quadro 2 - Vazões de produção

Água Produzida	4.000 BPD	635 m ³ /d
Óleo	400 BPD	63,5 m ³ /d

Fonte: Autoria própria (2021).

d. Vazões para a avaliação:

No **Quadro 3** estão descritas as vazões de trabalho para a avaliação.

Quadro 3 - Vazões para a avaliação

Água Produzida	6.000 BPD	952 m³/d
Óleo	600 BPD	95,2 m³/d

Fonte: Autoria própria (2021).

Considerou-se fator de projeto/ avaliação carga hidráulica adicional de + 50%.

e. Considerada a especificação de material aço carbono, classe 150 para as tubulações de óleo e vapores.

f. Considerada a especificação de material aço carbono com revestimento orgânico interno, classe 150 para as tubulações de água produzida.

g. Para informação e referência:

TOG de saída de água produzida do Tanque de Lavagem para o projeto: 200 ppm.

h. Quanto ao Tanque de Lavagem e Tanque Flotador:

Para avaliação do volume bruto do Tanque de Lavagem e do Tanque Flotador foi considerado como principal parâmetro o tempo de residência das fases componentes da produção no tanque, considerando as vazões informadas no item d do tópico 3.1.1.1.

O óleo da Estação Coletora é de fácil separação e por experiência de campo, demanda-se no mínimo de 2 horas. Portanto, para o projeto, para efeito de separação, foi considerado como tempo de residência mínimo aceito de 4 horas para qualquer das fases, seja óleo ou água. Valores superiores concorrem para melhorar a eficiência na separação das fases e enquadramento do óleo dentro da especificação e da água produzida sem perdas de óleo.

i. Quanto ao sifão:

A avaliação do sifão à jusante do Tanque de Lavagem e do Tanque Flotador foi feita de modo a garantir os níveis fixos operacionais e de interface para a separação em cada Tanque. Os níveis que foram adotados para estes Tanques estão de acordo com o melhor aproveitamento do volume útil, assim como atendendo as recomendações das normas para construção de tanques API, e, adicionalmente respeitando as dimensões gerais, bocais disponíveis e seus acessórios.

j. Foi levado em consideração a adoção de altura do Tanque Flotador igual a altura do Tanque de Lavagem para se minimizar os riscos de trasbordamento, já que o sistema irá operar interligado e com escoamento por gravidade.

3.1.1.2. Cálculo do sifão do Tanque de Lavagem

Não foi identificado no tanque padrão de 348 m³ bocal de transbordo e tampouco calha coletora de óleo, assim como, não foi visto tubo distribuidor ou indutor de carga e coletor de saída. Para o tanque padrão foi considerado para saída de óleo do tanque 300 mm abaixo da linha de centro do bocal da câmara de espuma (LGE), situado a 7.048 mm, ou seja, transbordo de óleo a 6.748 mm com a previsão de abertura de novo bocal de 4 polegadas, conforme o item d do tópico 3.1.1.1.

Com base nas dimensões do tanque e vazão de óleo foi identificado a altura de camada de óleo necessária para se atender a demanda de pelo menos 4 horas de tempo de residência mínimo. A partir da dedução da **Equação (1)**.

$$\begin{aligned} t_{residência} &= \frac{V_{camada\ óleo}}{Q_{óleo}} = \frac{A_{TQ} \times h_{camada\ óleo}}{Q_{óleo}} \\ h_{camada\ óleo} &= \frac{t_{residência} \times Q_{óleo}}{A_{TQ}} \\ h_{camada\ óleo} &= \frac{t_{residência} \times Q_{óleo}}{\pi \times d_{TQ}^2 / 4} \end{aligned} \quad (1)$$

Em que,

$t_{residência}$ = tempo de residência da camada de óleo (h);

$V_{camada\ óleo}$ = volume ocupado pela camada de óleo (m³);

$Q_{óleo}$ = vazão de óleo com 1% de água produzida (m³/h);

A_{TQ} = área transversal do tanque (m²);

$h_{camada\ óleo}$ = altura da camada de óleo (m);

d_{TQ} = diâmetro do tanque (m).

$$h_{camada\ óleo} = \frac{4 \times 4,01}{\pi \times 7,637^2 / 4} = 0,34995\ m = 350\ mm.$$

Com busca na melhor especificação do óleo e em uma camada que permita gerenciar melhor as flutuações do processo, assim como, suas interferências hidráulicas, foi testado a adoção de uma camada de óleo com 650 mm a partir da **Equação (1)**.

$$t_{residência} = \frac{\pi \times 7,637^2 / 4 \times 0,65}{4,01} = 7,4\ horas$$

Portanto, com folga e atendendo o fator de projeto, para especificação do óleo foi considerado a camada de óleo de 650 mm, e, isso deu um tempo de residência de 7,4 horas (vazão de óleo com 1 % de água).

3.1.1.3. Cálculo do vertedor do sifão

A vazão máxima de água produzida, com fator de projeto, que deixa o Tanque de Lavagem é de 953,3 m³/d (5.996 BPD), estimando com presença de 200 ppm de TOG.

3.1.1.3.1. Cálculo da cota do bocal de água produzida no sifão

O cálculo da cota do bocal de transbordo do tubo sifão de água produzida depende da cota de transbordo de óleo no bocal de saída de óleo a ser previsto, bocal de 4 polegadas, e da composição da camada líquida no Tanque de Lavagem, ou seja, da espessura da camada de óleo admitida e de água adotadas como operacionais. O valor da cota de transbordo de óleo está calculado abaixo nos próximos itens.

3.1.1.3.2. Cálculo da carga hidráulica para o novo bocal de óleo do Tanque de Lavagem

O diâmetro do bocal de saída de óleo sobrenadante foi dimensionado em função da carga hidráulica que ele apresenta para a vazão de projeto.

Dados:

Diâmetro do bocal: = 4” (102,26 mm - aço carbono, classe 150);

Vazão de avaliação (óleo) = 4,01 m³/h (606 BPD) (1% de água produzida).

Considerando-se a máxima carga hidráulica admissível em bocais tipo vertedor vertical igual a 75% do diâmetro do bocal, o cálculo da altura do líquido no bocal (H) - carga hidráulica foi efetuado pela **Equação (2)** abaixo:

$$Q = 1,518 \times D^{0,693} \times H^{1,807} \quad (2)$$

Em que,

Q = vazão (m^3/s) = 0,0011139;

D = diâmetro do bocal (m) = 0,10226.

$$H = (Q / (1,518 \times D^{0,693}))^{1/1,807}$$

$$H = (0,0011139 / (1,518 \times 0,10226^{0,693}))^{1/1,807}$$

$$H = 0,044161 \text{ m} = 44,2 \text{ mm (43 \% do diâmetro do bocal)}$$

O valor encontrado está dentro do limite da carga hidráulica estabelecida como premissa, que corresponde a 75 % do diâmetro do ladrão (101,26 mm), portanto, o diâmetro do bocal de saída de óleo estimado atende ao requisito de limite da carga hidráulica (máximo 75 % de D) em bocais vertedouros verticais.

3.1.1.3.3. Cálculo do nível de óleo no Tanque de Lavagem

O nível de óleo será correspondente à cota do bocal de óleo existente corrigido para a cota correspondente à carga hidráulica calculada no tópico anterior.

A cota do novo bocal de óleo com base em 300 mm abaixo do bocal da câmara de espuma (LGE) são 6.748 mm, o diâmetro são 101,26 mm e a carga hidráulica: 44,2 mm, portanto, pode-se calcular a cota de transbordo de óleo de acordo com a **Equação (3)**.

$$\text{Cota de transbordo} = \text{cota geratriz inferior do bocal} + \text{carga hidráulica} \quad (3)$$

$$\text{Cota de transbordo} = (6.748 - 101,26/2) + 44,2 = 6.741 \text{ mm}$$

3.1.1.3.4. Cálculo da cota do bocal de saída de água do sifão

Para o sifão do Tanque de Lavagem, tem-se:

Dados:

Nível de óleo no Tanque = 6.741 mm;

Espessura da camada de óleo = 650 mm;

Peso Específico do óleo (condições de operação) = 828,2 kg/m^3 ;

Espessura do colchão de água = 6.091 mm;

Cota prevista para o novo bocal de saída para o sifão = 350 mm;

Altura real da camada de água $(6.091 - 350) = 5.741 \text{ mm (*)}$;

Peso Específico da água (condições de operação) = 998 kg/m³.

(*) Altura real da camada de água considera a espessura do colchão menos a cota do bocal de saída de água do tanque.

Um adendo no cálculo da cota, com essa altura da camada de água, aplicou-se a **Equação (1)** para camada de água e foi possível identificar o tempo de residência para a água produzida no Tanque de Lavagem.

$$t_{\text{residência}} = \frac{\pi \times 7,637^2 / 4 \times 5,741}{39,7} \cong 7,0 \text{ horas}$$

Obteve-se que o tempo de residência para a água produzida no Tanque de Lavagem se estabelece na vazão de projeto de 7,0 horas, mesma ordem e grandeza obtida para o óleo. Isso permite velocidade de desprendimento gravitacional semelhantes em ambas as fases.

Quanto a cota dinâmica, esta corresponde à cota estática adicionada da perda de carga na tubulação de transferência e no próprio tubo sifão.

Para a cota estática tem-se a **Equação (4)**.

$$h_{sf} \times \rho_{ag} = h_{ag} \times \rho_{ag} + h_{ol} \times \rho_{ol} \quad (4)$$

Em que,

h_{sf} é a cota estática;

ρ_{ag} é a massa específica da água;

h_{ag} é a altura da camada de água;

ρ_{ol} é a massa específica do óleo;

h_{ol} é a altura da camada de óleo.

$$h_{sf} = \frac{(h_{ag} \times \rho_{ag} + h_{ol} \times \rho_{ol})}{\rho_{ag}}$$
$$h_{sf} = (5741 \times 998 + 650 \times 828,2) / 998$$
$$h_{sf} = 6280 \text{ mm}$$

Para a cota dinâmica tem-se a **Equação (5)**.

$$h_{sfd} = h_{sf} - J \quad (5)$$

Em que,

h_{sfd} é a cota dinâmica;

J é a perda de carga total.

3.1.1.3.5. Cálculo da perda de carga entre o Tanque e o sifão

Dados:

Diâmetro (d) = 8" (206,375 mm - aço carbono com revestimento orgânico interno, classe 150);

Vazão (Q) = 39,7 m³/h = 0,01104 m³/s (item d do tópico 3.1.1.1);

Coeficiente (C) = 130 (tubo de aço).

Para o cálculo da perda de carga unitária (j) foi utilizada a **Equação (6)**.

$$j = \frac{10,643 \times Q^{1,85}}{C^{1,85} \times d^{4,87}} \quad (6)$$

$$j = 0,00068 \text{ m / m}$$

Para a perda de carga na tubulação ($L_{eqSifão-TQ}$), considerando os comprimentos equivalentes e válvulas obteve-se o valor abaixo.

$$L_{eqSifão-TQ} = 47,6 \text{ m}$$

Logo, para a perda de carga da tubulação de interligação entre sifão e tanque ($J_{Sifão-TQ}$) tem-se a **Equação (7)**.

$$J_{Sifão-TQ} = j \times L_{eqSifão-TQ} \quad (7)$$

$$J_{Sifão-TQ} = 0,00068 \times 47,6$$

$$J_{Sifão-TQ} = 0,03245 \text{ m} = 32 \text{ mm}$$

Cálculo da perda de carga no sifão, considerando um tubo sifão de 10 polegadas. Importante observar que sifão e suas tubulações de comunicação, tanque/ sifão, devem imprimir mínima perda de carga no sistema para que o mesmo não influencie negativamente na carga hidráulica dos bocais vertedouros além do previsto e recomendado ao serviço ora proposto para os mesmos.

Dados:

Diâmetro (d) = 10" (260,35 mm – aço carbono com revestimento orgânico interno, classe 150);

Vazão (Q) = 39,7 m³/h = 0,01104 m³/s (item d do tópico 3.1.1.1);

Coeficiente (C) = 130 (tubo de aço).

O cálculo da perda de carga unitária (j) foi feito pela **Equação (6)**.

$$j = 0,00022 \text{ m / m}$$

Para a perda de carga na tubulação ($L_{eqSifão}$) tem-se a **Equação (8)**.

$$L_{eqSifão} = L_R \quad (8)$$

Em que, L_R é o comprimento equivalente (m).

$$L_{eqSifão} = 6,246 \text{ m}$$

Sendo assim, para a perda de carga no sifão ($J_{Sifão}$) tem-se a **Equação (9)**.

$$J_{Sifão} = j \times L_{eqSifão} \quad (9)$$

$$J_{Sifão} = 0,00022 \times 6,246$$

$$J_{Sifão} = 0,00137 \text{ m} = 1,4 \text{ mm}$$

Para a altura da cota dinâmica (h_{sfd}) tem-se a **Equação (10)**.

$$h_{sfd} = h_{sf} - J_{Sifão-TQ} - J_{Sifão} \quad (10)$$

$$h_{sfd} = 6280 - 32 - 1,4 = 6246 \text{ mm}$$

A cota dinâmica do sifão corrigida em relação ao fundo do tanque (h'_{sfd}) obtida foi:

$$h'_{sfd} = 6246 + 350 = 6596 \text{ mm}$$

3.1.1.3.6. Cálculo da carga hidráulica para o bocal vertedor do sifão com 10 polegadas

Cálculo do bocal de saída do sifão para vazão de projeto. O diâmetro do bocal de saída foi calculado em função da carga hidráulica que ele apresenta para a vazão de projeto.

Em função dos cálculos prévios foi calculado bocal de saída de 10 polegadas.

Verificação do diâmetro selecionado:

Dados:

Diâmetro da tubulação do ladrão = 10" (260,35 mm - aço carbono com revestimento orgânico interno, classe 150);

Vazão de projeto (água produzida) = 39,7 m³/h = 0,01104 m³/s.

Considerou-se como critério de aceitação a máxima carga hidráulica em bocais tipo vertedor vertical igual a 75% do diâmetro do bocal.

O cálculo da altura do líquido no bocal foi realizado pela **Equação (2)**.

Em que,

Q = vazão (m^3/s) = 0,01104;

D = diâmetro do bocal (m) = 0,26035.

$$H = (0,01104 / (1,518 \times 0,26035^{0,693}))^{1/1,807}$$

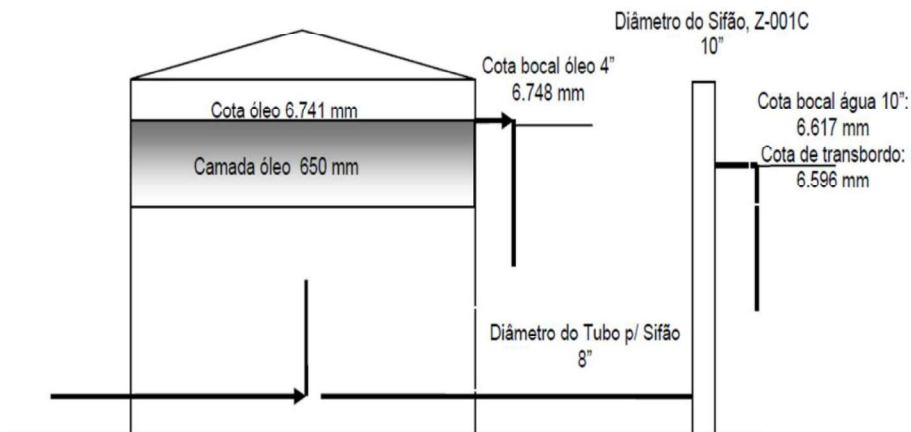
$$H = 0,109853 \text{ m} = 109,85 \text{ mm (42 \% do diâmetro do bocal)}$$

O valor encontrado atendeu a carga hidráulica como premissa de projeto, que deve ser abaixo de 75% do diâmetro do ladrão (260 mm), portanto, o diâmetro do bocal de saída do sifão deve ser de 10 polegadas.

Portanto, tubo sifão e bocal vertedouro em 10 polegadas, e, neste caso, a cota da linha de centro do bocal de saída de água produzida do sifão será de 6.617 mm, calculada a partir da cota dinâmica corrigida até o fundo, subtraída da carga hidráulica e adicionada do raio do bocal de 10 polegadas ($6,596 - 109,85 + 260,35/2$).

Tem-se a representação do Tanque de Lavagem e sifão na **Figura 2**.

Figura 2 - Representação do Tanque de Lavagem e sifão



Fonte: Autoria própria (2021).

3.1.1.3.7. Cálculo do Tubo Indutor do Tanque de Lavagem

A utilização de Tubo Indutor para o bocal de carga de tanques de separação gravitacional são para reduzir a turbulência interna no tanque durante o desprendimento de partículas descendentes de água produzida e ascendentes de óleo. Recomendação que deve ser seguida, como velocidade interna de desprendimento no tubo indutor, de 200 a 300 mm/s. Isso é capaz de manter a separação gravitacional dentro de bons parâmetros no tanque.

Também é recomendado que o término do tubo indutor esteja a pelo menos 1.500 mm da base da camada de óleo prevista, de forma a não promover muita interferência na zona de transição que é rica em emulsão.

Com essas bases, pode ser visto que um tubo indutor interno de 10 polegadas é o adequado para as vazões de projeto, conforme o item d do tópico 3.1.1.1, como mostrado no **Quadro 4**.

Quadro 4 - Tubo indutor do Tanque de Lavagem

Condição de projeto	d1 = 206,38
Vazão (m³/h)	39,7
Massa específica (kg/m³)	998,0
Viscosidade (cP)	0,6
Área transferência (m²)	0,0532
Velocidade (m/s)	0,21
Reynolds	90307,7089
Regime de fluxo	Turbulento
Rugosidade (mm)	0,04572
E/ D	$1,8 \times 10^{-4}$
Fator de atrito	0,01923
Perda de carga (mcl)	0,01

Fonte: Autoria própria (2021).

3.1.1.4. Condição Normal de Produção

Para avaliação considerou-se,

Dados:

Vazão de projeto de óleo na entrada = 3,97 m³/h (600 BPD);

Vazão de projeto de água na entrada/saída = 39,7 m³/h (6.000 BPD).

Os volumes então reservados a cada um dos líquidos, considerando a camada de óleo de 0,65 m e 5,741 m para a camada de água produzida foram:

Volume da camada de óleo = 29,8 m³;

Volume da camada de água = 262,9 m³.

Como resultado, os tempos de residências verificados para cada um deles foi:

Tempo de residência do óleo = 7,5 h;

Tempo de residência da água = 6,6 h;

Tempo de residência da água até o fundo do tanque = 7,0 h.

Considerando outros projetos semelhantes, os valores obtidos para o óleo encontram-se dentro do previsto, assim como, para água.

Melhorias podem ser obtidas na eficiência de separação com a adição de desmulsificantes na corrente de entrada do tanque, caso a emulsão se apresente com uma interação água/óleo mais forte do que o esperado à medida que o BSW sofra alteração ao longo do tempo. Recomenda-se teste de separação gravitacional a diferentes temperaturas e BSW para melhor caracterização da emulsão de forma a se obter uma avaliação mais robusta para a instalação.

3.1.2. Hidráulica do Tanque Flotador e sifão

Tem-se nos tópicos seguintes os cálculos referentes ao Tanque Flotador e sifão.

3.1.2.1. Bases e premissas

a. Considerou-se que a posição do sifão será a uma distância linear não superior a 2 metros do Tanque Flotador.

E considerou-se as outras premissas do tópico 3.1.1.1.

3.1.2.2. Cálculo do Nível de Transbordo do Tanque Flotador

Para definição da altura de transbordo do Tanque Flotador, foi considerado 500 mm abaixo da elevação da altura do vertedouro do sifão do Tanque de Lavagem, adicionado o diferencial de pressão da tubulação entre os mesmos, $\Delta P = 77$ mcl. Portanto, a elevação do bocal de transbordo de óleo do Tanque Flotador deverá ser 6.040 mm. Isso irá garantir o melhor aproveitamento da altura vertical desse Tanque Flotador, assim como, a não sobrecarga hidráulica no vertedouro vertical do sifão do Tanque de Lavagem.

3.1.2.3. Dimensões do Tanque Flotador

Por definição, de forma a minimizar o risco de transbordamento por equalização com o Tanque de Lavagem, em sistema com escoamento por gravidade, o Tanque Flotador deverá ter altura de 7.612 mm, igual à do Tanque de Lavagem.

Como a altura de transbordo, por limitação de escoamento por gravidade, conforme tópico 3.1.2.2 acima, são 6.040 mm, foi identificado o diâmetro do tanque que garantisse o tempo de residência solicitado, de 4 horas.

A partir da **Equação (11)** encontra-se um valor para o volume útil do tanque.

$$V_{\text{útil TQ}} = t_{\text{residência}} \times Q_{\text{carga}} \quad (11)$$

$$V_{\text{útil TQ}} = 4 \text{ h} \times 39,7 \text{ m}^3/\text{h} = 158,75 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{TQ}} = \frac{V_{\text{útil TQ}}}{85 \%} = \frac{158,75}{85 \%} = 186,76 \text{ m}^3 \quad (12)$$

Considerando a altura imposta pelo sifão do Tanque de Lavagem, 6.040 mm, e um diâmetro selecionado de 6.300 mm, pode ser visto a partir da **Equação (13)** o volume acima sendo atendido. Pois, o volume abaixo de 188,28 m³ atende ao volume calculado de 186,76 m³ pela **Equação (12)**.

$$V_{\text{calculado}} = \frac{\pi \times d_{\text{TQ}}^2 \times h_{\text{transbordo de óleo}}}{4} \quad (13)$$

$$V_{\text{calculado}} = \frac{\pi \times 6,3^2 \times 6,04}{4} = 188,28 \text{ m}^3$$

3.1.2.4. Cálculo do sifão do Tanque Flotador

Considerou-se a linha de centro do bocal de transbordo de óleo em 6.040 mm com novo bocal em 4 polegadas, atendendo ao item b do tópico 3.1.1.1.

Com base nas dimensões do tanque identificadas no tópico 3.1.2.3 e vazão de óleo proveniente do Tanque de Lavagem, foi identificado a altura de camada de óleo necessária para se atender a demanda de pelo menos 4 horas de tempo de residência mínimo. A partir da **Equação (1)**.

A seguir pode ser visto balanço para identificação da vazão de óleo considerando a carga do Tanque Flotador, com 200 ppm de óleo sendo carregado na água produzida proveniente do sifão do Tanque de Lavagem.

A partir dos Balanços de massa realizados referentes ao fluxo no Tanque de Lavagem e no Tanque Flotador nos **Quadros 5 e 6**, pode-se obter a vazão de óleo.

Quadro 5 - Fluxo no Tanque de Lavagem

Tanque de Lavagem	
Corrente 1 (Vem da Produção)	
Q total (m³/dia)	1049,3
Q total (m³/h)	43,72
Q óleo (m³/h)	3,97
Q água (m³/h)	39,75
Corrente 2 (Vai para os Tanques de produção)	
Q total (m³/d)	96,05
Q total (m³/h)	4
Corrente 3 (Vai para o Tanque Flotador, C = 200 ppm)	
Q total (m³/d)	953,3
Q total (m³/h)	39,7

Fonte: Autoria própria (2021).

Quadro 6 - Fluxo no Tanque Flotador

Tanque Flotador	
Eficiência de tratamento do Flotador	75 %
Corrente 3 (Água que vem do Tanque de Lavagem, C = 200 ppm)	
Q total (m³/dia)	953,3
Q total (m³/h)	39,7
Q óleo (m³/h)	0,007944
Q água (m³/h)	39,7
Corrente 4 (Vai para os Tanques de produção)	
Q total (m³/d)	0,14
Q total (m³/h)	0,006018
Corrente 5 (Vai para o Tanque pulmão de água produzida, C = 50 ppm)	
Q total (m³/d)	953,1
Q total (m³/h)	39,7

Fonte: Autoria própria (2021).

A partir do valor obtido de vazão de óleo, pode-se calcular a altura da camada de óleo pela **Equação (1)**.

$$h_{camada\ óleo} = \frac{4 \times 0,006018}{\pi \times 6,3^2 / 4} = 0,00077\ m = 0,8\ mm$$

Pode ser verificado que não se tem uma camada de óleo factível, portanto, foi considerado formação de camada de óleo de 250 mm e com essa altura foram desenvolvidos os cálculos para identificar qual o tempo calculado para formação dessa espessura de camada a partir da **Equação (1)**. A mesma servirá para criar um selo hidráulico para não haver passagem de água produzida para o armazenamento de óleo da Estação, assim como, permitir gerenciar melhor as flutuações do processo, assim como, suas interferências hidráulicas.

$$t_{residência} = \frac{\pi \times 6,3^2 / 4 \times 0,25}{0,006018} = 1295\ horas = 53\ dias$$

Assim, com folga e atendendo o fator de projeto, para especificação do óleo foi considerado a camada de óleo de 250 mm, e, essa camada de selo hidráulico será formada com aproximados 53 dias de operação.

3.1.2.5. Cálculo do vertedor do sifão

A vazão máxima de água produzida, com fator de projeto, que deixa o Tanque de Lavagem é de 953,3 m³/d (5.996 BPD), estimando com presença de 200 ppm de TOG.

3.1.2.5.1. Cálculo da cota do bocal de água produzida no sifão

O cálculo da cota do bocal de transbordo do tubo sifão de água produzida do Tanque Flotador também depende da cota de transbordo de óleo no bocal de saída de óleo a ser previsto, bocal de 4 polegadas, e da composição da camada líquida no Tanque Flotador, ou seja, da espessura da camada de óleo admitida e de água adotadas como operacionais.

Tem-se o cálculo do valor da cota de transbordo de óleo nos próximos itens.

3.1.2.5.2. Cálculo da carga hidráulica para o novo bocal de óleo do Tanque Flotador

O diâmetro do bocal de saída de óleo sobrenadante foi dimensionado em função da carga hidráulica que ele apresenta para a vazão de projeto.

Dados:

Diâmetro do bocal: = 4" (102,26 mm - aço carbono, classe 150);

Vazão de avaliação (óleo) = 0,006018 m³/h (0,91 BPD) (1% de água produzida).

Considerando-se a máxima carga hidráulica admissível em bocais tipo vertedor vertical igual a 75% do diâmetro do bocal, o cálculo da altura do líquido no bocal (carga hidráulica) foi efetuado pela **Equação (2)**.

Em que,

Q = vazão (m³/s) = 0,0000017 m³/s;

D = diâmetro do bocal (m) = 0,10226 m.

$$H = (0,0000015 / (1,518 \times 0,10226^{0,693}))^{1/1,807}$$

$$H = 0,001209 \text{ m} = 1,2 \text{ mm (1 \% do diâmetro do bocal)}$$

O valor encontrado foi muito baixo e será formado um pequeno filete de transbordamento, porém dentro do limite da carga hidráulica estabelecida como premissa, que corresponde até 75 % do diâmetro do ladrão (101,26 mm), portanto, o diâmetro do bocal de saída de óleo estimado atende ao requisito de limite da carga hidráulica (máximo de 75 % de D) em bocais vertedouros verticais.

3.1.2.5.3. Cálculo do nível de óleo no Tanque Flotador

O nível de óleo será correspondente à cota do bocal de óleo existente corrigido para a cota correspondente à carga hidráulica calculada no tópico anterior.

A cota do novo bocal de óleo são 6.040 mm, o diâmetro são 101,26 mm e a carga hidráulica: 1,2 mm, portanto, pode-se calcular a cota de transbordo de óleo pela **Equação (3)**.

$$Cota \text{ de transbordo} = \left(6040 - \frac{101,26}{2} \right) + 1,2 = 5990 \text{ mm}$$

3.1.2.5.4. Cálculo da cota do bocal de saída de água do sifão

Para o sifão do Tanque de Lavagem, tem-se:

Dados:

Nível de óleo no Tanque = 5.990 mm;

Espessura da camada de óleo = 250 mm;

Peso Específico do óleo (condições de operação) = 828,2 kg/m³;

Espessura do colchão de água = 5.740 mm;

Cota prevista para o novo bocal saída para o sifão = 350 mm;

Altura real da camada de água (5.740 – 350) = 5.390 mm (*);

Peso Específico da água (condições de operação) = 998 kg/m³.

(*) Altura real da camada de água considera a espessura do colchão menos a cota do bocal de saída de água do tanque.

Um adendo no cálculo da cota, com essa altura da camada de água, aplicou-se a **Equação (1)** para camada de água e foi possível identificar o tempo de residência para a água produzida no Tanque Flotador.

$$t_{\text{residência}} = \frac{\pi \times 6,3^2 / 4 \times 5,39}{39,7} \cong 4,5 \text{ horas}$$

Oteve-se que o tempo de residência para a água produzida no Tanque Flotador se estabelece na vazão de projeto de aproximadamente 4,5 horas. Isso permite velocidade de desprendimento gravitacional semelhantes em ambas as fases.

Quanto a cota dinâmica, esta corresponderá à cota estática adicionada da perda de carga na tubulação de transferência e no próprio tubo sifão.

A cota estática (h_{sf}) foi calculada pela **Equação (4)**.

$$h_{sf} = \frac{(h_{ag} \times \rho_{ag} + h_{ol} \times \rho_{ol})}{\rho_{ag}}$$
$$h_{sf} = \frac{(5390 \times 998 + 250 \times 828,2)}{998}$$
$$h_{sf} = 5597 \text{ mm}$$

A cota dinâmica foi calculada pela **Equação (5)** mais adiante.

3.1.2.5.5. Cálculo da perda de carga entre o Tanque e o sifão

Dados:

Diâmetro (d) = 8" (206,375 mm - aço carbono com revestimento orgânico interno, classe 150);

Vazão (Q) = 39,7 m³/h = 0,01104 m³/s (item d do tópico 3.1.1.1);

Coefficiente (C) = 130 (tubo de aço).

O cálculo da perda de carga unitária (j) foi feito pela **Equação (6)**.

$$j = 0,00068 \text{ m/ m}$$

A perda de carga na tubulação ($L_{eqSifão-TQ}$) foi calculada considerando os comprimentos equivalentes, válvulas e obteve-se o valor abaixo.

$$L_{eqSifão-TQ} = 47,6 \text{ m}$$

Sendo assim, a perda de carga da tubulação de interligação entre sifão e tanque ($J_{Sifão-TQ}$) foi obtida pela **Equação (7)**.

$$J_{Sifão-TQ} = 0,00068 \times 47,6$$

$$J_{Sifão-TQ} = 0,03245 \text{ m} = 32 \text{ mm}$$

Cálculo da perda de carga no sifão, considerando um tubo sifão de 10 polegadas. Importante observar que sifão e suas tubulações de comunicação, tanque/ sifão, deverão imprimir mínima perda de carga no sistema para que o mesmo não influencie negativamente na carga hidráulica dos bocais vertedouros além do previsto e recomendado ao serviço ora proposto para os mesmos.

Dados:

Diâmetro (d) = 10" (260,35 mm - aço carbono com revestimento orgânico interno, classe 150);

Vazão (Q) = 39,7 m³/h = 0,01104 m³/s (item d do tópico 3.1.1.1);

Coeficiente (C) = 130 (tubo de aço).

O cálculo da perda de carga unitária (j) foi feito pela **Equação (6)**.

$$j = 0,00022 \text{ m / m}$$

A perda de carga na tubulação ($L_{eqSifão}$) foi calculada pela **Equação (8)**.

$$L_{eqSifão} = 5,564 \text{ m}$$

Sendo assim, a perda de carga no sifão ($J_{Sifão}$) foi calculada pela **Equação (9)**.

$$J_{Sifão} = 0,00022 \times 5,564$$

$$J_{Sifão} = 0,00122 \text{ m} = 1,2 \text{ mm}$$

A altura da cota dinâmica (h_{sfd}) foi obtida pela **Equação (5)**.

$$h_{sfd} = 5597 - 32 - 1,2 = 5564 \text{ mm}$$

Para a cota dinâmica do sifão corrigida em relação ao fundo do tanque (h'_{sfd}), obteve-se:

$$h'_{sfd} = 5564 + 350 = 5914 \text{ mm}$$

3.1.2.5.6. Cálculo da carga hidráulica para o bocal vertedor do sifão com 10 polegadas

Cálculo do bocal de saída do sifão para vazão de projeto. O diâmetro do bocal de saída foi calculado em função da carga hidráulica que ele apresenta para a vazão de projeto.

Em função dos cálculos prévios foi calculado bocal de saída de 10 polegadas.

Verificação do diâmetro selecionado:

Dados:

Diâmetro da tubulação do ladrão = 10" (260,35 mm - aço carbono com revestimento orgânico interno, classe 150);

Vazão de projeto (água produzida) = 39,7 m³/h = 0,01104 m³/s.

Considerou-se como critério de aceitação a máxima carga hidráulica em bocais tipo vertedor vertical igual a 75 % do diâmetro do bocal.

O cálculo da altura do líquido no bocal foi realizado pela **Equação (2)**.

Em que,

Q = vazão (m³/s) = 0,01104;

D = diâmetro do bocal (m) = 0,26035.

$$H = (0,01104 / (1,518 \times 0,26035^{0,693}))^{1/1,807}$$

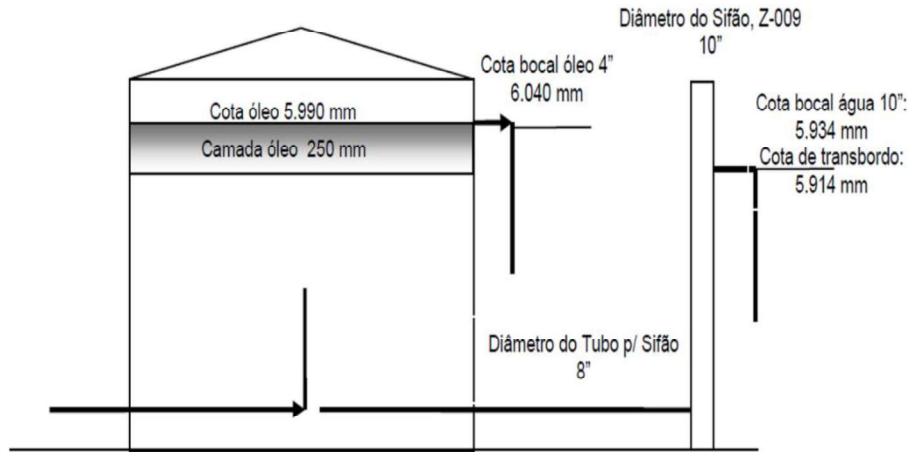
$$H = 0,109853 \text{ m} = 109,85 \text{ mm (42 \% do diâmetro do bocal)}$$

O valor encontrado atendeu a carga hidráulica como premissa de projeto, que deve ser abaixo de 75 % do diâmetro do ladrão (260 mm), portanto, o diâmetro do bocal de saída do sifão deverá ser de 10 polegadas.

Portanto, tubo sifão e bocal vertedouro em 10 polegadas, e, neste caso, a cota da linha de centro do bocal de saída de água produzida do sifão será de 5.934 mm, calculada a partir da cota dinâmica corrigida até o fundo, subtraída da carga hidráulica e adicionada do raio do bocal de 10 polegadas (5,914 – 109,85 + 260,35/2).

Tem-se a representação do Tanque Flotador e sifão na **Figura 3**.

Figura 3 - Representação do Tanque Flotador e sifão



Fonte: Autoria própria (2021).

3.1.2.6. Cálculo do Tubo Indutor do Tanque Flotador

Da mesma forma do tópico 3.1.1.3, a recomendação que deve ser seguida, como velocidade interna de desprendimento no tubo indutor, é de 200 a 300 mm/s. Isso é capaz de manter a separação gravitacional dentro de bons parâmetros no tanque. Também é recomendado que o término do tubo indutor esteja a pelo menos 1.500 mm da base da camada de óleo prevista, de forma a não promover muita interferência na zona de transição que é rica em emulsão.

Como no tópico 3.1.1.3, no cálculo do Tubo indutor do Tanque Flotador, pode ser visto que um tubo indutor interno de 10 polegadas é o adequado para as vazões de projeto, de acordo com o item d do tópico 3.1.1.1, como mostrado no **Quadro 7**.

Quadro 7 - Tubo indutor do Tanque Flotador

Condição de projeto	d1 = 206,38
Vazão (m³/h)	39,7
Massa específica (kg/m³)	998,0
Viscosidade (cP)	0,6
Área transferência (m²)	0,0532
Velocidade (m/s)	0,21
Reynolds	90307,7089
Regime de fluxo	Turbulento
Rugosidade (mm)	0,04572
E/ D	1,8 x 10 ⁻⁴
Fator de atrito	0,01923
Perda de carga (mcl)	0,01

Fonte: Autoria própria (2021).

3.1.2.7. Condição Normal de Produção

Para avaliação considerou-se,

Dados:

Vazão de projeto de óleo na entrada = 0,006018 m³/h (1 BPD)

Vazão de projeto de água na entrada/saída = 39,7 m³/h (5.995 BPD)

Os volumes então reservados a cada um dos líquidos, considerando a camada de óleo de 0,25 m e 5,390 m para a camada de água produzida foram:

Volume da camada de óleo = 7,8 m³

Volume da camada de água = 168,0 m³

Como resultado os tempos de residências verificados para cada um deles foi:

Tempo de residência do óleo = 1.295 h

Tempo de residência da água = 4,2 h

Tempo de residência da água até o fundo do tanque = 4,5 h

Considerando projetos semelhantes, os valores obtidos para a água encontram-se dentro do previsto.

Melhorias também podem ser obtidas na eficiência de separação com a adição de desemulsificantes na corrente de entrada do tanque, caso a emulsão se apresente com uma interação água/óleo mais forte do que o esperado à medida que o BSW sofra alteração ao

longo do tempo. Recomenda-se teste de separação gravitacional a diferentes temperaturas e BSW para melhor caracterização da emulsão de forma a se obter uma avaliação mais robusta para a instalação.

4. RESULTADOS

Em relação ao Tanque de Lavagem:

O Tanque padrão de 348 m³ foi avaliado para operar com uma camada de óleo de 650 mm. Tal avaliação foi considerando os dados técnicos do item b do tópico 3.1.1.1. Dimensões básicas: diâmetro de 7.637 mm e altura de 7.612 mm, com uma capacidade nominal de 348 m³;

No bocal de carga existente do tanque, com 8 polegadas, deverá ser previsto um prolongamento até o centro com expansão para 10 polegadas para instalação de tubo indutor vertical com altura de 4.000 mm. Esse permitirá estabilidade dentro do tanque, com o advento de velocidades baixas de admissão e com o ponto de instalação dentro do mesmo. Isso concorre com o favorecimento da separação gravitacional natural da emulsão óleo/água;

Foi previsto novo bocal para transbordo de óleo de 4 polegadas na cota de elevação: 6.748 mm. Para a vazão prevista de óleo a carga hidráulica foi de 43 %, portanto, dentro dos limites para vertedouros verticais (até 75 %);

Previu-se para a saída de água produzida novo bocal de 8 polegadas. O mesmo foi previsto com tubo coletor, visando minimizar a turbulência na seção onde já houve a separação e acomodação da água produzida. O tubo coletor deverá ser projetado até o centro do tanque e com duas curtas alimentações, com derivação em “T”, para redução da velocidade de aspiração;

Para a camada de óleo de 650 mm foi identificado tempo de residência para separação de 7,5 horas, portanto, dentro das 4 horas aqui recomendadas e com pleno atendimento ao histórico de tempo de separação da emulsão: 2 horas, lembrando que, considerando o BSW atual. Dessa forma, essa camada de 650 mm passa a ser mais relevante para garantir pulmão hidráulico para absorver flutuações e picos instantâneos de vazão do que para tempo de separação;

A camada de água produzida reservada no tanque também tem tempo de residência dentro do recomendado, e, dentro daqueles praticados para processos semelhantes de separação de emulsão água/ óleo. O tempo encontrado foi de $\pm 7,0$ horas. No entanto, também

é recomendado previsão de injeção de desemulsificante na alimentação. Trata-se de uma medida complementar para auxiliar na separação gravitacional, reduzindo perdas de receita, ou seja, óleo na água produzida;

Recomenda-se rotina de amostragem para TOG, tanto na carga, como saída de óleo e saída de água de forma a se acompanhar a rotina de separação e performance do Tanque de Lavagem.

Em relação ao sifão de Água Produzida do Tanque de Lavagem:

O sifão deverá estar na saída de água produzida do Tanque de Lavagem com o objetivo de manter a camada de óleo em sua espessura especificada, dentro do tempo recomendado para especificação;

O tubo sifão deverá ter pelo menos 10 polegadas de diâmetro. Deverá ser em tubo de Aço Carbono com revestimento interno ou em PRFV.

O bocal de saída de água (vertedouro) do sifão também deverá ser em pelo menos 10 polegadas, acompanhando o diâmetro do sifão;

A cota da linha de centro do bocal de transbordo do sifão, para garantir eficiência de separação e funcionamento adequado, foi obtida como 6.617 mm;

O sifão deverá ser construído com um carretel para ajuste de elevação do bocal vertedouro. Isso irá permitir que, caso haja ao longo da vida da instalação, alterações nas vazões e na qualidade de separação da mesma, o sifão possa ser adaptado para essa nova condição;

De suma relevância que a elevação da base do sifão seja a mesma elevação da base do Tanque de Lavagem, assim como, o comprimento linear da tubulação de interligação do tanque e o sifão não exceda 2,0 m e tenha o mínimo de acidentes e conexões.

Em relação ao Tanque Flotador:

O Tanque Flotador foi dimensionado para operar com uma camada de óleo de 250 mm. Dimensões básicas encontradas para o serviço de flotação: diâmetro de 6.300 mm e altura de 7.612 mm, com uma capacidade nominal 237 m³;

No bocal de carga do tanque, com 8 polegadas, deverá ser previsto um prolongamento até o centro com expansão para 10 polegadas para instalação de tubo indutor vertical com altura de 4.000 mm. Esse permitirá estabilidade dentro do tanque, com o advento de

velocidades baixas de admissão e com o ponto de instalação dentro do mesmo. Isso concorre com o favorecimento da separação gravitacional natural da emulsão óleo/água;

Foi previsto bocal para transbordo de óleo de 4 polegadas na cota de elevação: 6.040 mm. Para a vazão prevista de óleo a carga hidráulica foi de 1 %;

Previu-se para a saída de água produzida bocal de 8 polegadas. O mesmo foi previsto com tubo coletor, visando minimizar a turbulência na seção onde já houve a separação e acomodação da água produzida. O tubo coletor deverá ser projetado até o centro do tanque e com duas curtas alimentações, com derivação em “T”, para redução da velocidade de aspiração;

Para a camada de óleo de 250 mm foi identificado que levará cerca de 53 dias para a formação. Dessa forma, essa camada de 250 mm passa a ser mais relevante para garantir pulmão hidráulico para absorver flutuações e picos instantâneos de vazão do que para tempo de separação;

A camada de água produzida reservada no tanque também tem tempo de residência dentro do recomendado, e, dentro daqueles praticados para processos semelhantes de separação de emulsão água/ óleo. O tempo encontrado foi de $\pm 4,5$ horas. No entanto, também é recomendado previsão de injeção de desemulsificante na alimentação, para auxiliar na separação gravitacional, reduzindo perdas de receita, ou seja, óleo na água produzida;

Recomenda-se rotina de amostragem para TOG, tanto na carga, como saída de óleo e saída de água de forma a se acompanhar a rotina de separação e performance do Tanque Flotador.

Em relação ao sifão de Água Produzida do Tanque Flotador:

O sifão deverá estar na saída de água produzida do Tanque Flotador com o objetivo de manter a camada de óleo em sua espessura especificada, dentro do tempo recomendado para especificação;

O tubo sifão deverá ter pelo menos 10 polegadas de diâmetro. Deverá ser em tubo de Aço Carbono com revestimento interno ou em PRFV.

O bocal de saída de água (vertedouro) do sifão também deverá ser em pelo menos 10 polegadas, acompanhando o diâmetro do sifão;

A cota da linha de centro do bocal de transbordo do sifão, para garantir eficiência de separação e funcionamento adequado, foi obtida como 5.934 mm;

O sifão deverá ser construído com um carretel para ajuste de elevação do bocal vertedouro. Isso irá permitir que, caso haja ao longo da vida da instalação, alterações nas vazões e na qualidade de separação da mesma, o sifão possa ser adaptado para essa nova condição;

De suma relevância que a elevação da base do sifão seja a mesma elevação da base do Tanque Flotador, assim como, o comprimento linear da tubulação de interligação do tanque e o sifão não exceda 2,0 m e tenha o mínimo de acidentes e conexões.

5. CONCLUSÃO

Neste estudo, pode-se realizar os dimensionamentos do Sistema de Separação Primária (Tanque de Lavagem) e de Tratamento de água produzida por flotação composto por Tanque Flotador e injeção de polieletrólito.

O Tanque padrão de 348 m³ foi estudado para ser adaptado em um Tanque de Lavagem, e a partir disso pode-se definir as adequações necessárias. Ele foi avaliado para operar com uma camada de óleo de 650 mm. O Tanque Flotador foi dimensionado para operar com uma camada de óleo de 250 mm. Para isso, será necessário no bocal de carga de cada tanque, com 8 polegadas, um prolongamento até o centro com expansão para 10 polegadas para instalação de tubo indutor vertical com altura de 4.000 mm. Previu-se para o Tanque de Lavagem e o Tanque Flotador um bocal para transbordo de óleo de 4 polegadas para cada nas cotas de elevação de 6.748 mm e 6.040 mm, respectivamente. Foi previsto para a saída de água produzida bocal de 8 polegadas com tubo coletor para cada tanque. O tempo de residência identificado para a camada de óleo de 650 mm do Tanque de Lavagem para separação foi de 7,5 horas, para a camada de água produzida reservada no Tanque de Lavagem foi de $\pm 7,0$ horas e para a camada de água produzida reservada no Tanque Flotador foi de $\pm 4,5$ horas, ambos dentro do tempo recomendado e com atendimento ao histórico de tempo de separação da emulsão. Para a camada de óleo de 250 mm do Tanque Flotador foi identificado que levará cerca de 53 dias para a formação.

O tubo sifão do Tanque de Lavagem e o tubo sifão do Tanque Flotador deverão ter pelo menos 10 polegadas de diâmetro cada e deverão ser em tubo de Aço Carbono com revestimento interno ou em PRFV. O bocal de saída de água (vertedouro) de cada sifão também deverá ser em pelo menos 10 polegadas. A cota da linha de centro do bocal de transbordo do sifão do Tanque de Lavagem foi obtida como 6.617 mm e do sifão do Tanque

Flotador como 5.934 mm. A elevação da base do sifão do Tanque de Lavagem deve ser a mesma elevação da base do Tanque de Lavagem, assim como, a elevação da base do sifão do Tanque Flotador deve ser a mesma elevação da base do Tanque Flotador. E o comprimento linear da tubulação de interligação de cada tanque e seu sifão não deve exceder 2,0 m e deve ter o mínimo de acidentes e conexões.

Dessa forma, será possível implantar os sistemas citados, o que permitirá a utilização da água na injeção dos poços injetores, responsáveis por preservar a pressão nos reservatórios do campo, e assim aumentar o fator de recuperação de óleo do campo.

REFERÊNCIAS

FEITOSA, Ronnie Matos Tavares et al. Análise da viabilidade técnico-econômica nos métodos de tratamento de água produzida. **In: 2º Congresso Internacional RESAG - Gestão da água e monitoramento ambiental**, Aracaju, 2015.

CHAGAS, R. R. A. et al; Monitoramento Tecnológico das Técnicas de Tratamento de Água Produzida. **Revista GEINTEC**. São Cristóvão, v. 2, n. 3, p. 214-220, 2012. Disponível em: <<http://www.revistageintec.net/portal/index.php/revista/article/view/44>>. Acesso em: 20 abril 2014.

OGP, 2005. The International Association of Oil & Gas Producers. **Fate and effects of naturally occurring substances in produced water on marine environment**. Report 364. 36 p., 2005.

GABARDO, I. T. et al. **Caracterização do efluente da Plataforma Curimã (PCR-1)**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/processos/C657C5D3/GTCONAMAApresPetrobras.pdf>>. Acesso em: 15 abril 2014.

TSALIK, S.; SCHIFFRIN, A. **Reportando o petróleo, um guia jornalístico sobre energia e desenvolvimento**. Revenue Watch, Open Society Institute, Nova York, 2005.

SANTOS, T. R. T. dos; VIEIRA, M. F.; BERGAMASCO, R. Uso do Coagulante Natural Moringa Oleífera Lam no processo combinado de Coagulação/Floculação/Adsorção para minimização da formação de Trihalometanos. **IX Fórum Ambiental da Alta Paulista**, v. 9, n. 11, p. 131-141, 2013.

BORGES, Beatriz Bruna Gomes. **Tratamento da água produzida do petróleo para injeção em mananciais**. 2017. 78 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Engenharia de Petróleo, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Brasil, 2017.

JÚNIOR, Mabel Albuquerque Aragão. **Estudo fluidodinâmico e influência de dispositivos internos instalados em separadores atmosféricos gravitacionais de petróleo - Tanques de água livre**. 2011. 147 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2011.

NASCIMENTO, Rodrigo Scoralick Fontoura do; VILLA, Daniel Khéde Dourado. **Modelagem e Controle do Sistema de Nível de um Flotador Industrial**. 2019. Monografia (Aperfeiçoamento/Especialização em Automação e Controle de Processos Agrícolas e Industriais) - Universidade Federal de Viçosa, 2019.

SANTOS, Rafael Victor Gomes dos. **Tratamento de Água Produzida utilizando os processos de Flotação, Ozonização e Separação por membranas**. 2017. 146 f. Dissertação (Mestrado em Processos Químicos e Bioquímicos) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

GOMES, Emiliano Almeida. **Tratamento combinado da água produzida de petróleo por eletroflotação e processo Fenton**. 2009. 95 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) - Universidade Tiradentes, Aracaju, 2009.

MACHADO, D. M. O.; MEDINA, T. GABRIEL I.; COSTA, T. H. C. **Concepção e Dimensionamento de Sistema de Flotação por ar dissolvido em efluente de indústria têxtil**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

AZEVEDO NETTO, M. F. Fernandez, R. Araujo, A. E. Ito. **Manual de Hidráulica**. 9. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2015.

ARAÚJO, Virna Uchôa de. **Processamento primário de petróleo em campos terrestres**. 2015. 31 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Brasil, 2015.

API. **API RP 14E: Recommended Practice for Design and Installation of Offshore Production Platform Piping Systems**.

ABNT. **ABNT NBR 17505: Armazenagem de Petróleo, seus Derivados Líquidos e Álcool Carburante**.