

DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA DE OSMOSE REVERSA PARA REÚSO DE EFLUENTE NA INDÚSTRIA TÊXTIL

Luiz Vitor Mazorana Warmling¹

Débora De Pellegrin Campos²

Resumo: O presente estudo teve como objetivo principal dimensionar um sistema de osmose reversa com a finalidade de reúso em uma indústria têxtil para utilização nos processos de beneficiamento como: tingimento, branqueamento, desengomagem, estonagem e como água de alimentação na caldeira para geração de vapor utilizado na fábrica. Para o dimensionamento foi necessário realizar várias análises da água que foi utilizada na alimentação do sistema, tais como: pH, temperatura, amônio, cloretos, cálcio, magnésio, bário, estrôncio, sulfatos, condutividade, sólidos totais dissolvidos e entre outras, conforme o fornecedor das membranas de osmose reversa. O dimensionamento foi realizado através do software WAVE da DuPont, nele foi possível simular várias características de construção do projeto e adquirir os dados de concentrações dos íons nas correntes de concentrado e permeado. Além de atingir os parâmetros físico-químicos necessários para os processos da indústria, o projeto visou também atender ao apelo sustentável, pelo principal ideal de não utilizar recursos hídricos e nem os descartar no ambiente. Avaliou-se o custo de capital para implantação do projeto, com o orçamento das membranas, vasos de pressão, bombas e se obteve o valor de R\$ 220.214,42, considerado alto por conta das características do efluente, sugerindo um dimensionamento de sistema de ultrafiltração antes da osmose reversa, aumentando assim a capacidade de recuperação das membranas e a vazão de permeado.

Palavras-Chave: Dimensionamento. Osmose Reversa. Reúso.

1 INTRODUÇÃO

A diminuição dos recursos naturais provocados pela seca e crescimento populacional, somado a degradação decorrente dos recursos hídricos, que podem torná-los impróprios para diversos usos, criam um cenário cada vez mais desafiador para a sua preservação. Em virtude dessa redução, as autoridades governamentais estão incentivando as indústrias a estabelecerem sistemas de reúso de águas residuais (AMAR et al., 2009).

A busca por equilíbrio entre o consumo nas indústrias e a disponibilidade de água é um grande desafio para a preservação dos recursos hídricos, porém, é

¹ Graduando em Engenharia Química. E-mail: luizmazorana15@gmail.com

² Professora do Centro Universitário UniSATC. E-mail: debora.campos@satc.edu.br

necessário um controle sobre a captação, procurando reduzir os impactos sobre estes recursos e de outro lado tem-se a busca por sistemas alternativos de uso de água (RODRIGUES, 2005).

O reúso de água é um instrumento para reduzir os impactos ao meio ambiente e pode ser considerado um recurso complementar, em função disso a reutilização de água está em uma crescente no Brasil, impulsionado pelo apelo sustentável e pelos impactos financeiros causados pela Lei N° 9.433 de 1997. A Lei visa a implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos, que tem como objetivo estabelecer critérios gerais para a outorga de direitos de uso de recursos hídricos e a cobrança por seu uso (BRASIL, 1997; RODRIGUES, 2005).

Atualmente as indústrias têxteis são grandes consumidoras de recursos hídricos para realizar operações como: tingimento, branqueamento e limpeza, sendo estes, processos que consomem um grande volume de água e de produtos químicos. Como o efluente gerado em lavanderias possui grande variação dependendo do processo que está sendo realizado, muito por causa da sazonalidade das peças que são produzidas, atrelado a dificuldade de recuperar os produtos e subprodutos provenientes do processo, sendo esses, grandes desafios enfrentados pelo setor para implantar sistemas de reúso do recurso (SCHOENHALS; PORTO, 2013).

A osmose reversa é uma tecnologia de tratamento de água amplamente utilizada em todo o mundo. Ela é capaz de remover uma ampla gama de contaminantes da água, incluindo sais minerais e produtos químicos, tornando-a adequada para uma variedade de aplicações industriais, como fabricação de alimentos, produtos químicos, eletrônicos e tratamento de água para consumo humano (DUPONT, 2023).

Tema de grande importância para a indústria e para a sociedade em geral, a osmose reversa é uma solução eficaz e eficiente para a purificação da água e a proteção dos recursos hídricos do planeta (DUPONT, 2023).

A osmose reversa é utilizada para produzir água pura e de alta qualidade para diversas aplicações industriais e de consumo humano. Esta tecnologia tem um papel fundamental no contexto atual, em que a água potável é um recurso cada vez mais escasso e a necessidade de preservar os recursos hídricos torna-se cada vez mais urgente. Este trabalho busca solucionar os problemas de formação de biofilme, incrustações e outros obstáculos que possam afetar sua performance (JIANG; LI; LADEWIG, 2017).

Sendo assim, este trabalho busca avaliar o dimensionamento de um sistema de osmose reversa, como tecnologia de tratamento de águas residuais para reúso em lavanderias têxteis, com foco principalmente para os processos de beneficiamento têxtil e como água de alimentação para a caldeira, avaliando suas vantagens e desvantagens, além de discutir a eficiência do tratamento e seu impacto ambiental. Por essas razões, a realização de um estudo sobre esse tema é justificada e pode contribuir para a busca por soluções mais eficazes e sustentáveis para o tratamento de água.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A seguir será apresentada a fundamentação teórica sobre a importância da qualidade da água na indústria têxtil e aspectos e informações sobre o processo de osmose reversa.

2.1 IMPORTÂNCIA DA QUALIDADE DA ÁGUA DE REÚSO

De acordo com cada aplicação o nível de qualidade da água pode apresentar variações significativas. Diferentes aplicações requerem que múltiplos parâmetros sejam atendidos, a fim de minimizar os riscos associados ao processo, produto ou sistema em que a água será utilizada. Na literatura, existem limites de tolerância e restrições para a qualidade da água utilizada em processos têxteis, que podem variar de acordo com o processo a ser realizado (RIBEIRO, 2009).

Um dos principais parâmetros a serem controlados na água utilizada nos processos têxteis é a sua dureza, que é causada pela presença de sais solúveis de metais, incluindo cálcio e magnésio. Embora o ferro, sais de alumínio e cobre também possam contribuir para a dureza da água, seus efeitos são menores. O uso de água dura nos processos pode acarretar diversos problemas, como a formação de incrustações em caldeiras, reações com sabões e detergentes, interferência na reação com corantes e problemas devido ao ferro (FERNANDES, 2010).

No geral, além do controle da dureza, é necessário monitorar mais alguns parâmetros analíticos para a utilização da água em processos têxteis, como: pH (potencial hidrogeniônico), cor, turbidez, cloro livre, ferro, manganês, sulfato, sólidos totais dissolvidos (STD) e sólidos suspensos. Quando controlados, esses parâmetros

ajudam a manter a homogeneidade do processo, evitando problemas como manchas, riscos, diferença de tonalidade na cor de tingimentos, entre outros defeitos (RESENDE, 2012).

Todavia, vale ressaltar que não há uma legislação específica que determine a qualidade final da água de reúso, porém, existem limites específicos e tolerâncias para a água utilizada nestes processos, conforme a Tab. 1 (RESENDE, 2012).

Tabela 1: Requisitos da água para a realização de processos têxteis.

	Cor (UH)	Dureza total (mg/l)	Ferro (mg/l)	Manganês (mg/l)	pH	STD (mg/l)	Sólidos suspensos (mg/l)
Engomagem	5	25	0,3	0,05	6,5 – 10,0	100	5
Lavagem	5	25	0,1	0,01	3,0 -10,5	100	5
Branqueamento	5	25	0,1	0,01	2,0 – 10,5	100	5
Tingimento	5	25	0,1	0,01	3,5 – 10,0	100	5

Fonte: Adaptado de Resende (2012, p. 19)

A utilização de água de reúso em caldeiras pode ser viável, porém depende da eficiência do tratamento aplicado. Tal aplicação é de particular interesse para lavanderias têxteis, as quais demandam vapor para aquecimento da água utilizada em processos como desengomagens, branqueamento e tingimento. Todavia, a adoção de tal prática requer a observância de parâmetros rigorosos de qualidade da água de alimentação, os quais variam de acordo com o modelo e a classificação da caldeira utilizada em cada indústria (SANTOS, 2018).

Problemas como depósitos, que são formações sólidas depositadas no interior ou exterior dos tubos, formados principalmente por sílica e sais de cálcio e magnésio, quando existentes prejudicam a troca térmica e podem provocar superaquecimento dos tubos. A corrosão, por sua vez, é o processo de oxidação do metal utilizado nos tubos, causando perda de material, formados principalmente pelo excesso de oxigênio, teores elevados de cloro e a presença de íons cobre e níquel na água de alimentação da caldeira, portanto, a Tab. 2 demonstra alguns parâmetros de qualidade da água em caldeiras (ZARPELON; AZZOLINI, 2015).

Tabela 2: Parâmetros básicos de tratamento de caldeiras de baixa e média pressão.

Pressão (kgf/cm²)	0 – 21,1	21,1 – 31,6	31,6 – 42,2
Oxigênio Dissolvido (OD) (mg/l)	≤ 0,007	≤ 0,007	≤ 0,007
Ferro total (mg/l)	≤ 0,1	≤ 0,05	≤ 0,03
Cobre total (mg/l)	≤ 0,05	≤ 0,025	≤ 0,02
Dureza total (mg/l)	≤ 0,3	≤ 0,3	≤ 0,2
pH	8,3 - 10	8,3 - 10	8,3 - 10
Carbono Orgânico Total (COT) (mg/l)	≤ 1	≤ 1	≤ 0,5

Fonte: Adaptado de Santos (2018)

Os métodos de tratamento utilizados para a remoção destes interferentes presentes na água são vários, tais como abrandamento, desmineralização, filtração em areia, desaeração, entre outros. No entanto, a osmose reversa tem se destacado como uma técnica de alta eficiência para remoção de contaminantes orgânicos e inorgânicos em água de reúso. A osmose reversa utiliza membranas semipermeáveis para remover íons, compostos orgânicos e outras impurezas da água. Esse processo é capaz de remover até 99% dos contaminantes presentes na água, resultando em uma água de alta qualidade e segura para uso (FILHO, 2023).

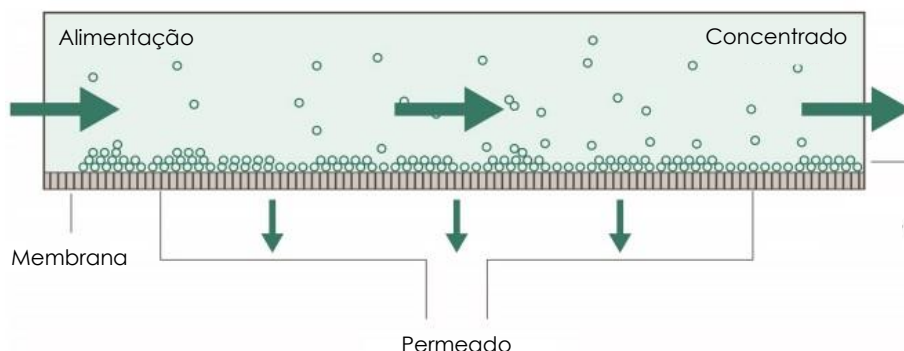
2.2 TRATAMENTO POR OSMOSE REVERSA

Desde o desenvolvimento da osmose reversa (OR) como operação unitária prática no final dos anos 1950 e início dos anos 1960, a aplicação dessa técnica tem se expandido continuamente. Inicialmente, a osmose reversa era aplicada na dessalinização de água do mar e salobra. A crescente demanda da indústria por conservação de água, redução do consumo de energia, controle da poluição e recuperação de materiais úteis de correntes de resíduos tornou novas aplicações economicamente atraentes (DUPONT, 2023).

Para remover partículas pequenas e sais dissolvidos, é comum utilizar a técnica de filtração de membrana de fluxo tangencial. Nesse método, um fluxo de alimentação pressurizado flui paralelamente à superfície da membrana. Uma parte desse fluxo passa pela membrana, deixando as partículas rejeitadas na parte

concentrada do fluxo (Fig. 1). Como o fluxo é contínuo, as partículas rejeitadas não se acumulam e são levadas pelo fluxo concentrado (RIBEIRO, 2020).

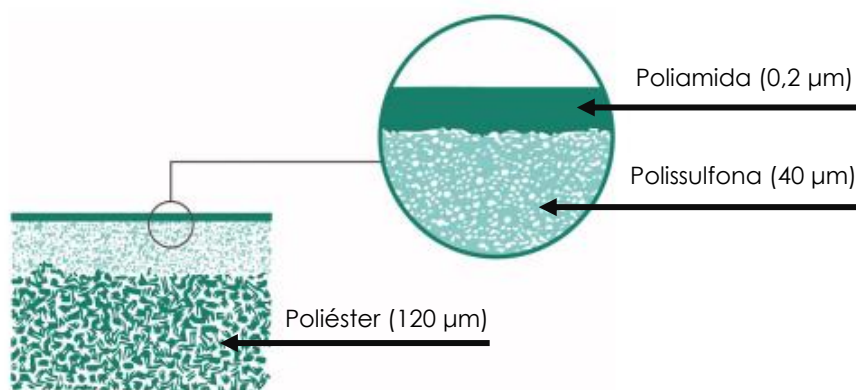
Figura 1: Processo de Osmose Reversa.



Fonte: Adaptação de DuPont (2023)

A membrana é composta por um filme fino de três camadas, uma rede de suporte de poliéster, uma camada microporosa de polissulfona e uma barreira ultrafina de poliamida na superfície exterior, conforme a Fig. 2 (DUPONT, 2023).

Figura 2: Esquema da seção de uma membrana.



Fonte: Adaptação de DuPont (2023)

O processo de osmose reversa requer uma pressão externa que exceda a pressão osmótica para impulsionar o líquido através da membrana, sendo a força mais comumente gerada pela pressão fornecida por uma bomba de alta pressão instalada logo antes da membrana. Quanto maior a pressão, maior a força direcional. À medida que a concentração do líquido aumenta devido à retenção dos rejeitos pela

membrana, maior será a pressão necessária para continuar concentrando o líquido (SILVA; QUIRINO, 2020).

2.3 PRÉ-TRATAMENTOS PARA ÁGUA DE ALIMENTAÇÃO

A obstrução e incrustação de membranas são problemas graves em processos de tratamento que as utilizam, como a osmose reversa. No caso da dessalinização de água salobra/marítima, o pré-tratamento do líquido é uma etapa crucial na concepção do processo para prevenir a obstrução e incrustação da membrana e reduzir a frequência de limpeza. O pré-tratamento apropriado é um aspecto fundamental na tecnologia de osmose reversa para garantir uma operação eficiente da planta e um desempenho de tratamento adequado (KHANZADA; KHAN; DAVIES, 2017).

Diversos estudos investigaram amplamente as incrustações de membrana em osmose reversa. Geralmente, quatro tipos de incrustações são identificáveis: (i) incrustações particuladas e coloidais, (ii) incrustações inorgânicas, (iii) incrustações orgânicas e (iv) bioincrustações. As incrustações particuladas costumam ser causadas por partículas suspensas ($> 1 \mu\text{m}$) ou partículas coloidais ($< 1 \mu\text{m}$), como detritos finos, detritos, partículas de ferro e manganês e sílica coloidal. Esses tipos de incrustações são, em geral, eliminados antes do processo de osmose reversa por meio de processos convencionais de pré-tratamento, como coagulação, floculação e filtração e mais recentemente, por processos de filtração de membrana de baixa pressão (micro e ultrafiltração) (CORNELISSEN et al., 2021).

A ultrafiltração desempenha um papel essencial como etapa de pré-tratamento antes do processo de osmose reversa. Ao remover partículas sólidas suspensas, a ultrafiltração evita danos e obstruções nas membranas de osmose reversa. Além disso, reduz a carga orgânica, prevenindo a degradação das membranas e a formação de bioincrustações. A remoção de impurezas durante a ultrafiltração também contribui para proteger as membranas de incrustações e depósitos, melhorando sua eficiência (KHANZADA; KHAN; DAVIES, 2017).

A qualidade da água tratada é significativamente aprimorada pelo pré-tratamento de ultrafiltração, resultando em água de alta qualidade com baixa turbidez, menor presença de microrganismos e menor concentração de matéria orgânica. Além disso, a ultrafiltração reduz a carga nas membranas de osmose reversa, resultando

em menor pressão e economia de energia. Por fim, esse pré-tratamento prolonga a vida útil das membranas, reduzindo custos de manutenção e substituição (KHANZADA; KHAN; DAVIES, 2017).

De acordo com Flynn (2018), as membranas utilizadas em osmose reversa e nanofiltração necessitam de um pré-tratamento mais complexo que as usadas em microfiltração e ultrafiltração, conforme a Tab. 3.

Tabela 3: Lista de parâmetros de pré-tratamento e tratamentos típicos para vários contaminantes potenciais.

Item	Unidade	Valor recomendado	Técnicas de tratamento
Turbidez	NTU	< 1	Filtros multimídia
Coloides	SDI	< 5	Filtros multimídia, filtração por membrana (Microfiltração (MF), Ultrafiltração (UF))
Orgânicos (COT)	mg/l	< 3	Clarificação, filtros de carvão
Cor verdadeira	Pt-Co	< 3	Clarificação
Ferro, Manganês	mg/l	< 0,05	Oxidação, filtros de pirolusita
Alumínio	mg/l	< 0,05	UF + acidificação para pH 6,5
Oxidantes	mg/l	< 0,02	Filtros de carvão, bissulfito de sódio
Micróbios	CFU	< 1000	Filtração por membrana (MF, UF), oxidação
Carbonato de cálcio	LSI	< 0	Ácido
Bário, Estrôncio	mg/l	< 0,05	Abrandamento, anti-incrustantes
Sílica solúvel	mg/l	140 - 200	Anti-incrustantes, ácido (pH < 5) ou base (pH > 9), redução da recuperação do sistema
pH	-	3 - 10	Ácido ou base
Temperatura	°C	< 35	Trocador de calor

Fonte: Adaptado de Flynn (2018)

2.4 PROBLEMAS OPERACIONAIS

Durante a operação regular e prolongada, as membranas de osmose reversa podem ser submetidas a incrustação por materiais suspensos ou solúveis presentes na água de alimentação. Essas incrustações podem incluir carbonato de cálcio, sulfato de cálcio, óxidos de metais, sílica e depósitos orgânicos ou biológicos. É importante monitorar regularmente o desempenho da osmose reversa para reconhecer quando as membranas estão ficando incrustadas. A eliminação de incrustações é realizada através de limpeza e lavagem rápida, além de mudanças

preventivas nas condições de operação. Em geral, a eliminação de incrustações é necessária quando ocorre qualquer uma das seguintes condições (FRISCHKORN, 2009):

- A vazão do permeado diminui em 10-15% abaixo do normal;
- A pressão da água de alimentação aumenta em 10-15% para manter a vazão do permeado;
- A qualidade da água do permeado diminui em 10-15%, aumentando a passagem de sal;
- O diferencial de pressão através de um estágio de osmose reversa aumenta.

Em geral, são adotados alguns valores para queda de pressão entre a alimentação e o concentrado através de um único elemento ou vaso do sistema de osmose e nunca deve exceder os valores de 0,10 MPa por elemento único e de 0,34 MPa por vaso de pressão (TORAY, 2022).

Através dos controles citados e de análises físico-químicas realizadas na água de alimentação, concentrado e permeado da osmose reversa, é possível identificar o provável causador do problema e com isso, escolher a melhor limpeza química. A Tab. 4 demonstra o melhor tratamento para cada contaminante (DUPONT, 2023).

Tabela 4: Soluções de limpeza simples para incrustações diversas.

Incrustante	Solução
Sais inorgânicos (como ex., CaCO ₃)	0,2% HCl (pH 1-2, 25°C)
Sulfatos (CaSO ₄ , BaSO ₄)	0,1% NaOH e 1,0% Na ₄ EDTA ⁽¹⁾ (pH 12, 35°C máx.)
Óxidos metálicos (como ex., ferro)	1,0% Na ₂ S ₂ O ₄ (pH 5, 25°C)
Coloides inorgânicos (lodo)	1,0% Na ₂ S ₂ O ₄ (pH 5, 25°C)
Sílica	0,1% NaOH e 0,025% Na-DSS ⁽²⁾ (pH 12, 35°C máx.)
Biofilme	0,1% NaOH e 0,025% Na-DSS (pH 12, 35°C máx.)
Orgânicos	0,1% NaOH e 0,025% Na-DSS (pH 12, 35°C máx.)

(1) Ácido etilenodiaminotetracético tetrassódico.

(2) Sal de sódio de dodecilsulfato; lauril sulfato de sódio.

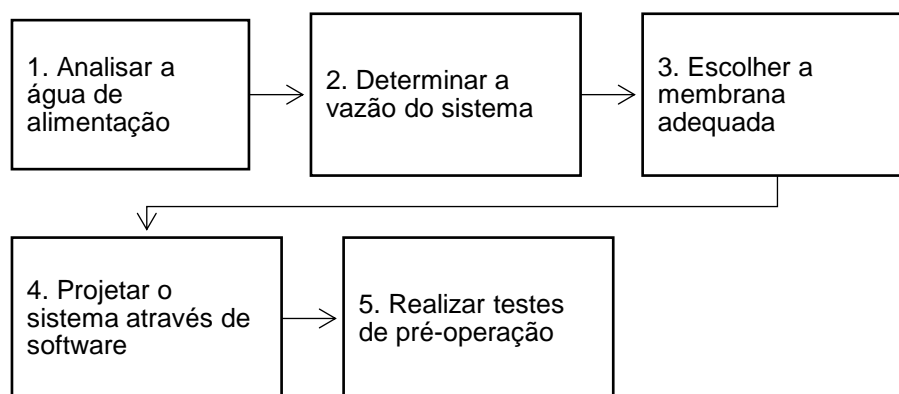
Fonte: Adaptado de DuPont (2023)

Durante a operação de sistemas de osmose reversa, é necessário realizar uma lavagem química preventiva das membranas, mas esse procedimento também pode afetar negativamente a vida útil da membrana. Normalmente, a escolha da solução de limpeza é baseada na análise físico-química dos elementos maiores na água de alimentação, sem considerar os elementos mais raros. Infelizmente, essa abordagem pode levar a escolha inadequada da solução de lavagem, danificando a membrana. Para evitar isso, em casos em que várias membranas são usadas em condições semelhantes, é recomendado sacrificar uma membrana para identificar quaisquer incrustações e, assim, permitir uma limpeza mais adequada e específica (FRISCHKORN, 2009).

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para o dimensionamento de um sistema de osmose reversa é importante salientar que é necessário seguir um passo a passo com o objetivo de organizar de que forma serão realizadas as tarefas, a fim de entender melhor o efluente com que se está trabalhando, para o que será usada a água tratada, quais vazões irão alimentar o sistema, dentre outros fatores. O dimensionamento visou garantir uma maior precisão do sistema, reduzindo riscos que podem ocorrer por conta de um subdimensionamento, otimizar o desempenho e facilitar a manutenção, a Fig. 3 apresenta o fluxograma do procedimento experimental.

Figura 3: Fluxograma do procedimento experimental utilizado para o dimensionamento.



Fonte: Adaptado de Ramos e DuPont (2023)

1. Coletou-se informações sobre a qualidade da água de alimentação:

- Realização de testes físico-químicos, microbiológicos e análises de cátions e ânions presente na água. Estas análises foram realizadas no laboratório LABSATC, conforme abaixo:
 - Condutividade;
 - pH;
 - Temperatura (°C);
 - Amônio (NH₄⁺);
 - Potássio (K⁺);
 - Sódio (Na⁺);
 - Magnésio (Mg²⁺);
 - Cálcio (Ca²⁺);
 - Bário (Ba²⁺);
 - Estrôncio (Sr²⁺);
 - Ferro (Fe²⁺);
 - Manganês (Mn²⁺);
 - Alumínio (Al³⁺);
 - Nitratos (NO₃⁻);
 - Carbonatos (CO₃²⁻);
 - Bicarbonatos (HCO₃⁻);
 - Cloretos (Cl⁻);
 - Fluoretos (F⁻);
 - Sulfatos (SO₄²⁻);
 - Fosfatos (PO₄²⁻);
 - Sílica solúvel (SiO₂);
 - Demanda bioquímica de oxigênio;
 - Demanda química de oxigênio;
 - Carbono orgânico total;
 - Turbidez;
 - Cloro livre.
- Registrou-se informações sobre a fonte de água, como rios, lagos, poços ou água de reúso.

2. Determinação da vazão desejada do sistema de osmose reversa:

- Avaliação da demanda de água do processo ou da aplicação específica, através da coleta de dados de um hidrômetro ou medidor de vazão por ao menos 3 meses, para obtenção de uma média com maior assertividade, estimando as variações que podem ocorrer;
- Levou-se em consideração a perda de pressão ao longo do sistema.

3. Escolha da membrana para o sistema:

- Seleção da membrana de osmose reversa apropriada para as condições de alimentação, vazão e pressão;
- Consideração dos fatores como a rejeição de sólidos, taxa de fluxo, durabilidade e custo, sendo estes, obtidos através de cálculos realizados pelo software WAVE (Water Application Value Engine).

4. Projeto do sistema de osmose reversa:

- Dimensionamento dos componentes do sistema, como a bomba de alta pressão, vasos de pressão, a membrana de osmose reversa e os tanques de armazenamento;
- Configuração do sistema para operar dentro dos limites de pressão, fluxo e temperatura recomendados pela membrana de osmose reversa selecionada.

5. Realização dos testes de pré-operação:

- Execução de testes de pré-operação para verificar o funcionamento correto do sistema e garantir que os componentes estejam adequadamente instalados e configurados;
- Verificação da qualidade da água de permeado para assegurar que atenda aos padrões de pureza desejados, que serão simulados através de software.

Na última etapa foi realizada a análise do custo total de implantação do projeto de osmose reversa, levando em consideração todos os fatores que implicam no projeto, tal como, custo de aquisição dos equipamentos (membranas), vasos de pressão e bombas de alta pressão), considerando assim a possibilidade de implantação deste projeto na indústria têxtil.

O software WAVE é um sistema para modelagem de plantas para tratamento de água, software este que integra sistemas de ultrafiltração, osmose reversa e trocadores de íons. O programa foi lançado em 2017 e substituiu o antigo software utilizado para cada uma das tecnologias de tratamento. O WAVE possui várias funções, tais como: informações de entrada do projeto, especificações da água de alimentação, configuração do sistema de osmose reversa, ajuste químico, geração de relatórios de revisão do projeto (KUCERA, 2023).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta etapa serão demonstrados todos os resultados das análises realizadas no laboratório LABSATC e os resultados do dimensionamento do sistema de osmose reversa realizados no software WAVE, sendo este o mesmo fornecedor da membrana escolhida.

As análises da água de alimentação, realizadas no LABSATC estão demonstradas na Tab. 5.

Tabela 5: Resultados das análises realizadas no laboratório LABSATC.

Análise	Metodologia	Resultado	Unidade	LQ*
Alcalinidade de Bicarbonatos	SMWW, 23ª Edição, Método 2320 B / PO-081	73,10	mg/L CaCO ₃	0,69
Alcalinidade de Carbonatos	SMWW, 23ª Edição, Método 2320 B / PO-081	< 0,69	mg/L CaCO ₃	0,69
Alumínio Total	SMWW, 23ª Edição, Método 3120 B / PO-248	< 0,1	mg/L	0,100
Amônio	SMWW, 23ª Edição, Método 4500-NH ₃ F / PO-262	30,186	mg/L	3,151
Bário Total	SMWW, 23ª Edição, Método 3120 B / PO-248	< 0,1	mg/L	0,100
Cálcio Total	SMWW, 23ª Edição, Método 3120 B / PO-248	16,060	mg/L	0,100
Carbono Orgânico Total	PO-110	6,19	mg/L	1,00
Cloretos	SMWW, 23ª Edição, Método 4500-CI-B / PO-082	74,30	mg/L	8,556
Cloro Livre	SMWW, 23ª Edição, Método 4500-CI G / PO-262	< 0,051	mg/L	0,051
Condutividade	SMWW, 23ª Edição, Método 2510 B / PO-101	824,9	µS/cm	1 - 19990
Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)	SMWW, 23ª Edição, Método 5210 D / PO-145	4,50	mg/L	4
Demanda Química de Oxigênio (DQO)	SMWW, 23ª Edição, Método 5220 D / PO-262	29,65	mg/L	7,743
Estrôncio Total	SMWW, 23ª Edição, Método 3120 B / PO-248	0,050	mg/L	0,010
Ferro Total	SMWW, 23ª Edição, Método 3120 B / PO-248	0,177	mg/L	0,100
Fluoreto	SMWW, 23ª Edição, Método 4500-F- D / PO-262	0,36	mg/L	0,130
Magnésio Total	SMWW, 23ª Edição, Método 3120 B / PO-248	3,476	mg/L	0,100
Manganês Total	SMWW, 23ª Edição, Método 3120 B / PO-248	0,272	mg/L	0,100
Nitrato	SMWW, 23ª Edição, Método 4500-NO ₃ - B / PO-262	0,852	mg/L	0,015
pH (21,5°C)	SMWW, 23ª Edição, Método 4500- H+ B / PO-079	7,19	-	2 a 12
Potássio Total	SMWW, 23ª Edição, Método 3120 B / PO-248	5,281	mg/L	0,100
Sílica	SMWW, 23ª Edição, Método 3120 B / PO-248	7,914	mg/L	0,100
Sódio Total	SMWW, 23ª Edição, Método 3120 B / PO-248	84,410	mg/L	0,500
Sulfatos	SMWW, 23ª Edição, Método 4500-SO ₄ 2- E / PO-100	149,77	mg/L	9,461
Temperatura da Amostra	SMWW, 23ª Edição, Método 2550 B / PO-141	21,5	°C	0 - 30
Turbidez	SMWW, 23ª Edição, Método 2130 B / PO-104	1,24	NTU	0,138

*Limite de Quantificação

Fonte: Do autor (2023)

A fonte da água de alimentação é de uma lagoa de aeração, logo após o processo de tratamento físico-químico por coagulante e polímero. A amostragem foi realizada através de um frasco de plástico com volume de 2 litros e coletada no ponto de saída da lagoa de aeração, foram coletados 2 litros do efluente analisado, volume suficiente para o laboratório terceirizado realizar as análises necessárias.

Os resultados das análises foram satisfatórios para ser realizado o tratamento por osmose reversa, sendo que os principais causadores de problemas, como: estrôncio, bário e cloro livre, apresentaram valores consideravelmente baixos.

Conforme o procedimento experimental, foi necessário também adquirir dados sobre o consumo de água para poder avaliar os valores para os cálculos realizados no dimensionamento, foram utilizados os dados de consumo de água nos processos da indústria de maio até outubro de 2023, valores estes, da média de consumo por hora durante o mês, ilustrado na Tab. 6.

Tabela 6: Consumo de água médio mensal.

Mês	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Média
Valor (m³/h)	20,75	18,75	19,55	18,34	19,53	18,66	19,26

Fonte: Do autor (2023)

Com a coleta de dados sobre o consumo realizada, foi necessário informar a origem da água a ser tratada pela osmose reversa, sendo um efluente de indústria com pré-tratamento convencional, já que esta informação impacta diretamente no dimensionamento, restringindo a máxima recuperação de água da membrana e vazão de permeado produzida, conforme a Tab. 7 (DUPONT, 2023).

Tabela 7: Diretrizes de projeto para elementos Filmtec™ na indústria.

Dados da Alimentação	Permeado de OR	Água de poço	Água de abastecimento	Superfície	Efluente	
					MF ¹	Convencional
SDI na alimentação (%/min)	SD1 < 1	SD1 < 3	SD1 < 3	SD1 < 5	SD1 < 3	SD1 < 5
Fluxo típico (l/m ² .h)	37	30	27	24	22	19
Recuperação máxima do elemento (%)	30	19	17	15	14	12

1: Microfiltração, processo contínuo que utiliza membrana microporosa <0,5 µm.

Fonte: Traduzido de DuPont (2023)

O SDI (Silt Density Index) é um parâmetro amplamente utilizado que mede a quantidade total de sólidos em suspensão nas fontes de água. Este índice informa sobre possíveis problemas com incrustações nas tecnologias de tratamento de água (PURE AQUA, 2023).

Seguindo as diretrizes de projeto, foram utilizados como limite para o dimensionamento um SDI <5 (sendo considerado este valor por conta de o tratamento precedente ser um tratamento convencional para efluentes, sem nenhuma filtração pós-tratamento), além de um fluxo típico de no máximo 19 l/m².h e uma recuperação máxima do elemento de 12%.

Com isso foi avaliado o modelo de membrana a ser utilizado, conforme os dados obtidos sobre vazão, tipo de efluente, pressão máxima de alimentação (esta obtida através do sistema). Serão utilizados dois tipos de membranas, a BW30HR-440i e a LC HR-4040, ambas da DuPont, apresentadas na Fig. 4.

Figura 4: Membranas utilizadas no projeto.



Fonte: DuPont (2023)

A escolha destas membranas se devem principalmente a sua alta taxa de rejeição de sais com uma grande área de contato, sendo esta importante para o dimensionamento, pois a área de contato influencia diretamente na quantidade de membranas utilizadas e na vazão mínima necessária na membrana.

Portanto, com a escolha das membranas já realizada foi necessário buscar os dados de sua ficha técnica, como comprimento, área da membrana, pressão máxima de operação, entre outros, a fim de obter as informações para inserir no software WAVE. Estas informações estão descritas conforme a Tab.8.

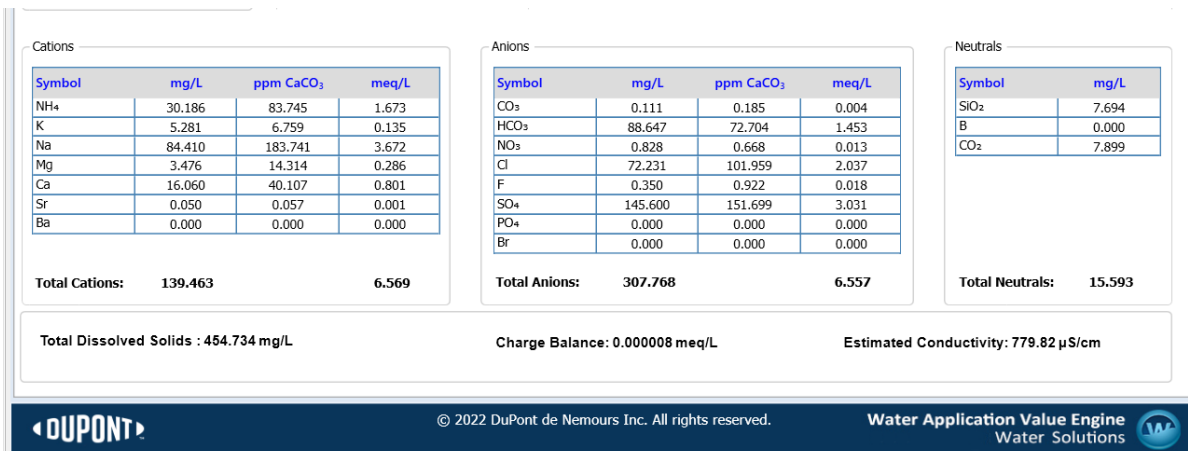
Tabela 8: Dados técnicos das membranas utilizadas no projeto.

Especificações do produto	Unidade	BW30HR-440i	LC HR-4040
Área da membrana	m ²	41	8,7
Rejeição de sais nominal	%	99,7	99,7
Vazão de permeado	m ³ /d	48	11
Pressão máxima de operação	bar	41	41
Temperatura máxima	°C	45	45
SDI máximo na entrada	-	5	5
Cloro livre máxima na entrada	ppm	< 0,1	< 0,1
pH na água de alimentação	-	2 - 11	2 - 11
Diâmetro	mm	201	99
Comprimento	mm	1016	1016

Fonte: DuPont (2023)

Com todos os dados obtidos nas etapas anteriores, utilizando o software WAVE é possível inserir os dados de vazão de alimentação e os valores das análises realizadas, o software através dos dados das análises informa o percentual de saturação de algum sal existente no efluente que possa comprometer a operação do sistema de osmose reversa, caso próximo ao limite de saturação é indicado um pré-tratamento para remover o íon necessário. A Fig. 5 demonstra a interface do software com os dados de alimentação já inseridos.

Figura 5: Interface do software WAVE.



Cations				Anions				Neutrals	
Symbol	mg/L	ppm CaCO ₃	meq/L	Symbol	mg/L	ppm CaCO ₃	meq/L	Symbol	mg/L
NH ₄ ⁺	30.186	83.745	1.673	CO ₃	0.111	0.185	0.004	SiO ₂	7.694
K	5.281	6.759	0.135	HCO ₃	88.647	72.704	1.453	B	0.000
Na	84.410	183.741	3.672	NO ₃	0.828	0.668	0.013	CO ₂	7.899
Mg	3.476	14.314	0.286	Cl	72.231	101.959	2.037		
Ca	16.060	40.107	0.801	F	0.350	0.922	0.018		
Sr	0.050	0.057	0.001	SO ₄	145.600	151.699	3.031		
Ba	0.000	0.000	0.000	PO ₄	0.000	0.000	0.000		
				Br	0.000	0.000	0.000		
Total Cations:	139.463		6.569	Total Anions:	307.768		6.557	Total Neutrals:	15.593
Total Dissolved Solids : 454.734 mg/L			Charge Balance: 0.000008 meq/L			Estimated Conductivity: 779.82 µS/cm			

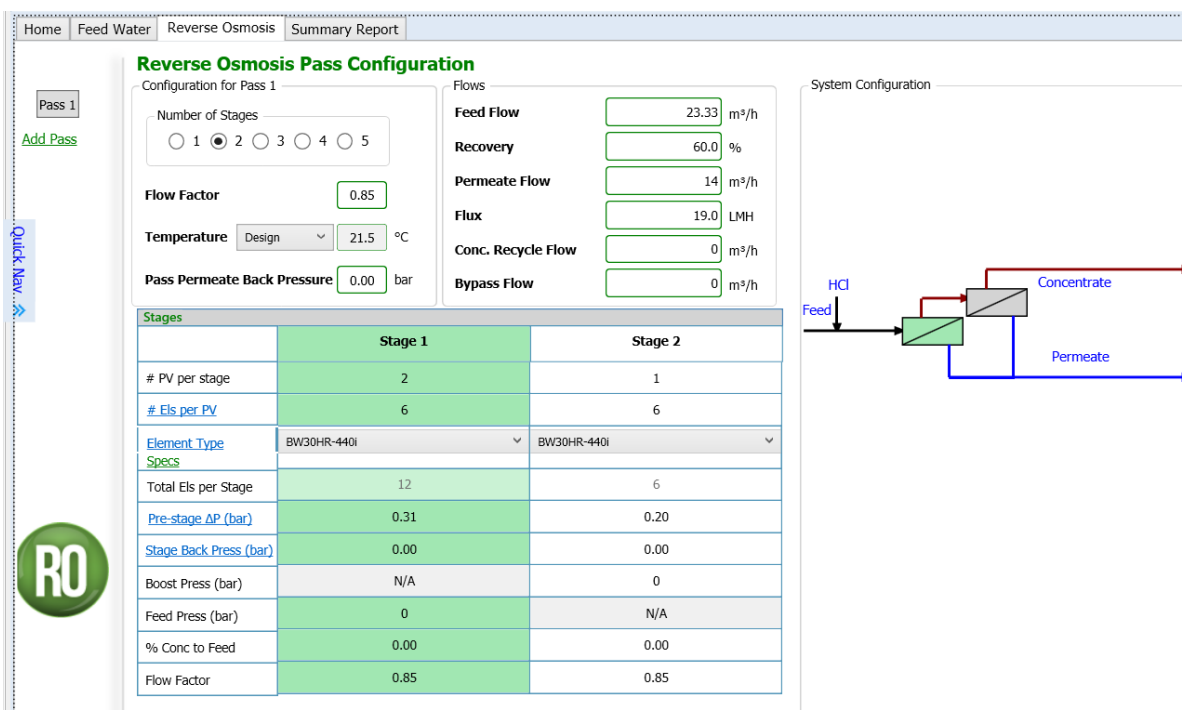
Fonte: Do autor (2023)

Para um sistema de osmose é importante salientar que existem algumas configurações que operam de forma mais eficiente, normalmente segue-se o sistema “6M” onde significa que cada vaso de pressão possui seis membranas e em sistemas que possuem mais de um estágio, “N” é a razão do primeiro estágio e para o segundo estágio é utilizado “N/2” para calcular o número de vasos de pressão, exemplos de matrizes afuniladas incluem 2:1, 6:3, 8:4, 10:5.

A razão para esta configuração é que em um vaso de pressão com seis elemento recuperará 50% do fluxo de alimentação e deixará 50% como concentrado, logo este se torna a alimentação do segundo estágio. Portanto, o número de recipientes de pressão necessários no segundo estágio é a metade dos recipientes no primeiro estágio para manter a velocidade de fluxo transversal (KUCERA, 2023).

Após, na aba “Reverse Osmosis”, Fig. 6, é possível escolher a membrana a ser utilizada e o sistema calcula todos os dados necessário através das informações da ficha técnica da membrana, nesta aba também é possível escolher a recuperação, número de passos, estágios, vasos de pressão e membranas, sendo que é necessário ir alterando os valores até que não se obtenha mais erros no sistema, pois ela alerta o usuário quando algo poderá dar problema no futuro, como o fluxo nas membranas e até mesmo o potencial de incrustação.

Figura 6: Aba “Reverse Osmosis” no software WAVE.



Reverse Osmosis Pass Configuration

Configuration for Pass 1

Number of Stages: 1 2 3 4 5

Flow Factor:

Temperature: Design °C

Pass Permeate Back Pressure: bar

Flows

Feed Flow: m³/h

Recovery: %

Permeate Flow: m³/h

Flux: LMH

Conc. Recycle Flow: m³/h

Bypass Flow: m³/h

Stages	Stage 1	Stage 2
# PV per stage	2	1
# Els per PV	6	6
Element Type	BW30HR-440i	BW30HR-440i
Specs		
Total Els per Stage	12	6
Pre-stage ΔP (bar)	0.31	0.20
Stage Back Press (bar)	0.00	0.00
Boost Press (bar)	N/A	0
Feed Press (bar)	0	N/A
% Conc to Feed	0.00	0.00
Flow Factor	0.85	0.85

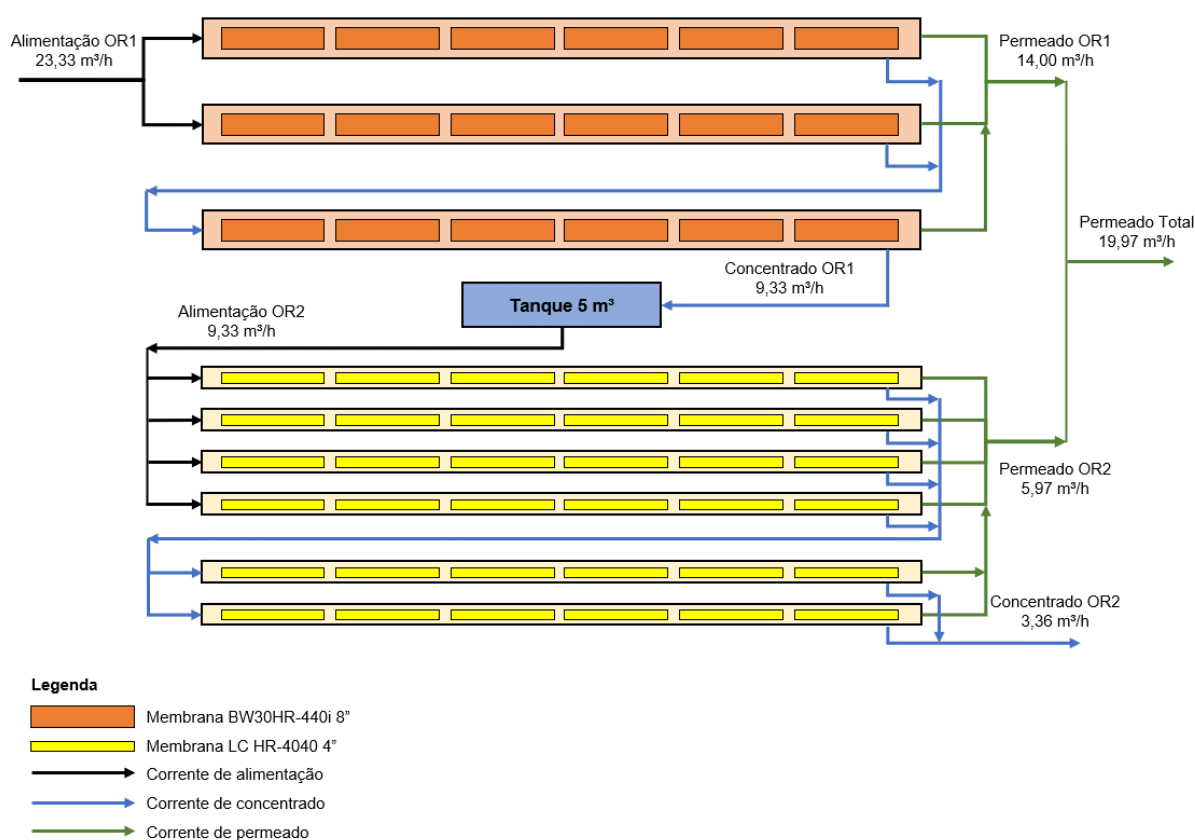
System Configuration

Diagram showing Feed (HCl) entering a system with Concentrate and Permeate outputs.

Fonte: Do autor (2023)

Para maior rendimento do sistema, foram dimensionados dois sistemas de osmose reversa, o primeiro sistema utilizando a membrana BW30HR-440i de 8", com dois estágios, sendo o primeiro com dois vasos de pressão e seis membranas cada e o segundo estágio com um vaso de pressão com seis membranas. Já para a segunda osmose reversa foi utilizada a membrana LC HR-4040 de 4", com dois estágios, com quatro vasos de pressão no primeiro estágio com seis membranas cada e o segundo estágio com dois vasos de pressão com seis membranas cada, conforme a Fig. 7.

Figura 7: Fluxograma do sistema de tratamento por osmose reversa.



Fonte: Do autor (2023)

A intenção de realizar o dimensionamento de um sistema para aproveitar o concentrado da primeira osmose é justamente o rendimento, pois com duas osmose, dos 23,33 m³/h da alimentação, foi possível aproveitar 19,97 m³/h, ou seja, 85,59% da vazão de alimentação.

Antes da alimentação da primeira osmose reversa, foi necessário a dosagem de ácido clorídrico 32% (ácido muriático), pois o LSI (Langelier Saturation Index) do concentrado na simulação com o pH da alimentação em 7,19 estava

positivo, tendendo a ocorrer incrustações nos últimos elementos do vaso de pressão, portanto foi reduzido a um pH de 6,0.

Segundo Kucera (2023), quanto maiores as concentrações de sólidos totais dissolvidos, alcalinidade, cálcio e um elevado pH, como de costume em uma corrente de concentrado de osmose reversa, maiores valores de LSI. A maioria dos fabricantes sugerem manter o LSI no concentrado ≤ 0 sem anti-incrustante e $\leq +2,5$ com o uso de anti-incrustantes.

A seguir, a Tab. 9 demonstra os resultados da simulação da OR1 de 23,33 m³/h com as concentrações simuladas de concentrado, permeado e a alimentação ajustada após a adição de ácido clorídrico 32%.

Tabela 9: Resultado da simulação de íons na OR1.

Íons	Unidade	Alimentação	Alimentação ajustada	Concentrado	Permeado
NH ₄ ⁺	mg/l	30,19	30,19	74,84	0,43
K ⁺	mg/l	5,28	5,28	13,04	0,11
Na ⁺	mg/l	84,41	84,41	209,6	0,95
Mg ⁺²	mg/l	3,48	3,48	8,69	0,00
Ca ⁺²	mg/l	16,06	16,06	40,14	0,01
Sr ⁺²	mg/l	0,05	0,05	0,12	0,00
Ba ⁺²	mg/l	0,00	0,00	0,00	0,00
CO ₃ ⁻²	mg/l	0,11	0,00	0,02	0,00
HCO ₃ ⁻	mg/l	88,65	34,25	82,12	2,76
NO ₃ ⁻	mg/l	0,83	0,83	1,99	0,05
F ⁻	mg/l	0,35	0,35	0,87	0,00
Cl ⁻	mg/l	72,23	104,4	259,5	1,01
SO ₄ ⁻²	mg/l	145,6	145,6	363,8	0,18
SiO ₂	mg/l	7,69	7,69	19,11	0,08
TDS ¹	mg/l	454,7	454,7	1.074	5,60
Cond.	µS/cm	780	780	1.934	12
pH	-	7,19	6,00	6,30	5,00
LSI	-	-1,31	-2,91	-1,84	-

1: Abreviação para a sigla em inglês para sólidos totais dissolvidos (Total Dissolved Solids)

Fonte: Do autor (2023)

Considerando os resultados da simulação da OR1, obteve-se uma corrente de permeado altamente pura, em que foram utilizados os dados da concentração de íons da corrente do concentrado com dados para alimentação para a OR2 de 9,33 m³/h, nesta osmose também foi necessária a adição de ácido clorídrico 32% para regular o pH de 6,3 para 6,0 por conta do LSI próximo a zero na simulação. A Tab. 10 ilustra os resultados obtidos para a simulação realizada para OR2.

Tabela 10: Resultado da simulação de íons na OR2.

Íons	Unidade	Alimentação	Alimentação ajustada	Concentrado	Permeado
NH ₄ ⁺	mg/l	74,84	74,84	205,9	1,12
K ⁺	mg/l	13,04	13,04	36,09	0,29
Na ⁺	mg/l	209,6	209,6	578,3	2,16
Mg ⁺²	mg/l	8,69	8,69	24,07	0,04
Ca ⁺²	mg/l	40,14	40,14	111,2	0,17
Sr ⁺²	mg/l	0,12	0,12	0,33	0,00
Ba ⁺²	mg/l	0,00	0,00	0,00	0,00
CO ₃ ⁻²	mg/l	0,02	0,01	0,05	0,00
HCO ₃ ⁻	mg/l	82,12	56,20	152,8	2,48
NO ₃ ⁻	mg/l	1,99	1,99	5,32	0,11
F ⁻	mg/l	0,87	0,87	2,38	0,02
Cl ⁻	mg/l	259,5	274,7	765,5	3,64
SO ₄ ⁻²	mg/l	363,8	363,8	1.007	2,17
SiO ₂	mg/l	19,11	19,11	55,20	0,06
TDS ¹	mg/l	1.074	1.064	2.935	12,27
Cond.	µS/cm	1.934	1.947	5.040	29
pH	-	6,30	6,0	6,4	4,8
LSI ²	-	-1,87	-2,34	-1,13	-

Fonte: Do autor (2023)

Além das simulações de íons no concentrado e permeado, o sistema também calcula vários outros parâmetros, como pressão necessária na alimentação (sendo este dado utilizado para dimensionar a bomba de alimentação do sistema), a área efetiva total, entre outros, conforme a Tab. 11.

Tabela 11: Dados gerais dos sistemas de osmose reversa.

Informações	Unidade	OR1	OR2
Número de elementos	-	18	36
Área total efetiva	m ²	738	314
Pressão na alimentação	bar	8,9	8,6
Fluxo médio no passe	l/m ² .h	19,0	19,0

Fonte: Do autor (2023)

Com os dados de pressão na alimentação obtidos, junto aos dados de vazão foi possível dimensionar a potência das bombas que foram utilizadas no projeto, estes dados são obtidos através da curva de dimensionamento disponível com cada fornecedor. A Tab. 12 apresenta as informações das bombas selecionadas.

Tabela 12: Características das bombas selecionadas.

Informações	Bomba OR1	Bomba OR2
Modelo	VMSS20-60	VMSS8-80
Fabricante	Famac Motobombas	Famac Motobombas
Vazão máxima	31 m ³ /h a 75 mca	14,2 m ³ /h a 75 mca
Potência	15,0 cv	7,5 cv
Material	AISI 304	AISI 304
Tensão	380 V	380 V
Número de estágios	6	8
Rotação	3500 RPM	3500 RPM
Grau de proteção	IP55	IP55
Selo mecânico	Viton®	Viton®

Fonte: Famac Motobombas (2023)

Além das bombas a serem utilizadas, foi realizada a avaliação dos vasos de pressão necessários para o projeto, que por sua vez foram utilizados para armazenar as membranas para a realização do processo, sendo importante avaliar se a pressão de operação do sistema de osmose reversa é menor que a pressão máxima de operação do vaso de pressão estes que estão descritos na Tab. 13.

Tabela 13: Características dos vasos de pressão selecionados.

Informações	Vaso de pressão OR1	Vaso de pressão OR2
Modelo	Codeline 80E40-6	Codeline 40E60-6
Fabricante	Pentair	Pentair
Pressão máxima de operação	20 bar	41 bar
Temperatura máxima de operação	49 °C	49 °C
Pressão de qualificação	124 bar	248 bar
Número de membranas	1 a 8	1 a 6
Composição	Filamento de epóxi/ compósitos de vidro	Filamento de epóxi/ compósitos de vidro

Fonte: Pentair (2023)

Com a escolha de todos os materiais e equipamentos realizada, foi possível obter o orçamento de todos eles a fim de avaliar a viabilidade econômica do projeto do sistema de osmose reversa, considerando o custo de aquisição inicial, conforme a Tab. 14.

Tabela 14: Cotações para os equipamentos utilizados no projeto.

Descrição	Equipamento	Fabricante	Quantidade	Valor unitário	Total
Membrana OR1	BW30HR-440i	DuPont	18	US\$ 924,83 (R\$ 4.466,93) *	US\$ 16.646,94 (R\$ 81.004,01) *
Membrana OR2	LC HR-4040	DuPont	36	US\$ 318,06 (R\$ 1.545,77) *	US\$ 11.450,16 (R\$ 55.647,77) *
Vaso de pressão OR1	Codeline 80E40-6	Pentair	3	US\$ 1.124,00 (R\$ 5.462,64) *	US\$ 3.372,00 (R\$ 16.387,92) *
Vaso de pressão OR2	Codeline 40E60-6	Pentair	6	US\$ 764,00 (R\$ 3.713,04) *	US\$ 4.584,00 (R\$ 22.278,24) *
Bomba OR1	VMSS20-60	Famac Motobombas	1	R\$ 28.345,82	R\$ 28.345,82
Bomba OR2	VMSS8-80	Famac Motobombas	1	R\$ 16.550,66	R\$ 16.550,66
TOTAL					R\$ 220.214,42

*Considerado a cotação do dólar para o dia 15/11/2023 (US\$ 1,00 = R\$ 4,86)

Fonte: Do autor (2023)

Lembrando que além dos custos supracitados, existem ainda despesas como: dimensionamento do painel elétrico, automação, dosagem de produtos químicos, treinamento dos operadores e entrega de EPI's, fatores que elevam ainda mais o valor do projeto.

Após avaliação interna na empresa, chegou-se à conclusão de que o capital necessário de R\$ 220.214,42 para implantação foi considerado elevado, levando em

consideração que a empresa capta a água do rio ao lado sem custos, este projeto pode-se tornar viável num cenário de redução nos custos de aquisição dos equipamentos ou de uma política interna de investimento na área de sustentabilidade maior, pois o impacto gerado no meio ambiente, pela redução na utilização dos recursos hídricos, é bem visto pela sociedade.

5 CONCLUSÃO

Através do presente estudo, pode-se concluir que o dimensionamento do sistema de osmose reversa é atrativo para a indústria, pelo fato de atender aos parâmetros físico-químicos mínimos desejados para o processo de beneficiamento têxtil, alimentação da caldeira e atender ao apelo sustentável de reduzir o consumo dos recursos hídricos empregado pela empresa.

Porém como o efluente tratado pelo sistema se encaixa nos parâmetros mínimos para ser tratado por osmose reversa, a configuração fica bem limitada quanto a taxa de recuperação do sistema, fluxo médio e a taxa da recuperação das membranas, sendo necessário aumentar o número de membranas e diminuir a recuperação do sistema.

Mesmo os valores estando nos limites mínimos, foi possível obter uma recuperação de 85,59% da vazão de alimentação, ainda assim podendo no futuro ser avaliado a aquisição dos equipamentos caso as cotações dos equipamentos necessários venham a ficar com um custo menor.

Como sugestão para trabalhos futuros, pode-se propor o dimensionamento de um sistema filtração anterior ao sistema de osmose reversa, tal como uma ultrafiltração com o objetivo de reduzir o SDI para $< 2,5$, sendo assim, tornando superior a possibilidade de configurações no projeto, pois a taxa de recuperação das membranas e a vazão do permeado aumentam, podendo então aumentar a recuperação do sistema e diminuir o número de membranas e vasos de pressão a serem utilizados.

REFERÊNCIAS

AMAR, Nihel Ben; KECHAOU, Noura; PALMERI, Jhon; DERATANI, André; SGHAIER, Ali. **Comparison of tertiary treatment by nanofiltration and reverse osmosis for water reuse in denim textile industry**. Journal of Hazardous

Materials, v. 170, n. 1, p. 111-117, 2009. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389409007250>. Acesso em: 19 mar. 2023.

BRASIL. Lei Nº 9.433 de 8 de janeiro de 1997. **Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989.** Brasília, DF: Diário Oficial da União, 1997. Disponível em:
https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9433.htm. Acesso em: 19 mar. 2023.

CORNELISSEN, E. R.; HARMSEN, D. J. H.; BLANKERT, B.; WESSELS, L. P.; VAN DER MEER, W. G. J. **Effect of minimal pre-treatment on reverse osmosis using surface water as a source.** Desalination, v. 509, p. 115056, 2021. Disponível em:
https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0011916421001272?casa_tok=en=-jKrzEPG-tUAAAAA:iKDga7fw3kMZBPbLwE5fSRfs7a7Hz1Yx7-IrLLtPrNW9YHBFykb-QJvdzVukuzf9OPYi130QPRIIIRA. Acesso em: 22 abr. 2023.

DUPONT. **FilmTec™ Reverse Osmosis Membranes Technical Manual.** 16. Delaware, USA, 2023, 221 p. Disponível em:
<https://www.dupont.com/content/dam/dupont/amer/us/en/water-solutions/public/documents/en/RO-NF-FilmTec-Manual-45-D01504-en.pdf>. Acesso em: 18 mar. 2023.

FAMAC MOTOBOMBAS. **Famac Motobombas.** Santa Catarina, Brasil, 2023. Disponível em: <https://www.famac.ind.br/>. Acesso em: 13 nov. 2023.

FERNANDES, Alinne Kadidja de Sousa. **Reúso de água no processamento de jeans na indústria têxtil.** 2010. 101 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento Ambiental; Meio Ambiente; Recursos Hídricos e Hidráulica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010. Disponível em:
<https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/15974>. Acesso em: 22 abr. 2023.

FILHO, Joaquim Marques. **Introdução à tecnologia de tratamento de água através da osmose reversa.** Portal Tratamento de Água. Disponível em:
<https://tratamentodeagua.com.br/artigo/introducao-tratamento-osmose-reversa/>. Acesso em: 16 abr. 2023.

FLYNN, Daniel. **The Nalco Water Handbook.** 4th Edition. United States: McGraw-Hill Education, 2018.

FRISCHKORN, Horst. **Osmose reversa: limpeza química em membranas de dessalinizadores do Ceará.** Revista Tecnologia, v. 30, n. 1, p. 61-76, 2009. Disponível em: <https://ojs.unifor.br/tec/article/view/5277>. Acesso em: 22 abr. 2023.

JIANG, Shanxue; LI, Yuening; LADEWIG, Bradley P. **A review of reverse osmosis membrane fouling and control strategies.** Science of the total environment, v. 595, p. 567-583, 2017. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969717307660>. Acesso em: 19 mar. 2023.

KHANZADA, N. K.; KHAN, S. Jamal; DAVIES, P. A. **Performance evaluation of reverse osmosis (RO) pre-treatment technologies for in-land brackish water treatment.** *Desalination*, v. 406, p. 44-50, 2017. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0011916416307391?casa_token=pYKXAH-zRp0AAAAA:Drqqx6sgxQtKKaSEWu3GOTx4V1Jk1IKCcbHcxcd50DLUeB1N3gFA6EQxYFKIqHLerDMmHBXoInEg. Acesso em: 22 abr. 2023.

KUCERA, Jane. **Reverse Osmosis**. 3rd Edition. United States. John Wiley & Sons, Inc and Scrivener Publishing LLC, 2023.

PENTAIR. **Pressure Vessels and Aqualine**. London, United Kingdom, 2023. Disponível em: <https://codeline.pentair.com/en/products>. Acesso em: 13 nov. 2023.

PURE AQUA. **Tratamento de água SDI**. Califórnia, Estados Unidos. 2023. Disponível em: <https://pt.pureaqua.com/tratamento-de-agua-sdi/>. Acesso em: 08 dez. 2023.

RAMOS, Cristofer. **Aprenda tratamento de águas por membranas (osmose reversa e UF) e resinas de troca iônica (desmi e abrandador)**. Disponível em: <https://industrialwaterbrasil.com.br/iwb/>. Acesso em: 20 mai. 2023.

RESENDE, Letícia Passos. **Reúso na indústria têxtil e lavanderias**. *Hydro*, v. 4, p. 14-19, 2012. Disponível em: <https://silo.tips/download/reuso-na-industria-textil-e-lavanderias>. Acesso em: 16 abr. 2023.

RIBEIRO, Marília Cleto Meirelles. **Avaliação da possibilidade de reúso de efluentes têxteis após tratamento complementar por processos oxidativos avançados**. 2009. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/ENGD-7Y7NKX>. Acesso em: 22 abr. 2023.

RIBEIRO, Shakil Bonnet Jossob. **Dimensionamento e simulação de um sistema híbrido eólico-fotovoltaico para o acionamento de uma planta de dessalinização por osmose reversa**. 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/50426>. Acesso em: 21 abr. 2023.

RODRIGUES, Raquel dos Santos. **As dimensões legais e institucionais do reúso de água no Brasil: proposta de regulamentação do reúso no Brasil**. 2005. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3147/tde-03112005-121928/en.php>. Acesso em: 19 mar. 2023.

SANTOS, Enock Jabes do Nascimento. **A importância do tratamento e cuidados com a água de caldeira**. 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufersa.edu.br/handle/prefix/4577>. Acesso em: 16 abr. 2023.

SCHOENHALS, Marlise; PORTO, André Elias. **Tratamento de efluentes, reúso de água e legislação aplicada em lavanderia têxtil industrial**. *Engenharia Ambiental: Pesquisa e Tecnologia*, v. 10, n. 2, 2013. Disponível em:

<http://ferramentas.unipinhal.edu.br/engenhariaambiental/viewarticle.php?id=956&layout=abstract&locale=>. Acesso em: 20 mar. 2023.

SILVA, Flavia Pereira Da; QUIRINO, Jonatas Motta. **Dessalinização por osmose reversa**. Revista Tecnológica da Universidade Santa Úrsula, v. 3, n. 2, p. 16-32, 2020. Disponível em: <http://revistas.icesp.br/index.php/TEC-USU/article/view/1453>. Acesso em: 16 abr. 2023.

TORAY. **Toray RO Handling Manual**. Tokyo, Japan, 2022, 90 p. Disponível em: https://www.water.toray/knowledge/manual/pdf/RO_HandlingManual.pdf. Acesso em: 21 abr. 2023.

ZARPELON, Willian; AZZOLINI, José Carlos. **Caldeiras de alta pressão: caracterização e avaliação da qualidade do tratamento das águas de abastecimento**. Unoesc & Ciência - ACET, [S. l.], v. 6, n. 2, p. 141–154, 2015. Disponível em: <https://periodicos.unoesc.edu.br/acet/article/view/6554>. Acesso em: 28 mai. 2023.