



**UDESC**

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGROVETERINÁRIAS - CAV  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**AVALIAÇÃO TÉCNICO-ECONÔMICA  
DE DOIS SISTEMAS DE TRATAMENTO  
DE ÁGUA PARA ABASTECIMENTO**

**ALTHERRE BRANCO ROSA**

**LAGES/SC, 2021**

**ALTHERRE BRANCO ROSA**

**AVALIAÇÃO TÉCNICO-ECONÔMICA DE DOIS SISTEMAS DE  
TRATAMENTO DE ÁGUA PARA ABASTECIMENTO**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais, ao curso de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, da Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC/CAV.

Orientador: Prof. Dr. Everton Skoronski  
Coorientador: Prof. Dr. Flávio José Simioni

**LAGES/SC**

**2021**

**Ficha catalográfica elaborada pelo programa de geração automática da  
Biblioteca Setorial do CAV/UEDESC,  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

Rosa, Altherre Branco  
Avaliação técnico-econômica de dois sistemas de tratamento de  
água para abastecimento / Altherre Branco Rosa. -- 2021.  
53 p.

Orientador: Everton Skoronski  
Coorientador: Flávio José Simioni  
Dissertação (mestrado) -- Universidade do Estado de Santa  
Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de  
Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Lages, 2021.

1. Tratamento convencional. . 2. Membranas de Ultrafiltração. .  
3. Custo de produção. . 4. Tratamento de água. . 5. Abastecimento  
Público. I. Skoronski, Everton . II. Simioni, Flávio José . III.  
Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências  
Agroveterinárias, Programa de Pós-Graduação em Ciências  
Ambientais. IV. Título.

**ALTHERRE BRANCO ROSA**

**AVALIAÇÃO TÉCNICO-ECONÔMICA DE DOIS SISTEMAS DE  
TRATAMENTO DE ÁGUA PARA ABASTECIMENTO**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Ciências Ambientais pelo Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais do Centro de Ciências Agroveterinárias – CAV, da Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC.

Orientador: Prof. Dr. Everton Skoronski

Coorientador: Prof. Dr. Flávio José Simioni

**BANCA EXAMINADORA**

Orientador:

---

Professor Dr. Everton Skoronski  
Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC

Coorientador:

---

Professor Dr. Flávio José Simioni  
Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC

Membros:

---

Professor Dr. Philipe Ricardo Casemiro Soares  
Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC

---

Professor Dr. Diego Bittencourt Machado  
Instituto Federal de Santa Catarina

Lages, 29 de outubro de 2021.

## AGRADECIMENTOS

Sou grato, acima de tudo a Deus por me proporcionar força, consciência e principalmente a vida para poder fazer as atividades necessárias do meu dia a dia.

Sou grato aos meus familiares, meus pais, Deomar e Elza, meu irmão Diego e principalmente a minha esposa Melyssa e a minha filha Luísa, que mesmo com as tarefas diárias de trabalho compreenderam a minha falta nos momentos de estudo.

Sou grato à instituição SEMASA (Secretária de Águas e Saneamento de Lages), sem ela e todos os seus colaboradores e colegas de trabalho, não seria possível o desenvolvimento deste trabalho e a visualização da concretização do mesmo.

Sou grato à Universidade do Estado de Santa Catarina por proporcionar um curso de especialização totalmente gratuito e com imensa qualidade, fornecer laboratórios para pesquisa e principalmente o software usado neste trabalho. Neste contexto agradeço imensamente ao Dr. Everton e Dr. Flávio, meu orientador e coorientador consecutivamente, sem suas observações e ensinamentos não seria concretizada esta etapa de minha vida.

Por fim, agradeço à banca examinadora pela disponibilidade em avaliar meu trabalho e contribuir para seu aperfeiçoamento.

## RESUMO

Estações de tratamento de água convencional e de tecnologia de membranas do tipo ultrafiltração são utilizadas para condicionar à água, a qualidade requerida no uso para consumo humano de acordo com a legislação vigente, Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021. O objetivo principal deste trabalho foi avaliar a melhor alternativa de estação para tratamento de água para consumo humano para o município de Lages/SC, com base em aspectos técnicos e econômicos, considerando um cenário de 30 anos de operação. A avaliação foi dividida em duas abordagens. Primeiro foram consideradas as questões técnicas relacionadas a cada alternativa de estação. Em seguida, na avaliação econômica, foi considerado o Custo Médio de Produção (CMP) da água tratada nas duas tecnologias, a avaliação de risco pelo Método de Monte Carlo e o impacto da piora da qualidade da água sobre o CMP. A avaliação dos processos foi realizada considerando o cenário da estação de tratamento de água da cidade de Lages/SC, uma vez que o modelo de estação convencional já é utilizado pelo município com critérios e dados bem definidos. Já a avaliação da tecnologia por membranas do tipo ultrafiltração, se deu por meio de dados gerados em um experimento utilizando uma estação piloto, a qual foi verificado principalmente o seu desempenho em termos de remoção de contaminantes e os custos de implantação nas vazões desejadas. Foram realizadas 85 coletas de água tratada por ambas as tecnologias. Os resultados obtidos mostraram que a água produzida pelo sistema de ultrafiltração apresentou média de turbidez igual à 0,56 NTU e cor aparente de 0,27 mgPt/Co.L<sup>-1</sup>. Já o sistema convencional foi responsável pela produção de água com turbidez e cor aparente com valores médios iguais a 2,01 NTU e 2,09 mgPt/Co.L<sup>-1</sup>, respectivamente. A média das medidas de pH da água tratada pelo sistema convencional foi de 6,94, apresentando diferença significativa ( $p < 0,05$ ) daqueles observados para as águas bruta e tratada pelo sistema de membranas, com médias iguais a 7,04. Em contrapartida, o CMP foi de R\$ 0,20/m<sup>3</sup> e de R\$ 0,24/m<sup>3</sup> para a estação convencional e por membrana, respectivamente. Os insumos químicos e o tratamento de resíduo (lodo) são as principais variáveis que afetam o CMP no tratamento convencional, enquanto o custo da estação e a energia são os principais componentes do COM do tratamento por membrana. Uma redução da qualidade da água em 30% aumenta o CMP em 2,6% e 1,5% para os sistemas convencionais e por membrana, respectivamente. De forma geral, a estação convencional, no contexto analisado, é a mais indicada para aquisição considerando o custo e a eficiência no tratamento com a matéria prima disponível. Evidencia-se também um grande potencial de utilização de processos de separação por membranas de ultrafiltração no tratamento de água para abastecimento público.

**Palavras-chave:** Tratamento convencional. Membranas de Ultrafiltração. Custo de produção. Tratamento de água. Abastecimento Público.

## ABSTRACT

Conventional water treatment processes and ultrafiltration membrane filtration are technologies applied for water treatment to meet the drinking-water quality required by the ordinance GM/MS nº 888, 4th May 2021. This study aimed to evaluate the most adequate alternative of drinking-water treatment technology for the municipality of Lages/SC, based on technical and economic aspects, considering a project life of 30 years. The study was carried out in two approaches. First, the technical aspects of each relevant technology were contemplated. Then, regarding to economics, it was considered the average cost of production (ACP), risk assessment by the Monte Carlo Method and the impact of worsening water quality on ACP. These processes were appraised considering the scenario of the water treatment plant in Lages/SC, as the conventional process has been operating in the municipality under well-defined and data. Conversely, the ultrafiltration membrane filtration technology evaluation was based on data acquired from an experiment using a pilot plant. In this case, it was verified its performance in terms of contaminants removal and the costs for implementation according to a specific flowrate. It was done 85 samplings of water treated by both technologies. The results demonstrated that the water produced by ultrafiltration membrane filtration showed average turbidity of 0.56 NTU and apparent colour of 0.27mgPt/Co.L<sup>-1</sup>. On the other hand, the conventional process was responsible for the production of water with average turbidity and apparent colour of 2.01 NTU and 2.09 mgPt/Co.L<sup>-1</sup>, respectively. The pH of water treated by the conventional process was 6.94, showing a significant difference ( $p < 0.05$ ) from the average pH of water treated by ultrafiltration membrane filtration and the raw water, which was 7.04. Oppositely, the ACP was R\$ 0.20/m<sup>3</sup> and R\$ 0.24/m<sup>3</sup> for the conventional process and ultrafiltration membrane filtration, respectively. Chemical inputs and waste (sludge) treatment are the main variables that affect ACP in conventional treatment, while plant cost and energy are the main components of ACP in membrane treatment. A 30% reduction in water quality increases ACP by 2.6% and 1.5% for conventional and membrane systems, respectively. Overall, the conventional process, in the analysed context, is preferable considering the acquisition in terms of cost and performance in the treatment of available raw water. It is also noticeable the tremendous potential of the ultrafiltration membrane filtration application for drinking-water treatment.

**Keywords:** Conventional Treatment. Ultrafiltration Membrane. Production Cost. Water Treatment. Public Supply.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Imagem de Satélite ETA e Captação .....	19
Figura 2 - Fluxograma das etapas da estação de tratamento de água de Lages/SC.....	20
Figura 3 - Imagem da calha Parshall e do medidor ultrasonico instalado na seção convergente da calha. ....	21
Figura 4 - Imagem dos dois flocladores em paralelo com destaque para as telas de dispersão rápida.....	22
Figura 5 - Vista superior dos decantadores, com destaque para os sistemas de alta taxa. ....	23
Figura 6 - Filtro de dupla camada recebendo água decantada para a operação de filtração. ...	24
Figura 7 - Estação piloto de Ultrafiltração .....	25
Figura 8 - Representação esquemática das correntes envolvidas em um processo de membranas. ....	26
Figura 9 - Bacia do rio Caveiras .....	35
Figura 10 - Boxplot para os valores de cor aparente da água bruta.....	37
Figura 11 - Boxplot para os valores de cor aparente para a água tratada via sistema convencional e membranas de ultrafiltração. ....	37
Figura 12 - Boxplot para os valores de turbidez da água bruta. ....	39
Figura 13 - Boxplot para os valores de turbidez para a água tratada via sistema convencional e membranas de ultrafiltração.....	39
Figura 14 - Boxplot para os valores de pH para a água tratada via sistema convencional e membranas de ultrafiltração.....	42
Figura 15 - Impactos das variáveis de risco sobre o custo de uma estação convencional.....	45
Figura 16 - Impactos das variáveis de risco sobre o custo de uma estação por membranas. ...	46
Figura 17 - Distribuição de probabilidade do custo da água tratada (CMP em R\$/m <sup>3</sup> ) pelo sistema convencional, para dois padrões de qualidade da água.....	47
Figura 18 - Distribuição de probabilidade do custo da água tratada (CMP em R\$/m <sup>3</sup> ) pelo sistema por membrana, para dois padrões de qualidade da água.....	48

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Área dos Filtros .....	24
Tabela 2 - Distribuição de probabilidade e variação percentual para os itens de custo do sistema convencional .....	31
Tabela 3 - Distribuição de probabilidade e variação percentual para os itens de custo do sistema por membrana .....	32
Tabela 4 - Riscos associados à piora da qualidade da água para a estação convencional .....	32
Tabela 5 - Riscos associados à piora da qualidade da água para a estação de membranas .....	32
Tabela 6 - Resumo dos valores obtidos para a determinação das características da água bruta .....	34
Tabela 7 - Resultados do teste de análise de variância (ANOVA) para o parâmetro cor aparente. ....	36
Tabela 8 - Resultado do teste de Tukey para o parâmetro cor aparente (mgPt/Co.L <sup>-1</sup> ). ....	36
Tabela 9 - Resultados do teste de análise de variância (ANOVA) para o parâmetro turbidez. ....	38
Tabela 10 - Resultados do teste de análise de variância (ANOVA) para o parâmetro pH. ....	41
Tabela 11 - Resultado do teste de Tukey para o parâmetro pH. ....	41
Tabela 12 - Investimento inicial para implantação dos sistemas de tratamento de água. ....	43
Tabela 13 - Custo Médio de Produção (R\$/m <sup>3</sup> ) da água tratada no sistema convencional com capacidade de 9 milhões de m <sup>3</sup> /ano. ....	44
Tabela 14 - Custo Médio de Produção (R\$/m <sup>3</sup> ) da água tratada no sistema por membranas com capacidade de 9 milhões de m <sup>3</sup> /ano. ....	44

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<b>ABNT</b>	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<b>APHA</b>	<i>American Public Health Association</i> (Associação Pública de Saúde Americana)
<b>ETA</b>	Estação de tratamento de água
<b>ETE</b>	Estação de tratamento de esgoto
<b>GAPLAN</b>	Gabinete de Planejamento e Coordenação-Geral
<b>IBGE</b>	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
<b>IMA</b>	Instituto do Meio Ambiente de Santa Catarina
<b>IPCA</b>	Índice de Preço ao Consumidor Amplo
<b>NBR</b>	Norma Brasileira
<b>NTU</b>	<i>Nephelometric turbidity unit</i> (Unidade nefelométrica de turbidez)
<b>PAC</b>	<i>Polyaluminum Chloride</i> (Cloreto de polialumínio)
<b>PAN</b>	Poliacrilonitrila
<b>pH</b>	Potencial Hidrogeniônico
<b>SDE</b>	Secretária de Estado de Desenvolvimento Econômico Sustentável
<b>SEMASA</b>	Secretária Municipal de Águas e Saneamento
<b>SNIS</b>	Sistema Nacional de Informação Sobre Saneamento
<b>uT</b>	Unidade de turbidez

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
1.1	OBJETIVOS.....	17
1.1.1	<b>Objetivo geral .....</b>	<b>17</b>
1.1.2	<b>Objetivos específicos.....</b>	<b>17</b>
<b>2</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>18</b>
2.1	LOCAL DE REALIZAÇÃO DO ESTUDO .....	18
2.2	COLETA E CARACTERIZAÇÃO DA ÁGUA .....	19
2.2.1	<b>Coletas .....</b>	<b>19</b>
2.2.2	<b>Análises físico-químicas .....</b>	<b>19</b>
2.3	ESTAÇÃO DE TRATAMENTO CONVENCIONAL CONSIDERADA NO ESTUDO .....	20
2.3.1	<b>Calha Parshall e Mistura Rápida do Coagulante.....</b>	<b>20</b>
2.3.2	<b>Floculação.....</b>	<b>21</b>
2.3.3	<b>Decantação .....</b>	<b>22</b>
2.3.4	<b>3.3.4 Filtração .....</b>	<b>23</b>
2.4	ESTAÇÃO DE TRATAMENTO POR SISTEMA DE MEMBRANAS DE ULTRAFILTRAÇÃO USADA NO ESTUDO.....	24
2.5	AVALIAÇÕES ECONÔMICAS .....	26
2.5.1	<b>Fonte dos dados .....</b>	<b>26</b>
2.5.2	<b>Determinação dos custos de implantação e operação de cada sistema de tratamento.....</b>	<b>28</b>
2.5.3	<b>Avaliação do impacto das variáveis de risco sobre o custo.....</b>	<b>31</b>
<b>3</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>34</b>
3.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁGUA BRUTA.....	34
3.2	AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE REMOÇÃO DE CONTAMINANTES ENTRE AS TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO .....	35
3.2.1	<b>Cor Aparente .....</b>	<b>36</b>
3.2.2	<b>Turbidez .....</b>	<b>38</b>
3.2.3	<b>Potencial hidrogeniônico (pH).....</b>	<b>40</b>
3.3	AVALIAÇÃO ECONÔMICA .....	42
3.3.1	<b>Investimento inicial para implantação dos sistemas .....</b>	<b>42</b>

<b>3.3.2</b>	<b>Custo da água tratada.....</b>	<b>43</b>
<b>3.3.3</b>	<b>Avaliação de risco: impactos das variáveis sobre o custo.....</b>	<b>45</b>
<b>4</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>49</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>51</b>

# 1 INTRODUÇÃO

A água é o meio estruturante para a manutenção de toda a biodiversidade do planeta, bem como para a manutenção da economia e desenvolvimento socioambiental do sistema criado pelos seres humanos (WOLKMER e PIMMEL, 2013). O aumento do consumo, bem como a escassez recorrente de água em nosso planeta, vem gerando preocupações constantes de como manter as atividades humanas, bem como, de manter sua escalada de crescimento (MAC KENZIE et al., 1994). Esta preocupação está alicerçada nas mudanças climáticas e contaminação dos recursos hídricos geradas em grande parte pelo próprio ser humano.

Particularmente para o Brasil, é público e notório a crise em que se atravessa o setor de saneamento do país. Dos 5.570 municípios brasileiros, o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) traz informação referente a 5.191 municípios, o que representa 93,2% do total de municípios, equivalente a uma população urbana de 98,2% (SNIS, 2021). O SNIS mostrou em seu diagnóstico de 2019 uma discrepância de atendimentos entre as regiões do Brasil, sendo que as regiões Norte e Nordeste ainda estão com uma defasagem enorme em relações aos outros entes da federação, além de uma redução de investimento, o que fez essas regiões voltarem aos patamares de investimento observados em 2011.

Em termos de quantidade de água, o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) fornecem alguns dados interessantes a respeito da distribuição de água usados para consumo humano no Brasil. Em 2017, o volume de água tratada e distribuída foi de 43.645.542 m<sup>3</sup>, e o volume de água sem tratamento distribuída foi 2.527.219 m<sup>3</sup>, considerando uma população de 207,8 milhões de habitantes. Além disto, observou-se uma perda de água estimada em 38%, chegando a um déficit de quase de 7 milhões de m<sup>3</sup> por dia de água tratada (IBGE, 2017).

Diante deste cenário, onde se observa uma escassez da matéria prima (“água bruta”), aliado com a falta de investimento em tratamento e desenvolvimento de novas tecnologias, a busca constante pela manutenção das fontes de água doce está alinhada com a eficiência esperada no processo de tratamento. A qualidade da água distribuída para a população é o foco principal nos sistemas de abastecimento de água para consumo.

Em relação às tecnologias de tratamento, a água deve passar por processos unitários para condicioná-la aos parâmetros estabelecidos, no Brasil, pela Portaria do Ministério da Saúde/Gabinete do Ministro (GM/MS) nº 888 de 2021, para que a água seja considerada apropriada para consumo humano. Técnicas como coagulação, floculação, sedimentação,

filtração e desinfecção são processos bem conhecidos e difundidos e constituem-se no tratamento convencional de água para abastecimento. Entretanto, tecnologias novas estão constantemente em implantação e difusão por todos os setores. Um exemplo promissor desses novos processos envolve o uso de membranas por ultrafiltração, o qual pode ser operado sem a adição de coagulantes e agentes de desinfecção na remoção de contaminantes presentes na água bruta (OLADOJA, 2015).

As estações de tratamento de água (ETA) convencionais utilizam coagulantes constituídos de sais de metais trivalentes, normalmente alumínio (sulfato de alumínio, cloreto de alumínio, aluminato de sódio e cloreto de polialumínio). Em menor escala, são usados ainda sais a base de ferro III (sulfato férrico, sulfato ferroso e cloreto férrico) (BAHADORI, CLARK e BOYD, 2013). Esses coagulantes são largamente utilizados tanto no tratamento de água para consumo humano quanto em ETE (Estações de Tratamento de Efluentes) para tratamento de águas residuárias. Isto se deve principalmente a sua eficiência comprovada ao longo de décadas, bem como a disponibilidade facilitada desses produtos químicos. No entanto, mesmo com a eficácia comprovada no tratamento de água e efluentes e a sua disponibilidade no mercado, existe a dissipação de alumínio na água tratada. Desta forma, em estações sem controles rígidos, um excesso de alumínio pode causar problemas de saúde na população que faz uso da água (MARTINS; OLIVEIRA; GUARDA, 2014). A exposição do alumínio aos seres humanos bem como sua ingestão em formas residuais é muito bem catalogada pela literatura de um modo geral. Rondeau et al. (2009), efetuaram estudos com prazo prolongado acima de 15 anos com pessoas que passaram por exposição de 0,1 mg/L de alumínio na água consumida e fornecida pelo abastecimento público. Verificaram vários problemas relacionados, principalmente declínio cognitivo e demência permanente. Em pacientes com problemas renais com tratamento através de hemodíalises, a excreta de substâncias tóxicas pela urina é comprometida gerando um acúmulo ainda maior de alumínio no organismo (TARPANI, 2012).

O cloreto de polialumínio (PAC), sal para coagulação utilizado neste estudo, é um complexo poli nuclear de íons de alumínio polimerizados, um tipo de polímero inorgânico de peso molecular medido em várias centenas de unidades. O PAC é utilizado para unir impurezas, destacando-se partículas coloidais, substâncias húmicas e outros organismos. Esta união deve-se principalmente pela característica química destes compostos com cargas superficiais negativas. Na coagulação, a água e o sal de alumínio criam espécies hidrolisadas com cargas positivas. Na sequência, nos floculadores, ocorre o processo de agregação das impurezas e a formação dos flocos para separação nos sedimentadores e filtros de meio poroso (DI BERNARDO, 2005; HOWE et al., 2016).

A ação do PAC já é comprovada em muitas ETAs, devido à qualidade dos flocos formados, menor demanda de alcalinizantes adicionais e vem sendo muito mais indicada e usada em estações, como substituintes ao clássico sulfato de alumínio.

Por outro lado, a filtração por membrana de ultrafiltração (UF) é um processo equivalente ao tratamento convencional em termos de remoção de partículas e microrganismos da água. O processo de UF não possui adição de produtos químicos para coagulação, não possui a etapa de sedimentação e sua filtração não é em meio poroso. Neste caso, a filtração por UF ocorre em um material fino e sintético, sendo que os sólidos suspensos, coloides e microrganismos passam por poros as quais ficaram aderidos (DU et al., 2015). Assim, a UF é uma alternativa para a diminuição no uso de alumínio no tratamento de água para abastecimento, quer seja tanto na água tratada quanto nos subprodutos gerados no tratamento.

Sob o ponto de vista econômico, em que pese os projetos de estações de tratamento de água que não são privatizados, o proprietário deve preparar um orçamento para financiar a operação e um cronograma para conclusão. A fase de projeto da maioria das estações municipais de tratamento de água normalmente custa entre 5 e 10% do gasto de construção estimado. O tempo necessário para projetar e construir uma estação de tratamento é de aproximadamente 3 anos, incluindo um período de *design* de 9 a 12 meses conforme praticado nos Estados Unidos (KAWAMURA, 2000). Com relação à escolha do processo ou tecnologia para a transformação da água, o custo é uma das principais variantes. Os valores de operação e construção destas estações devem ser amplamente verificados, sendo muitas vezes o diferencial de escolha, já que os custos operacionais perduram por um longo período (HOWE et al., 2016). Uma avaliação comparativa entre processos convencional e de membranas de ultrafiltração foi realizada a mais de 15 anos por Mierzwa et al., (2008), onde avaliaram comparativamente os sistemas em termos de custo de implantação e eficiência de remoção de contaminantes. Em seu trabalho, os autores apresentaram custos de R\$ 0,20/m<sup>3</sup> de água tratada para a tecnologia convencional e R\$ 0,40/m<sup>3</sup> para a água obtida pelo processo de membranas. Sua proposta de vazão para a implantação das estações foi de 100L/s e todos os seus custos e avaliações foram realizados com base neste valor. Desta forma, uma avaliação deve ser feita de forma mais aprofundada em relação aos custos reais, bem como para ampliar o leque de tecnologias disponíveis. Além disto, deve-se buscar também avaliar se, após pelo menos 15 anos, as mesmas conclusões podem ser obtidas em relação à comparação financeira entre os dois processos e se a dimensão da estação pode influenciar nessa tomada de decisões.

Deste modo, estudos que conciliam avaliações técnicas com a avaliação econômica de projetos podem contribuir de forma mais ampla e nortear as decisões relacionadas a investimentos. Prates e Schaitza (2018) realizaram uma pesquisa sobre viabilidade econômica de um sistema simulado de geração de energia pela gaseificação de cavacos de madeira. Em sua análise, utilizaram a simulação de Monte Carlo para avaliar o risco do projeto, com o software *@Risk 7.50* da *Palisade Corporation*, o mesmo utilizado neste estudo. Os autores identificaram que o projeto é economicamente viável desde que exista algum incentivo externo ao investimento. Ainda, dentre as barreiras observadas para o desenvolvimento de sistemas de gaseificação mais eficientes, com cavacos de madeira, estão o desenvolvimento de equipamentos apropriados para a preparação da matéria prima.

Também, Severis et al., (2019) realizaram uma avaliação econômica e de viabilidade de risco para a implantação de um sistema para recuperação de água de chuva em uma residência unifamiliar. Três sistemas distintos foram avaliados, onde as análises econômicas, de sensibilidade e de risco desses sistemas foram observadas. Neste caso, para o estudo da análise de risco, os autores utilizaram o software *@Risk 7.0* da *Palisade Corporation*. Assim, podem-se verificar estudos de comparação entre tecnologias, incluindo um enfoque de longo prazo e utilizando ferramentas como o software *@Risk* da *Palisade Corporation*. Até o momento, não foram identificados estudos comparativos entre sistemas convencionais de tratamento de água e sistemas de membrana de ultrafiltração, utilizando as ferramentas de avaliação de risco, o que torna o presente estudo inovador nesse contexto.

Neste contexto, o objetivo do presente trabalho foi realizar uma avaliação entre duas tecnologias para o tratamento de água para abastecimento, em termos de eficiência de remoção de contaminantes, bem como em relação aos seus custos de implantação como construção da edificação aos custos de operação do dia a dia, propondo uso de novas avaliações de sensibilidade e riscos.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

O objetivo principal foi avaliar, comparativamente, os aspectos técnicos e econômicos de uma estação de tratamento de água do tipo convencional e de uma utilizando o processo de membranas por ultrafiltração.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- a) Comparar os dados de turbidez e cor aparente da água tratada pelas tecnologias de tratamento convencional e por membranas para assegurar a viabilidade técnica das alternativas;
- b) Determinar os custos de implantação e de operação de dois sistemas de tratamento, um do tipo convencional e outro por membranas de ultrafiltração;
- c) Identificar e avaliar o impacto de variáveis de risco sobre o custo de água para os dois sistemas de tratamento estudados.

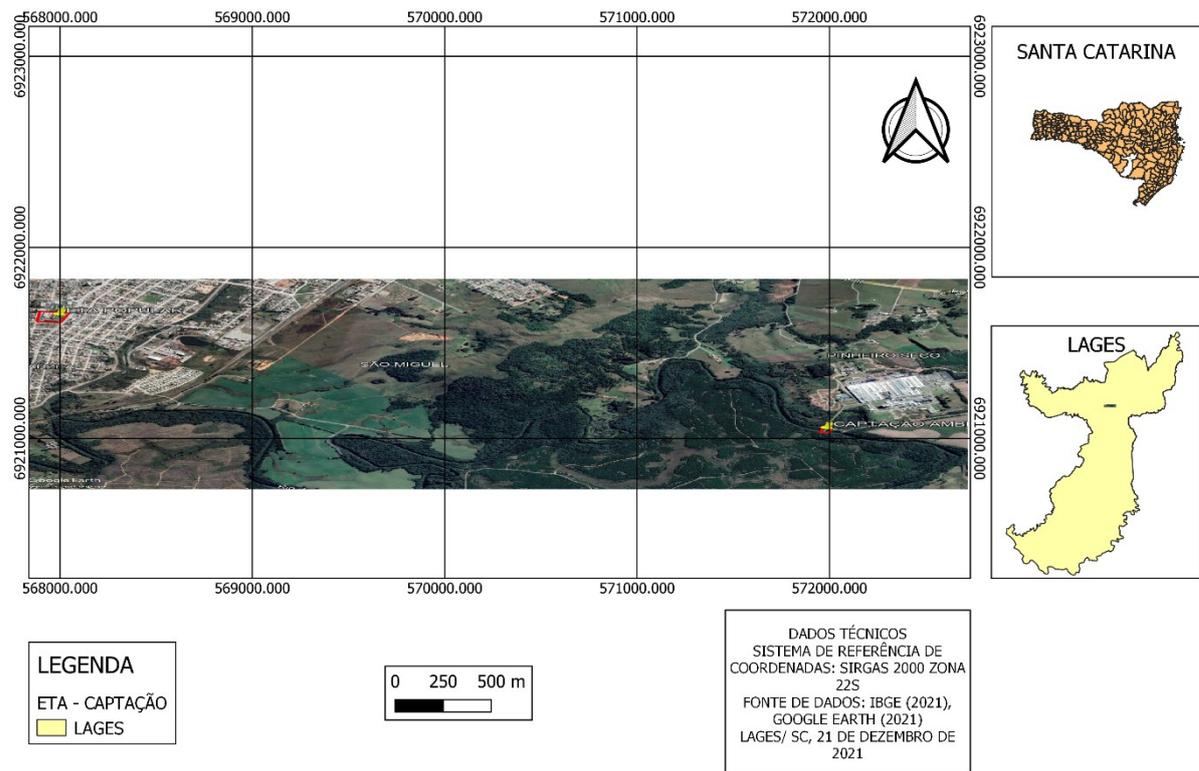
## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 LOCAL DE REALIZAÇÃO DO ESTUDO

A motivação para este estudo está fundamentada na necessidade de expansão na quantidade de água distribuída para o município de Lages/SC, o que se faz necessário devido ao aumento de consumo. A cidade de Lages, SC, está localizada na serra catarinense e possui uma população estimada em 158.508 habitantes e um PIB per capita de 9.602,75 USD (IBGE, 2018). A água de abastecimento da cidade é tratada em apenas uma estação, que se localiza no bairro Popular, e a água bruta é captada no Rio Caveiras. Além disto, outro fator motivacional é com relação ao tempo de manutenção da estação, o que envolve a limpeza dos floculadores, decantadores e filtros. Com o alto consumo, observado principalmente durante o verão, estas manutenções são comprometidas, inviabilizando os períodos de parada no sistema, pois estas aumentariam o risco de desabastecimento no município e a retomada do processo de tratamento.

Por outro lado, existe uma necessidade de aumento na eficiência do processo de tratamento devido a observada perda de qualidade do insumo (água bruta) ao decorrer dos anos. Esta piora na qualidade da água bruta se deve, em grande parte, pelas alterações climáticas agregadas com o uso descontrolado dos solos ao longo do leito do manancial de captação. Entretanto, em um contexto geral, esta alteração ao longo do manancial de coleta vem sendo de forma lenta e gradual. Desta forma, o município de Lages/SC foi selecionado como exemplo para o presente estudo. A Figura 1 mostra uma foto de satélite, onde aparecem os pontos de captação de água bruta e a ETA do município de Lages. Um dos pontos marcados mostra a localização do Rio Caveiras, o único fornecedor de matéria-prima para a estação de tratamento de água. O Rio Caveiras foi enquadrado pela portaria 024/79 do Gabinete de Planejamento e Coordenação-Geral (GAPLAN), desde suas nascentes até a captação para o abastecimento de Lages, como Classe 01 (Resolução CONAMA 357 de 2005). A área de contribuição do rio no ponto de captação é da ordem de 348 km<sup>2</sup>, apresentando uma vazão média anual neste ponto de 12,8m<sup>3</sup>/s, segundo dados levantados pela Secretaria Municipal de Águas e Saneamento do Município de Lages. O outro ponto mostra a ETA localizada no bairro Popular no município de Lages/SC. Esta planta foi inaugurada em 1976 e se encontra operando até os dias atuais sem uma grande reforma ou ampliação.

Figura 1 - Imagem de Satélite ETA e Captação



Fonte: Elaborado por Larissa Roberta de Jesus Oliveira (2021).

## 2.2 COLETA E CARACTERIZAÇÃO DA ÁGUA

### 2.2.1 Coletas

As coletas para caracterização da água bruta foram realizadas na própria estação de tratamento. Foram consideradas 85 coletas e análises realizadas durante 1 (um) mês, entre 15 de dezembro de 2015 a 15 de janeiro de 2016, tempo em que a estação piloto de ultrafiltração foi disponibilizada pela empresa Fluid Brasil. Com isso, foi possível comparar o desempenho da ETA convencional em operação com o observado no processo de ultrafiltração, levando em conta o tratamento de água bruta com as mesmas características nos dois processos.

### 2.2.2 Análises físico-químicas

Para a caracterização da água bruta e tratada, foram avaliados os parâmetros cor aparente, turbidez e pH. As leituras de cor aparente ( $\text{mgPt/Co.L}^{-1}$ ) foram realizadas em um espectrofotômetro modelo DR 3900 (Hach). A turbidez (NTU) foi medida em um turbidímetro modelo 2100Q (Hach). Por fim, a medição do pH foi realizada em um pHmetro modelo Sension

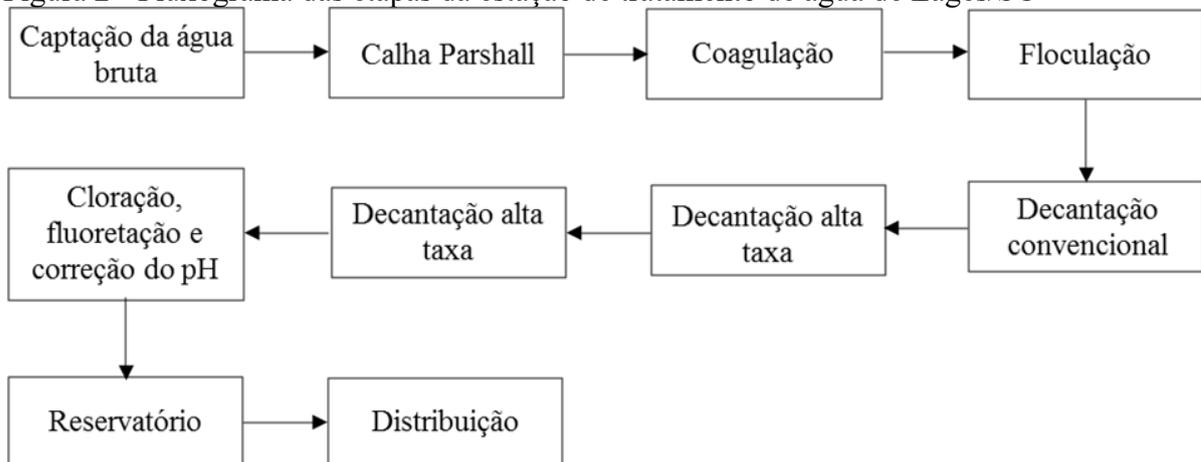
pH3(Hach). As metodologias seguiram recomendações estabelecidas em métodos padrões (APHA; AWWA; WEF, 2012).

### 2.3 ESTAÇÃO DE TRATAMENTO CONVENCIONAL CONSIDERADA NO ESTUDO

O tratamento realizado na ETA se Lages/SC é do tipo convencional, envolvendo as seguintes etapas: captação e tratamento preliminar, coagulação, floculação, decantação, filtração, fluoretação, desinfecção e correção do pH (Figura 2).

O coagulante utilizado é o cloreto de polialumínio (PAC) (Avanex), adicionado diretamente na tubulação que realiza o recalque da água bruta do rio para realização da etapa de coagulação. Após a adição do coagulante, a água passa pela calha Parshall, onde há um medidor ultrassônico de vazão. A vazão de operação é aproximadamente 600 L/s. Após a medição de vazão, a água segue para 2 tanques de floculação e depois ao tanque de sedimentação. Em seguida, a água é enviada para seis filtros que atuam em paralelo. Finalmente, a água filtrada recebe flúor, sendo direcionada para o tanque de contato com cloro e, ainda é realizada a correção de pH com hidróxido de cálcio 30%. Em seguida, a água tratada é distribuída para o município. As diversas etapas são descritas detalhadamente a seguir.

Figura 2 - Fluxograma das etapas da estação de tratamento de água de Lages/SC



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

#### 2.3.1 Calha Parshall e Mistura Rápida do Coagulante

A calha Parshall existente possui largura da garganta de 1,525 m ou 5', sendo apta a medir uma vazão máxima de 2.422 L/s com escoamento livre e uma vazão mínima de 62,80 L/s. No local existe um medidor de nível do tipo ultrassônico.

Figura 3 - Imagem da calha Parshall e do medidor ultrassônico instalado na seção convergente da calha.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

### 2.3.2 Floculação

A floculação é realizada em dois sistemas em paralelo com processo híbrido de chicana de fluxo vertical e telas de dispersão rápida.

No sistema I ou floculador I, existe uma área total de aproximadamente 160 m<sup>2</sup>, profundidade média de 3,95 m, resultando em um volume de 625 m<sup>3</sup>. Considerando uma vazão de 300 L/s, o tempo de detenção é de 34,73 minutos. Para uma vazão de 350 L/s, o tempo de detenção resulta em 29,77 minutos.

No sistema II ou floculador II, existe uma área total de aproximadamente 123 m<sup>2</sup>, profundidade média de 3,95 m, resultando em um volume de 485 m<sup>3</sup>. Neste caso, o tempo de detenção é de 26,95 minutos para uma vazão de 300 L/s e de 23,10 minutos para uma vazão de 350 L/s.

A ABNT, por meio da NBR 12216 (projetos de estação de tratamento de água para abastecimento público), recomenda tempo de detenção para esse tipo de floculador entre 20 e

30 minutos. Portanto ao considerar a ampliação da vazão total na ETA para 700 L/s, os valores observados de tempo de detenção estão de acordo com a recomendação da NBR 12216.

Figura 4 - Imagem dos dois flocladores em paralelo com destaque para as telas de dispersão rápida.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

### 2.3.3 Decantação

Os dois decantadores atuais dos Sistema I e Sistema II são do tipo mistos, sendo parte deles formados por placas planas paralelas (tipo alta taxa) inclinadas a  $60^\circ$  e o restante da área do decantador formado por fluxo horizontal ou convencional. A área de cada um dos decantadores com placas planas paralelas é de cerca de  $170 \text{ m}^2$ .

Cada perfil de decantação tem dimensão de  $90 \times 50 \text{ mm}$ , sendo que, cada 8 perfis de decantação formam entre si mais 7 áreas. Estas possuem dimensões de  $77 \times 36 \text{ mm}$  e, portanto, a área efetiva de cada decantador (com área de  $177,0 \text{ m}^2$ ) é de  $141,2 \text{ m}^2$ , produzindo velocidade de fluxo entre os perfis de  $247,30 \text{ m/dia}$  ou  $17,17 \text{ cm/min}$ .

Figura 5 - Vista superior dos decantadores, com destaque para os sistemas de alta taxa.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

### 2.3.4 3.3.4 Filtração

Existem seis filtros do tipo dupla camada filtrante de antracito e areia com áreas unitárias diferentes, conforme a Tabela 1. Todos os filtros possuem área total de filtração igual a 187,18 m<sup>2</sup>. Para a vazão de 600 L/s, observa-se uma taxa de filtração de 277 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.dia. Já para a vazão de 700 L/s, a taxa de filtração resulta em 323 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.dia. A NBR 12.216 da ABNT recomenda, para esse tipo de filtro, a taxa máxima de 360 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.dia.

Considerando a situação de parada para lavagem do filtro com maior área (filtro 1), o sistema ainda conta com uma área de 152,86 m<sup>2</sup>, resultando em uma taxa de filtração de 339 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.dia para 600 L/s e 395 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.dia para 700 L/s. Desta forma, observa-se não ser possível operar a 700 L/s, na ocasião da lavagem de um dos filtros.

Tabela 1 - Área dos Filtros

Filtro	Dimensão 1 (m)	Dimensão 2 (m)	Área (m <sup>2</sup> )
1	7,56	4,54	34,32
2	6,61	4,44	29,35
3	7,56	4,40	33,26
4	6,70	4,57	30,62
5	6,72	4,42	29,70
6	6,65	4,50	29,93
<b>Total</b>			<b>187,18</b>

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 6 - Filtro de dupla camada recebendo água decantada para a operação de filtração.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

#### 2.4 ESTAÇÃO DE TRATAMENTO POR SISTEMA DE MEMBRANAS DE ULTRAFILTRAÇÃO USADA NO ESTUDO

O estudo com relação a estação por membranas de ultrafiltração (UF) foi realizado devido a uma parceria com a empresa Fluid Brasil, o qual gentilmente disponibilizou uma estação piloto para os testes. O equipamento ficou disponibilizado por 1 mês, para comparação, permitindo avaliar a qualidade da água tratada em comparação ao desempenho observado na ETA convencional para o tratamento da mesma água bruta. A capacidade da estação piloto foi de 3,6 m<sup>3</sup>/h ou 1,0 L/s, com uma potência de 5 kW.

Neste estudo, o sistema possuía um módulo de membranas de UF modelo Microdyn Aquadyn UA860 (Mann-Hummel). As membranas eram do tipo fibra oca, com diâmetro externo de 2,1 mm, interno de 1,1 mm e tamanho de poro nominal de 0,025  $\mu\text{m}$ . A área da membrana era de 45  $\text{m}^2$  e o seu material foi a poliacrilonitrila (PAN). A filtração ocorreu no sentido externo-interno da membrana, sob a configuração *dead end*. A pressão transmembrana máxima aplicada foi de 1 bar.

Figura 7 - Estação piloto de Ultrafiltração

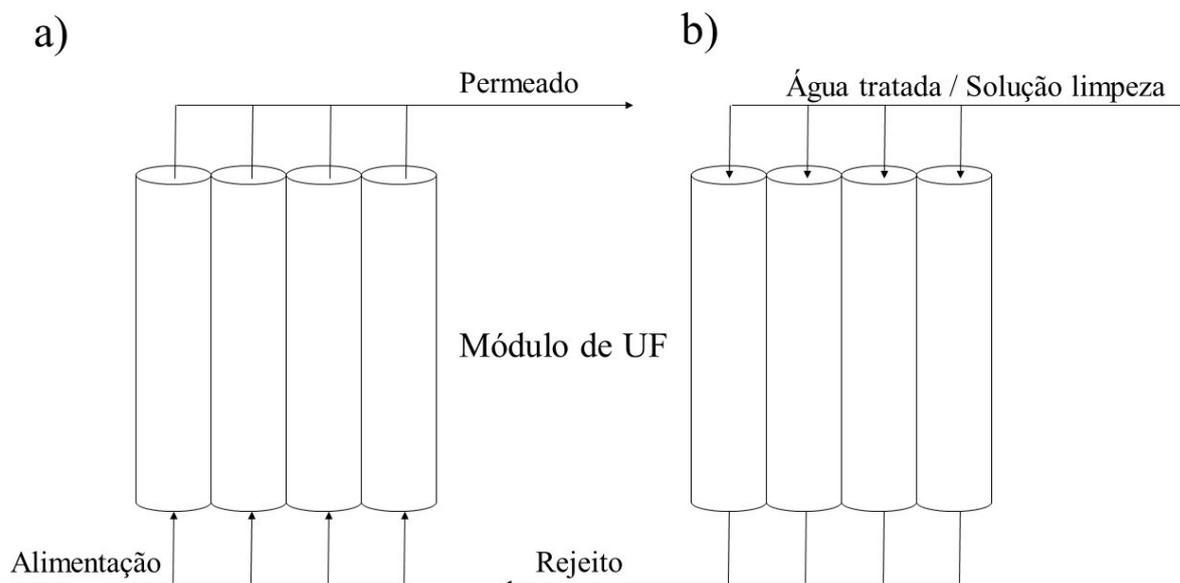


Fonte: Fluid Brasil.

A planta piloto era composta ainda composta por uma unidade chamada pré-filtração, o qual possuía a função de realizar a prévia retenção de turbidez e cor aparente da água bruta.

O processo de ultrafiltração envolve duas correntes, no caso alimentação e permeado durante a operação (Figura 8.a). Pode ainda ser considerada a geração de uma terceira corrente proveniente da retrolavagem com água e a limpeza química da unidade, no qual é utilizado ácido cítrico, hidróxido de sódio e aplicação de cloro (XING et al., 2019). Neste caso, a operação de limpeza ocorre com a interrupção da alimentação e produção de permeado (Figura 8.b).

Figura 8 - Representação esquemática das correntes envolvidas em um processo de membranas.



Nota: a) operação de filtração e b) limpeza da membrana.

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Para a instalação da unidade, foi realizada uma derivação na adutora de água bruta. Além disto, foi instalada ainda uma ligação dos rejeitos gerados pela unidade de UF durante a retrolavagem, para descarte concomitante com os subprodutos gerados na estação convencional. Devido às características e localização da máquina no terreno, não foi possível aproveitar a água tratada desta unidade. Por este motivo a água tratada foi descartada na caixa de descarga juntamente com os demais rejeitos.

## 2.5 AVALIAÇÕES ECONÔMICAS

### 2.5.1 Fonte dos dados

Com relação aos custos do projeto, foram seguidos todos os orçamentos feitos com as empresas fornecedoras das duas tecnologias propostas. Os orçamentos foram obtidos no ano de 2017 e atualizados para o ano de 2020. Para chegar aos projetos a serem orçados, cálculos de dimensionamento das duas estações foram realizados, tanto da estação convencional quanto da estação por membranas.

O projeto da estação convencional partiu da verificação dos dados históricos adquiridos na SEMASA nos últimos 10 anos, e seus cálculos para obter uma estação com a vazão requisitada de 300L/s seguiu as normas da NBR 12216 da ABNT (1992), onde para cada

módulo da estação apresenta as seguintes configurações com uma área total de implantação de 120 m<sup>2</sup>:

**Mistura rápida:** dotado de um medidor de vazão tipo calha parshall de 18 polegadas, a fim de garantir uma boa dispersão de coagulante.

**Floculação:** esta etapa ocorre a mistura lenta da água a ser tratada. É composta de seis contêineres com chicanas, que auxiliam na formação dos flocos, visando à decantação deles na etapa seguinte.

**Decantação:** nesta etapa ocorre a decantação dos flocos formados na etapa anterior, constituído de quatro contêineres. O conceito utilizado é através de decantação acelerada com a instalação de módulos de PVC na parte superior dos tanques.

**Filtração:** a filtração será realizada através de dez filtros, com taxas declinantes. O leito filtrante terá duas camadas, sendo uma camada de areia torpedo e uma camada de carvão antracitoso. Fundo falso dotado de crepinas e sistema de retro lavagem independente.

O projeto da estação por membranas partiu da verificação dos dados históricos adquiridos através de contatos com empresas que operam este sistema, tais como a Ambev (cervejaria), a Degusa (química) e a Sabesp (saneamento) com uma estação de 1000 L/s. Seus cálculos para obter uma estação com a vazão requisitada de 300 L/s seguiu as normas da AWWA (2005) e EPA (2005).

**Membranas:** responsáveis pela filtração real, ou seja, uma barreira para os contaminantes, nesta concepção os modelos por fibras ocas foi o escolhido, fibras estas agrupadas em módulos que podem conter milhares de fibras.

**Vasos de pressão:** sua principal função é a de confinar os módulos de membrana, isolar as correntes de alimentação e permeado e suportar a pressão exercida. Os vasos de pressão são feitos estanques para evitar vazamentos e consecutiva perda de pressão, diminuir o acúmulo de sólidos e ser de fácil troca dos módulos de membrana.

**Pré-filtração:** responsável por uma pré-retenção de sólidos e redução de cor e turbidez. Normalmente estes filtros são necessários para proteção das membranas, uma retenção de sólidos grosseiros com diâmetros maiores que 0,1 a 0,5 mm. São utilizados normalmente telas de autolimpeza, filtro de cartucho ou filtros de manga.

**Sistema de limpeza química:** gradualmente as membranas vão perdendo sua capacidade de filtração, só com a retrolavagem com o tempo não é mais eficiente, uma lavagem química é necessária para a membrana atingir seu grau de remoção original. As soluções usadas dependem de fabricante para fabricante, dividem-se em uma solução com alto pH contendo

detergentes e surfactantes para remoção de contaminantes orgânicos, e solução de baixo pH tais como ácidos cítricos para remoção de contaminantes inorgânicos.

Com relação aos custos de operação, considerou-se o histórico adquirido com o tempo de operação de 10 anos de uma estação convencional – a da SEMASA de Lages/SC. Com relação à estação por membrana, foram considerados dados e informações de outros operadores que estão atuando no mercado.

Os custos de implantação dos sistemas foram definidos através de orçamentos de fornecedores que atuam no mercado, considerando: licenças, terraplanagem, equipamentos, mão de obra para construção.

Já com relação aos custos variáveis, ou seja, relacionados à operação dos sistemas, foram verificadas análises históricas e relações de índices de inflação. Com relação aos insumos químicos, os preços foram atualizados pelo IPCA de produtos químicos 20C, verificando-se os anos de 2017 e 2018 os quais apresentam a variação de produtos e sua referida inflação no período, baseados na tabela 5796 do IBGE: Índice de Preços ao Produtor, por tipo de índice, indústria geral, indústrias extrativas e indústrias de transformação e atividades.

Todos os valores estipulados foram feitos através de orçamentos com empresas conceituadas no mercado, definindo o de menor valor como orçamento base para a execução deste estudo.

### **2.5.2 Determinação dos custos de implantação e operação de cada sistema de tratamento**

O custo total foi obtido considerando os custos de implantação, que representam custos fixos de cada sistema, e os custos variáveis decorrentes da operação dos sistemas.

Com relação aos custos de implantação foram considerados os seguintes itens:

- a) Licenças: todas as licenças necessárias para iniciar o projeto até seu início de operação, nas esferas municipais e estaduais. As licenças consideradas foram: licenças de outorga de uso da água, licença prévia para liberação do projeto, licença de instalação para início da obra e licença de operação, licenças liberadas pelos órgãos do estado, IMA (Instituto do Meio Ambiente) e SDE (Secretária de Estado do Desenvolvimento Econômico) e as licenças da vigilância sanitária municipal.
- b) Equipamentos: referem-se à estação convencional e a de membrana, com todos os periféricos para o bom funcionamento das estações, com bombas, registros,

válvulas, comportas, etc. Envolve a especificação do projeto de acordo com as exigências de vazão e qualidade especificadas em legislação.

- c) Terraplanagem: usada para nivelamento do solo onde será implantada a estação, logo após a introdução de um radier no local, que é uma superfície com concreto armado onde serão acomodadas as estações. O radier para cada uma das estações será diferente, ou seja, terão configurações distintas.
- d) Mão de obra: os valores de mão de obra são bem específicos, pois as estações são pré-moldadas, e sua mão de obra tem que ser especializada e direcionada para cada caso. Os fornecedores dos orçamentos dos equipamentos foram os responsáveis pelo fornecimento destes custos.

Em relação aos custos de operação (CO) do sistema, foram considerados:

- a) Mão de obra: a mão de obra para operacionalização dos sistemas foi considerada, operadores, laboratorista e responsável técnico. As estimativas foram feitas considerando o histórico de operação da SEMASA para tratamento de água.
- b) Insumos químicos: são os componentes usados para o tratamento da água bem como insumos para as análises operacionais diárias executadas na estação. Os insumos são muito mais utilizados na estação convencional, na parte de tratamento, já na estação por membrana, este impacto é reduzido.
- c) Tratamento do resíduo: considerou-se um custo por m<sup>3</sup> gerados pela estação convencional, a qual possui contaminantes devido aos insumos usados para o tratamento. O lodo gerado (rejeito) pela estação é estimado em aproximadamente 400 m<sup>3</sup>/mês, derivados das lavações de filtros e decantadores, o que deve ser encaminhado para um aterro credenciado para esta classe de resíduo. Com relação ao rejeito gerado pela estação por membranas, poderá ser lançado diretamente no corpo receptor por não apresentar contaminantes relativos ao tratamento (MICKLEY & ASSOCIATES, 2006).
- d) Energia: com relação à energia os custos de operação de uma estação convencional são baixos, porém, para a operação de uma estação por membranas os custos são elevados estimados em 0,122 kWh/m<sup>3</sup>.
- e) Meio Filtrante: O meio filtrante é trocado a cada 4 anos dependendo de sua deterioração e uso, tanto para a estação convencional como para a estação por membranas. O meio filtrante da estação convencional é de custo reduzido, e

consistem em carvão ativado, areia e seixos rolados. Já na estação por membranas, há a troca da membrana que é o meio filtrante.

A comparação dos dois sistemas de tratamento de água foi realizada considerando o custo da água tratada, considerando 30 anos de vida útil para os dois sistemas.

Para os custos de implantação dos sistemas (vida útil de 30 anos) e os custos relacionados a troca do meio filtrante (vida útil de 4 anos), utilizou-se o método do Valor Anual Uniforme Equivalente (VAUE), que consiste em encontrar a série uniforme anual (que representa o Custo Anual Equivalente – CAE) empregando-se uma taxa de desconto (k) que representa a Taxa Mínima de Atratividade (TMA), conforme equação 1 (CASAROTTO FILHO e KOPITTKKE, 2010):

$$CAE = \frac{C.k}{1-(1+k)^{-t}} \quad (1)$$

Onde:

CAE – Custo Anual Equivalente

C – Custo a ser anualizado (exemplo: custo de implantação e meio filtrante)

k – taxa de desconto real

t – tempo em anos

Foi utilizada a taxa de desconto (k) de 3,06% ao ano, que representa a taxa de juros real da economia brasileira, média dos últimos 10 anos (período de 2010 a 2020). A taxa k foi obtida pela equação 2, considerando a taxa de juros nominal (i) medida pelo Sistema Especial de Liquidação e Custódia (Selic) (BANCO CENTRAL DO BRASIL, 2021a)., e a taxa de inflação (j) do mesmo período, medida pelo Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA) (BANCO CENTRAL DO BRASIL, 2021b).

$$k = \frac{(1+i)}{(1+j)} - 1 \quad (2)$$

Assim, o Custo Médio de Produção (CMP), em R\$/m<sup>3</sup> foi obtido pela equação 3:

$$CMP_{\left(\frac{R\$}{m^3}\right)} = \frac{CAE_{Estação} + CAE_{Meio\ filtrante} + CO_{anual}}{Volume\ água\ tratada_{anual}} \quad (3)$$

### 2.5.3 Avaliação do impacto das variáveis de risco sobre o custo

Alterações nos preços dos fatores de produção ou nas quantidades utilizadas durante o processo de tratamento da água representam incertezas e impactam sobre o custo do tratamento de água. Assim, técnicas de simulação são usadas para lidar com incertezas na análise de projetos (CASAROTTO FILHO e KOPITTKKE, 2010) e avaliar o impacto sobre os custos como medida de risco.

Para tanto, para cada item de custo foi definido um valor mínimo e máximo a partir dos valores médios de custo (valores mais prováveis obtidos na pesquisa de mercado), considerando uma distribuição de probabilidade (Tabela 2). Os valores mínimo e máximo representam o menor e o maior custo possível de uma determinada variável em um sistema, mantendo as características funcionais dos sistemas.

As variáveis de custos podem apresentar variações em torno dos valores médios com diferentes distribuições de probabilidades. As distribuições de probabilidade utilizadas foram (SMITH e MERRITT, 2002):

Triangular: os valores ao redor do valor médio têm a maior probabilidade de ocorrência.

Pert: os valores ao redor do valor médio têm a maior probabilidade de ocorrência, porém, os valores que se encontram entre o valor médio e os valores dos dois extremos (mínimo e máximo) tem maior probabilidade de ocorrência quando comparada com a probabilidade triangular.

Tabela 2 - Distribuição de probabilidade e variação percentual para os itens de custo do sistema convencional

Descrição	Distribuição de Probabilidade	Variação (%)		
		Mínimo	Médio	Máximo
<b>Estação PAC</b>	Triangular	92%	100%	112%
<b>Meio filtrante</b>	Triangular	97%	100%	108%
<b>Mão de obra</b>	Triangular	98%	100%	104%
<b>Insumos químicos</b>	Pert	85%	100%	125%
<b>Tratamento do resíduo</b>	Pert	95%	100%	150%
<b>Energia</b>	Triangular	94%	100%	118%

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Na Tabela 3 é apresentada a distribuição de probabilidade e a variação percentual para os itens de custo do sistema da estação por membrana (estação, meio filtrante, mão de obra e energia), com suas variações de máximos e mínimos estipulados através de orçamentos e verificações com operadores do sistema de outras localidades.

Tabela 3 - Distribuição de probabilidade e variação percentual para os itens de custo do sistema por membrana

Descrição	Distribuição de Probabilidade	Variação (%)		
		Mínimo	Médio	Máximo
<b>Estação MEMBRANA</b>	Triangular	80%	100%	120%
<b>Meio filtrante</b>	Triangular	90%	100%	130%
<b>Mão de obra</b>	Triangular	98%	100%	104%
<b>Energia</b>	Triangular	94%	100%	118%

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Alterações da qualidade da água bruta também podem provocar impacto sobre os custos, portanto, também representam variáveis de risco. A Tabela 4 apresenta as variáveis de risco decorrentes da piora da qualidade da água, onde a frequência de 30% indica que a qualidade da água piora em 30% das vezes ou do volume captado, e a severidade indica a porcentagem de aumento do custo.

Tabela 4 - Riscos associados à piora da qualidade da água para a estação convencional

Descrição do Risco	Risco	Frequência	Severidade
<b>Aumento do trabalho - lavagem equipamentos</b>	R1	30%	5%
<b>Aumento do custo com insumos - mais reagentes</b>	R2	30%	15%
<b>Aumento do custo com tratamento de resíduos - mais lodo</b>	R3	30%	20%

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Alterações da qualidade da água bruta causam um aumento de compostos retidos nas membranas, o que acarreta um maior consumo de energia para retrolavagens, bem como a manutenção do equipamento, com utilização de mão de obra especializada. A Tabela 5 apresenta as variáveis de risco decorrentes da piora da qualidade da água, onde a frequência de 30% indica que a qualidade da água piora em 30% das vezes ou do volume captado, e a severidade indica a porcentagem de aumento do custo.

Tabela 5 - Riscos associados à piora da qualidade da água para a estação de membranas

Descrição do Risco	Risco	Frequência	Severidade
<b>Aumento do trabalho - manutenção dos equipamentos</b>	R1	30%	10%
<b>Aumento do custo com energia - para retrolavagem</b>	R2	30%	10%

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

A análise de risco foi realizada com o suporte do software @Risk 7.0.0 (Palisade Corp., 2015). Foram empregadas 100.000 iterações em uma simulação de Monte Carlo para o custo

da água tratada de cada sistema como variável de saída, considerando tanto o custo normal de tratamento de água como também o custo na situação em que ocorre a piora da qualidade da água. O método Monte Carlo é usado para transformar incertezas em riscos (GITMAN, 2010).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁGUA BRUTA

Para a realização deste trabalho, foram avaliados os seguintes parâmetros para a caracterização da água bruta: turbidez, cor aparente e pH. A Tabela 6 apresenta os resultados da caracterização da água bruta coletada ao longo dos 30 dias de amostragem, totalizando 90 amostras.

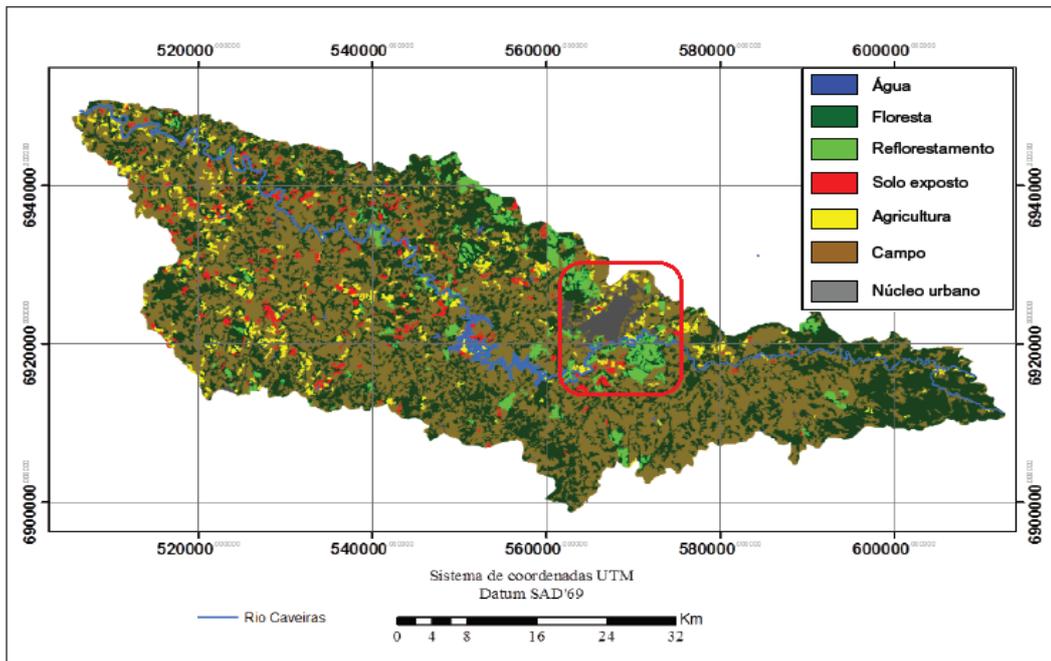
Tabela 6 - Resumo dos valores obtidos para a determinação das características da água bruta

<b>Parâmetro</b>	<b>Contagem</b>	<b>Média</b>	<b>Valor máximo</b>	<b>Valor mínimo</b>
Turbidez (uT)	90	73,40	369	5
Cor aparente (mgPt/Co.L <sup>-1</sup> )	90	123,46	1051	39
pH	90	7,00	7,70	6,80

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

O intervalo dos valores da turbidez e da cor aparente mostrou uma variação na qualidade da água bruta do rio Caveiras durante o período de amostragem. Isso deve, provavelmente, ao fato de as coletas terem sido realizadas em um período de chuvas, o que caracteriza uma grande variação na qualidade da água bruta. Neste sentido, Rafaeli Neto, Becegato e Cabral (2013), fizeram o mapa de uso e ocupação da bacia do rio Caveiras, rio utilizado para o abastecimento da cidade de Lages (Figura 9).

Figura 9 - Bacia do rio Caveiras



Fonte: Rafaeli Neto, Becegato e Cabral (2013)

A área em destaque em vermelho corresponde à cidade de Lages, região onde está o ponto de captação da água bruta. Conforme os autores, na nascente do rio, que está localizada na direita na imagem encontra-se um maior índice de floresta, porém, ao longo do percurso do rio a floresta decai até a sua foz encontrar com o rio canoas. Já os campos, estes representam de 40 a 50% da área da bacia e o reflorestamento corresponde a um total de 4 a 5%. Quando chove, há um escoamento superficial, tanto de poluentes quanto da própria água, o que aumenta a vazão do rio e a entrada de sedimentos, aumentando assim a turbidez e por consequência a cor aparente.

### 3.2 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE REMOÇÃO DE CONTAMINANTES ENTRE AS TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO

Após a realização das coletas e análises físico-químicas, foram avaliados os desempenhos das estações de tratamento de água utilizando a tecnologia convencional e por membranas de ultrafiltração. Foi dado ênfase à remoção de turbidez e cor aparente, bem como o pH, que normalmente são os parâmetros de controle para avaliação do desempenho de ETAs.

### 3.2.1 Cor Aparente

A cor aparente é geralmente um indicador da presença de metais (Fe, Mn), húmus (matéria orgânica oriunda da degradação de matéria de origem vegetal), plâncton (conjunto de plantas e animais microscópicos em suspensão nas águas) e diversas substâncias dissolvidas na água (PIVELI e KATO, 2006).

Após 1 mês de operação dos 2 tipos diferentes de estação disponibilizados pelas empresas SEMASA e Fluid Brasil, foi possível observar a eficiência das duas tecnologias. Primeiramente foi realizado o teste de análise de variância (ANOVA) dos dados obtidos, onde foram comparadas as médias de todos os tratamentos. Na Tabela 7 estão apresentados os dados obtidos para o parâmetro cor aparentes.

**Tabela 7 - Resultados do teste de análise de variância (ANOVA) para o parâmetro cor aparente.**

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	1378624	2	689312,1	91,88286	4,33E-31	3,02
Dentro dos grupos	2003054	267	7502,074			
Total	3381678	269				

Legenda: SQ – soma dos quadrados; gl – graus de liberdade; MQ – soma média dos quadrados; F - valor da estatística F utilizada para realizar o teste de hipótese; valor-P - probabilidade de significância; F crítico - valor onde o ponto sobre a distribuição da estatística de teste sob a hipótese nula que define um conjunto de valores que chama para rejeitar a hipótese nula.

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Desta forma, observou-se uma diferença estatisticamente significativa em pelo menos uma das médias dos tratamentos ( $p < 0,05$ ). Assim, foi aplicado o teste de Tukey (5% de significância) para verificação da diferença significativa entre as médias (Tabela 8) e em seguida foram gerados gráficos boxplot para uma melhor visualização dos dados (Figuras 10 e 11).

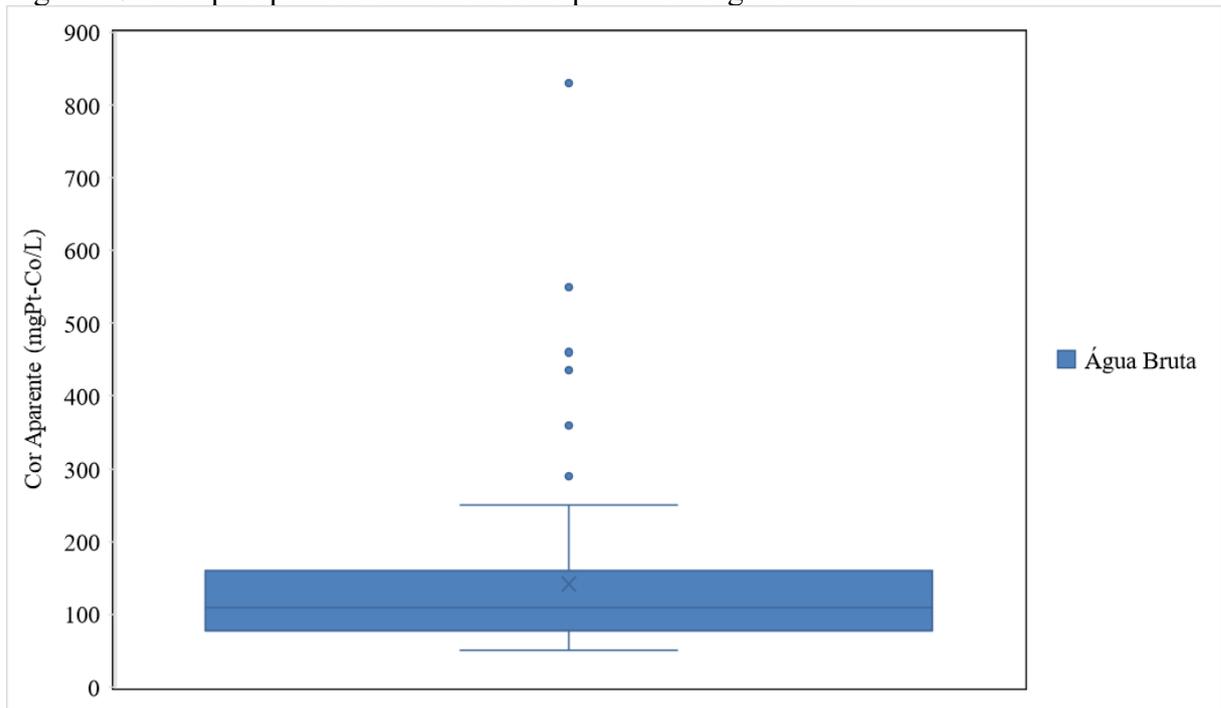
**Tabela 8 - Resultado do teste de Tukey para o parâmetro cor aparente (mgPt/Co.L<sup>-1</sup>).**

<b>Tratamentos</b>	<b>Médias</b>	<b>Significância</b>
Água Bruta	142,00	a
Convencional	2,12	b
UF	0,27	b

Obs.: letras iguais indicam que, no nível de 5% de significância, não há diferença entre as médias.

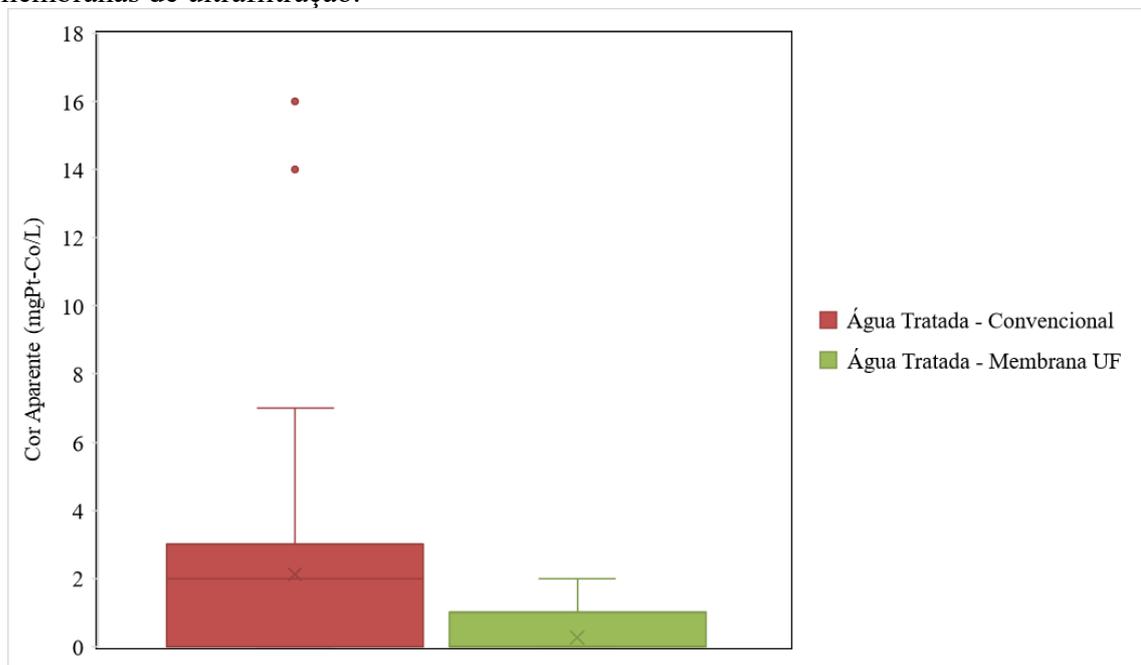
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 10 - Boxplot para os valores de cor aparente da água bruta.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 11 - Boxplot para os valores de cor aparente para a água tratada via sistema convencional e membranas de ultrafiltração.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Conforme a Figura 11, a maioria dos valores ficaram entre 45 a 188,71 mgPt/Co.L<sup>-1</sup> cor aparente, tendo 15 valores de 188,71 a 332,43 mgPt/Co.L<sup>-1</sup>, 15 valores de 332,43 a 476,14 mgPt/Co.L<sup>-1</sup> e alguns blocos com valores unitários de cor, chegando até

907 - 1000 mgPt/Co.L<sup>-1</sup>. Já os dados apresentados na Figura 12 para a água tratada, demonstram que tanto pela estação convencional quanto o sistema de de ultrafiltração, a qualidade da água atingiu os parâmetros exigidos pela portaria vigente. A cor aparente média obtida para o sistema convencional foi de 2,12 mgPt/Co.L<sup>-1</sup> para o sistema de membranas de ultrafiltração foi de 0,27 mgPt/Co.L<sup>-1</sup>, ambos abaixo do limite máximo permitido segundo a portaria GM/MS 888 de 2021 de 15 mgPt/Co.L<sup>-1</sup>. Embora a média da cor aparente da água tratada via sistema convencional seja superior, não foi observada diferença significativa em relação à água obtida pelo sistema UF, segundo o teste de Tukey a 5%.

### 3.2.2 Turbidez

A turbidez se deve à quantidade de sólidos suspensos como silte, argila e areia, além de matéria orgânica e inorgânica de fina granulometria que apresentam tamanhos maiores que o comprimento de onda da luz branca, tornando a água com aspecto escuro e turvo (COUTO, s.d.). Na Tabela 9 estão os dados da análise de variância (ANOVA) obtidos para o parâmetro turbidez.

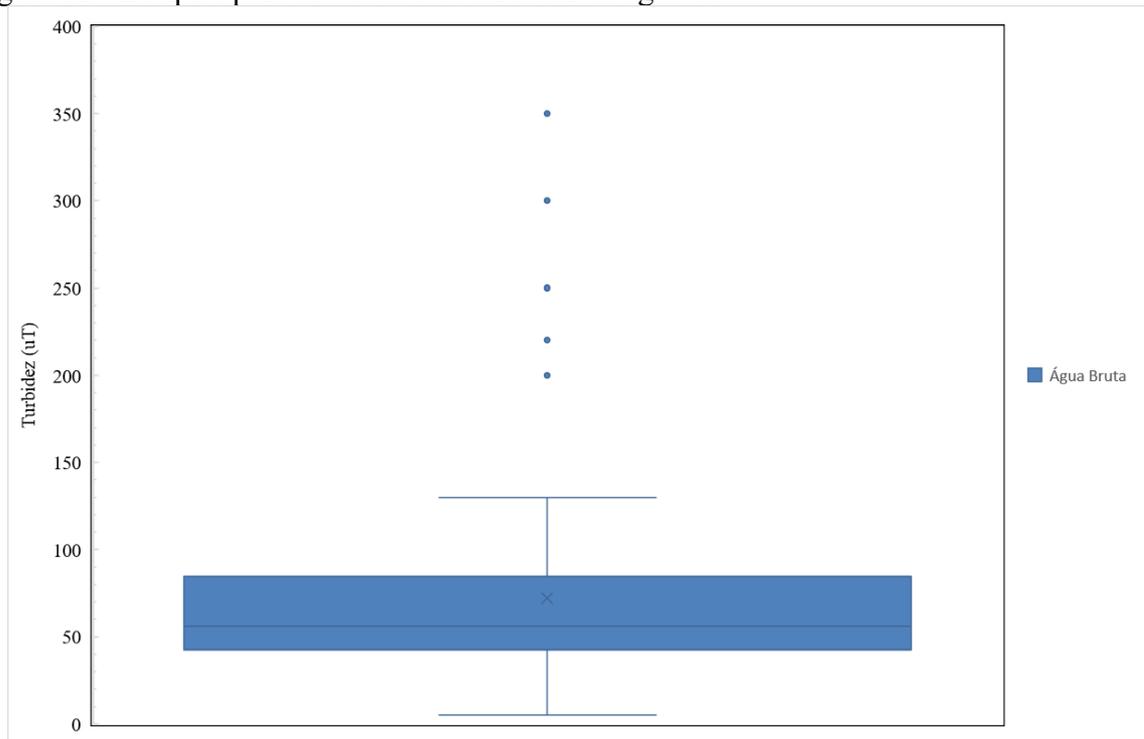
Tabela 9 - Resultados do teste de análise de variância (ANOVA) para o parâmetro turbidez.

Tratamentos	Médias	Significância
Água Bruta	72,11	a
Convencional	1,90	b
UF	0,19	b

Obs.: letras iguais indicam que, no nível de 5% de significância, não há diferença entre as médias.

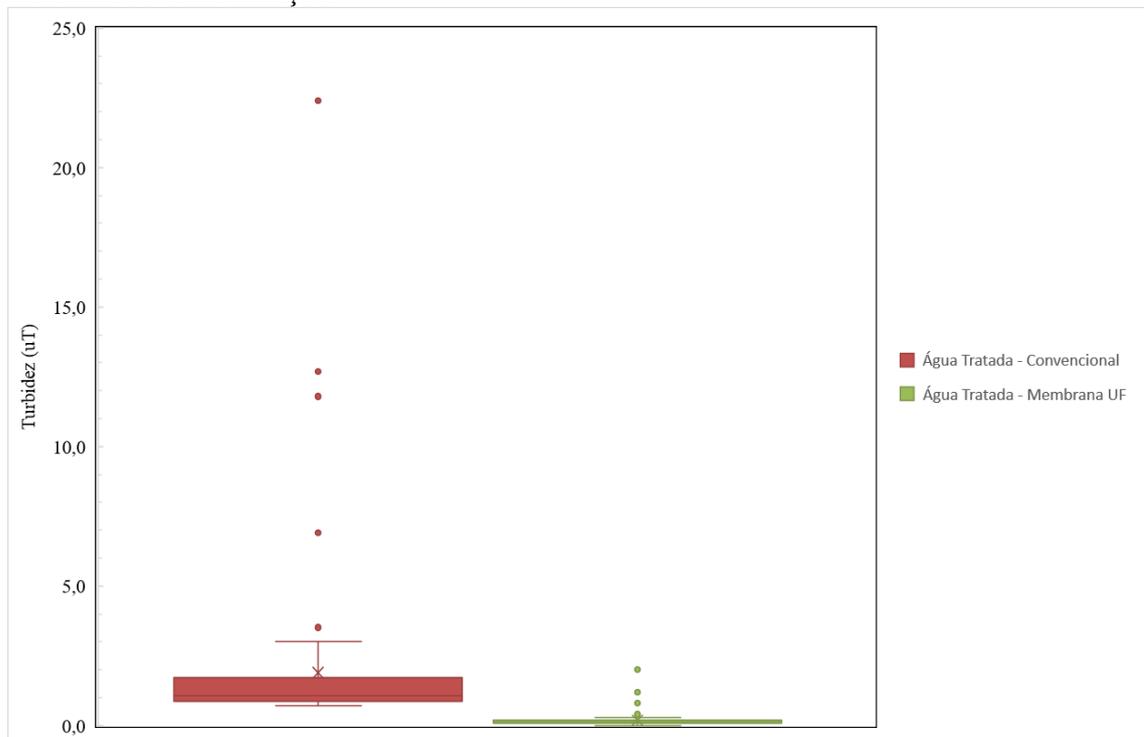
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 12 - Boxplot para os valores de turbidez da água bruta.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 13 - Boxplot para os valores de turbidez para a água tratada via sistema convencional e membranas de ultrafiltração.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Os dados da turbidez para a água bruta ficaram na maioria entre 5 e 54 NTU, tendo alguns valores acima disso, chegando até de 301 a 369 NTU. O valor da turbidez média foi de 72,11 NTU.

A Figura 13 apresenta os resultados obtidos para a turbidez medida na água bruta após o tratamento pelas estações convencional e de membrana. O valor médio para a turbidez obtida pelo sistema convencional foi de 1,90 NTU e para o sistema de ultrafiltração foi de 0,19 NTU. Embora a turbidez pelo sistema convencional seja superior, não foi observada diferença estatisticamente significativa entre as médias. Neste sentido, o valor médio da turbidez tratado pelo sistema convencional esteve abaixo do limite máximo estabelecido para a água tratada segundo a portaria GM/MS 888 de 2021 de 5 NTU. Entretanto, em algumas amostras foi observado um valor de turbidez desde 0,7 NTU até valores acima deste limite, atingindo 22,4 NTU. Assim, observa-se uma maior instabilidade na qualidade da água tratada obtida pelo sistema convencional. Já para o sistema de ultrafiltração, de acordo com o art.29 da portaria GM/MS 888 de 2021, em seu § 12º, “para sistemas de abastecimento de água (SAA) com tratamento por filtração em membrana, deve-se obter um efluente filtrado com turbidez menor ou igual a 0,1 uT em pelo menos 99% das medições realizadas no mês”. Desta forma, observou-se que a média superou este valor, tendo medições individuais desde 0 até 2 NTU. Cabe ressaltar que a obtenção dos dados foi obtida na vigência da revogada Portaria 2914 de 2011 e neste caso não havia uma especificação para a turbidez obtida por sistemas de ultrafiltração, sendo a turbidez da água tratada devendo ser mantida a 5 NTU. Neste sentido, adequações na operação da membrana envolvendo a taxa de aplicação, a pressão transmembrana e uma eventual utilização de coagulante poderiam ser consideradas para a adequação à legislação atual. Nas condições de operação, por volta de 53% das amostras obtiveram turbidez menor que 0,1 NTU.

### **3.2.3 Potencial hidrogeniônico (pH)**

O pH representa a atividade resultante da dissociação do íon hidrogênio ( $H^+$ ) na própria molécula, na forma logarítmica, e posteriormente a adição do hidrogênio proveniente de efluentes industriais, ácidos orgânicos da decomposição anaeróbia da matéria orgânica, e qualquer outra substância que apresente reação ácida com a água (LIBÂNIO, 2010). A Tabela 10 apresenta os dados obtidos após a aplicação da análise de variância (ANOVA) para os dados de pH.

Tabela 10 -. Resultados do teste de análise de variância (ANOVA) para o parâmetro pH.

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,584162	2	0,292081	3,590165	0,028934	3,029597
Dentro dos grupos	21,72202	267	0,081356			
Total	22,30619	269				

Legenda: SQ – soma dos quadrados; gl – graus de liberdade; MQ – soma média dos quadrados; F - valor da estatística F utilizada para realizar o teste de hipótese; valor-P - probabilidade de significância; F crítico - valor onde o ponto sobre a distribuição da estatística de teste sob a hipótese nula que define um conjunto de valores que chama para rejeitar a hipótese nula.

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Uma vez que foi constatada existência de diferença significativa entre pelo menos duas médias ( $p < 0,05$ ), foi aplicado o teste de Tukey (a 5% de significância) para avaliação da diferença significativa entre as médias (Tabela 11) e em seguida foram gerados gráficos boxplot para uma melhor visualização dos dados (Figura 14).

Tabela 11 - Resultado do teste de Tukey para o parâmetro pH

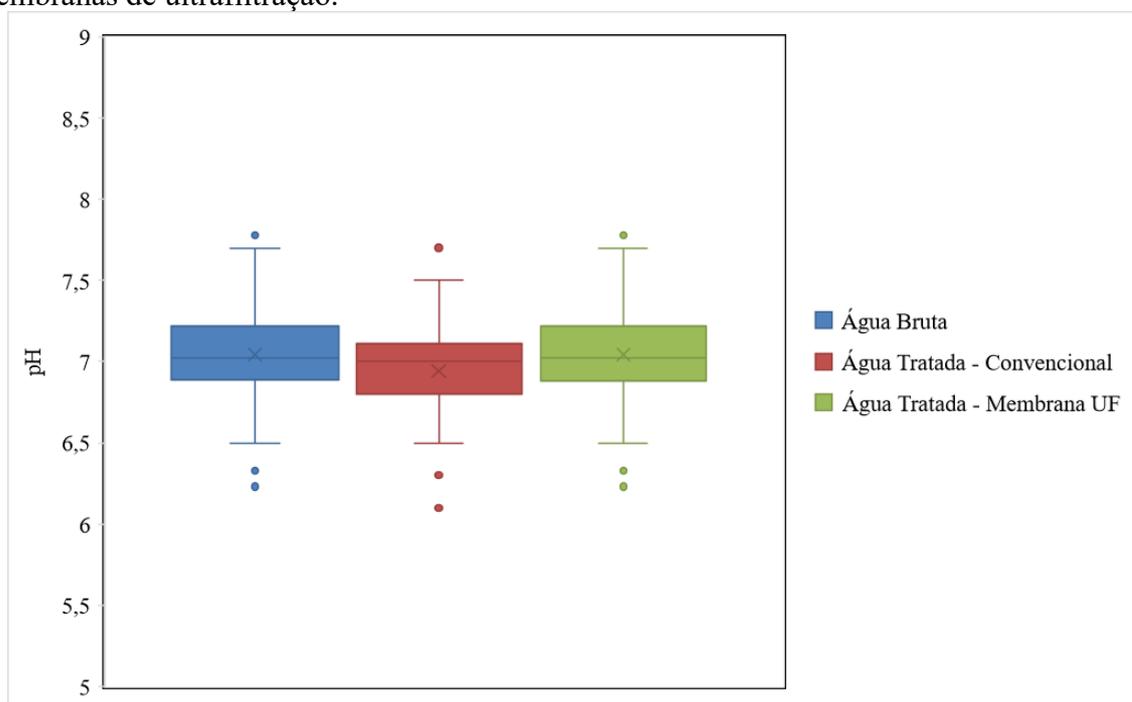
Tratamentos	Médias	Signif
UF	7,04	a
Água Bruta	7,04	ab
Convencional	6,94	b

Obs.: letras iguais indicam que, no nível de 5% de significância, não há diferença entre as médias.

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Os resultados mostraram que o valor médio obtido para o pH da água tratada pelo sistema convencional (6,94) é menor que o da água bruta e da água obtida pelo tratamento pelo sistema de ultrafiltração (7,04). Esta diferença está associada à natureza do tratamento via coagulação e floculação com PAC, o qual consome alcalinidade do meio e possui tendência à diminuição do pH. Já o sistema de UF que realiza a remoção dos contaminantes de forma física produziu água com pH que não apresentou um valor médio significativamente diferente em relação à média observada para a água bruta.

Figura 14 - Boxplot para os valores de pH para a água tratada via sistema convencional e membranas de ultrafiltração.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Os dados obtidos para o pH da água bruta ficaram na maioria entre 6,70 e 7,51, tendo algumas medições apresentando valores acima e abaixo desta faixa, mas com uma tendência à obtenção de valores próximos da faixa de neutralidade (Figura 14) para os três grupos de amostras estudadas.

No tratamento de água para abastecimento, o pH é peça importante em diversos processos. A coagulação e floculação dependem de um pH ótimo para serem eficientes, sendo esse pH ótimo a situação em que as partículas coloidais apresentam menor carga eletrostática superficial (LIBÂNIO, 2010). Já para o tratamento por membranas o pH não é fator preponderante para se obter uma água de qualidade

### 3.3 AVALIAÇÃO ECONÔMICA

#### 3.3.1 Investimento inicial para implantação dos sistemas

Na Tabela 12 são apresentados os custos relativos à implantação dos sistemas convencional e por membranas.

Tabela 12 - Investimento inicial para implantação dos sistemas de tratamento de água.

<b>Modelo</b>	<b>Componente</b>	<b>Valor Inicial</b>	
<b>Convencional</b>	Licenças Ambientais	R\$	60.000,00
	Equipamentos	R\$	8.000.000,00
	Preparação do terreno - terraplanagem	R\$	50.000,00
	Mão de Obra	R\$	390.000,00
	<b>Total</b>	<b>R\$</b>	<b>8.500.000,00</b>
<b>Membrana</b>	Licenças Ambientais	R\$	60.000,00
	Equipamentos	R\$	13.800.000,00
	Preparação do terreno - terraplanagem	R\$	50.000,00
	Mão de Obra	R\$	590.000,00
	<b>Total</b>	<b>R\$</b>	<b>14.500.000,00</b>

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Pode-se observar uma elevada diferença nos custos de implantação, ou seja, uma diferença de R\$ 6.000.000,00 entre os dois sistemas. Em uma primeira análise, os investidores podem ter uma avaliação simplista e descartar totalmente a estação por membranas, porém, outros aspectos devem ser levados em consideração no processo de tomada de decisão, tais como o CMP, além dos aspectos de qualidade da água tratada já discutidos no tópico anterior.

A estação por membranas tem um custo elevado em comparação com a estação convencional devido aos seus equipamentos e materiais, sobretudo em relação às membranas que são de materiais específicos e de formação complexa, assim como as bombas de alta pressão e vasos de pressão, os quais aumentam os custos de instalação deste equipamento.

É importante mencionar que os meios filtrantes dos dois sistemas já estão incluídos no valor de implantação das estações, porém, os mesmos têm um tempo de vida útil curto, devendo ser substituídos periodicamente, ou seja, a cada 4 anos.

### 3.3.2 Custo da água tratada

Neste tópico são apresentados os custos da água tratada, em R\$/m<sup>3</sup>, considerando os custos de implantação das estações e os custos para as operações ao longo de suas vidas úteis (Tabelas 13 e 14).

Tabela 13 - Custo Médio de Produção (R\$/m<sup>3</sup>) da água tratada no sistema convencional com capacidade de 9 milhões de m<sup>3</sup>/ano.

Descrição	Valor (R\$)	Tempo (anos)	CAE (R\$/ano)	CMP (R\$/m <sup>3</sup> )
<b>Estação convencional</b>	8.500.000,00	30	437.033,85	0,0486
<b>Meio filtrante</b>	400.000,00	4	107.765,26	0,0120
<b>Mão de obra</b>	343.300,00	1	343.300,00	0,0381
<b>Insumos químicos</b>	552.365,00	1	552.365,00	0,0614
<b>Tratamento do resíduo</b>	300.000,00	1	300.000,00	0,0333
<b>Energia</b>	38.880,00	1	38.880,00	0,0043
CMP total				0,1977

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

De acordo com os dados apresentados na Tabela 13, o CMP é de R\$ 0,20/m<sup>3</sup>. Verifica-se que o custo com insumos químicos (R\$ 0,0614/m<sup>3</sup>) é o que apresenta o maior impacto sobre o custo total, seguido do custo de implantação da estação (R\$ 0,0486/m<sup>3</sup>). Os dados encontrados são semelhantes ao trabalho apresentado por Mierzwa et al., (2008), que chegaram a um valor de R\$ 0,20 por m<sup>3</sup> de água tratada produzida.

Tabela 14 - Custo Médio de Produção (R\$/m<sup>3</sup>) da água tratada no sistema por membranas com capacidade de 9 milhões de m<sup>3</sup>/ano.

Descrição	Valor (R\$)	Tempo (anos)	CAE (R\$/ano)	CMP (R\$/m <sup>3</sup> )
<b>Estação Membrana</b>	14.500.000,00	30	745.528,34	0,0828
<b>Meio filtrante</b>	1.000.000,00	4	269.413,15	0,0299
<b>Mão de obra</b>	343.300,00	1	343.300,00	0,0381
<b>Energia</b>	777.600,00	1	777.600,00	0,0864
CMP total				0,2373

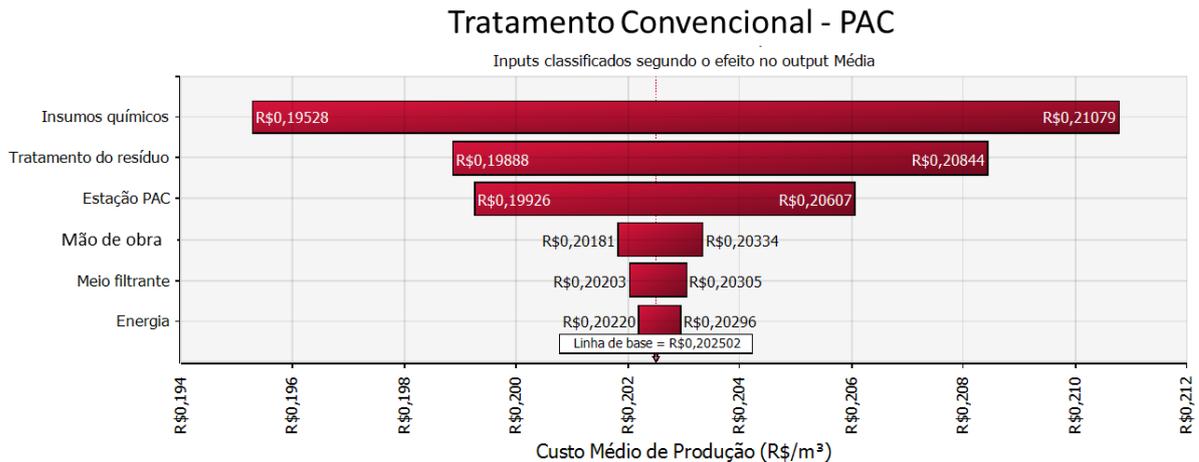
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

De acordo com os dados apresentados na Tabela 14, o CMP é de R\$ 0,24/m<sup>3</sup>. Verificam-se os custos de implantação e de operacionalização da estação por membranas podendo visualizar os custos de maior impacto, que neste caso é o custo com energia chegando a R\$ 0,0864/m<sup>3</sup>, seguido do custo da estação, de R\$ 0,0828/m<sup>3</sup>. Mierzwa et al., (2008) chegaram a um valor de R\$ 0,40/m<sup>3</sup> de água tratada produzida, evidenciando que houve uma redução significativa dos custos após 15 anos, atribuído principalmente à melhora na tecnologia e ao barateamento dos equipamentos e periféricos.

### 3.3.3 Avaliação de risco: impactos das variáveis sobre o custo

A avaliação de risco foi realizada para verificar qual o impacto da variação dos preços dos itens de custo sobre o CMP. Inicialmente, os gráficos de tornado demonstram o grau de importância que cada item de custo apresenta sobre o CMP, tanto para a estação convencional (Figura 15) como para a estação por membranas (Figura 16).

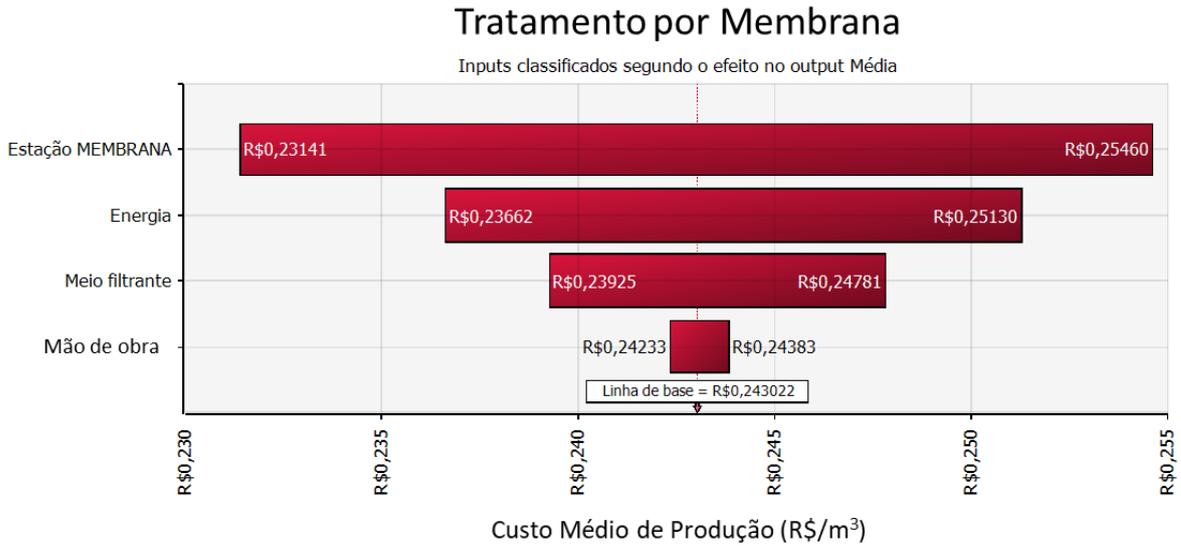
Figura 15 - Impactos das variáveis de risco sobre o custo de uma estação convencional.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

A Figura 15 nos mostra que a variável de maior impacto sobre os custos na estação convencional é representada pelos insumos químicos, seguida do tratamento do resíduo. A variação decorrente dos insumos químicos oscila de R\$ 0,1953/m<sup>3</sup> no melhor dos cenários até R\$ 0,2108/m<sup>3</sup> no pior dos cenários comparando-se com o custo médio R\$ 0,20/m<sup>3</sup>. Com relação à destinação dos resíduos, uma variação para o pior cenário chama a atenção podendo chegar a um custo de R\$ 0,2084/m<sup>3</sup>.

Figura 16 - Impactos das variáveis de risco sobre o custo de uma estação por membranas.



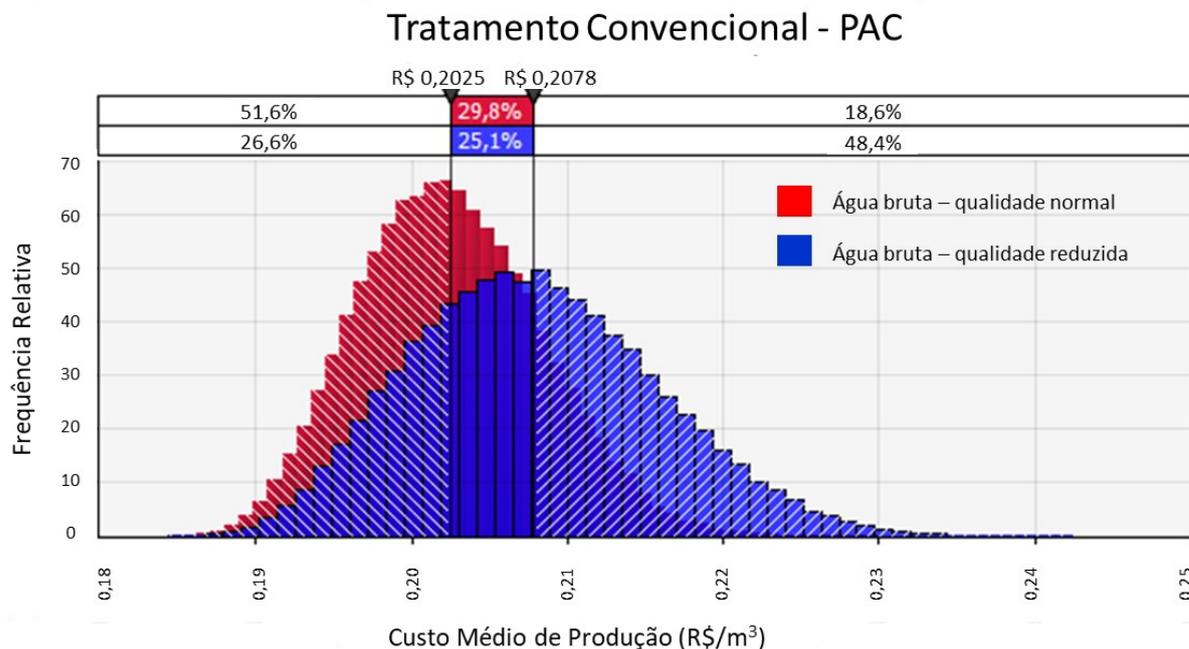
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

A Figura 16 nos mostra que o maior impacto gerado em custos na estação por membrana é a sua implantação, podendo variar de R\$ 0,2314/m³ no melhor dos cenários até R\$ 0,2546/m³ no pior dos cenários, comparando-se com o custo médio R\$ 0,24/m³. Com relação ao consumo de energia, verifica-se que uma variação para o pior cenário chama a atenção podendo chegar a um custo de R\$ 0,2513/m³.

Nota-se que para a estação convencional, o custo devido ao uso de insumos químicos e seu respectivo lodo gerado são as variáveis que mais impactaram sobre as variações dos custos de tratamento de água. Já para a estação por membrana, o custo de implantação da estação associado ao seu maior consumo de energia são os componentes mais importantes.

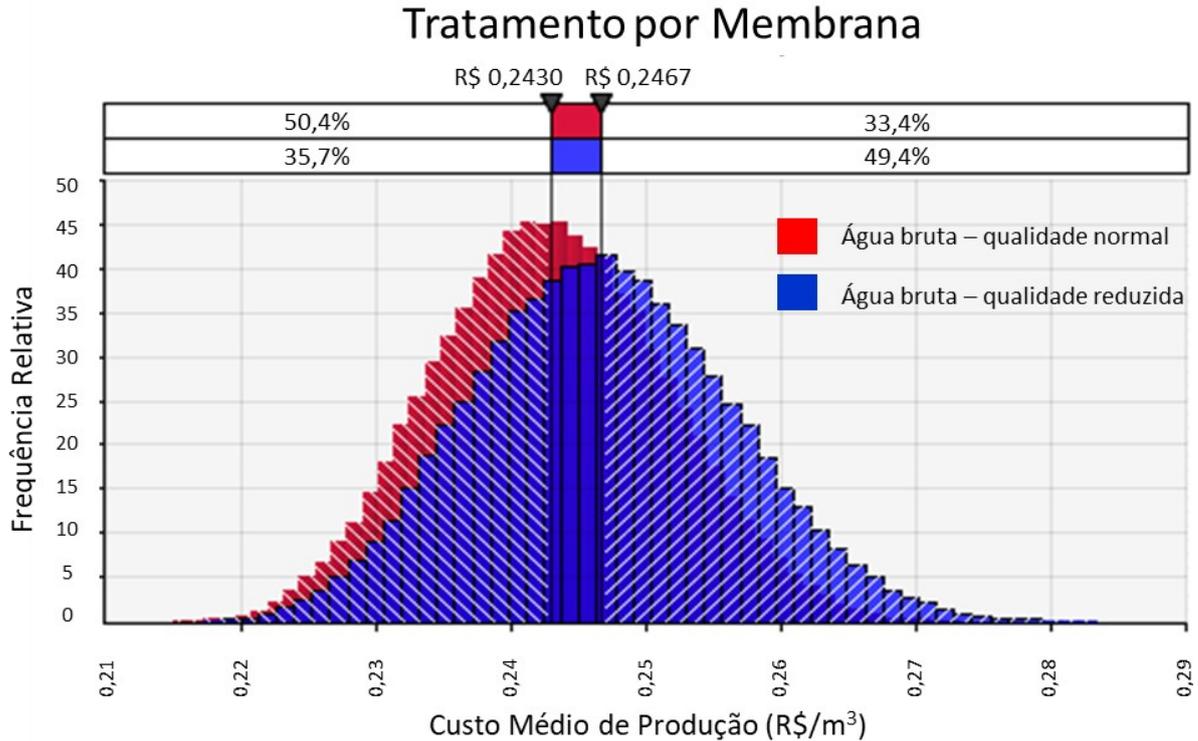
A análise de risco considera os efeitos simultâneos de mais de uma variável nos indicadores econômicos. As Figuras 17 e 18 apresentam os gráficos da análise de probabilidade de risco em relação ao custo da água tratada para os sistemas convencional e por membrana, respectivamente. O curva em vermelho representa a distribuição de probabilidade do custo em um cenário normal, ou seja, em condições em que a água bruta apresenta qualidade padrão. Já a curva em azul representa a distribuição de probabilidade do custo considerando a piora da qualidade da água bruta tratada pelos sistemas.

Figura 17 - Distribuição de probabilidade do custo da água tratada (CMP em R\$/m<sup>3</sup>) pelo sistema convencional, para dois padrões de qualidade da água.



De acordo com a Figura 17, considerando as condições normais de qualidade da água bruta para tratamento (curva em vermelho), o custo total variou de R\$ 0,1844/m<sup>3</sup> à R\$ 0,2300/m<sup>3</sup>, com com valor médio de R\$ 0,2025/m<sup>3</sup>. Estas alterações representam uma variação de -8,9% e 13,6% em relação ao CMP. Por outro lado, na presença de eventos adversos, ou seja, com a piora da qualidade da água bruta, o custo variou de R\$ 0,1844/m<sup>3</sup> à R\$ 0,2425/m<sup>3</sup>, com média de R\$ 0,2078/m<sup>3</sup>. Nota-se que a alteração da qualidade da água aumentou o custo médio do tratamento convencional em 2,6%.

Figura 18 - Distribuição de probabilidade do custo da água tratada (CMP em R\$/m<sup>3</sup>) pelo sistema por membrana, para dois padrões de qualidade da água.



No caso do tratamento da água por membrana (Figura 18), considerando as condições normais de qualidade da água bruta para tratamento (curva em vermelho), o custo total variou de R\$ 0,2150/m<sup>3</sup> à R\$ 0,2734/m<sup>3</sup>, com com valor médio de R\$ 0,2430/m<sup>3</sup>. Estas alterações representam uma variação de -11,5% e 12,5% em relação ao custo médio. Por outro lado, na presença de eventos adversos, ou seja, com a piora da qualidade da água bruta, o custo variou de R\$ 0,2173/m<sup>3</sup> à R\$ 0,2834/m<sup>3</sup>, com média de R\$ 0,2467/m<sup>3</sup>. Nota-se que a alteração da qualidade da água aumenta o custo médio do tratamento pelo sistema de membranas em 1,5%. A análise comparativa entre os dois sistemas nota-se que o CMP da água tratada na estação por membrana é 20,0% maior do que na estação convencional. Os impactos das oscilações dos itens de custo sobre o CMP mostraram-se relativamente semelhante nos dois sistemas avaliados, assim como em relação à piora da qualidade da água.

## 4 CONCLUSÃO

O presente trabalho objetivou realizar uma avaliação técnica e econômica de duas tecnologias de tratamento de água, uma convencional e outra por membranas por ultrafiltração. Ademais, verificou-se os riscos associados a esse tipo de investimento, de modo a apresentar instrumentos de análise que permitem subsidiar a tomada de decisão sob condições de incerteza. Foram considerados os dois cenários de tratamento com diferentes eventos de impacto negativos sobre os custos.

Com relação à avaliação técnica das estações, foi verificado que a eficiência em termos de remoção de turbidez e cor aparente, bem como a estabilização nos valores de pH. Considerando estes critérios, a estação por membranas apresentou uma melhor eficiência, devido a sua capacidade de não alterar suas características devido as oscilações na água bruta. Por outro lado, as dosagens na estação convencional são dependentes das alterações da qualidade da água bruta, o que muitas vezes leva a uma condição adversa na qualidade de água tratada.

Com relação à avaliação econômica o oposto foi verificado, sendo que a estação por membrana apresentou um custo por m<sup>3</sup> de água tratada maior que a estação convencional. A estação por membrana em condições de qualidade da água bruta normal apresentou um CMP de R\$ 0,24/m<sup>3</sup>, enquanto a estação convencional apresentou um CMP de R\$ 0,20/m<sup>3</sup>, demonstrando maior atratividade econômica para a estação convencional.

Com relação às análises de risco, a variação em torno do CMP foi relativamente semelhante para os dois sistemas avaliados, cuja variação foi de -11,5% até +14,9%. Por outro lado, o impacto decorrente da piora da qualidade da água foi menor na estação por membrana, aumentado o CMP em 1,5%. Por outro lado, para a estação convencional, este custo aumentou em 2,6% com a concretização dos eventos adversos, demonstrando que a estação convencional é mais afetada do que a estação por membranas em decorrência da piora da qualidade da água.

O tomador de decisão deverá observar tanto os dados técnicos quanto os econômicos para a escolha da estação que melhor para suas necessidades. No cenário em que se apresentou a realidade de Lages/SC, a estação convencional ainda seria uma boa opção de uso, porém, visando uma melhor estabilidade na qualidade da água, a estação por membranas deveria ser escolhida.

Embora a estação por membrana tenha apresentado um CMP maior do que a convencional, outros benefícios são relatados e relacionados à melhor qualidade da água

tratada, como por exemplo, a remoção de agrotóxicos, os quais não são captados pelo sistema tradicional de cálculo de custos de produção. Neste sentido, novos estudos futuros são recomendados para valorar os benefícios desse sistema de tratamento para contribuir para uma análise mais aprofundada da relação Benefício/Custo e melhor subsidiar o processo de tomada de decisão.

## REFERÊNCIAS

ABNT. **ABNT NBR 12216**: projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION; AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION; WATER ENVIRONMENT FEDERATION. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 22. ed. Washington, D.C.: American Public Health Association, 2012.

AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION. **Manual of water supply practices: microfiltration and ultrafiltration membranes for drinking water**. 1. ed. Denver: American Water Works Association, 2005

BAHADORI, A.; CLARK, M.; BOYD, B. **Essentials of water systems design in the oil, gas, and chemical processing industries**. 1. ed. Berlin: Springer, 2013.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. 2021a. Taxas de juros básicas – histórico. Disponível em: <<https://www.bcb.gov.br/controleinflacao/historicotaxasjuros>>. Acesso em: 10 de out. de 2021.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. 2021b. Histórico das metas para a inflação. Disponível em: <<https://www.bcb.gov.br/controleinflacao/historicometas>>. Acesso em: 10 de out. de 2021.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021. [Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS nº 5, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade]. **Diário Oficial da União**: edição 85: seção 1: Ministério da Saúde/Gabinete do Ministro, Brasília, p. 127, 07 mai. 2021.

CASAROTTO FILHO, N.; KOPITCKE, B. H. **Análise de investimentos**: matemática financeira, engenharia econômica, tomada de decisão, estratégia empresarial. 11. ed. São Paulo: Atlas, 2010.

COUTO, J.L.V. Parâmetros: fatores técnicos e científicos. Limnologia. Disponível em: <<http://www.ufrj.br/institutos/it/de/acidentes/turb.htm>>. Acesso em: 10 de out. de 2021.

DI BERNARDO, L. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. volume 1. 2. ed. São Carlos: Rima, 2005.

DU, J. R. Modification of membrane surfaces via microswelling for fouling control in drinking water treatment. **Journal of Membrane Science**, v. 475, p. 488-495, 2015.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Membrane filtration guidance manual**. Cincinnati: United States Environmental Protection Agency – Office of Ground Water and Drinking Water, 2005.

GITMAN, L. **Princípios de administração financeira**. 12. ed. São Paulo: Pearson/Addison Wesley, 2010.

HOWE, K.J.; HAND, D.W.; CRITTENDEN, J.C.; TRUSSEL, R.R.; TCHOBANOGLIOUS, G. **Princípios de tratamento de água**. 1. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. 2018. Panorama. Lages. Disponível em: <<http://cidades.ibge.gov.br/brasil/sc/lages/panorama>>. Acesso em: 08 de ago. de 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pesquisa nacional de saneamento básico**. Rio de Janeiro: IBGE, 2017.

KAWAMURA, S. **Integrated design and operation of water treatment facilities**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 2000.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. 3. ed. rev. e ampl. Campinas: Átomo, 2010.

MAC KENZIE, W.R. *et al.* A massive outbreak in milwaukee of cryptosporidium infection transmitted through the public water supply. **The New England Journal of Medicine**, v. 331, p. 161-167, 1994.

MARTINS, A.A.; OLIVEIRA, R.M.S.; GUARDA, E.A. Potencial de uso de compostos orgânicos como, coagulantes, floculantes e adsorventes no tratamento de água e efluentes. **Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista**, v. 10, n. 12, p. 168-183, 2014.

MICKLEY & ASSOCIATES. **Membrane concentrate disposal: practices and regulation**. Denver: U.S. Department of the Interior, 2006.

MIERZWA, J.C.; SILVA, M.C.C.; RODRIGUES, L.D.B.; HESPANHOL, I. Tratamento de água para abastecimento público por ultrafiltração: avaliação comparativa através dos custos diretos de implantação e operação com os sistemas convencional e convencional com carvão ativado. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 13, n.1, p. 78-87, 2008.

OLADOJA, N. A. Headway on natural polymeric coagulants in water and wastewater treatment operation. **Journal of Water Process Engineering**, v. 6, p. 174-192, 2015.

PALISADE. **@Risk 7**. Corporation. Version 7,0.0. 2015.

PIVELI, R.P.; KATO, M.T. **Qualidade das águas e poluição: aspectos físico-químicos**. 1. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2006.

PRATES, G.A.; SCHAITZA, E.G. Wood gasification energy micro-generation system in Brazil- a Monte Carlo viability simulation. **Independent Journal of Management & Production**, v. 9, n. 1, p. 140-152, 2018.

RAFAELI NETO, S.L; BECEGATO, V.A.; CABRAL, J.B.P. Monitoramento da qualidade da água do rio caveiras no planalto serrano de Santa Catarina com suporte de tecnologia de geomática. **Boletim Goiano de Geografia**, v. 33, n. 1, p. 17-36, 2013.

RONDEAU, V.; JACQMIW-GADD, H.; COMMENGES, D.; HELMR, C.; DARTIGUES, J. Aluminum and silica in drinking water and the risk of Alzheimer's disease or cognitive decline: findings from 15-year follow-up of the PAQUID cohort. **American Journal of Epidemiology**, v. 169, n. 4, p. 489-496, 2009.

SEVERIS, R.M.; SILVA, F.A.; WAHRLICH, J.; SKORONSKI, E.; SIMIONI, F.J. Economic analysis and risk-based assessment of the financial losses of domestic rainwater harvesting systems. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 146, p. 206-217, 2019.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. 2021. Painel de Informações sobre Saneamento. Disponível em: < <http://www.snis.gov.br/>>. Acesso em: 28 de abr. de 2021.

SMITH, P.G.; MERRITT, G.M. **Proactive risk management controlling uncertainty in product development**. 1. ed. Boca Raton: CRC Press. 2002.

TARPANI, R.R.Z. **Remoção de alumínio monomérico de água para abastecimento através da ação da carboximetilcelulose e da quitina**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

WOLKMER, M.F.S.; PIMMEL, N.N. Política nacional de recursos hídricos: governança da água e cidadania ambiental. **Seqüência (Florianópolis)**, v. 34, n. 67, p. 165-198, 2013.

XING, J. *et al.* Combined effects of coagulation and adsorption on ultrafiltration membrane fouling control and subsequent disinfection in drinking water treatment. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 26, p. 33770–33780, 2019.