

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS  
E SANEAMENTO AMBIENTAL

BRUNO CIRIA SAUL

VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA  
DA RECIRCULAÇÃO DA ÁGUA DE LAVAGEM DE FILTROS  
EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA

PORTO ALEGRE  
OUTUBRO/2023

BRUNO CIRIA SAUL

VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA  
DA RECIRCULAÇÃO DA ÁGUA DE LAVAGEM DE FILTROS  
EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de mestre.

Orientador: Dr. Gino Roberto Gehling

Coorientadora: Dra. Maria Cristina de Almeida Silva

PORTO ALEGRE

OUTUBRO/2023

#### CIP - Catalogação na Publicação

Saul, Bruno Ciria

Viabilidade técnica e econômica da recirculação da água de lavagem dos filtros em estações de tratamento de água / Bruno Ciria Saul. -- 2023.

130 f.

Orientador: Gino Robert Gehling.

Coorientador: Maria Cristina de Almeida Silva.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Porto Alegre, BR-RS, 2023.

1. Água de lavagem dos filtros. 2. Barrela. 3. Qualidade da água. 4. Tratamento de água. 5. Recirculação. I. Gehling, Gino Robert, orient. II. Silva, Maria Cristina de Almeida, coorient. III. Título.

BRUNO CIRIA SAUL

VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA  
DA RECIRCULAÇÃO DA ÁGUA DE LAVAGEM DE FILTROS  
EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

\_\_\_\_\_ em: Porto Alegre, 27 de outubro de 2023.

---

Dr. Gino Roberto Gehling – IPH/UFRGS  
Orientador

---

Dra. Maria Cristina de Almeida Silva – IPH/UFRGS  
Coorientadora

---

Dr. Antônio Domingues Benetti – IPH/UFRGS  
Examinador

---

Dr. Fernando Jorge Correa Magalhães Filho – IPH/UFRGS  
Examinador

---

Dr. Tiago Luis Gomes – SUL MAGNA  
Examinador

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a toda comunidade do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) por propiciar as condições e fornecer as ferramentas necessárias para o pleno desenvolvimento da presente pesquisa, em especial ao professor Dr. Gino Roberto Gehling, que, na condição de orientador, compartilhou, de forma irrestrita, seus conhecimentos e experiências, da definição do tempo ao desenvolvimento do trabalho, à professora Dra. Maria Cristina de Almeida Silva, que se juntou a este empreitada já em andamento, colaborando para a sua continuidade, e aos professores Dr. Antônio Domingues Benetti e Dr. Fernando Jorge Correa Magalhães Filho, por constituírem a banca na condição de examinadores.

Também agradeço ao Departamento Municipal de Águas e Esgotos de Porto Alegre (DMAE/POA), tanto à entidade quanto aos seus funcionários, pela colaboração com esta pesquisa, do dispendioso fornecimento de informações ao irrestrito acesso às instalações, em especial ao Diretor Geral, o Advogado Alexandre Garcia, ao Gerente de Tratamento de Água, o Químico André Petry, à Subgerente de Tratamento de Água, a Química Vanessa Venturi, aos Coordenadores de Tratamento de Água Norte e Sul, respectivamente os Químicos Altair Boelter e Ilo Cesar Garcia da Silva.

Por último, agradeço ao Dr. Tiago Luis Gomes, Diretor Técnico da empresa Sul Magna e Consultor do Banco Mundial, constituinte da banca como examinador, dando continuidade ao ciclo de transmissão de saberes que se iniciou ainda durante a minha graduação, quando me orientou no Trabalho de Conclusão de Curso, no curso de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária pela Faculdade Dom Bosco de Porto Alegre (FDBPA).

## RESUMO

A água de lavagem dos filtros (ALF) representa a maior quantidade, em termos volumétricos, de resíduos de estações de tratamento de água (ETA) do tipo convencional (de ciclo completo) e é caracterizada pela baixa presença de sólidos e alto custo de tratamento. A recirculação da barrela à cabeceira da planta, com ou sem pré-tratamento, é uma alternativa para gerenciamento adequado da ALF, que na maioria das ETA brasileiras são lançadas sem tratamento diretamente nos corpos receptores, o que pode constituir crime ambiental. Essa manobra possui aspectos positivos, como a redução das perdas processuais no tratamento e a redução dos custos operacionais, representados majoritariamente pelos custos com energia elétrica e insumos químicos, e negativos, como o retorno de materiais retidos no filtro à cabeceira da planta, em especial cistos de *Giardia* ssp. e oocistos de *Cryptosporidium* spp., contaminantes altamente resistentes à desinfecção por cloro. O objetivo principal deste trabalho é analisar a viabilidade técnica e econômica da recirculação da água de lavagem dos filtros em estações de tratamento de água e sua metodologia consiste em analisar o impacto desta prática na qualidade da água tratada e no desempenho técnico-econômico das etapas da captação de água bruta e seu tratamento. Os resultados das análises dos analitos *E. Coli* e turbidez realizados pelo DMAE/POA, onde, das cinco maiores ETA, que são objeto de estudo, três realizam a recirculação e outras duas o lançamento diretamente no Lago Guaíba, foram utilizados para análise da interferência da ALF na água tratada. Já a modelagem técnico-econômica, que testou 120 cenários, com e sem recirculação, variando diferentes parâmetros, teve como principal base preços de referências e indicadores econômicos. A partir deste processo, pode-se concluir que a recirculação não impacta na qualidade da água tratada nas ETA objeto de estudo, que há grande potencial para economia em energia elétrica, que a vazão de captação, a altura geométrica entre a captação e o tratamento e a extensão da linha de recalque são as variáveis técnicas mais significantes do ponto de vista econômico. Por fim, foi utilizado modelo de regressão para desenvolver equação para mensurar a potencial economia com a recirculação da barrela.

**Palavras-chave:** Água de lavagem dos filtros; Barrela; Qualidade da água; Tratamento de água; Recirculação.

## ABSTRACT

Backwash water of filters represents the largest quantity in volumetric terms of waste generated in water treatment plants of the conventional type (cycle complete) and is characterized by the low presence of solids and high treatment cost. The recirculation of backwash water at the beginning of the process of the plant is an alternative for adequate management of backwash water, which in most Brazilian treatment plants are released without treatment directly into the rivers and lakes, which constitutes an environmental crime. The positive aspects of recirculating filter washing water include appropriate disposal of this waste, reduction of water losses in the treatment process and the reduction of operational costs, represented mainly by the costs of electrical energy and chemical inputs. However, this practice results in the recirculation of materials retained in the filter back to the beginning of the process, especially cysts of *Giardia* spp. and oocysts of *Cryptosporidium* spp., contaminants highly resistant to chlorine disinfection. The main objective of this work is to analyze the technical and economic feasibility of recirculating filter washing water in water treatment plants and its methodology is divided into analyzing the impact of this practice on the quality of treated water and on the technical-economic performance of the stages of raw water capture and treatment. The results of the analyzes of *E. Coli* and turbidity analytes carried out by the DMAE/POA, where, of the five largest ETAs, which are the object of study, three perform recirculation and two others release directly in Lake Guaíba, were used to analyze the interference of backwash water of filters in the treated water. The technical-economic modeling, which tested 120 scenarios, with and without recirculation, varying different parameters, was mainly based on reference prices and economic indicators. From this process, it can be concluded that the recirculation does not impact the quality of the treated water in the WTP object of study, that there is great potential for savings in electricity, that the flow, the geometric height and the extension of the line are the most significant technical variables from the economic point of view. Finally, a regression model was used to develop an equation to measure the potential savings with the recirculation of the barrel.

**Keywords:** Backwash water; Water quality; Water treatment; Recirculation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema geral da captação e do tratamento comumente aplicados do Brasil. ....	18
Figura 2 – Esquema base de uma ETA de ciclo completo comumente encontrada no Brasil. ....	36
Figura 3 – Perfil de filtro rápido. ....	38
Figura 4 – ALF durante a lavagem dos filtros. ....	43
Figura 5 – Imagem de satélite com locação das EBAB e ETA objetos de estudo. ....	60
Figura 6 – Imagem de satélite com locação das EBAB e ETA dos sistemas Moinhos de Vento e São João. ....	60
Figura 7 – Imagem de satélite da ETA Moinhos de Vento. ....	61
Figura 8 – Registro fotográfico dos filtros da ETA Moinhos de Vento. ....	61
Figura 9 – Imagem de satélite da ETA São João. ....	62
Figura 10 – Registro fotográfico dos filtros da ETA São João. ....	62
Figura 11 – Imagem de satélite com locação das EBAB e ETA do sistema Loureiro da Silva. ....	63
Figura 12 – Imagem de satélite da ETA Loureiro da Silva. ....	63
Figura 13 – Registro fotográfico dos filtros da ETA Loureiro da Silva. ....	64
Figura 14 – Imagem de satélite com locação das EBAB e ETA do sistema Belém Novo. ....	64
Figura 15 – Imagem de satélite da ETA Belém Novo. ....	65
Figura 16 – Registro fotográfico dos filtros da ETA Belém Novo. ....	65
Figura 17 – Imagem de satélite com locação das EBAB e ETA do sistema Tristeza. ....	66
Figura 18 – Imagem de satélite da ETA Tristeza. ....	66
Figura 19 – Registro fotográfico dos filtros da ETA Tristeza. ....	67
Figura 20 – Esquema do roteiro de modelagem técnica para cenário sem recirculação. ....	73
Figura 21 – Roteiro de modelagem técnica para cenário com recirculação. ....	73
Figura 22 – <i>Boxplot</i> da série histórica das taxas anuais de inflação. ....	75
Figura 23 – Esquema do roteiro de modelagem econômica. ....	80
Figura 24 – <i>E. Coli</i> na água bruta. ....	83
Figura 25 – <i>Boxplot</i> dos resultados das análises de turbidez na água bruta. ....	84
Figura 26 – <i>E. Coli</i> na água tratada. ....	85
Figura 27 – <i>Boxplot</i> dos resultados das análises de turbidez na água tratada. ....	87
Figura 28 – Distribuição da turbidez na água tratada. ....	87
Figura 29 – Comparativo entre ETA com e sem recirculação para água bruta e tratada. ....	89
Figura 30 – Comparativo entre ETA com e sem recirculação para água tratada. ....	89
Figura 31 – Gráfico da VPL. ....	91
Figura 32 – Distribuição entre os cenários com e sem recirculação. ....	91
Figura 33 – Superávit dos cenários com recirculação sobre os cenários sem recirculação. ....	92
Figura 34 – Análise da distribuição do VPL para a variável vazão. ....	95
Figura 35 – Análise da distribuição do VPL para a variável altura. ....	95

Figura 36 – Análise da distribuição do VPL para a variável extensão.....	96
Figura 37 – Análise da distribuição da economia para a variável vazão. ....	97
Figura 38 – Análise da distribuição da economia para a variável altura.....	97
Figura 39 – Análise da distribuição da economia para a variável extensão. ....	98
Figura 40 – Verificação do VPL para distribuição normal.....	99
Figura 41 – Verificação da economia com recirculação para distribuição normal. ....	99

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Resumo da classificada Resolução CONAMA 357/2005. ....	27
Quadro 2 – Classificação da água bruta e tratamento mínimo pela ABNT NBR 12.216 (1992). ....	28
Quadro 3 – Indicadores de DRSAl para o Rio Grande do Sul e para o Brasil. ....	29
Quadro 4 – Principais agentes infecciosos encontrados em água contaminada.....	30
Quadro 5 – Aspectos positivos e negativos da recirculação da água de lavagem dos filtros. ....	45
Quadro 6 – Indicadores de inflação.....	53
Quadro 7 – Detalhamento das EBAB.....	57
Quadro 8 – Detalhamento das ETA. ....	58
Quadro 9 – Detalhamento da lavagem dos filtros. ....	59
Quadro 10 – Frequência mínima de análises.....	68
Quadro 11 – Organização de cenários.....	72
Quadro 12 – Resumo da diferença de VPL entre os cenários com e sem recirculação. ....	90
Quadro 13 – Superávit dos cenários com recirculação sobre os cenários sem recirculação em valores absolutos. ....	93
Quadro 14 – Superávit dos cenários com recirculação sobre os cenários sem recirculação em valores percentuais. ....	93
Quadro 15 – Resumo dos resultados da verificação do <i>payback</i> .....	94
Quadro 16 – Matriz de cenários. ....	116

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características predominantes na água de lavagem dos filtros. ....	43
Tabela 2 – Coeficientes de rugosidade para Equação de Hazen-Williams para alguns materiais. ....	48
Tabela 3 – Coeficientes de perda de carga por singularidade. ....	48
Tabela 4 – Rendimento mínimo dos motores elétricos de 4 pólos. ....	50
Tabela 5 – Rendimento médio sugerido para bombas centrífugas a baixa rotação. .	50
Tabela 6 – Folga recomendada para potência instalada. ....	50
Tabela 7 – Série histórica das taxas anuais de inflação. ....	75
Tabela 8 – Variação no preço de referência da energia elétrica distribuída em Porto Alegre/RS. ....	76
Tabela 9 – Fator de valor presente. ....	77
Tabela 10 – Índices de atualização e correção de preços. ....	77
Tabela 11 – Preços de referência. ....	78
Tabela 12 – Preço da tarifa de energia elétrica. ....	79
Tabela 13 – Tarifa de consumo média entre segmentos horários. ....	79
Tabela 14 – Resultados das análises de <i>E. Coli</i> na água bruta. ....	83
Tabela 15 – Resultados das análises de turbidez na água bruta. ....	84
Tabela 16 – Resultados das análises de <i>E. Coli</i> na água tratada. ....	86
Tabela 17 – Resultados das análises de turbidez na água tratada. ....	88
Tabela 18 – Modelos de regressão para conjuntos de duas variáveis. ....	100
Tabela 19 – Modelos de regressão para altura. ....	100
Tabela 20 – Matriz de resultados da modelagem técnica. ....	119
Tabela 21 – Matriz de resultados da modelagem econômica. ....	126
Tabela 22 – Base de custos de elevatórias. ....	130
Tabela 23 – Base de custos para linha de recalque em ferro fundido. ....	130

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ALF	Água de lavagem dos filtros
BCB	Banco Central do Brasil
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
COFINS	Contribuição para o financiamento da seguridade social
DBO	Demanda bioquímica de oxigênio
DBO <sub>5,20</sub>	Teste padrão para quantificação da DBO a 20°C durante 5 dias.
DQO	Demanda química de oxigênio
DMAE/POA	Departamento Municipal de Águas e Esgotos de Porto Alegre
DRSAI	Doenças relacionadas ao saneamento ambiental inadequado
EBAB	Estação de bombeamento de água bruta
ETA	Estação de tratamento de água
FVP	Fator de valor presente
FGV	Fundação Getúlio Vargas
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IGP	Índice geral de preços
INCC	Índice nacional de preços da construção
IPA	Índice de preços ao produtor amplo
IPCA	Índice nacional de preços ao consumidor amplo
LDD	Lodo de descarga dos decantadores
NMP	Número mais provável
OD	Oxigênio dissolvido
OMS	Organização Mundial da Saúde
PIS	Programa de Integração Social
PNRS	Política Nacional dos Resíduos Sólidos
RETA	Resíduos de estações de tratamento de água
SAA	Sistema de abastecimento de água
SUS	Sistema Único de Saúde
TIR	Taxa interna de retorno
VPL (ou VLP)	Valor presente líquido
VMP	Valor máximo permitido

## LISTA DE SÍMBOLOS E UNIDADES

AMT	Altura manométrica [mca]
C	Coefficiente de rugosidade
D	Diâmetro [m] [mm]
g	Aceleração da gravidade [m/s <sup>2</sup> ]
H	Altura geométrica [m]
hf	Perda de carga por atrito unitária [m/m]
hs	Perda de carga por singularidades
k	Coefficiente de perda de carga por singularidades
NTU	Unidade Nefelométrica de turbidez [μT]
PC	Potência consumida [W] [kW] [cv]
PH	Potência hidráulica [W] [kW] [cv]
pH	Potencial hidrogeniônico
Q	Vazão [m <sup>3</sup> /s] [L/s]
rpm	Rotação por minuto
V	Volume [m <sup>3</sup> ] [l] [mL]
v	Velocidade [m/s]
β	Parâmetros de ajuste de regressão
γ	Variável dependente
η	Rendimento o conjunto motor-bomba [%]
γ	Peso específico do fluido [N/m <sup>3</sup> ]
κ	Ângulo da curva do sistema [°]

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>17</b>
<b>2</b>	<b>CONTEXTO E JUSTIFICATIVA</b> .....	<b>22</b>
<b>3</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>23</b>
3.1	OBJETIVO GERAL.....	23
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	23
<b>4</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>24</b>
4.1	QUALIDADE DA ÁGUA.....	24
<b>4.1.1</b>	<b>Principais parâmetros</b> .....	<b>24</b>
4.1.1.1	Turbidez .....	24
4.1.1.2	Coliformes .....	25
<b>4.1.2</b>	<b>Padrão de potabilidade</b> .....	<b>25</b>
<b>4.1.3</b>	<b>Qualidade do manancial</b> .....	<b>27</b>
4.2	RISCO MICROBIOLÓGICO .....	29
<b>4.2.1</b>	<b>Doenças relacionadas ao saneamento inadequado</b> .....	<b>29</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Contaminantes microbiológicos emergentes</b> .....	<b>30</b>
4.2.2.1	Giardia ssp. ....	31
4.2.2.2	Cryptosporidium spp.....	32
<b>4.2.3</b>	<b>Histórico de surtos de giardíase, criptosporidiose e outras doenças causadas por protozoários</b> .....	<b>32</b>
<b>4.2.4</b>	<b>Controle laboratorial</b> .....	<b>33</b>
<b>4.2.5</b>	<b>Avaliação quantitativa de risco</b> .....	<b>34</b>
4.3	TRATAMENTO DE CICLO COMPLETO .....	36
<b>4.3.1</b>	<b>Clarificação</b> .....	<b>37</b>
4.3.1.1	Coagulação .....	37
4.3.1.2	Floculação .....	37
4.3.1.3	Decantação .....	38
<b>4.3.2</b>	<b>Filtração</b> .....	<b>38</b>
<b>4.3.3</b>	<b>Desinfecção</b> .....	<b>39</b>
4.4	RESÍDUOS DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA.....	40
<b>4.4.1</b>	<b>Legislação e classificação</b> .....	<b>41</b>
<b>4.4.2</b>	<b>Caracterização da água de lavagem dos filtros</b> .....	<b>43</b>
<b>4.4.3</b>	<b>Recirculação da água de lavagem dos filtros</b> .....	<b>44</b>

4.5	RECALQUE DE ÁGUA.....	46
<b>4.5.1</b>	<b>Perdas de carga por atrito .....</b>	<b>47</b>
<b>4.5.2</b>	<b>Perdas de carga por singularidades.....</b>	<b>48</b>
<b>4.5.3</b>	<b>Curva do sistema.....</b>	<b>48</b>
<b>4.5.4</b>	<b>Potência .....</b>	<b>49</b>
4.6	ANÁLISE DE VIABILIDADE.....	50
<b>4.6.1</b>	<b>Viabilidade técnica .....</b>	<b>51</b>
<b>4.6.2</b>	<b>Viabilidade econômica.....</b>	<b>51</b>
4.6.2.1	Estimativa de custos e de receitas .....	52
4.6.2.2	Inflação.....	52
4.6.2.3	Valor presente .....	53
4.6.2.4	Valor presente líquido.....	54
4.6.2.5	Taxa interna de retorno .....	54
4.6.2.6	Tempo de retorno descontado .....	55
4.7	FERRAMENTA PARA PARA ANÁLISE DA VIABILIDADE .....	55
<b>5</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>56</b>
5.1	HIPÓTESES.....	56
5.2	OBJETO DE ESTUDO .....	57
5.3	QUALIDADE DA ÁGUA.....	67
<b>5.3.1</b>	<b>Base de dados .....</b>	<b>67</b>
<b>5.3.2</b>	<b>Analitos de referência .....</b>	<b>68</b>
<b>5.3.3</b>	<b>Tratamento dos dados .....</b>	<b>69</b>
<b>5.3.4</b>	<b>Testagem dos dados.....</b>	<b>70</b>
5.4	MODELAGEM TÉCNICA.....	70
<b>5.4.1</b>	<b>Definição de parâmetros.....</b>	<b>71</b>
<b>5.4.2</b>	<b>Definição de cenários .....</b>	<b>72</b>
<b>5.4.3</b>	<b>Roteiro da modelagem técnica.....</b>	<b>73</b>
5.5	MODELAGEM ECONÔMICA .....	74
<b>5.5.1</b>	<b>Atualização e correção monetária .....</b>	<b>74</b>
5.5.1.1	Taxa anual de inflação .....	75
5.5.1.1.1	Indicadores econômicos.....	75
5.5.1.1.2	Tarifa de energia elétrica .....	76
<b>5.5.2</b>	<b>Taxa de desconto .....</b>	<b>76</b>
<b>5.5.3</b>	<b>Fator de valor presente.....</b>	<b>77</b>
<b>5.5.4</b>	<b>Projeção de índice para atualização e correção de preços. ....</b>	<b>77</b>

<b>5.5.5</b>	<b>Preços de referência .....</b>	<b>77</b>
5.5.5.1	Custos de implantação .....	78
5.5.5.2	Custos de operação .....	79
<b>5.5.6</b>	<b>Roteiro da modelagem econômica. ....</b>	<b>79</b>
5.6	MODELO DE REGRESSÃO.....	80
5.7	LIMITAÇÕES.....	81
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>82</b>
6.1	QUALIDADE DA ÁGUA.....	82
<b>6.1.1</b>	<b>Escherichia coli na água bruta.....</b>	<b>82</b>
<b>6.1.2</b>	<b>Turbidez na água bruta .....</b>	<b>83</b>
<b>6.1.3</b>	<b>Escherichia coli na água tratada.....</b>	<b>85</b>
<b>6.1.4</b>	<b>Turbidez na água tratada .....</b>	<b>86</b>
<b>6.1.5</b>	<b>Influência da recirculação na qualidade da água tratada .....</b>	<b>89</b>
6.2	MODELAGEM TÉCNICO-ECONÔMICA .....	89
<b>6.2.1</b>	<b>Validação econômica da recirculação .....</b>	<b>90</b>
<b>6.2.2</b>	<b>Verificação do <i>payback</i> dos investimentos .....</b>	<b>94</b>
<b>6.2.3</b>	<b>Verificação das variáveis .....</b>	<b>94</b>
6.3	VERIFICAÇÃO DAS HIPÓTESES.....	101
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>102</b>
<b>8</b>	<b>CONTINUIDADE DA ARTE .....</b>	<b>105</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>106</b>
	<b>APÊNDICE A – Matriz de cenários. ....</b>	<b>116</b>
	<b>APÊNDICE B – Matriz de resultados da modelagem técnica.....</b>	<b>119</b>
	<b>APÊNDICE C – Matriz de resultados da modelagem econômica. ....</b>	<b>126</b>
	<b>APÊNDICE D – Custos de referência .....</b>	<b>130</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Sistemas de abastecimento de água (SAA) devem preencher requisitos mínimos de quantidade (e de continuidade) e de qualidade (físico-química e microbiológica), conforme preconizado pela ABNT NBR 12.211 (1992). A quantidade mínima de água é variável, dependendo das características culturais e sociais de cada população, enquanto a qualidade mínima de água é uma constante, definida pela sua potabilidade, porém, em ambos os casos, o não atendimento desses requisitos mínimos pode resultar em problemas de saúde pública, crises econômicas e instabilidade social (LIBÂNIO, 2016).

A água potável é aquela cujas características físico-químicas e microbiológicas garantem seu consumo seguro, o que se faz necessário visto que a água é o principal vetor de transmissão de doenças infecciosas (TSUTIYA, 2006). Doenças relacionadas ao saneamento inadequado (DRSAI), causadas em maior parte pelo consumo de água contaminada, custam R\$ 588 milhões ao ano ao SUS (Sistema Único de Saúde) (FIOCRUZ, 2023; IBGE, 2021).

Quando a água captada junto ao manancial, seja ele superficial ou subterrâneo, denominada água bruta, não se enquadra nos padrões de potabilidade, o que costuma ser regra se tratando de mananciais superficiais, se faz necessário o tratamento, que consiste na aplicação de diferentes processos para condicionamento da água, adequando suas características conforme os padrões estabelecidos (TSUTIYA, 2006). Além do condicionamento da água, é demandada a cloração, tanto da água advinda de mananciais superficiais quanto naquela de mananciais subterrâneos (LIBÂNIO, 2016).

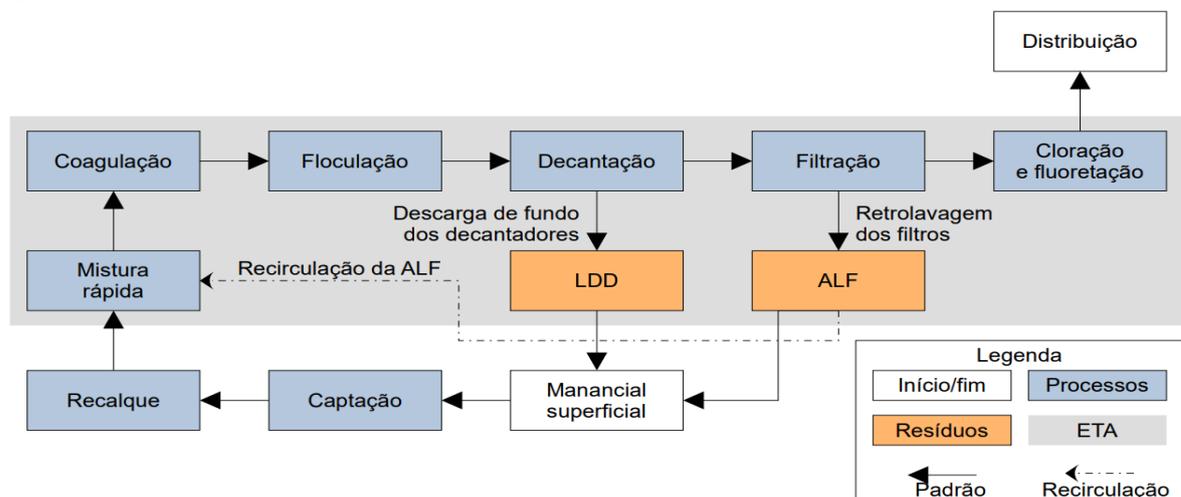
No Brasil, 57% dos SAA captam suas águas, exclusivamente ou predominantemente, de manancial superficial, sendo que, entre esses sistemas, 96% demandam recalque hidráulico entre a captação e a estação de tratamento de água (ETA) e 88% realizam tratamento convencional (ANA, 2021). Também denominado método de ciclo completo, o tratamento convencional, que possui muitas variantes, pode ser definido pela combinação dos processos de coagulação, floculação, decantação (ou flotação, método pouco difundido no Brasil) e filtração, além da desinfecção e da correção do pH (DI BERNARDO; SABOGAL-PAZ, 2008). O tratamento convencional, no Brasil, é caracterizado pelo predomínio de algumas

práticas, como a adoção de cloro como agente oxidante na desinfecção, o uso de decantadores (e não de flotadores), a passagem em filtros e a realização de fluoretação (LIBÂNIO, 2016).

Nas ETA que utilizam o método de ciclo completo, o lodo de descarga dos decantadores (LDD) e a água de lavagem dos filtros (ALF), também denominada barrela, constituem, por regra, a totalidade dos resíduos de estações de tratamento de água (RETA), representando de 2 a 10% do volume total tratado (RAJ *et al*, 2008), sendo caracterizadas pelas grandes quantidades em termos mássicos, no caso do LDD, e volumétricos, no caso da ALF (RICHTER, 2009). A baixa concentração de sólidos, em especial na ALF, e o alto custo de tratamento e de destinação são características comuns aos RETA, logo, a recirculação da água de lavagem dos filtros se apresenta como uma alternativa interessante para seu adequado gerenciamento (DI BERNARDO; SABOGAL-PAZ, 2008), principalmente diante do cenário brasileiro, em que 73% dos SAA lançam seus RETA diretamente em corpos hídricos sem tratamento (IBGE, 2017), podendo constituir crime ambiental devido ao potencial poluidor e riscos à saúde humana pela interpretação literal da legislação vigente (BRASIL, 1998; BRASIL, 2010).

A Figura 1 apresenta o esquema geral da captação e do tratamento comumente aplicado no Brasil, com captação em manancial superficial com recalque, tratamento convencional com mistura rápida, coagulação, floculação, decantação, filtração, cloração e fluoretação, e lançamento dos RETA sem tratamento no manancial superficial.

Figura 1 – Esquema geral da captação e do tratamento comumente aplicados do Brasil.



Fonte: Autoria própria.

A parcela dos resíduos de estações de tratamento de água gerida com outra destinação que não a recirculação representa, por regra, a totalidade das perdas dentro das estações de tratamento, e a ALF é o RETA com maior potencial para recirculação, por conter menos sólidos, e cuja recirculação causaria maior impacto na redução das perdas, por ser mais volumosa (EPA, 2002). A recirculação da água de lavagem dos filtros sem tratamento era prática comum nas estações de tratamento de água até o final do Século XIX, mas avanços nos padrões de potabilidade em meados do Século XX tornaram esta prática menos popular (EPA, 1999), sendo retomada, com ou sem tratamento, no início do Século XX, diante do fortalecimento da legislação ambiental quanto ao lançamento de resíduos em corpos hídricos e o alto custo para tratamento e destinação adequada (EPA, 2002).

O tratamento da ALF, que pode ser dispensado dependendo das características da água bruta e da água de lavagem, embora muito difundido em países desenvolvidos, não é recorrente no Brasil (CAMPOS, 2014) e envolve principalmente as técnicas de clarificação, adensamento e oxidação (DI BERNARDO; SABOGAL-PAZ, 2008). Outras técnicas, menos difundidas, para tratamento da ALF envolvem membranas e ultravioleta (PANKIVSKYI, OSHURELEVYCH-PANKIVSKA, 2023). Destacam-se experiências realizadas no Brasil nas quais a recirculação da ALF sem tratamento não acarretou prejuízos à eficiência da ETA (CAMPOS, 2014; FREITAS *et al*, 2017).

No Brasil, tem sido observada a crescente prática de recirculação da água de lavagem dos filtros, com ou sem tratamento, com o objetivo de interromper o lançamento da barreira em corpos hídricos (CAMPOS, 2014), assim como a mistura da água de lavagem dos filtros com o lodo da descarga dos decantadores para posterior desaguamento (FROTA, 2020), cuja prática não é indicada devido à baixa concentração de sólidos encontrados na ALF em relação ao LDD (SHAMMAS; WANG, 2016).

Os aspectos positivos da recirculação da água de lavagem dos filtros, parcial ou integral, com ou sem tratamento, incluem o fim do lançamento em corpos hídricos ou a redução dos custos com tratamento e destinação, a redução da demanda por captação de água bruta e do volume de RETA a ser tratado e, nos casos em que há bombeamento de água bruta, a redução dos custos com energia elétrica (EPA, 2002). Destaca-se ainda o aumento da vida útil das instalações em relação às suas

capacidades de volume e de vazão, já que estas unidades são rotineiramente superdimensionadas para cobrir tais perdas (ANJOS JÚNIOR, 2011). Também se destaca que os RETA, quando geridos adequadamente, podem representar até 12% dos custos operacionais de um SAA, dependendo da técnica adotada (RICHTER, 2001), e que o consumo de energia elétrica, que ocorre majoritariamente no bombeamento – seja ele na captação, tratamento ou distribuição – representa outra parcela significativa dos custos operacionais de sistemas de abastecimento, com média de 35% e máxima de 78% para o ano de 2021 nos SAA brasileiros (ANA, 2023).

Já os pontos negativos são a reintrodução na cabeceira da planta de microrganismos altamente resistentes à cloração que haviam sido retidos nos filtros, em especial protozoários em forma evolutiva de cistos de *Giardia* spp. e oocistos de *Cryptosporidium* spp., e a necessidade de recalque para recirculação, o que gera custos com energia elétrica (EPA, 2002). Quanto aos protozoários, estes se destacam pela alta infectividade e baixa dose infectante (CERTAD *et al*, 2017) e por apresentarem, na forma de cistos ou oocistos, uma carapaça de proteção que os tornam altamente resistentes à desinfecção, de modo que só podem ser removidos na decantação (ou na flotação) e na filtração (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017). No que tange aos custos associados ao recalque da recirculação, destaca-se que estes são consideravelmente inferiores aos custos associados ao recalque da água bruta entre a captação e a ETA (EPA, 2002).

Também merece destaque, entre os efeitos da recirculação da ALF, que a fração não sedimentada de coagulantes são retidos nos filtros e recirculados à cabeceira da planta, podendo refletir positivamente na redução da demanda de coagulante, ou negativamente na desestabilização da dosagem de coagulante (RICHTER, 2001). Ainda, a água utilizada para lavagem dos filtros é desinfetada, de modo que certa concentração de oxidante residual pode ser introduzida na cabeceira da planta, com potencial para propiciar uma redução na demanda de pré-oxidação (EPA, 2002).

Os filtros são a última barreira de proteção contra microrganismos altamente resistentes à cloração em estações de tratamento de ciclo completo, e a recirculação da água de lavagem deles resulta na recirculação desses patógenos, que, quando não há tratamento da ALF, passam a ser removidos apenas pela decantação;

mesmo assim, considerando o grande volume de ALF gerado e o alto custo ambiental das outras destinações adequadas a este resíduo, a recirculação, desde que não comprometa a eficiência do tratamento quanto a potabilidade, deve ser considerada como alternativa viável sempre que a qualidade da água bruta e a eficiência da decantação permitirem (EPA, 2002).

## 2 CONTEXTO E JUSTIFICATIVA

O aumento na prática de recirculação da água de lavagem dos filtros levou ao aumento no desenvolvimento de pesquisas sobre barrela, mas o tema ainda é incipiente. Pesquisas recentes têm foco principalmente na influência da recirculação na concentração de cistos de *Giardia* spp. e de oocistos de *Cryptosporidium* spp. ou na recirculação do clarificado resultante do tratamento da ALF em conjunto com o LDD, sem muita atenção à recirculação da ALF, com ou sem tratamento, e seus impactos técnicos e econômicos.

Em Porto Alegre, as cinco maiores das seis ETA operadas pelo DMAE/POA, a autarquia responsável pelos serviços de água e de esgoto no município, produzem 99% da água tratada, com três delas realizando a recirculação da água de lavagem dos filtros, sem tratamento, apenas com equalização de vazões, e duas delas lançando os resíduos oriundos do filtro diretamente no manancial superficial, o que pode configurar crime ambiental<sup>1</sup>. Destaca-se que estas cinco ETA são de ciclo completo, demandam recalque de água bruta, possuem decantadores e utilizam cloro como agente desinfetante.

A combinação entre o estado da arte da pesquisa científica sobre a recirculação da água de lavagem dos filtros e a situação atual do manejo dos resíduos dos filtros em Porto Alegre propicia as condições para que a pesquisa seja realizada, buscando a consolidação de conhecimentos existentes e o desenvolvimento de novos conhecimentos referentes à viabilidade técnica e econômica desta prática.

Uma vez que a recirculação da ALF não comprometa o atendimento aos padrões de potabilidade, é pungente a necessidade de se explorar os aspectos técnicos e econômicos relacionados à recirculação da barrela. Destaca-se que, apesar de o estudo ser focado em estações específicas, localizadas em Porto Alegre, ao final do trabalho será possível associar as características das ETA objeto do presente estudo com estações de tratamento convencional de outras localidades.

---

<sup>1</sup> Pela interpretação literal do ordenamento jurídico vigente, em especial, Lei Federal nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, Lei Federal nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998, e Lei Federal nº 12.305, de 2 de agosto de 2010.

### 3 OBJETIVOS

Num contexto geral, esta pesquisa tem como objetivo analisar a viabilidade técnica e econômica da recirculação da água de lavagem dos filtros em estações de tratamento de água convencionais, conforme detalhado a seguir.

#### 3.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral é analisar as vantagens e as desvantagens técnicas e econômicas da recirculação da ALF em ETA convencionais.

#### 3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- a) Avaliar o impacto da recirculação da água de lavagem dos filtros;
- b) Identificar aspectos técnicos mais influentes na viabilidade técnico-econômica da recirculação da ALF;
- c) Modelar os custos estimados associados à recirculação da barreira à cabeceira da planta;
- d) Propor ferramenta para análise da viabilidade econômica da recirculação da água de lavagem dos filtros.

## 4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo é apresentada a revisão da literatura para subsídio desta pesquisa acerca dos tópicos mais relevantes do presente estudo, que incluem: (i) qualidade da água; (ii) risco microbiológico; (iii) tratamento por ciclo completo; (iv) resíduos de estações de tratamento de água; (v) recalque de água; e (vi) análise de viabilidade.

### 4.1 QUALIDADE DA ÁGUA

A água, cujo consumo é indispensável ao ser humano, quando encontrada no ambiente natural, seja em manancial superficial ou subterrâneo, pode apresentar características físico-químicas e biológicas prejudiciais à saúde, quando contém determinadas substâncias ou microrganismos (OMS, 2017).

#### 4.1.1 Principais parâmetros

A seguir são apresentadas as principais características da água no âmbito da presente pesquisa, utilizadas como indicadores da qualidade da água e parâmetros para a operação de estações de tratamento de água.

##### 4.1.1.1 Turbidez

A turbidez é o principal parâmetro para medição da concentração de partículas suspensas e coloidais presentes na água, mede o espelhamento da luz gerado pela presença destas partículas e está comumente associada à presença de silte, argila, substâncias inorgânicas e orgânicas finamente divididas, algas, plâncton e outros microrganismos (TRAIN, 1986). Varia de 3 a 500  $\mu\text{T}$  em mananciais superficiais e é inferior a 1  $\mu\text{T}$  em mananciais subterrâneos, sendo visível a olho nu em copo transparente quando superar 5  $\mu\text{T}$  (SHAMMAS; WANG, 2016).

Devido à simplicidade, rapidez e baixo custo das técnicas analíticas para medição, a turbidez é largamente utilizada como indicador de qualidade da água, até mesmo como indicador da eficiência da remoção de cistos e oocistos de protozoários em ETA, visto que, “quanto menor a turbidez, menor a quantidade de microrganismos presentes” (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017; LIBÂNIO, 2016; SHAMMAS; WANG, 2016). Destaca-se que a turbidez também pode estar associada à presença de carbonato de cálcio para águas duras em águas naturais e

de compostos de ferro e de alumínio, oriundos da coagulação, em águas tratadas (LIBÂNIO, 2016).

#### 4.1.1.2 Coliformes

Os coliformes representam uma grande variedade de bactérias que habitam o intestino dos animais de sangue quente e são utilizados como indicadores microbiológicos para identificar potencial contaminação das águas por fezes humanas ou de animais, indicando se houve contaminação da água por material de origem fecal, mas não necessariamente se há presença de organismos patogênicos (METCALF & EDDY, 2016). No entanto, a quantidade de indivíduos do grupo coliforme, medida em número máximo provável (NMP) por 100 mL (NMP/100 mL), é um indicador microbiológico, por correlação probabilística: quanto maior o número de coliformes, maior a presença de organismos patogênicos (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017).

Os coliformes são subdivididos em coliformes totais, que englobam todos os coliformes, e em coliformes termotolerantes, que representam aqueles coliformes que se reproduzem em menos de 24 horas quando submetidos a temperaturas superiores a 40 °C, condição associada às fezes dos animais endotérmicos, como mamíferos e aves (METCALF & EDDY, 2016). Entre as bactérias coliformes, destaca-se como indicador microbiológico a *Escherichia coli*, por ser muito populosa no aparelho digestivo de animais endotérmicos, possuir relativa resistência à desinfecção, não precisar de um ambiente ou de condições nutricionais específicas para o seu desenvolvimento e apresentar altas taxas de reprodução, o que torna os processos analíticos mais simples e menos custosos em relação a outros microrganismos específicos (VESILIND; MORGAN, 2011).

#### 4.1.2 Padrão de potabilidade

O padrão de potabilidade e os instrumentos de controle da qualidade da água para consumo humano no Brasil é instituído pelo Ministério da Saúde através da Portaria nº 888, de 4 de maio de 2021 (BRASIL, 2021). A água potável, apta para consumo humano, é aquela cujas características físico-químicas e microbiológicas garantem seu consumo seguro, podendo conter certas quantidades de substâncias

ou microrganismos, desde que atendendo a limites legais que garantem seu consumo com segurança (TSUTIYA, 2006).

As diretrizes básicas dos padrões de potabilidade, conforme a Organização Mundial da Saúde (OMS), são: (i) ênfase nos riscos microbiológicos; (ii) limite dos contaminantes químicos, monitorados aqueles com maior relevância para a saúde; (iii) visão sistêmica da dinâmica da qualidade da água; (iv) reconhecimento de que o controle laboratorial tem limitações; e (v) ferramentas de avaliação e gestão de risco como abordagem preventiva (HELLER; PÁDUA, 2016). O padrão de potabilidade nacional, que atende apenas as quatro primeiras diretrizes da OMS, é resumido, a seguir, com ênfase nos tópicos mais relevantes à presente pesquisa:

- a) deve ser realizado monitoramento de *Escherichia coli* na água bruta (2 amostras por semana), sob a seguinte regra:
  - quando a média móvel de *Escherichia coli* nos últimos 12 meses for igual ou superior a 1.000 NMP/ mL, deve ser realizado monitoramento mensal de cistos de *Giardia* spp. e oocistos de *Cryptosporidium* spp. em cada ponto de captação pelos 12 meses seguintes;
  - quando a média aritmética da concentração de oocistos de *Cryptosporidium* spp. for maior ou igual a 1,0 oocisto/L no ponto de captação, a água filtrada deve apresentar turbidez máxima de 0,3  $\mu$ T em 95% das amostras e de 1,0  $\mu$ T em 5% das amostras;
  - o monitoramento de cistos e oocistos pode ser suspenso quando todos os filtros obtiverem turbidez inferior a 0,3  $\mu$ T.
- b) a água tratada deve apresentar ausência de *Escherichia coli* em VMP/100 mL em todas as amostras (2 amostras semanais);
- c) a água tratada deve apresentar 0,5  $\mu$ T de turbidez em 95% das amostras e máximo de 1,0  $\mu$ T em 5% das amostras (amostras a cada 2 horas);
- d) deve ser realizada a manutenção de cloro residual de 0,2 mg/L na distribuição e no consumo.

### 4.1.3 Qualidade do manancial

A água dos mananciais, ou água bruta, é classificada, no contexto da legislação e da normatização brasileira, pela Resolução n° 357, de 17 de março de 2005, do CONAMA (Conselho Nacional de Meio Ambiente), alterada pela Resolução n° 430, de 13 de maio de 2011, também do CONAMA, e pela ABNT NBR 12.216 (1992), que definem tratamentos mínimos a serem realizados de acordo com a classe da água, conforme sintetizado no Quadro 1 para a resolução e no Quadro 2 para a norma <sup>1</sup>.

Quadro 1 – Resumo da classificada Resolução CONAMA 357/2005.

Classe	1	2	3	4
Tratamento mínimo	Desinfecção, filtração e correção de pH	Idem classe 1, mais coagulação e floculação	Idem classe 2	Não destinada ao consumo humano
DBO <sub>5,20</sub>	≤ 3,0 mg/L	≤ 5,0 mg/L	≤ 10,0 mg/L	SL <sup>2</sup>
OD	> 6,0 mg/L	> 5,0 mg/L	> 4,0 mg/L	> 2,0 mg/L
Turbidez	≤ 40 µT	≤ 100 µT	≤ 100 µT	SL <sup>1</sup>
Coliformes totais <sup>3</sup>	≤ 200 NMP/100 mL	≤ 1.000 NMP/100 mL	≤ 4.000 NMP/100 mL	SL <sup>1</sup>
pH	6 – 9	6 – 9	6 – 9	6 – 9

Fonte: Baseado em BRASIL (2005).

<sup>1</sup> Em ambos os quadros, listados apenas parâmetros mais relevantes - no contexto desta pesquisa.

<sup>2</sup> Sem limite.

<sup>3</sup> Em pelo menos 80% das amostras.

Quadro 2 – Classificação da água bruta e tratamento mínimo pela ABNT NBR 12.216 (1992).

Classe	A	B	C	D
Manancial	Subterrâneo ou superficial	Subterrâneo ou superficial	Superficial	Superficial
Condição sanitária da bacia	Protegida	Não protegida	Não protegida	Não protegida, sujeitas à fonte de poluição
DBO <sub>5,20</sub> Média Máxima <sup>1</sup>	≤ 1,5 mg/L ≤ 3,0 mg/L	≤ 2,5 mg/L ≤ 4,0 mg/L	≤ 4,0 mg/L ≤ 6,0 mg/L	> 4,0 mg/L > 6,0 mg/L
Coliformes totais Média Máxima	[NMP/100 mL] ≤ 100 ≤ 100 <sup>2</sup>	[NMP/100 mL] ≤ 5.000 ≤ 5.000 <sup>3</sup>	[NMP/100 mL] ≤ 20.000 > 20.000 <sup>1</sup>	[NMP/100 mL] > 20.000 -
pH	5 – 9	5 – 9	5 – 9	3,8 – 10,3
Tratamento	Desinfecção e correção de pH	Idem Classe A, mais decantação simples <sup>4</sup> ou filtração <sup>5, 6</sup>	Idem Classe A, mais coagulação <sup>7</sup> e filtração	Idem Classe C, mais tratamento complementar específico

Fonte: Baseado em ABNT (1992B).

O Lago Guaíba, manancial onde são captadas as águas que abastecem as ETA do SAA de Porto Alegre, inicia-se no Delta do Jacuí, recebendo contribuições do Rio Jacuí, do Rio Caí, do Rio dos Sinos e do Gravataí, entre outros cursos hídricos de menor porte, e afluí para a Lagoa dos Patos, e está enquadrado, sob a ótica das resoluções do CONAMA, como Classe 3 nas margens oeste e norte de Porto Alegre, onde estão situados os pontos de captação (RIO GRANDE DO SUL, 2016). Destaca-se que não há nenhuma classificação oficial referente à ABNT NBR 12.216 (1992).

No que tange à presença de cistos e oocistos no Lago Guaíba, destaca-se a pesquisa de Berino (2004), que estudou a ocorrência de cistos de *Giardia* spp. e de oocistos de *Cryptosporidium* spp. nas águas dos rios tributários do Lago Guaíba,

<sup>1</sup> Em qualquer amostra.

<sup>2</sup> Em menos de 5% das amostras.

<sup>3</sup> Em menos de 20% das amostras.

<sup>4</sup> Para águas contendo sólidos sedimentáveis.

<sup>5</sup> Para águas não superando 40 µT de turbidez natural e 20 °H de cor.

<sup>6</sup> Precedida ou não de decantação.

<sup>7</sup> Seguida ou não de decantação ou flotação.

concluindo que esses microrganismos estavam disseminados nestas águas em níveis semelhantes a outras regiões do Brasil e do mundo.

## 4.2 RISCO MICROBIOLÓGICO

A principal causa das doenças relacionadas ao saneamento ambiental inadequado é o consumo de água contaminada, que tem grande potencial de danos devido ao alcance destas através de mananciais contaminados e tratamentos insuficientes, alcançando grandes populações (OMS, 2017). A seguir é apresentado um panorama das DRSAs no Brasil e detalhados os contaminantes microbiológicos emergentes, assim como discutidas técnicas para monitoramento laboratorial e de avaliação quantitativa de risco.

### 4.2.1 Doenças relacionadas ao saneamento inadequado

Doenças relacionadas ao tratamento inadequado são causadas em maior parte pelo consumo de água contaminada e custam R\$ 588 milhões ao ano ao SUS (FIOCRUZ, 2023); IBGE, 2021). O Quadro 3 apresenta indicadores de DRSAs para o Rio Grande do Sul, estado brasileiro com melhores indicadores de DRSAs, e para o Brasil.

Quadro 3 – Indicadores de DRSAs para o Rio Grande do Sul e para o Brasil.

Indicador no ano de 2019	Unidade	Rio Grande do Sul	Brasil
Casos de DRSAs	milhão	1,05	5,22
Internações por DRSAs	milhão	0,07	0,44
Internações por DRSAs	%	1,02	6,02
Registros de DRSAs	/ 100 mil	2,9	6,1
Óbitos por DRSAs	/ 100 mil	2,9	6,1
Incidência de DRSAs	/ 100 mil	117	685

Fonte: Baseado em IBGE (2021).

O Quadro 4 apresenta os principais agentes infecciosos encontrados em águas contaminadas, sua resistência à cloração e infecciosidade.

Quadro 4 – Principais agentes infecciosos encontrados em água contaminada.

Agente infeccioso <sup>1</sup>	Persistência em meio aquático <sup>2</sup>	Resistência à cloração <sup>3</sup>	Infecciosidade <sup>4</sup>
<b>Bactérias</b>			
<i>Escherichia coli</i>	Moderada	Moderada	Baixa
<i>Salmonella</i>	Moderada	Baixa	Baixa
<i>Shigella</i>	Curta	Baixa	Moderada
<i>Vibrio cholerae</i>	Curta	Baixa	Baixa <sup>5</sup>
<b>Helmintos</b>			
<i>Ascaris</i>	Alta	Moderada	Alta
<i>Taenia</i>	Alta	Moderada	Alta
<b>Protozoários</b>			
<i>Cryptosporidium</i>	Alta	Alta	Alta
<i>Entamoeba</i>	Moderada	Moderada	Alta
<i>Giardia</i>	Moderada	Alta	Alta
<b>Vírus</b>			
<i>Enterovirus</i>	Longa	Alta	Alta
<i>Hepatite A</i>	Longa	Alta	Alta
<i>Rotavírus</i>	Longa	Alta	Alta
<i>Norwalk</i>	Longa	Alta	Alta

Fonte: Baseado em DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN (2017), IBGE (2009), OMS (2004) *apud* LIBÂNIO (2016) e OMS (2017).

Observa-se que bactérias, helmintos e vírus demandam menor preocupação quanto à contaminação microbiológica porque os dois primeiros são menos resistentes à cloração e o último, em geral, possui vacinas com amplo acesso e cobertura no Brasil (IBGE, 2009; OMS, 2017). Desta forma, os surtos de DRSAI reportados concentram-se nos protozoários, cuja principal característica como agentes etiológicos é a alta resistência às técnicas usuais de desinfecção, como a cloração, quando estão na forma evolutiva de cistos e oocistos e a indisponibilidade de vacinas (KARANIS, 2007).

#### 4.2.2 Contaminantes microbiológicos emergentes

A emergência de determinado contaminante não está associada à sua recente descoberta, mas sim à atenção demandada por este contaminante como agente etiológico (PÁDUA, 2009). Neste sentido, os protozoários, principal causa de surtos

<sup>1</sup> Gênero.

<sup>2</sup> Detecção em estágio infectivo a 20° curta (≤1 semana), moderada (≤1 mês) e longa (>1 mês).

<sup>3</sup> Resistência pode variar conforme a espécie. Resistência baseada na inativação de 99% a 20 °C baixa (≤1 min.mg/L), moderada (≤30 min.mg/L e alta (>30 min.mg/L).

<sup>4</sup> Dosagem infectante que provocou sintomas clínicos em 50% dos indivíduos testados baixa (≥104 NMP/100 mL), moderada (≥102 NMP/100 mL) e alta (<102 NMP/100 mL).

<sup>5</sup> Há vacina com ampla disponibilidade e cobertura no Brasil.

recentes, no cenário atual com desinfecção e vacinação consolidados, se apresentam como contaminantes microbiológicos emergentes (IBGE, 2009; OMS, 2017), tendo sido reportados 16 surtos causados por protozoários entre 1979 e 2015 na América Latina (ZINI, 2021).

Os protozoários constituem um grupo de organismos que inclui parasitas com seres humanos e outros animais como hospedeiros e que se caracterizam por apresentarem complexos ciclos biológicos, com diferentes fases evolutivas (cistos e oocistos) e, em alguns casos, grande potencial patogênico, como no caso dos gêneros *Giardia* spp. e *Cryptosporidium* spp. (CERTAD *et al*, 2017). A preocupação sobre estes microrganismos se acentua devido a (OMS, 2017; PÁDUA, 2009):

- a) alta sobrevivência em meio aquoso;
- b) alta resistência à cloração e outras técnicas usuais de desinfecção;
- c) alta infecciosidade e indisponibilidade de vacina;
- d) custo, demora e especificidade das técnicas analíticas para sua detecção e contagem;
- e) potenciais limitações nos métodos de controle da qualidade a partir do monitoramento de *Escherichia coli* e da turbidez.

#### 4.2.2.1 *Giardia* spp.

O gênero *Giardia* spp. se apresenta nas formas evolutivas de trofozoíto, sua forma ativa para alimentação e reprodução, e cisto, sua forma de resistência, encontrada fora dos hospedeiros, quando apresenta formato oval com tamanho de 8 a 12 µm de comprimento e 7 a 10 µm de largura, com parede celular de 0,3 a 0,5 µm, o que lhe confere alta resistência à cloração (CERTAD *et al*, 2017; KARANIS *et al*, 2007). A espécie *Giardia lamblia*, com dosagem infectante de 1 a 10 cistos/L, é a única encontrada em humanos, tem tempo de incubação que varia de uma a duas semanas e causa giardíase, doença que se manifesta através de sintomas de enterite acompanhado por caquexia, diarreia, edema, flato e náusea, com duração de até sete semanas (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017; MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2005).

#### 4.2.2.2 *Cryptosporidium* spp.

Já o gênero *Cryptosporidium* spp. se apresenta em seis formas evolutivas distintas, sendo oocisto a mais comumente encontrada fora dos hospedeiros, caracterizada por formato esférico com 4 a 6 µm de diâmetro, sendo o menor entre todos os protozoários patogênicos (CERTAD *et al*, 2017; KARANIS *et al*, 2007). Mais de dez espécies do gênero estão associadas a doenças em humanos, entre as quais se destacam a *Cryptosporidium parvum* e a *Cryptosporidium hominis*, com dosagem infectante variando de 1 a 30 oocistos/L e tempo de incubação que varia de horas a meses, e causam criptosporidiose, doença caracterizada por sintomas similares à giardíase, mas com alta letalidade entre indivíduos imunocomprometidos (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017; MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2005).

#### 4.2.3 Histórico de surtos de giardíase, criptosporidiose e outras doenças causadas por protozoários

Foram registrados 868 surtos causados por *Giardia* spp. e *Cryptosporidium* spp. desde a década de 50, o que representa mais de 95% dos surtos doenças diarreicas neste período, com 152 casos tendo a água para consumo humano como via de exposição (EFSTRATIOU *et al*, 2017; KARANIS *et al*, 2007). A maior parte dos casos são registrados em países desenvolvidos, o que pode indicar uma possível sub identificação de surtos em países onde o monitoramento da qualidade da água para abastecimento não é tão robusto (EFSTRATIOU *et al*, 2017), com a prevalência da giardíase sendo inferior a 5% em países desenvolvidos e variando de 10 a 50% em países em desenvolvimento (FAKHRI *et al*, 2021 *apud* ZINI, 2021). A sub identificação de surtos é corroborada pelo fato de que, diferente dos países desenvolvidos, a maior parte dos surtos registrados por protozoários na América Latina não são causados por *Giardia* spp. e *Cryptosporidium* spp. (ZINI, 2021), como o surto de toxoplasmose ocorrido em Santa Maria/RS no ano de 2018, com 547 casos confirmados e via de exposição provavelmente causada por água para consumo humano (RIO GRANDE DO SUL, 2018B).

Tem sido observado um aumento no registro de surtos relacionados de giardíase e criptosporidiose (EFSTRATIOU *et al*, 2017). A nível local, destaca-se um surto recente, identificado em Bento Gonçalves/RS, com 567 casos, que teve *Giardia* spp. como possível agente infeccioso e água para consumo humano como

potencial via de exposição, embora não tenha sido comprovado pela não realização de análises para detecção de protozoários na água de abastecimento (ZINI *et al.*, 2017).

#### 4.2.4 Controle laboratorial

Rapidez, sensibilidade, reprodutibilidade, praticidade e baixo custo são as propriedades requeridas em um método analítico, mas os métodos existentes aplicáveis na análise de cistos e oocistos estão longe de possuírem estas características (BERINO, 2004). Os procedimentos aplicados na detecção e quantificação desses microrganismos representam um grande desafio, tanto pela grande variabilidade e baixa reprodutividade destes microrganismos (FRANCO *et al.* 2012) quanto pelo alto custo e alta complexibilidade destes procedimentos em relação e outros procedimentos analíticos aplicados no controle da qualidade da água (ANDREOLI; SABOGAL-PAZ, 2017). Destaca-se ainda a grande variedade de técnicas analíticas aplicáveis, que envolvem diferentes combinações de práticas de concentração e purificação das amostras e de detecção dos microrganismos, bem como a ausência de consenso na academia sobre um padrão para tais análises (BERINO, 2004).

A indisponibilidade de técnicas analíticas simples, rápidas e econômicas para monitoramento de cistos de *Giardia* spp. e oocistos de *Cryptosporidium* spp. representa um grande problema para o controle laboratorial destes contaminantes microbiológicos emergentes (BERINO, 2004; EPA, 2005). A estes problemas, somam-se os seguintes desafios inerentes ao controle laboratorial: (i) a amostragem tem princípios estatísticos e probabilísticos, entre os quais se destaca a incerteza (margem de erro); (ii) o monitoramento da qualidade nunca será em tempo real, visto que procedimentos analíticos demandam tempo de resposta; (iii) sistemas de abastecimento possuem limitações financeiras, técnicas e operacionais; e (iv) a dinâmica dos contaminantes emergentes supera a capacidade de atualização dos parâmetros de controle (EPA, 2005; BASTOS; BEZERRA; BEVILACQUA, 2007).

Tais barreiras são contornadas com o uso de indicadores, tanto microbiológicos quanto físico-químicos, que permitem o monitoramento indireto desses microrganismos (OMS, 2017). Os principais indicadores utilizados para qualidade da água quanto à presença de cistos de *Giardia* spp. e oocistos de *Cryptosporidium*

spp. são *Escherichia coli*, para água bruta, e turbidez, para água tratada (EPA, 1999; EPA, 2005).

A presença e a quantidade de *Escherichia coli* na água bruta indica se a água teve contato com material fecal e qual a intensidade desse contato, mas não indica se há a presença de determinados patógenos e qual o nível de contaminação (EPA, 1999). De modo geral, quanto maior for a presença de *Escherichia coli* na água bruta, maior a probabilidade de que cistos de *Giardia* spp. e oocistos de *Cryptosporidium* spp. também estejam presentes (EPA, 1999). O *Escherichia coli* também é frequentemente utilizado como indicador da eficiência dos processos de desinfecção, o que não se aplica ao monitoramento de cistos e oocistos, que são altamente resistentes aos processos típicos de desinfecção, como a cloração (PÁDUA, 2009).

A turbidez é um indicador da eficiência da remoção de cistos e de oocistos nos processos de decantação e de filtração, considerando que estes microrganismos são removidos junto de silte, argila, substâncias inorgânicas e orgânicas, algas, plâncton e outros microrganismos presentes na água em forma de partículas suspensas e coloidais (PÁDUA, 2009; EPA, 1989). Quanto menor for a presença destas partículas suspensas na água tratada, menor a probabilidade de que cistos de *Giardia* spp. e oocistos de *Cryptosporidium* spp. também estejam presentes (EPA, 1989).

#### **4.2.5 Avaliação quantitativa de risco**

A estimativa numérica dos potenciais efeitos prejudiciais à saúde pela exposição de indivíduos ou populações a determinado risco é denominada avaliação quantitativa de risco (AQR) e consiste numa metodologia adotada como paradigma central em estudos sobre danos à saúde decorrentes da exposição de substâncias, sendo dividida em quatro etapas (OMS, 2017; PÁDUA, 2009):

- a) identificação do perigo:
- b) avaliação da exposição:
- c) avaliação dos efeitos à saúde;
- d) caracterização do risco.

A partir da aplicação da AQR com cistos de *Giardia* spp. e oocistos de *Cryptosporidium* spp. em sistemas de abastecimento de água com captação em manancial superficial do estado do Rio Grande do Sul, Zini (2021) verificou que, entre 2016 e 2020, a concentração de *Escherichia coli* atingiu os limites pré-estabelecidos pela Portaria n° 888, de 4 de maio de 2021, para monitoramento de protozoários em 79 dos 497 municípios gaúchos. Segundo a pesquisa:

- a) foram analisadas 2.304 amostras de água bruta de 66 ETA;
- b) foram detectados cistos e/ou oocistos em 53 das 66 ETA e em 63 dos 79 municípios analisados;
- c) foram detectados cistos em 8,2% das amostras, com concentrações variando de 0,1 a 21,0 cistos/L;
- d) foram detectados oocistos em 3,3% das amostras, com concentrações variando de 0,1 a 7,0 oocistos/L;
- e) detectados cistos e oocistos na mesma amostra em 1,8% das amostras;
- f) em comparação com pesquisas similares na América do Norte e na Espanha, foi verificado que os percentuais de detecção (entre 25% e 46%) e as concentrações (alcançando 190 cistos/L e 40 oocistos/L) foram inferiores no Rio Grande do Sul;
- g) os percentuais de detecção foram maiores no outono e no inverno do que na primavera e no verão, em escala de 2,5 vezes para cistos e de 2,9 vezes para oocistos, não havendo variação significativa nas concentrações;
- h) os percentuais de detecção foram maiores em dias secos do que em dias chuvosos para cistos, em 1,5 vezes para detecção, não havendo variação significativa para oocistos;
- i) não foi detectada variação entre a turbidez na água filtrada nos casos em que os cistos e/ou oocistos estiveram presentes ou ausentes nas amostras;
- j) em Porto Alegre o percentual de detecção foi de 88% para cistos, com contagem variando de 0,2 a 21,5 cistos/L e média de 6,6 cistos/L, e de 46% para oocistos, com contagem variando de 0,1 a 1,3 oocistos/L e

média de 0,6 oocistos/L, e a eficiência na remoção de 2,8 log para cistos e de 3,2 log para oocistos;

- k) entre 2016 e 2020, 2,7 milhões de habitantes de 48 municípios foram expostos ao risco de consumir água contaminada por cistos de *Giardia* spp. e oocistos de *Cryptosporidium* spp.

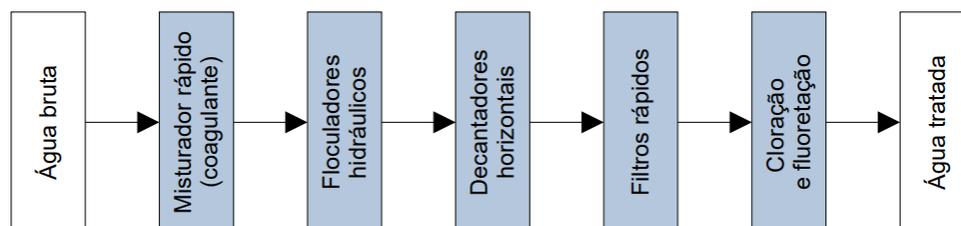
#### 4.3 TRATAMENTO DE CICLO COMPLETO

A potabilização das águas envolve basicamente três fases – clarificação, filtração e desinfecção – que, nas estações de tratamento de água de ciclo completo, também denominadas convencionais, compostas basicamente por floculação, decantação, filtração e desinfecção, comumente no Brasil são munidas de: (i) misturador rápido/coagulação; (ii) floculadores hidráulicos; (iii) decantadores horizontais; (iv) filtração rápida; e (v) cloração/fluoretação, sendo complementada pela correção do pH e fluoretação e, eventualmente, por outros processos, como a redução da dureza (LIBÂNIO, 2016).

Destaca-se que, nestas estações, a remoção de cistos e de oocistos ocorrem principalmente nos decantadores e nos filtros, com uma pequena parcela destes microrganismos sendo inativada na cloração (HELLER, 2004 *apud* DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017), atingindo eficiência de remoção de *Giardia* spp. superiores a 2,5 log e de oocistos de *Cryptosporidium* spp. superiores a 3,0 log (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017). Também se destaca que a fluoretação não está relacionada à potabilização da água propriamente dita, mas ao condicionamento da água visando propiciar o fortalecimento do esmalte da dentição, o que reduz em 65% a prevalência de cáries (TSUTIYA, 2006).

A Figura 2 apresenta esquema base de uma ETA de ciclo completo comumente encontrada no Brasil.

Figura 2 – Esquema base de uma ETA de ciclo completo comumente encontrada no Brasil.



Fonte: Autoria própria.

### 4.3.1 Clarificação

A clarificação compreende os processos de coagulação, floculação e decantação, e tem como objetivo a remoção de uma ampla variedade de impurezas, que compreendem principalmente partículas coloidais, substâncias húmicas e microrganismos em geral (SHAMMAS; WANG, 2016). A seguir são apresentados os processos de clarificação adotados em ETA convencionais usualmente adotadas no Brasil.

#### 4.3.1.1 Coagulação

A coagulação se baseia no princípio de que as impurezas a serem removidas da água possuem carga negativa e consiste na alteração química das partículas coloidais, de modo que elas possam se aglutinar e formar partículas maiores conhecidas como flocos (VESILIND; MORGAN, 2011). A coagulação é realizada na unidade de mistura rápida, geralmente com a aplicação de sais de alumínio e de ferro, como sulfato de alumínio ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ) e cloreto férrico ( $\text{FeCl}_3$ ), resultando em dois fenômenos: (i) químico, referente à relação do coagulante com a água, formando espécies hidrolisadas que dependem da concentração de metal e do pH final da mistura; e (ii) físico, do transporte das espécies hidrolisadas para que haja contato com as impurezas presentes na água (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017). Frequentemente, utiliza-se alcalinizantes, ou acidulantes, para ajuste do pH, visando a favorecer melhores condições para coagulação (LIBÂNIO, 2016).

#### 4.3.1.2 Floculação

A floculação consiste nos processos físicos associados à redução do número de partículas suspensas e coloidais presentes na massa líquida a partir de choques entre as partículas desestabilizadas na coagulação, com o objetivo de formar flocos (LIBÂNIO, 2016). Para favorecer o aglutinamento das partículas, os floculadores, que podem ser hidráulicos (modelo mais comumente adotado no Brasil), ou mecânicos, são formulados para formar gradientes de velocidade, que propiciam a colisão entre as partículas (VESILIND; MORGAN, 2011).

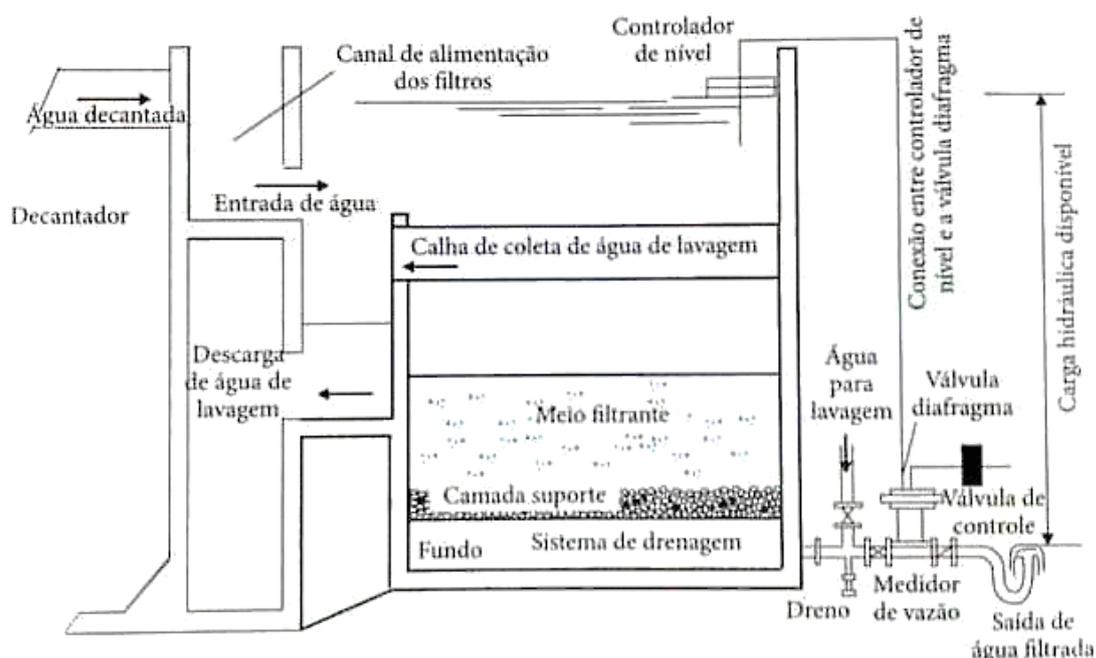
#### 4.3.1.3 Decantação

Os flocos formados ao longo das etapas de coagulação e de floculação são removidos na unidade de decantação, através do processo físico de sedimentação, onde os flocos, mais densos do que a água, decaem, se acumulando no fundo dos decantadores, que são estruturas hidráulicas caracterizadas por grandes tanques, geralmente horizontais, que propiciam baixas velocidades de escoamento, favorecendo a ação da gravidade sobre os flocos (SHAMMAS; WANG, 2016). O material sedimentado acumula-se no fundo dos decantadores, concentrando as impurezas retidas e os produtos químicos acrescidos em forma de lodo, que deve ser removido periodicamente para garantir a operacionalidade dos decantadores (AZEVEDO NETTO; RICHTER, 1991).

#### 4.3.2 Filtração

A filtração, processo final de remoção de impurezas em uma ETA, que consiste no escoamento da água através de um meio poroso, geralmente no sentido descendente, para remoção de partículas suspensas e coloidais e microrganismos presentes na água que não foram removidos durante a clarificação, é o principal responsável pela produção de água dentro dos padrões de potabilidade (SHAMMAS; WANG, 2016). A Figura 3 apresenta o perfil de um filtro rápido.

Figura 3 – Perfil de filtro rápido.



Fonte: DI BERNARDO, DANTAS & VOLTAN (2017).

As impurezas retidas nos filtros são removidas periodicamente através da lavagem dos filtros, usualmente pelo processo de retrolavagem com água, realizada em intervalos horas a dias, dependendo das características construtivas do filtro e operacionais da ETA (RICHTER, 2009). Acrescenta-se que o tempo mínimo de retrolavagem é de 10 min, conforme preconizado pela ABNT NBR 12.216 (1992).

O volume de água utilizado para lavagem dos filtros e o tempo de retrolavagem varia mediante diversos fatores, que incluem, principalmente, a qualidade da água em tratamento, a composição e a altura das camadas dos filtros, a taxa de aplicação, a frequência da lavagem, se a lavagem utiliza apenas água ou é acrescida de injeção de ar (ABNT, 1992; DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017; EPA, 2022).

#### **4.3.3 Desinfecção**

A desinfecção tem como objetivo a destruição ou inativação de microrganismos pelos mecanismos de destruição da estrutura celular, interferência no metabolismo com inativação de enzimas e interferência na biossíntese e no crescimento celular, evitando a síntese de proteínas, ácidos nucleicos e coenzimas, pela oxidação, ou seja, processo em que um oxidante, normalmente o cloro, interage com um redutor, no caso, a parede celular dos microrganismos, trocando elétrons de valência (MEYER, 1994).

Em geral, é realizada a cloração, ao final do tratamento, na saída dos filtros, com o objetivo de destruir ou inativar os microrganismos não retidos nos decantadores e nos filtros e de garantir uma concentração residual de cloro na distribuição, e, eventualmente, é realizada a inter-cloração, entre a saída dos decantadores e a entrada nos filtros, com a finalidade de preservar a linha de tratamento, reduzindo a carga de microrganismos na mesma (RICHTER, 2009; SHAMMAS; WANG, 2016).

Destaca-se que, consoante apresentado no subitem 4.2.2, cistos de *Giardia* spp. e oocistos de *Cryptosporidium* spp. apresentam grande resistência à cloração (CERTAD *et al*, 2017; OMS, 2017; PÁDUA, 2009).

#### 4.4 RESÍDUOS DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA

Os principais resíduos gerados pelas ETA de ciclo completo no Brasil são o lodo de descarga dos decantadores e a água de lavagem dos filtros, que chegam a representar 10% do volume tratado, correspondendo à grande maioria dos RETA (RICHTER, 2001). Outros resíduos gerados em ETA, com periodicidade e volume consideravelmente inferiores ao LDD e à ALF, são a lama de cal decorrente do preparo de cal (nas ETA em que é realizada alcalinização com cal), os lodos e as águas resultantes da limpeza das unidades de mistura rápida, floculação e reservação (muito semelhantes ao LDD ou à ALF) e os agregados resultantes da troca do material filtrante (EPA, 2002).

As características dos resíduos gerados em determinada ETA de ciclo completo variam em qualidade e quantidade por (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017):

- a) qualidade da água bruta, em especial quanto à cor e turbidez;
- b) características da coagulação, como tipo e dosagem de coagulante, e da correção de pH, se houver, como tipo e dosagem de alcalinizante;
- c) método e da frequência de limpeza dos decantadores e dos filtros;
- d) recirculação da água do clarificado do lodo dos decantadores e/ou da água de lavagem dos filtros, se houver, e as características da água recirculada, como qualidade, volume e frequência;
- e) operação, como habilidade dos operadores e nível de automação dos processos.

A composição do lodo de descarga dos decantadores e da água de lavagem dos filtros, de modo geral, é similar, sendo compostos basicamente de sólidos retidos nos processos de decantação e de filtração, acrescidos dos produtos químicos utilizados para coagulação, ajuste de pH e desinfecção, diferenciando-se principalmente pelo teor de sólidos, que varia de 0,1 a 4,0% no LDD e de 0,004 a 0,010% na ALF (RICHTER, 2001). Aproximadamente 95% dos sólidos retidos no tratamento sedimentam nos decantadores formando o lodo, enquanto os 5% restantes são retidos nos filtros (SHAMMAS; WANG, 2016). Já em volume, o LDD

representa de 0,5 a 2,0% do volume total produzido numa estação, enquanto a ALF representa de 3,0 a 8,0% da produção total de uma ETA (MCGUIRE, 1997).

Quanto ao tratamento e a destinação, em geral, resíduos de ETA não são geridos adequadamente no Brasil, pois apenas 11% dos SAA destinam adequadamente seus RETA, enquanto 73% lançam *in natura* em corpo hídrico, outros 13% deságuam e destinam a aterros não licenciados, não havendo informações sobre os últimos 3% dos sistemas (IBGE, 2017).

#### 4.4.1 Legislação e classificação

A Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), define os resíduos sólidos como:

(...) todo material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível. (BRASIL, 2010, art. 3º, parágrafo XVI).

Desta forma, tanto o lodo de descarga dos decantadores quanto a água de lavagem dos filtros, apesar de suas características fluídas, se enquadram como resíduos sólidos, classificação que é reforçada pela ABNT NBR 10.004 (2004) no caso do LDD, que dispõe sobre procedimentos para classificação dos resíduos sólidos, incluindo o lodo de ETA juntamente com os resíduos sólidos e semissólidos como resíduos, sujeitos à seguinte classificação (ABNT, 2004):

- a) classe I – perigosos: possuem características de periculosidade, como inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e/ou patogenicidade;
- b) classe IIA – não inertes: são aqueles que não se enquadram como classe I ou classe IIB, podendo ter propriedades como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água;
- c) classe IIB – inertes: são aqueles que quando solubilizados não apresentam constituintes superiores aos padrões de potabilidade da água, exceto por aspecto, cor, turbidez, sabor e odor.

Devido às diferentes características de água bruta e variações nos insumos utilizados na ETA, a classificação dos RETA pode variar bastante (DI BERNARDO; SABOGAL-PAZ, 2008), mas diversas pesquisas em ETA convencionais brasileiras que abordaram a classificação desses resíduos, em diversas regiões do Brasil, os classificaram, nos termos da ABNT NBR 10.004 (2004), como resíduo classe IIA – não inertes (ACQUOLINI, 2017 *apud* FROTA, 2020; GUERRA; ANGELIS, 2005 *apud* FROTA, 2020; SILVA *et al*, 2012 *apud* FROTA, 2020). Destaca-se que estas pesquisas não consideraram a ALF, ou a consideraram juntamente com o LDD.

Além da classificação como resíduo sólido pela PNRS e das diretrizes para classificação pela ABNT NBR 10.004 (2004), não há outros regramentos a nível nacional além da Lei n° 9.605, de 12 de fevereiro de 1998, que reforça a PNRS. Desta forma, o lançamento da ALF nos mananciais pode configurar crime ambiental<sup>1</sup>, pelo seu potencial poluidor e riscos à saúde humana (BRASIL, 1998; BRASIL, 2010). Ainda, no que tange ao Rio Grande do Sul e Porto Alegre, o único regramento acerca dos RETA é a Resolução n° 461, de 19 de maio de 2022, do Governo do Estado, que autoriza o uso de lodo de ETA em solos agrícolas, desde que respeitados limites máximos para determinados contaminantes, nenhum deles de natureza microbiológica.

Acrescenta-se, consoante a Política Nacional de Meio Ambiente, estabelecida pela Lei Federal n° 6.938, de 31 de agosto de 1981, a Resolução n° 237, de 19 de dezembro de 1997, que estabelece a obrigatoriedade de licenciamento ambiental, regido a nível estadual pela Resolução n° 372, de 22 de fevereiro de 2018, sendo definido como responsabilidade da FEPAM. Neste âmbito, as unidades de captação e de tratamento do SAA de Porto Alegre operam mediante a Licença de Operação de Regularização n° 3.122, de 9 de setembro de 2022, válida até 21 de agosto de 2025, que, no que tange a ALF, define que devem “ser destinados ao esgoto cloacal [sic] para tratamento ou poderão ser recirculados no processo quando verificado não comprometimento da potabilidade”.

---

<sup>1</sup> Pela interpretação literal do ordenamento jurídico vigente, em especial, Lei Federal n° 6.938, de 31 de agosto de 1981, Lei Federal n° 9.605, de 12 de fevereiro de 1998, e Lei Federal n° 12.305, de 2 de agosto de 2010.

#### 4.4.2 Caracterização da água de lavagem dos filtros

As características da água de lavagem dos filtros variam conforme a ETA, dependendo principalmente da qualidade da água bruta e do tipo e da quantidade de coagulantes e outros insumos aplicados no tratamento. Entretanto, algumas características são dominantes, sendo apresentadas na Tabela 1.

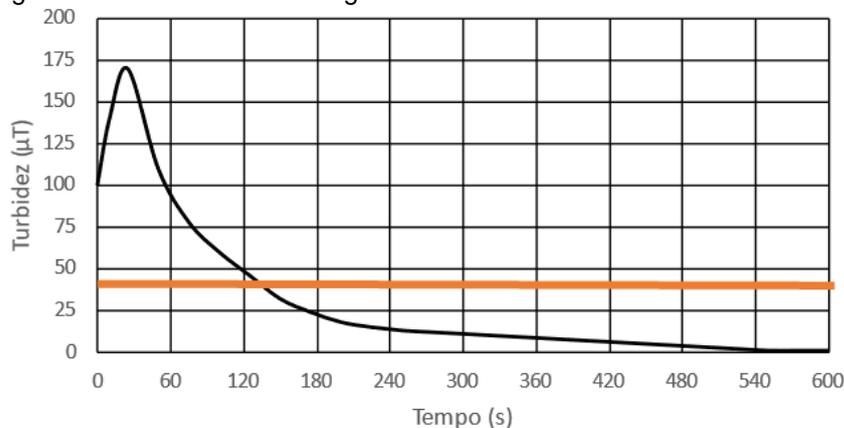
Tabela 1 – Características predominantes na água de lavagem dos filtros.

Parâmetro	Unidade	Faixa de valores
Turbidez	[ $\mu$ T]	0 – 170
DQO	[mg/L]	30 – 50
pH	-	6,9 – 8,0
Sólidos totais	[mg/L]	90 - 370
Concentração de sólidos	[mg/L]	50 – 300
Alumínio	[mg/L]	20 – 500 <sup>1</sup>
Ferro	[mg/L]	10 – 700 <sup>2</sup>

Fonte: Baseado em DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017; SOUZA FILHO, 1998.

A turbidez média da ALF é de 35  $\mu$ T durante o processo de lavagem, podendo chegar a 170  $\mu$ T (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017). A Figura 4 apresenta o gráfico da turbidez da ALF ao longo do processo de lavagem dos filtros.

Figura 4 – ALF durante a lavagem dos filtros.



Legenda: Laranja = Média.

Fonte: Baseado em DI BERNARDO, DANTAS, VOLTAN, 2017.

Há poucos estudos sobre a presença de cistos de *Giardia* spp. e de oocistos de *Cryptosporidium* spp. na água de lavagem dos filtros, entre os quais se destacam:

- a) Estados Unidos da América – para amostra de 10 ETA convencionais, foram encontrados cistos e oocistos em 30% das amostras de água bruta com média de 4,7 cistos/L e em 8% das amostradas de ALF com média de 1,0 cistos/L (AROTA et al, 2001);

<sup>1</sup> Para ETA com coagulação por sulfato de alumínio.

<sup>2</sup> Para ETA com coagulação por cloreto férrico.

- b) Estados Unidos da América – para amostra de 37 ETA convencionais com diferentes tipos de tratamento e de manancial, foram encontrados cistos em 10% das amostras com média de 0,59 cistos/L e oocistos em 37% das amostras com média de 3,21 cistos/L (LECHEVALLIER, 2001);
- c) Campinas – para amostra de 1 ETA convencional, não foram detectados protozoários ao longo de 8 meses (AGUIRRE, 2005).

#### 4.4.3 Recirculação da água de lavagem dos filtros

A recirculação da ALF se baseia em dois pilares: (i) os recursos hídricos são limitados e as perdas hídricas<sup>1</sup> devem ser reduzidas; e (ii) a recirculação tende a ser mais econômica do que o tratamento e a destinação adequados (EPA, 2002).

A ABNT NBR 12.216 (1992) admite a recirculação da ALF, desde que seja realizada a pré-sedimentação e a cloração intensa dela, e Di Bernardo, Dantas e Voltan (2017) não recomendam a recirculação da barrela sem tratamento preliminar, mas a possibilidade de recirculação da água de lavagem dos filtros sem tratamento diretamente à cabeceira da planta em ETA de ciclo completo é defendida por outros autores:

(...) a recirculação da água de lavagem dos filtros sem qualquer tratamento, com todos os sólidos que pode conter, não prejudica em nada a eficiência da estação de tratamento; pelo contrário, além de reduzir as perdas no processo a praticamente zero, pode trazer ainda alguns benefícios, como a redução no consumo de coagulante. (RICHTER, 2001, p. 97)

A prática da recirculação da água da retrolavagem pode reintroduzir materiais no processo de tratamento, mas as quantidades e as concentrações em que estes materiais são reintroduzidos é significativa inferior às da água bruta, o que torna possível a recirculação com ou sem tratamento, ou equalização de fluxo. (EPA, 2002, p. 22, trad. própria)

A qualidade da água bruta e a eficiência do tratamento na remoção de organismos resistentes à cloração são fatores que permitem a recirculação da água da retrolavagem sem tratamento ou equalização. (MCGUIRE, 1997, p. 88 – tradução própria)

No Quadro 5 são apresentados os aspectos positivos e negativos da recirculação da água de lavagem dos filtros.

---

<sup>1</sup> Processuais.

Quadro 5 – Aspectos positivos e negativos da recirculação da água de lavagem dos filtros.

Aspectos positivos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fim da destinação inadequada (em corpos hídricos ou aterros não licenciados) ou redução dos custos com tratamento e destinação adequados;</li> <li>- Redução das perdas e consequente redução do volume de água bruta captada;</li> <li>- Redução dos custos com energia elétrica, nos casos em que há recalque de água bruta;</li> <li>- Potencial redução na demanda, e consequentemente nos custos, com coagulantes, alcalinizantes e oxidantes.</li> </ul>
Aspectos negativos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Possível recirculação de contaminantes, em especial cistos de <i>Giardia</i> spp. e oocistos de <i>Cryptosporidium</i> spp.;</li> <li>- Possível desregulação na dosagem de coagulante;</li> <li>- Aumento dos custos com energia elétrica, nos casos em que não há recalque de água bruta.</li> </ul>

Fonte: Baseado em DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN (2017), LIBÂNIO (2016), MCGUIRE (1997) e EPA (2002).

A recirculação da ALF é realizada nas seguintes formas (EPA, 2002):

- a) recirculação direta – a ALF é destinada diretamente da saída dos filtros para a cabeceira da planta, podendo causar:
  - picos de vazão na cabeceira da planta;
  - desregulação na dosagem de coagulante;
  - aumento da sobrecarga hidráulica nas unidades de tratamento;
  - redução na eficiência do tratamento.
- b) com equalização – a ALF é armazenada num tanque de equalização de vazões, propiciando:
  - recirculação a vazões baixas e constantes;
  - maior controle da dosagem de coagulante;
  - maior economia de coagulante;
  - minimização das sobrecargas hidráulicas nas unidades de tratamento;
- c) sedimentação – a ALF é submetida a um decantador, onde sedimenta por gravidade, de modo que a fase superior é submetida à recirculação e a fase inferior é misturada ao LDD, se caracterizando pela:
  - recirculação a vazões baixas e constantes;

- maior controle da dosagem de coagulante;
  - menor economia de coagulante;
  - minimização das sobrecargas hidráulicas nas unidades de tratamento;
  - melhora na qualidade da água recirculada;
  - possível necessidade de cloração no tanque de sedimentação, para evitar atividade de microrganismos;
- d) adensamento – a ALF é submetida a uma sequência de tanque de equalização, aplicação de polímero, tanque de mistura e tanque de adensamento, otimizando os resultados do tratamento por sedimentação, mas apresenta:
- moderado custo de implantação (adensador) e de operação (polímero e energia elétrica);
- e) Clarificação por sedimentação ou adensamento, seguida de radiação ultravioleta – a ALF é clarificada e então submetida a:
- presença de sólidos na água reduz a eficiência da desinfecção;
  - altamente eficaz na desintegração de cistos e oocistos;
  - alto custo de implantação (reator) e de operação (energia elétrica e manutenção).

Destaca-se que a equalização, sem agitação, da ALF, muitas vezes no próprio poço de sucção da elevatória de recirculação, é o processo mais difundido de manejo da ALF no Brasil por sua simplicidade e baixo custo (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017; RITCHER, 2001).

#### 4.5 RECALQUE DE ÁGUA

Sistemas de abastecimento demandam recalque em diversas situações, do tratamento à distribuição, seja para vencer as perdas até pontos distantes ou para ganhar altura até pontos mais elevados, entre outras finalidades, sendo muito comum entre a captação e a ETA (AZEVEDO NETTO, 2018). O recalque hidráulico, que no espectro do presente trabalho se faz presente na captação de água bruta e

na recirculação da barrela, representa em média 35% dos custos operacionais de sistemas de abastecimento (ANA, 2023).

Para recalque de água, comumente utiliza-se bombas centrífugas, locadas em poços seco ou úmido, acionadas por motores elétricos de 4 polos com rotação entre 1.800 e 3.600 rpm, por cobrirem grandes faixas de vazão e de pressão, possuem ótimos rendimentos e baixos custos de instalação, operação e manutenção, em relação aos demais tipos de bombas (MACINTYRE, 2010).

Para fins de pré-dimensionamento, a altura manométrica, que compreende o somatório entre a altura geométrica, ou altura estática (desnível geométrico entre os níveis de sucção e de recalque), e as perdas de carga, tanto por singularidades quanto por atrito, e a vazão, constituem a curva do sistema, que juntamente com a potência compreendem as características mais relevantes de um sistema de recalque hidráulico (GOMES, 2021).

#### 4.5.1 Perdas de carga por atrito

As perdas de carga por atrito, ou lineares, correspondem à perda de carga ao longo da tubulação, devido ao gradiente hidráulico ocasionado pelo contato entre o fluido e a parede da tubulação, sendo calculado empiricamente por diversos métodos, entre os quais se destaca o Método de Hazen-Williams (Equação 1), recomendado para transporte de água em linhas de recalque com diâmetro superior a 50 mm (VIANNA, 2021).

$$hf = 10,65 * Q^{1,85} * C^{-1,85} * D^{-4,87} \quad (1)$$

Onde:

- a)  $hf$  = perda de carga por atrito unitária [m/m];
- a)  $Q$  = vazão [m<sup>3</sup>/s];
- b)  $C$  = coeficiente de rugosidade (Tabela 2);
- c)  $D$  = diâmetro interno da tubulação [m].

Tabela 2 – Coeficientes de rugosidade para Equação de Hazen-Williams para alguns materiais.

Material \ Tempo de uso	Novo	Usado (20 anos)
Aço galvanizado	125	100
Aço soldado com revestimento interno epóxico	140	115
Cimento-amianto	140	120
Concreto com acabamento interno comum	130	110
Ferro fundido com revestimento interno epóxico	140	120
Ferro fundido com revestimento interno cimentício	130	105
PVC	140	130

Fonte: Baseado em AZEVEDO NETTO (2018).

#### 4.5.2 Perdas de carga por singularidades

As perdas de carga por singularidades, ou localizadas, calculadas a partir da velocidade, conforme apresentado na Equação 2, correspondem à energia cinética consumida pelo sistema para transpor determinado obstáculo ao escoamento, como curvas, válvulas e outras peças (VIANNA, 2021).

$$h_s = \frac{V^2}{2 * g} * \sum k \quad (2)$$

Onde:

- d)  $h_s$  = perda de carga por singularidades [m];
- e)  $v$  = velocidade<sup>1</sup> [m/s];
- f)  $g$  = aceleração da gravidade [m/s<sup>2</sup>];
- g)  $k$  = coeficiente de perda de carga por singularidade (Tabela 3);

Tabela 3 – Coeficientes de perda de carga por singularidade.

Singularidade	Coeficiente	Singularidade	Coeficiente
Crivo	0,75	Válvula de globo aberta	10,00
Curva de 90°	0,40	Tê de passagem direta	0,60
Curva de 45°	0,20	Tê de passagem indireta	1,30
Redução gradual	0,15	Válvula de retenção	2,50
Válvula de pé	1,75	Válvula de pé	1,75
Válvula de gaveta aberta	0,20	Saída de canalização	1,00

Fonte: Baseado em GOMES (2021).

#### 4.5.3 Curva do sistema

A curva do sistema (Equação 3) apresenta a altura manométrica em função da vazão.

$$AMT = H + \kappa * Q^2 \quad (3)$$

<sup>1</sup> Entre 0,6 e 3,0 m/s, conforme ABNT NBR 12.215-1 (2017).

Onde:

- a) AMT = altura manométrica [mca];
- b) H = altura geométrica [m];
- c)  $\kappa$  = ângulo da curva, representando as perdas de carga;
- d) Q = vazão [m<sup>3</sup>/s].

#### 4.5.4 Potência

A energia total demandada por determinado sistema pode ser representada tanto como altura manométrica, razão entre energia e peso, quanto como potência, razão entre energia e tempo, apresentada na forma de potência hidráulica na Equação 4 (GOMES, 2021).

$$P_H = \gamma * Q * AMT \quad (4)$$

Onde:

- a) PH = potência hidráulica [W];
- b)  $\gamma$  = peso específico do fluido [N/m<sup>3</sup>];
- c) Q = vazão [m<sup>3</sup>/s];
- d) AMT = altura manométrica [mca].

A potência consumida, ou potência demandada, pela bomba é apresentada na Equação 5, como a razão entre a potência hidráulica e o rendimento do conjunto, que por sua vez corresponde ao produto entre as eficiências do motor e da bomba (VIANNA, 2021).

$$P_C = P_H / \eta \quad (5)$$

Onde:

- a) PC = potência consumida [W];
- b) PH = potência hidráulica [W];
- c)  $\eta$  = rendimento do conjunto motor-bomba [%], conforme Tabelas 4 e 5.

Tabela 4 – Rendimento mínimo dos motores elétricos de 4 pólos.

Potência consumida (cv)	Rendimento a 3.600 rpm (%)	Rendimento a 1.800 rpm (%)	Potência (cv)	Rendimento a 3.600 rpm (%)	Rendimento a 1.800 rpm (%)
1	80,00	80,50	50	92,40	93,00
2	83,50	84,00	75	93,00	94,10
5	87,50	87,50	100	93,60	94,50
10	89,50	89,50	150	94,50	95,00
15	90,20	91,00	250	95,40	95,00
25	91,00	92,40	500	95,40	95,00

Fonte: Baseado em AZEVEDO NETTO (2018).

Tabela 5 – Rendimento médio sugerido para bombas centrífugas a baixa rotação.

Vazão (L/s)	Rendimento (%)	Vazão (L/s)	Rendimento (%)
5	52	30	80
10	66	40	84
15	68	50	85
20	71	100	87
25	75	200	88

Fonte: Baseado em AZEVEDO NETTO (2018).

Já a potência instalada representa a potência dos dispositivos implantados, considerando uma folga sobre a potência dos motores elétricos, conforme a Tabela 6, suportando picos de consumo durante a partida e eventuais variações no rendimento do conjunto (MACINTYRE, 2010).

Tabela 6 – Folga recomendada para potência instalada.

Potência consumida (cv)	Folga recomendada (%)
2	50
5	30
10	20
20	15
> 20	10

Fonte: Baseado em AZEVEDO NETTO (2018).

#### 4.6 ANÁLISE DE VIABILIDADE

A engenharia pode ser definida como a prática de utilizar a ciência para solucionar problemas da sociedade, e a tomada de decisão na engenharia é ponto chave no desenvolvimento de qualquer sociedade, pois escolhas equivocadas podem gerar consequências graves (VESILIND; MORGAN, 2011). Para que as tomadas de decisão sejam exitosas, foram desenvolvidas e são aperfeiçoadas constantemente um conjunto de ferramentas metodológicas, denominadas análise de viabilidade, que propiciam subsídios para a tomada de decisão, a partir da estimativa das vantagens e desvantagens de cada ação (BORDEAUX-RÊGO, 2013).

As ferramentas a serem aplicadas na análise de viabilidade variam conforme o projeto objeto do estudo e as condições de contorno, podendo incorporar

parâmetros técnicos, garantindo a funcionalidade, e parâmetros financeiros, garantindo a economicidade, podendo estas ferramentas se comunicarem (ENAP, 2015). Em ambos os casos, a análise tem como cerne: (i) a coleta e o processamento de informações; e (ii) a prospecção ao longo da vida útil (VESILIND; MORGAN, 2011).

#### **4.6.1 Viabilidade técnica**

A análise da viabilidade técnica envolve a seleção de todas as alternativas técnicas possíveis, a definição dos parâmetros de comparação e das metas para cada parâmetro, a verificação da funcionalidade destas alternativas e a avaliação de cada alternativa a partir dos parâmetros, culminando na comparação entre os parâmetros adotados e medidos, devendo ser considerados na seleção de tecnologias em ETA (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017; VESILIND; MORGAN, 2011):

- a) complexidade da tecnologia;
- b) disponibilidade, acessibilidade e custo de peças de reposição;
- c) combustíveis e insumos;
- d) aspectos legais da tecnologia;
- e) habilidades técnicas para operação e manutenção;
- f) prospecção de todos estes parâmetros ao longo da vida útil.

#### **4.6.2 Viabilidade econômica**

Após a análise da viabilidade técnica, é verificada a funcionalidade da manobra proposta a partir da análise da viabilidade econômica. O objetivo central da análise econômica é prospectar diferentes cenários em termos monetários, para que possam ser comparados (VESILIND; MORGAN, 2011).

Destaca-se que a ABNT NBR 12.211 (1992) determina que as soluções para unidades de tratamento em sistemas de abastecimento de água devem ser adotadas mediante comparação econômica entre as alternativas possíveis, considerando custos imediatos e a longo prazo.

Para comparação financeira, as ferramentas e métodos mais difundidos são o valor presente líquido (VPL), a taxa interna (TIR) e o *payback* (BORDEAUX-RÊGO, 2013; ENAP, 2015). No entanto, independentemente dos processos aplicados para análise, ela deve considerar a inflação, realizando, quando pertinente, as devidas atualizações e correções monetárias, e iniciar-se pela estimativa de custos, que abrange os custos de implantação e os custos de operação, podendo incorporar as receitas e os custos de oportunidade, quando aplicáveis (BORDEAUX-RÊGO, 2013; ENAP, 2015).

#### 4.6.2.1 Estimativa de custos e de receitas

A estimativa de custos, baseada no pré-dimensionamento das alternativas testadas, considera os custos diretos, que consistem nos custos de implantação, que compreende todos os investimentos necessários para execução das soluções de engenharia pré-dimensionada, e os custos de operação, que compreendem os custos com energia elétrica, combustíveis, pessoal, insumos, etc., e os custos indiretos, que consistem no custo de oportunidade, que é o “custo da tomada de decisão”, que representa a perda de ganhos em outras alternativas (BORDEAUX-RÊGO, 2013; WOILER; MATIAS, 2008).

#### 4.6.2.2 Inflação

A variação dos preços de produtos e de serviços é resultado da variação do valor de uma moeda ao longo do tempo, fenômeno econômico denominado de inflação em caso de redução de valor da moeda e deflação em caso de aumento de valor da moeda (ENAP, 2015; IBGE, 2023A). Na maioria dos países, incluindo o Brasil, o fenômeno predominantemente é a inflação, em que se observa a tendência de aumento nos preços dos produtos e serviços (ENAP, 2015; FGV, 2023A).

A inflação é medida a partir da variação dos preços de produtos e de serviços e pode ser parametrizada a partir de indicadores financeiros que medem a variação dos preços de um conjunto de produtos e serviços em determinado período (ENAP, 2015). Os principais indicadores adotados no Brasil, que são apresentados no Quadro 6, são medidos pela Fundação Getúlio Vargas (FGV) e pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

Quadro 6 – Indicadores de inflação.

IPCA	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo</li> <li>- Instituição: IBGE</li> <li>- Composição: itens representativos no consumo de uma família com renda de 1 a 40 salários-mínimos</li> <li>- Aplicação em estudos de viabilidade econômica: definição de taxas de juro e correção de preços geral, abrangendo produtos e serviços</li> <li>- OBS: É o índice de referência da política monetária brasileira para metas de inflação</li> </ul>
INCC	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Índice Nacional de Preços da Construção</li> <li>- Instituição: FGV</li> <li>- Composição: itens representativos na construção civil</li> <li>- Aplicação em estudos de viabilidade econômica: correção de preços de investimentos em obras</li> </ul>
IPA	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Índice de Preços ao Produtor Amplo (antigo Índice de Preços por Atacado)</li> <li>- Instituição: FGV</li> <li>- Composição: bens de produção e de capital</li> <li>- Aplicação em estudos de viabilidade econômica: correção de preços de investimentos em máquinas</li> <li>- OBS: É o índice de referência para Obrigações Reajustáveis do Tesouro Nacional (OTRN) e Unidade Padrão de Capital (UPC)</li> </ul>
IPC	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Índice de Preços ao Consumidor</li> <li>- Instituição: FGV</li> <li>- Composição: itens representativos no consumo de uma família com renda de 1 a 33 salários-mínimos</li> <li>- Aplicação em estudos de viabilidade econômica: não é aplicado</li> </ul>
IGP	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Índice Geral de Preços</li> <li>- Instituição: FGV</li> <li>- Composição: 60% pelo IPA, 30% pelo IPC e 10% pelo INCC</li> <li>- Aplicação em estudos de viabilidade econômica: correção de preços de serviços</li> </ul>

Fonte: Baseado em BCB (2023), ENAP (2015), FGV (2023A) e IBGE (2023A).

#### 4.6.2.3 Valor presente

O valor presente é uma metodologia econômica para atualização do valor monetário ao longo do tempo, sendo muito aplicado em projeções financeiras de longo prazo, apresentando para o momento atual um valor estimado para o futuro através da aplicação do fator de valor presente (FVP) (ENAP, 2015). A Equação 6 apresenta o fator de valor presente para cada ano projetado:

$$FVP = \frac{1}{(1+i)^n} \quad (6)$$

Onde:

- a) FVP = fator de valor presente;
- b)  $i$  = taxa de desconto, baseada na taxa de inflação [%];
- c)  $n$  = número de anos decorrido entre o ano base e o ano trasladado.

#### 4.6.2.4 Valor presente líquido

O valor presente líquido (VPL ou VLP) de um projeto consiste no produto do FVP com a soma dos valores presentes, de entrada e/ou saída, que ocorrem ao longo da vida útil do projeto (ENAP, 2015), conforme apresentado na Equação 7:

$$VPL = (\sum_i^n xi * FVP) - x_o \quad (7)$$

Onde:

- a) VPL = valor presente líquido [R\$];
- b)  $X_i$  = valores de entrada ou saída em cada período [R\$];
- c)  $X_0$  = valor do investimento inicial [R\$];
- d)  $n$  = período de tempo;
- e)  $i$  = taxa de desconto, baseada na taxa de inflação [%].

#### 4.6.2.5 Taxa interna de retorno

A taxa interna de retorno (TIR), apresentado na Equação 8, aplicável a modelos econômicos em que há balanço de custos e receitas, corresponde à taxa de desconto que iguala o VPL a zero, correspondendo à taxa de retorno do projeto, de modo que, entre vários investimentos, o melhor será aquele que apresentar maior TIR (ENAP, 2015).

$$X_0 = \left( \sum_i^n xi / (1 + TIR)^n \right) - x_o \quad (8)$$

Onde:

- a)  $X_i$  = fluxo de caixa, valores de entrada e saída, em cada período [R\$];
- b)  $X_0$  = valor do investimento inicial [R\$];
- c)  $n$  = período de tempo;

d) TIR = taxa interna de retorno [%].

#### 4.6.2.6 Tempo de retorno descontado

O tempo de retorno descontado, ou *payback* descontado, vide Equação 9, corresponde ao intervalo de tempo necessário para que determinado investimento seja compensado, tanto em custo financeiro quanto em custo de oportunidade (ENAP, 2015).

$$VPL = \sum_i^n x_i / (1 + TIR)^n \quad (9)$$

Onde:

- a) VPL = valor presente líquido [R\$];
- b)  $X_i$  = fluxo de caixa, valores de entrada e saída, em cada período [R\$];
- c) n = período de tempo;
- d) TIR = taxa interna de retorno [%].

#### 4.7 FERRAMENTA PARA PARA ANÁLISE DA VIABILIDADE

A representação do comportamento observado na modelagem técnico-econômica pode ser descrita a partir de modelos de regressão linear multivariável se os dados aderirem a uma distribuição normal, através da Equação 13:

$$\gamma = \beta_0 + \beta_1 * X_1 + \beta_2 * X_2 + (\dots) \quad (13)$$

Onde:

- a)  $\gamma$  = variável dependente;
- b)  $\beta$  = parâmetros de ajuste;
- c) X = variáveis independentes.

## 5 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentadas e detalhados os materiais e métodos do presente estudo.

### 5.1 HIPÓTESES

O conjunto de hipóteses admitidas a serem testadas para que possam ser atingidos os objetivos propostos na presente pesquisa são:

- a) Hipótese 1<sup>1</sup> – a recirculação da ALF é viável tecnicamente:
  - H0 – a recirculação não interfere na qualidade da água tratada;
  - H1 – a recirculação interfere na qualidade da água tratada, mas não a descaracteriza quanto à sua potabilidade.
  - H2 – a recirculação interfere na qualidade da água tratada, descaracterizando sua potabilidade.
- b) Hipótese 2<sup>2</sup> – a recirculação da ALF é viável economicamente:
  - H0 – a recirculação da ALF é viável economicamente;
  - H1 – a recirculação da ALF é viável economicamente sob determinadas condições<sup>3</sup>;
  - H2 – a recirculação da ALF não é viável economicamente.
- c) Hipótese 3 – a modelagem técnico-econômica produzirá resultados aplicáveis a modelos de regressão:
  - H0 – a modelagem técnico-econômica produzirá resultados aplicáveis a modelos de regressão para as três variáveis dependentes<sup>4</sup>;
  - H1 – a modelagem técnico-econômica produzirá resultados aplicáveis a modelos de regressão para duas ou uma das três variáveis dependentes;

---

<sup>1</sup> Para as cinco ETA objeto de estudo.

<sup>2</sup> Para os 120 cenários testados.

<sup>3</sup> De vazão de captação, altura geométrica de recalque e extensão de adução.

<sup>4</sup> Variáveis dependentes são citadas na nota 3.

— H2 — a modelagem técnico-econômica não produzirá resultados aplicáveis a modelos de regressão.

## 5.2 OBJETO DE ESTUDO

As estruturas das EBAB, das ETA e da lavagem dos filtros das ETA são apresentadas, respectivamente, dos Quadros 7 a 9.

Quadro 7 – Detalhamento das EBAB.

Sistema	Moinhos de Vento	São José	Loureiro da Silva	Belém Novo	Tristeza
Manancial	Lago Guaíba	Lago Guaíba	Lago Guaíba	Lago Guaíba	Lago Guaíba
EBAB	Voluntários da Pátria I <sup>1</sup>	Voluntários da Pátria II <sup>1</sup>	Menino Deus	Belém Novo	Tristeza
Vazão média de captação (L/s)	1.381	2.246	2.522	1.089	344
Capacidade máxima da EBAB (L/s)	2.000	4.000	3.200	1.000	450
Configuração dos conjuntos motor-bomba	2 OP + 1 RE	2 OP + 1 RE	3 OP + 2 RE	2 OP + 0 RE	2 OP + 1 RE
Tubulação de recalque	Aço DN1000	FF DN800 2x FF DN1000 1x	Aço DN1100 2x FF DN1200 2x	FF DN800 2x	FF DN600
Extensão do recalque (m)	1.546	3.500	836	735	294
Desnível geométrico (m)	52,63	41,32	13,35	12,46	55,35
Potência instalada dos conjuntos motor-bomba (cv)	1.750	3.000	750	250	400
Inversor de frequência	Sim	Sim	Sim	Sim	sim

Legenda: OP = operacional; RE = reserva. FF = ferro fundido.

Fonte: Dados fornecidos pelo DMAE/POA e levantados pelo autor.

<sup>1</sup> Estações de bombeamento localizadas no mesmo terreno, mas com captação independente.

Quadro 8 – Detalhamento das ETA.

Sistema	Moinhos de Vento	São José	Loureiro da Silva	Belém Novo	Tristeza
ETA	Moinhos de Vento	São José	Loureiro da Silva	Belém Novo	Tristeza
Vazão média de tratamento (L/s)	1.381	2.246	2.522	1.089	344
Capacidade máxima da ETA (L/s)	2.000	4.000	3.000	1.000	450
Tratamento	Convencional	Convencional	Convencional	Convencional	Convencional
Coagulação	PAC	Sulfato de alumínio c/ polieletrólito não iônico auxiliar	Sulfato de alumínio	PAC	PAC
Floculação	Fluxo hidráulico	Contato em manta de lodo	Fluxo mecânico	Contato em manta de lodo	Fluxo hidráulico
Decantação	Convencional	Acelerada <sup>1</sup>	Convencional	Acelerada <sup>1</sup>	Convencional
Filtração	Filtração rápida por gravidade	Filtração rápida por gravidade	Filtração rápida por gravidade	Filtração rápida por gravidade	Filtração rápida por gravidade
Pré tratamento	Carvão ativado (eventual) e dióxido de cloro (na captação) <sup>2</sup>	Carvão ativado (eventual) e dióxido de cloro (na captação) <sup>1</sup>	Carvão ativado (eventual)	Carvão ativado (eventual)	Carvão ativado (eventual)
Desinfecção	Cloro gás (inter e pós cloração)	Cloro gás (inter e pós cloração)	Cloro gás (inter e pó cloração)	Cloro gás (inter e pó cloração)	Cloro gás (inter e pó cloração)
Fluoretação	Ácido fluossílico	Ácido fluossílico	Ácido fluossílico	Ácido fluossílico	Ácido fluossílico
Alcalinização	Hidróxido de sódio	Hidróxido de sódio	Cal Hidratada	Hidróxido de sódio	Hidróxido de sódio
Recirculação	Sim	Sim	Não	Não	Sim
Operação média (h/dia)	21	21	21	21	21

Fonte: Dados fornecidos pelo DMAE/POA e levantados pelo autor.

<sup>1</sup> Tipo *superpulsator*.

<sup>2</sup> Dióxido de cloro aplicado para controle de mexilhão dourado.

Quadro 9 – Detalhamento da lavagem dos filtros.

Sistema	Moinhos de Vento	São José	Loureiro da Silva	Belém Novo	Tristeza
Quantidade de filtros (un.)	8	18	8	6	5
Dimensões dos filtros – L x C x H <sup>1</sup> (m)	5,50 x 15,00 x 2,80	7,10 x 9,10 x 1,90	6,00 x 2,50 x 2,40	5,00 x 6,60 x 2,80	5,50 x 15,00 x 2,20
Área superficial (m <sup>2</sup> )	82,50	64,61	87,20	15,00	33,00
Frequência de lavagem dos filtros (h) <sup>2</sup>	24	24	24	24	24
Tempo de retrolavagem (min) <sup>3</sup>	5	5	5	5	de 5 a 10
Volume de retrolavagem (m <sup>3</sup> )	500	400	500	100	200
Recirculação da ALF	Sim	Sim	Não	Não	Sim
Capacidade do reservatório de barrela (m <sup>3</sup> ) <sup>4</sup>	650	500	-	-	275
Vazão da recirculação (L/s) <sup>5</sup>	150	250	-	-	25
Extensão da recirculação (m)	245	205	-	-	105
Desnível geométrica da recirculação (L/s)	5,20	7,20	-	-	4,70

Legenda: L = Largura. C = Comprimento. H = Altura.

Fonte: Dados fornecidos pelo DMAE/POA e levantados pelo autor.

<sup>1</sup> Altura total dos filtros, inclui altura das camadas filtrantes e da base.

<sup>2</sup> Ou menor, se a turbidez na saída dos filtros atingir 0,3 µT na ETA Moinhos de Ventos ou 0,5 µT nas demais ETA.

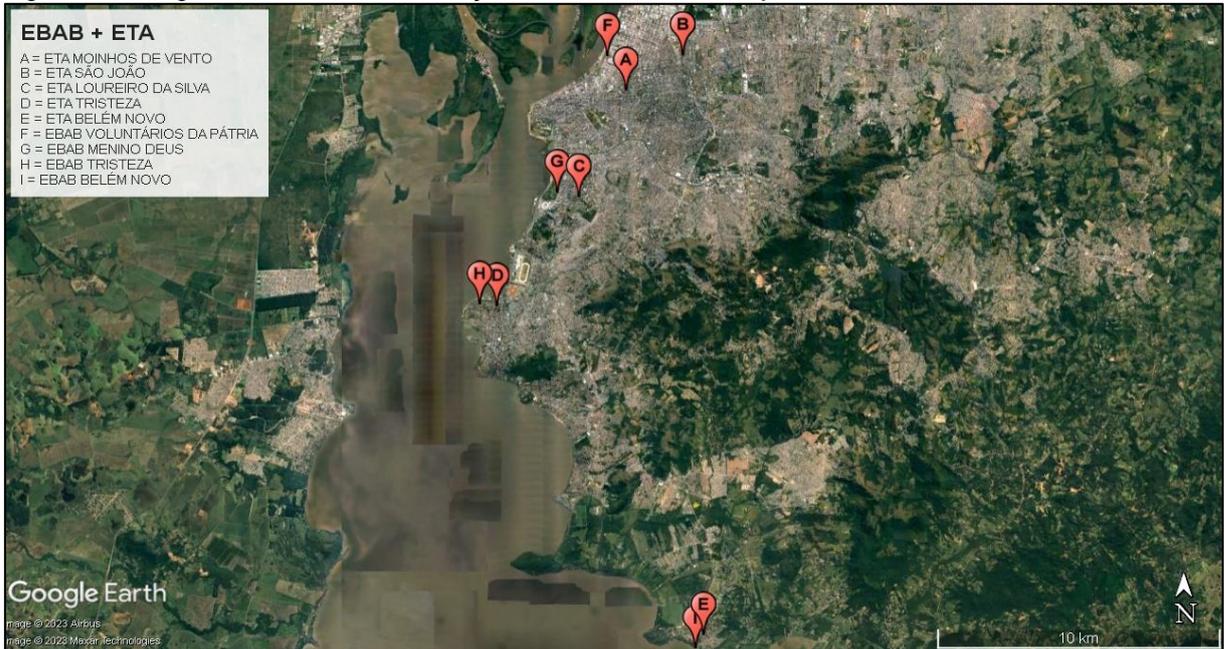
<sup>3</sup> O tempo mínimo de recirculação determinado pela ABNT NBR 12.216 (1992) é de 10 min, mas observou-se que este limite é rotineiramente desrespeitado na operação dessas ETA em situação de combinação de acúmulo de filtros a retro lavar e baixa reservação no reservatório de água para lavagem dos filtros.

<sup>4</sup> Opera tanto quanto equalizador de vazões quanto como poço de sucção.

<sup>5</sup> Estimado pelo volume recalcado e intervalo entre liga e desliga das bombas.

A Figura 5 apresenta a locação dos sistemas objeto de estudo.

Figura 5 – Imagem de satélite com locação das EBAB e ETA objetos de estudo.



Fonte: Baseado em dados fornecidos pelo DMAE/POA.

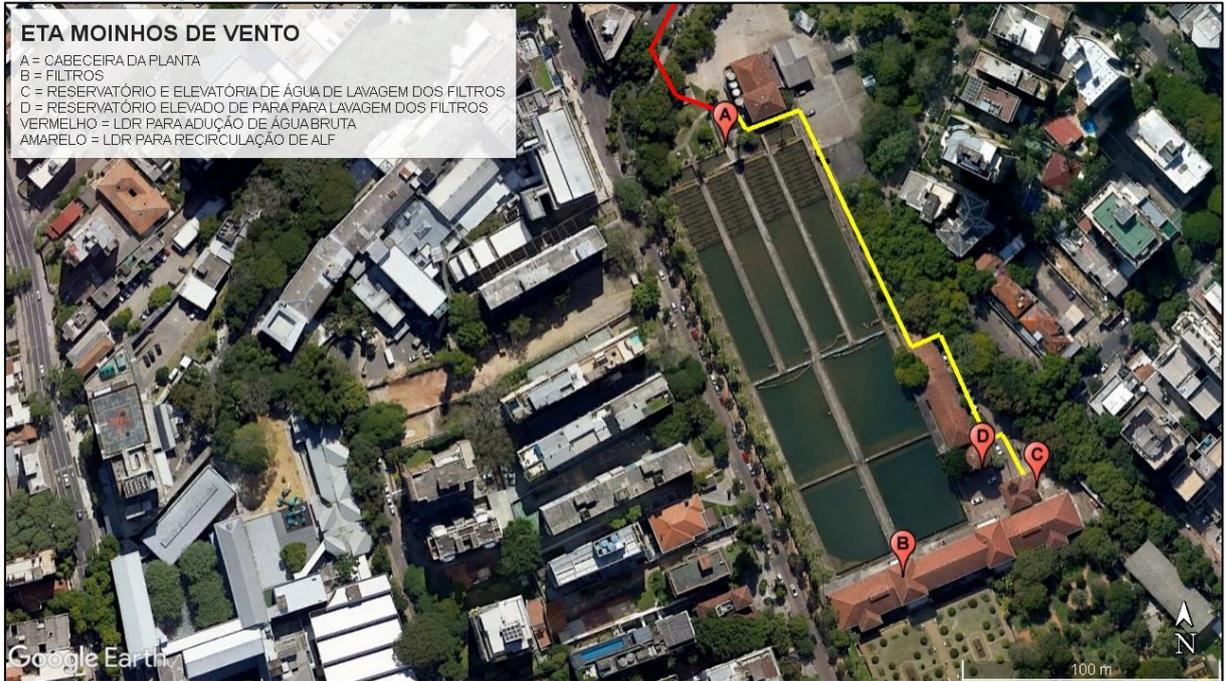
A Figura 6 apresenta a locação das EBAB e ETA dos sistemas Moinhos de Vento e São João, enquanto a Figura 7 e a Figura 8 apresentam o detalhamento da ETA Moinhos de Vento e as Figuras 9 e 10 apresentam o detalhamento da ETA São João.

Figura 6 – Imagem de satélite com locação das EBAB e ETA dos sistemas Moinhos de Vento e São João.



Fonte: Baseado em dados fornecidos pelo DMAE/POA.

Figura 7 – Imagem de satélite da ETA Moinhos de Vento.



Fonte: Baseado em dados fornecidos pelo DMAE/POA.

Figura 8 – Registro fotográfico dos filtros da ETA Moinhos de Vento.



Fonte: Autor.

Figura 9 – Imagem de satélite da ETA São João.



Fonte: Baseado em dados fornecidos pelo DMAE/POA.

Figura 10 – Registro fotográfico dos filtros da ETA São João.



Fonte: Autor.

A Figura 11 apresenta a locação da EBAP e ETA do sistema Loureiro da Silva, enquanto as Figuras 12 e 13 apresentam o detalhamento da ETA.

Figura 11 – Imagem de satélite com locação das EBAB e ETA do sistema Loureiro da Silva.



Fonte: Baseado em dados fornecidos pelo DMAE/POA.

Figura 12 – Imagem de satélite da ETA Loureiro da Silva.



Fonte: Baseado em dados fornecidos pelo DMAE/POA.

Figura 13 – Registro fotográfico dos filtros da ETA Loureiro da Silva.



Fonte: Autor.

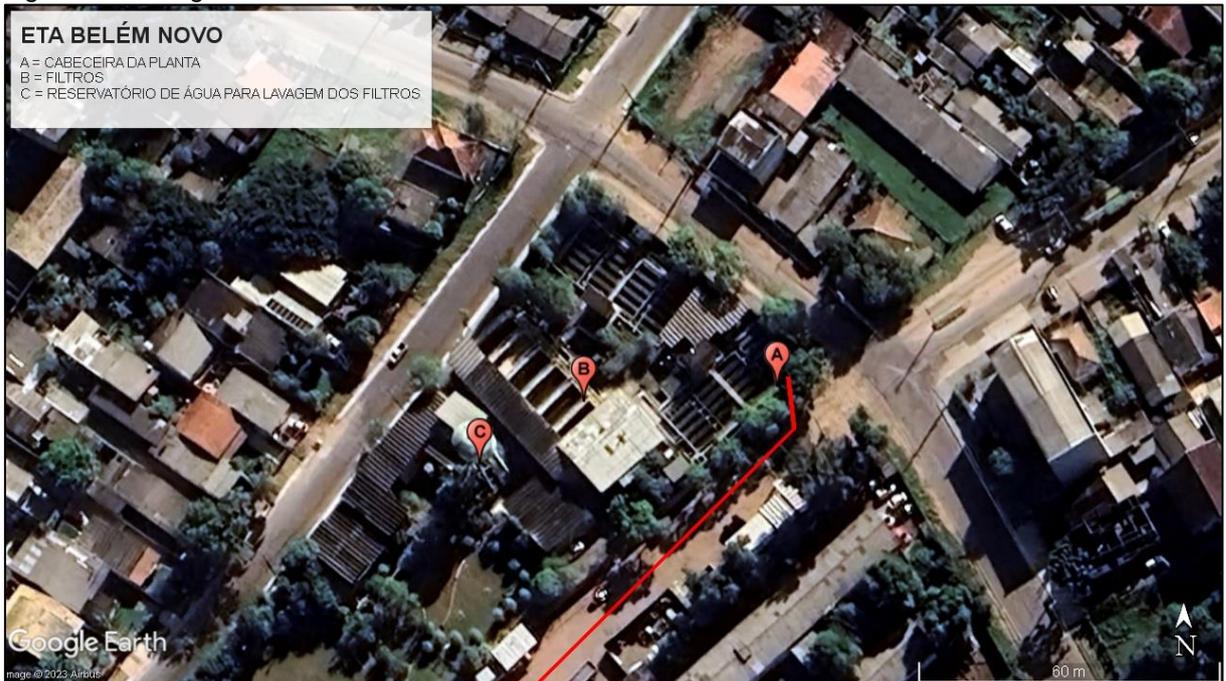
A Figura 14 apresenta a localização da EBAP e ETA do sistema Belém Novo, enquanto as Figuras 15 e 16 apresentam o detalhamento da ETA.

Figura 14 – Imagem de satélite com localização das EBAB e ETA do sistema Belém Novo.



Fonte: Baseado em dados fornecidos pelo DMAE/POA.

Figura 15 – Imagem de satélite da ETA Belém Novo.



Fonte: Baseado em dados fornecidos pelo DMAE/POA.

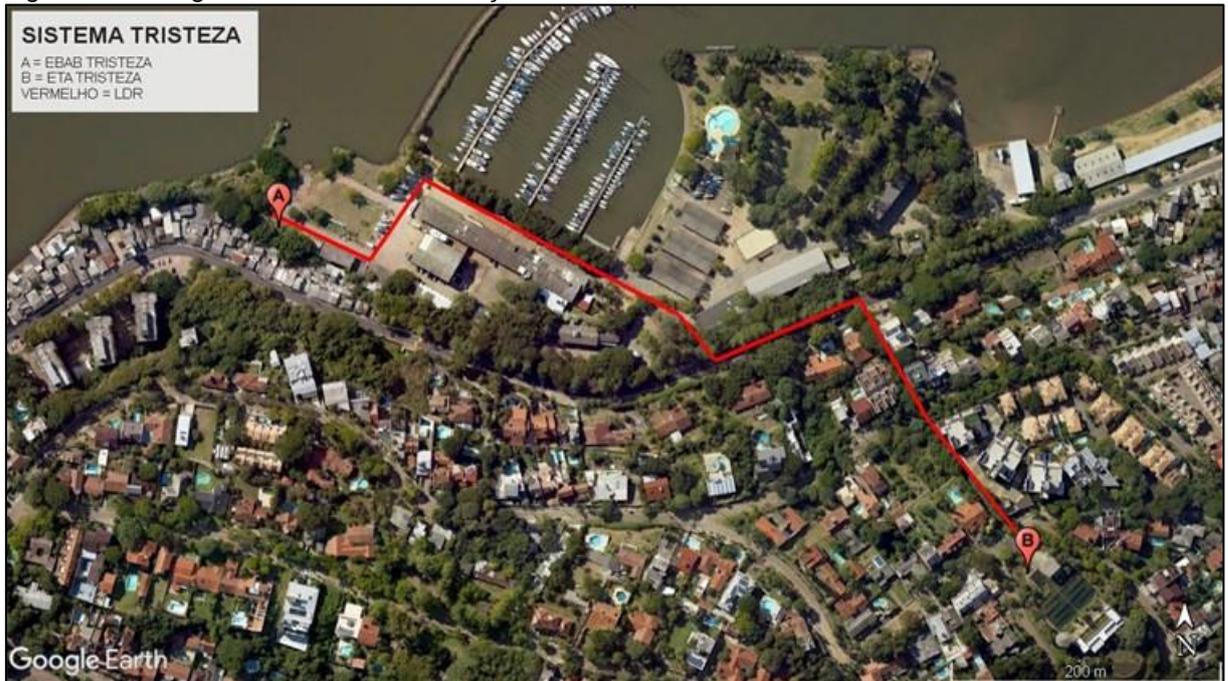
Figura 16 – Registro fotográfico dos filtros da ETA Belém Novo.



Fonte: Autor.

A Figura 17 apresenta a locação da EBAP e ETA do sistema Tristeza, enquanto as Figuras 18 e 19 apresentam o detalhamento da ETA.

Figura 17 – Imagem de satélite com locação das EBAB e ETA do sistema Tristeza.



Fonte: Baseado em dados fornecidos pelo DMAE/POA.

Figura 18 – Imagem de satélite da ETA Tristeza.



Fonte: Baseado em dados fornecidos pelo DMAE/POA.

Figura 19 – Registro fotográfico dos filtros da ETA Tristeza.



Fonte: Autor.

No que tange ao licenciamento ambiental, todo o SAA de Porto Alegre/RS é licenciado pela FEPAM, mediante Licença de Operação de Regularização n° 3.122/2022, que, em relação à água de lavagem dos filtros, especifica a seguinte condicionante:

(...) os efluentes líquidos provenientes do tratamento (lavagem de filtros e decantadores e percolado da secagem do lodo) deverão ser destinados ao esgoto cloacal para tratamento ou poderão ser recirculados no processo quando verificado não comprometimento da potabilidade ou contraindicação pelas autoridades sanitárias. (FEPAM, 2022)

Destaca-se, quanto à condicionante apresentada acima, que as ETA objeto de estudo que não praticam a recirculação da ALF o lançam diretamente na rede de drenagem, que contribui para o Lago Guaíba.

### 5.3 QUALIDADE DA ÁGUA

O monitoramento da qualidade da água é descrito nos subitens a seguir.

#### 5.3.1 Base de dados

A série de amostras da qualidade da água obtidas junto ao DMAE/POA contemplam água bruta, junto à cabeceira da planta, e água tratada, após a desinfecção. Os dados fornecidos são consistidos, ou seja, são dados brutos que

foram consolidados pela equipe técnica do DMAE/POA, que realiza periodicamente a eliminação de erros grosseiros na computação das informações.

A frequência das análises para cada analito de referência é apresentada no Quadro 10. Destaca-se que é apresentada a frequência mínima.

Quadro 10 – Frequência mínima de análises.

Analito	Água bruta	Água tratada
<i>E. Coli</i>	Diária	Diária
Turbidez	A cada 2 horas	Horária
Alcalinidade	12 horas	A cada 12 horas
Bactérias heterotróficas	Semanal	Diária
Coliformes totais	Semanal	Diária
Condutividade	Diária	Diária
Matéria orgânica	Semanal	Semanal
pH	A cada 2 horas	A cada 2 horas
Fluoreto	-	A cada 2 horas
Cloro residual	-	Horária
Cloro residual combinado	-	Horária
Cloro residual total	-	Horária

Fonte: Autor.

O período das análises é de janeiro/2019 a dezembro/2022, totalizando quatro anos. Destaca-se que, antes de 2019, o DMAE/POA não possuía sistema integrado para gerenciamento dos resultados das análises.

### 5.3.2 Analitos de referência

Adota-se como analitos de referência, no presente estudo, a turbidez e a *E. Coli*, dispensando-se a detecção e a contagem de cistos de *Giardia* spp. e oocistos de *Cryptosporidium* spp., cujas técnicas analíticas apresentam maior custo e demandam maior tempo para realização.

O uso da *Escherichia coli* como indicador microbiológico se justifica por ser um coliforme termotolerante muito populoso no aparelho digestivo de animais endotérmicos; apresentar alta taxa de reprodução e ser pouco seletivo quanto a

ambiente e nutrição; e por demandar procedimentos analíticos simples e pouco custosos em relação a outros microrganismos específicos. Logo, é viável e justificável o monitoramento da qualidade da água através da detecção e contagem da *Escherichia coli*, visto que apresentam cinética de decaimento similar a outros microrganismos. Assim, mesmo que a ausência de *Escherichia coli* não implique na ausência de *Giardia* spp. ou de *Cryptosporidium* spp., pode-se inferir, por correção probabilística, que, quanto maior a presença de *Escherichia Coli*, maior a possibilidade de que *Giardia* spp. e *Cryptosporidium* spp. estejam presentes.

Já o uso da turbidez se justifica porque, quanto maior a turbidez, maior a presença de partículas suspensas e coloidais na água, incluindo microrganismos. A simplicidade, a rapidez e o baixo custo das técnicas analíticas para medição da turbidez justificam o uso deste parâmetro no monitoramento de cistos de *Giardia* spp. e os oocistos de *Cryptosporidium* spp., que, assim como a turbidez, são removidos através dos processos de decantação e de filtração.

O uso da *Escherichia coli* e da turbidez como indicadores da presença dos cistos e oocistos é corroborado pela Portaria nº 888, de 4 de maio de 2021, que, a partir da quantidade de *E. Coli* na água bruta, condiciona a obrigatoriedade ou não de monitoramento de cistos e oocistos na água bruta e os limites de turbidez na água tratada.

### 5.3.3 Tratamento dos dados

O tratamento de dados teve como objetivo preparar os dados para que fosse possível analisar a qualidade da água, a eficiência do tratamento e os riscos associados à recirculação da água de lavagem dos filtros. Mesmo que os dados fornecidos pelo DMAE/POA fossem previamente consistidos, eles foram revisados, sendo excluídos dados repetidos (ex.: resultados duplicados) ou digitados incorretamente (ex.: números negativos).

No caso da turbidez, com os dados revisados, realizou-se a eliminação de *outliers* pelo método de Tukey, com a análise dos dados através de gráficos *boxplot* de água bruta e tratada. Já quanto a *Escherichia coli*, trabalhou-se com a média geométrica.

### 5.3.4 Testagem dos dados

Os dados lapidados foram testados diante dos pré-requisitos para potabilidade dispostos na Portaria nº 888, de 4 de maio de 2021, e do padrão de turbidez da água de lavagem dos filtros. Foram verificados:

- a) Média dos últimos 12 meses de *Escherichia coli* na água bruta superior ou inferior a 1.000 NMP/100mL;
- b) Para os meses em que a *Escherichia coli* na água bruta é superior a 1.000 NMP/100mL na média dos últimos 12 meses: se a turbidez na água tratada é superior ou inferior a 0,50  $\mu$ T em 95% das amostras e a 1,00  $\mu$ T no restante das amostras;
- c) Para os meses em que a *Escherichia coli* na água bruta é superior a 1.000 NMP/100mL na média dos últimos 12 meses: se a turbidez na água tratada é superior ou inferior a 0,30  $\mu$ T em 95% das amostras e a 1,00  $\mu$ T no restante das amostras;
- d) Média da remoção de *Escherichia coli* é superior ou inferior a 2,5 log (99,7%);
- e) Turbidez da água bruta em relação ao padrão da água de lavagem dos filtros de média 35,00  $\mu$ T.

No que tange ao padrão da água de lavagem dos filtros, ela varia de 0,00  $\mu$ T a 170,00  $\mu$ T, com média de 35,00  $\mu$ T durante uma lavagem de 10 min (DI BERNARDO; DANTAS. VOLTAN, 2017). Desta forma, considerando que o presente estudo considera recirculação da ALF sem tratamento, mas não direta, ou seja, sendo equalizada em reservatório de armazenamento de barrela antes do recalque da recirculação, adota-se padrão da água de lavagem dos filtros de 35,00  $\mu$ T.

## 5.4 MODELAGEM TÉCNICA

A modelagem técnica inclui a identificação dos parâmetros de maior influência no desempenho técnico-econômico da recirculação da água de lavagem dos filtros e a definição de diferentes cenários para modelagem técnica, seguido do desenvolvimento e aplicação de uma rotina de modelagem técnica.

### 5.4.1 Definição de parâmetros

Uma vez verificado que a água de recirculação da água de lavagem dos filtros impacta na qualidade da água tratada, procura-se determinar, com base na literatura, os fatores que mais impactariam nos custos com energia elétrica. Para tal, recapitula-se as equações da curva do sistema e da potência hidráulicas, rerepresentadas nas Equações 10 e 11, respectivamente.

$$AMT = H + \kappa * Q^2 \quad (10)$$

Onde:

- a) AMT = altura manométrica [mca];
- b) H = altura geométrica [m];
- c)  $\kappa$  = ângulo da curva, representando as perdas de carga;
- d) Q = vazão [m<sup>3</sup>/s].

$$P_H = \gamma * Q * AMT \quad (11)$$

Onde:

- a) PH = potência hidráulica [W];
- b)  $\gamma$  = peso específico do fluido [N/m<sup>3</sup>];
- c) Q = vazão [m<sup>3</sup>/s];
- d) AMT = altura manométrica [mca].

A partir dessas equações, infere-se as seguintes considerações:

- a) A potência consumida é representada majoritariamente pela vazão e pela altura manométrica;
- b) A vazão representa a captação da EBAB;
- c) A altura manométrica é representada pela altura geométrica e pelas perdas de carga;
- d) As perdas de carga são representadas majoritariamente pela extensão da tubulação e pela velocidade;
- e) O diâmetro e a velocidade estão correlacionados, sendo usualmente adotadas velocidades que correspondam às menores perdas de carga;

- f) A velocidade para um dado diâmetro é resultado da vazão;
- g) A altura geométrica e a extensão representam características locais, como relevo local e distância entre a captação e a ETA.

Logo, delimita-se os seguintes parâmetros para a modelagem:

- a) Variável 1 — Vazão de EBAB;
- b) Variável 2 — Altura geométrica do recalque da EBAB;
- c) Variável 3 — Extensão da linha de recalque da EBAB.

#### 5.4.2 Definição de cenários

Para cada variável, foram definidos cenários, que são apresentadas no Quadro 11, a serem testados na modelagem, totalizando 120 cenários. Os cenários são detalhados na matriz de cenários, apresentada no APÊNDICE A.

Quadro 11 – Organização de cenários.

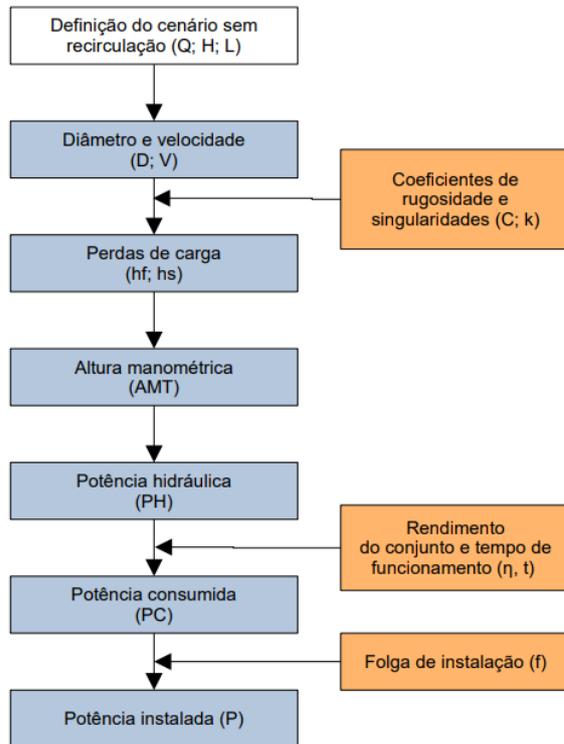
-	Recirculação	Vazão — Q (L/s)	Altura — H (m)	Extensão — L (m)	
Quantidade de categorias (n)	2	10	3	2	
Quantidade de cenários por categoria (n')	60	10	40	60	
		300			
		600			
		900			
		1.200			
Faixas	Sem recirculação (S)	1.500	10	150	
	Com recirculação (C)		50		
			1.800	100	1.500
			2.100		
			2.400		
			2.700		
			3.000		

Fonte: Autor.

### 5.4.3 Roteiro da modelagem técnica

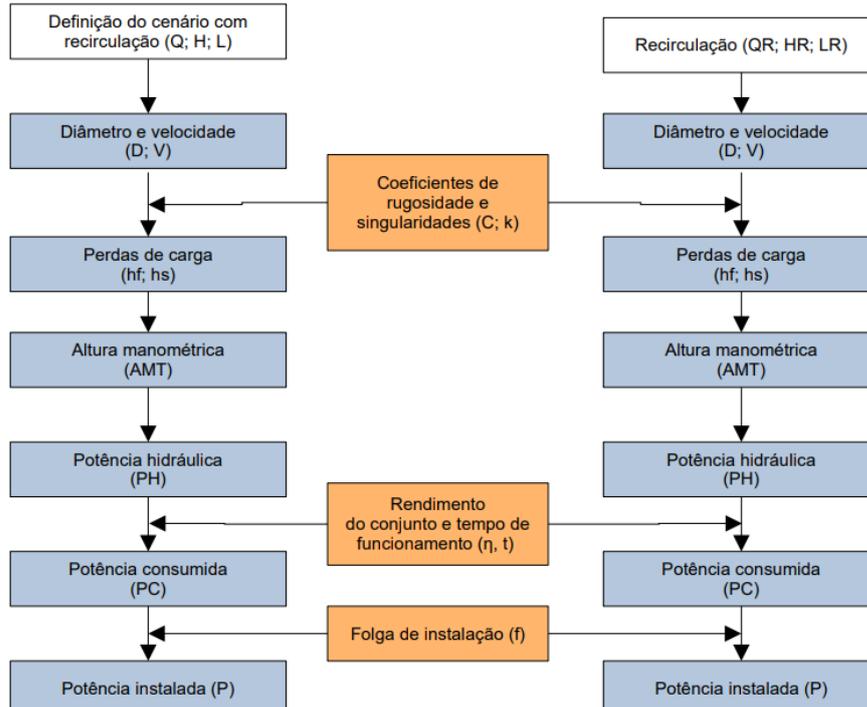
O roteiro da modelagem técnica para os cenários sem e com recirculação é apresentado, respectivamente, nas Figuras 20 e 21.

Figura 20 – Esquema do roteiro de modelagem técnica para cenário sem recirculação.



Fonte: Autor.

Figura 21 – Roteiro de modelagem técnica para cenário com recirculação.



Fonte: Autor.

Para viabilizar a modelagem técnica, adota-se os seguintes valores de referência:

- a) Redução das perdas com recirculação: 5,50%<sup>1</sup>;
- b) Altura geométrica da recirculação: 5,00 m;
- c) Extensão da recirculação: 100,00 m;
- d) Diâmetro: menor diâmetro nominal que atenda à vazão de 0,8 a 1,5 m/s;
- e) Material: ferro fundido com revestimento cimentício;
- f) Coeficientes de perda de carga por atrito: 130 para tubulação nova (recirculação, em início de plano) e 105 para tubulação usada (captação, em início de plano, mais captação e recirculação, em ambos planos);
- g) Coeficiente de perdas de carga por singularidades: 10<sup>2</sup>;
- h) Tempo de recalque na captação de 21 h e na recirculação de 10 h.

## 5.5 MODELAGEM ECONÔMICA

A modelagem econômica, etapa subsequente à análise técnica, tem como objetivo quantificar, em termos financeiros, os cenários modelados. Esta etapa inclui a definição de parâmetros econômicos de atualização e correção monetária, estimativa de custos, tanto de implantação quanto de operação, e projeções ao longo do horizonte de alcance.

No que tange ao horizonte de alcance, adota-se, seguindo padrão comumente adotado na viabilidade técnico-econômica de projetos de saneamento, horizonte de alcance de 35 anos (ENAP, 2015).

### 5.5.1 Atualização e correção monetária

Neste subitem são apresentadas as metodologias e parâmetros adotados para atualizar e corrigir os valores utilizados na modelagem financeira.

---

<sup>1</sup> Mediana dos valores estimados pela literatura técnica.

<sup>2</sup> Arbitrado.

### 5.5.1.1 Taxa anual de inflação

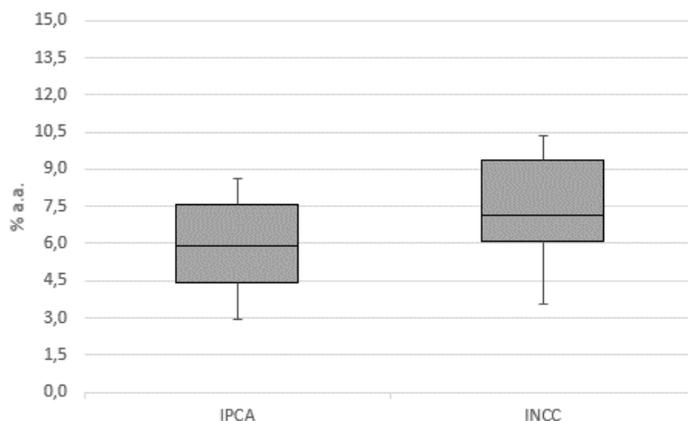
A definição de valores médios de taxa anual de inflação é necessária para subsidiar a definição de parâmetros da análise de viabilidade econômica. Tais valores médios são obtidos a partir da análise da série histórica do preço dos produtos e de indicadores econômicos. Foram considerados os indicadores financeiros IPCA para definição da taxa de juros e INCC para correção de preços de obras, enquanto a série histórica do preço da tarifa média efetiva de energia elétrica foi adotada para correção do preço da energia elétrica.

#### 5.5.1.1.1 Indicadores econômicos

A série histórica dos indicadores financeiros utilizados na análise da viabilidade econômica são apresentados na Figura 22 e na Tabela 7, com eliminação de *outliers*. Adotando-se IPCA para taxa de juros e INCC para custos de implantação, obteve-se, a partir da análise das séries históricas, as seguintes taxas de inflação:

- a) Taxa de juros (baseada no IPCA): 6,04% ao ano;
- b) Preços de obras (baseada no INCC): 7,92% ao ano.

Figura 22 – *Boxplot* da série histórica das taxas anuais de inflação.



Fonte: Baseado em IBGE (2023B) e FGV (2023B).

Tabela 7 – Série histórica das taxas anuais de inflação.

Ano	IPCA	INCC	Ano	IPCA	INCC	Ano	IPCA	INCC
2000	5,97	7,14	2008	5,90	11,82	2016	6,29	6,14
2001	7,67	8,62	2009	4,31	3,56	2017	2,95	4,15
2002	12,53	14,16	2010	5,91	7,52	2018	3,75	4,03
2003	9,30	13,09	2011	6,50	8,01	2019	4,31	4,04
2004	7,60	11,5	2012	5,84	6,86	2020	4,52	9,37
2005	5,69	6,41	2013	5,91	8,34	2021	10,06	13,65
2006	3,14	5,15	2014	6,41	6,99	2022	5,79	8,51
2007	4,45	6,08	2015	10,67	6,92	-	-	-

Legenda: *Outliers* em vermelho.

Fonte: Adaptado de IBGE (2023B) e FGV (2023B).

### 5.5.1.1.2 Tarifa de energia elétrica

A unidade padrão para a medida da tarifa de energia elétrica é a tarifa média efetiva, uma composição de referência que incorpora custos de geração e de distribuição (ANEEL, 2023), e a Tabela 8 apresenta tal tarifa praticada pela concessionária de distribuição de energia elétrica em Porto Alegre/RS, onde é possível observar uma variação de 34,14% no intervalo de 59 meses, resultando numa taxa média de inflação no preço da energia elétrica de 6,94% ao ano, adotada no presente trabalho.

Tabela 8 – Variação no preço de referência da energia elétrica distribuída em Porto Alegre/RS.

Mês	Tarifa efetiva média (MWh/R\$)	Intervalo entre variações (mês)
Dezembro/2017	308,89	-
Novembro/2018	360,75	11
Novembro/2019	309,98	12
Novembro/2020	304,48	12
Novembro/2021	351,33	12
Novembro/2022	414,35	12

Fonte: Adaptado de ANEEL (2023).

### 5.5.2 Taxa de desconto

Essencial à estimativa do valor presente líquido, a taxa de desconto é definida seguindo metodologia do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), apresentada na Equação 12:

$$TX = IPCA + TE \quad (12)^1$$

Onde:

- a) TD: taxa de desconto [%];
- b) IPCA: taxa de juros [%];
- c) TE: taxa efetiva [%].

Adotando a taxa de juros média histórica do IPCA de 6,04% ao ano e a taxa efetiva média definida pelo BNDES para 2023 de 5,14% ao ano (BNDES, 2023), têm-se que a taxa de retorno é de 11,18%.

<sup>1</sup> Fonte: Adaptado de BNDES (2023).

### 5.5.3 Fator de valor presente

Definida a taxa de desconto, é possível projetar o fator de valor presente ao longo do horizonte de análise. A projeção do FVP é apresentada na Tabela 9.

Tabela 9 – Fator de valor presente.

Ano	FVP	Ano	FVP	Ano	FVP
2023	1,0000	2035	0,2803	2047	0,0786
2024	0,8994	2036	0,2522	2048	0,0707
2025	0,8090	2037	0,2268	2049	0,0636
2026	0,7277	2038	0,2040	2050	0,0572
2027	0,6545	2039	0,1835	2051	0,0514
2028	0,5887	2040	0,1650	2052	0,0463
2029	0,5295	2041	0,1484	2053	0,0416
2030	0,4762	2042	0,1335	2054	0,0374
2031	0,4283	2043	0,1201	2055	0,0337
2032	0,3853	2044	0,1080	2056	0,0303
2033	0,3465	2045	0,0971	2057	0,0272
2034	0,3117	2046	0,0874	-	-

Fonte: Autor.

### 5.5.4 Projeção de índice para atualização e correção de preços.

Uma vez projetado o fator de valor presente ao longo do horizonte de alcance da viabilidade, é possível calcular os valores monetários atualizados para cada ano projetado. Ainda, cruzando o fator de valor de presente com as taxas de inflação calculadas, pode-se corrigir os valores monetários atualizados. Logo, obtêm-se índices de atualização e de correção de preços para o período da viabilidade, em relação ao preço atual, apresentados na Tabela 10 para a inflação do preço da energia elétrica.

Tabela 10 – Índices de atualização e correção de preços.

Ano	Energia elétrica	Ano	Energia elétrica	Ano	Energia elétrica
2023	1,0000	2035	0,6272	2047	0,3933
2025	0,9252	2037	0,5802	2049	0,3639
2026	0,8899	2038	0,5581	2050	0,3500
2027	0,8560	2039	0,5368	2051	0,3366
2028	0,8233	2040	0,5163	2052	0,3238
2029	0,7919	2041	0,4967	2053	0,3115
2030	0,7617	2042	0,4777	2054	0,2996
2031	0,7327	2043	0,4595	2055	0,2881
2032	0,7047	2044	0,4420	2056	0,2772
2033	0,6779	2045	0,4251	2057	0,2666
2034	0,6520	2046	0,4089	-	-

Fonte: Autor.

### 5.5.5 Preços de referência

Na estimativa dos custos de implantação, considera-se os custos com construção de reservatório para armazenamento de ALF, mais elevatória e de linha

de recalque para recirculação da ALF. Destaca-se que, no que tange os custos operacionais, considerou-se apenas os custos com energia elétrica, que são os mais representativos. Outros custos que poderiam ser computados entre os custos operacionais, como mão de obra, não foram considerados na modelagem econômica.

#### 5.5.5.1 Custos de implantação

Os dados de custos utilizados na modelagem foram obtidos utilizando como base preços de referência de editais de licitação pública da Companhia Riograndense de Saneamento (CORSAN), baseados majoritariamente no Sistema Nacional de Custos e Preços da Construção (SINAPI). Todos os custos levantados foram atualizados e corrigidos para uma mesma base temporal, o ano de 2023.

Foram considerados linha de recalque em ferro fundido sob pavimento intertravado, comumente encontrado em ETA, elevatória de poço úmido com conjunto motor-bomba submersível e o reservatório enterrado de concreto armado com volume paradigma de 400 m<sup>3</sup>, nestes dois últimos, desconsiderando elementos referentes cercamento e fechamento do terreno, visto que seriam locados no interior da ETA.

A Tabela 11 apresenta os preços de referência adotados e a base de dados é apresentada no APÊNDICE D.

Tabela 11 – Preços de referência.

Item	Item	Unidade	R\$/m	Base
Linha de recalque	DN200	R\$/m	809,99	CORSAN
	DN300	R\$/m	1.079,29	CORSAN
	DN400	R\$/m	1.465,37	CORSAN
	DN500	R\$/m	1.656,61	CORSAN
	DN600	R\$/m	1.594,90	CORSAN
Reservatório	V=400m <sup>3</sup>	R\$/un.	351.815,10	CORSAN
	P=7,5	R\$/un.	495.489,85	CORSAN
	P=10	R\$/un.	559.173,41	CORSAN
	P=12,5	R\$/un.	614.154,72	CORSAN
	P=15	R\$/un.	663.067,39	CORSAN
Elevatória	P=17,5	R\$/un.	707.449,44	CORSAN
	P=20	R\$/un.	748.289,10	CORSAN
	P=25	R\$/un.	821.865,40	CORSAN
	P=30	R\$/un.	887.320,63	CORSAN
	P=40	R\$/un.	1.001.364,82	CORSAN

Fonte: Baseado de CORSAN (2023).

### 5.5.5.2 Custos de operação

O preço da tarifa de energia elétrica adotado considera o enquadramento das unidades de captação (EBAT) e de tratamento (ETA) do DMAE/POA, que é alta tensão, grupo A4 e modalidade tarifária verde. A tarifação de energia elétrica para esta categoria é dividida em tarifa de demanda<sup>1</sup>, correspondente à tarifa de uso do sistema de distribuição (TUSD), e de consumo, correspondente à tarifa efetiva (TE), que por sua vez é dividida pelo segmento horário em ponta e fora de ponta. Acrescenta-se desconto de 3,00% para o setor de saneamento e tributos incidentes de PIS e COFINS de 4,77%, sendo considerada isenção de ICMS para serviço de água e de esgoto. A Tabela 12 apresenta o valor das tarifas.

Tabela 12 – Preço da tarifa de energia elétrica.

Tarifa	Tarifa bruta	Tarifa com desconto e tributação
Demanda (R\$/kW)	26,12	26,61
Consumo em ponta (R\$/kWh)	0,40367	0,41118
Consumo fora de ponta (R\$/kWh)	1,80981	1,84350

Fonte: Baseado de CEEE (2023).

Destaca-se que, para viabilizar a modelagem financeira, optou-se por considerar uma tarifa de consumo média proporcional entre as tarifas de consumo para cada segmento horário, conforme apresentado na Tabela 13.

Tabela 13 – Tarifa de consumo média entre segmentos horários.

Segmento horário	Duração (HH)	Duração relativa (%)	Tarifa de consumo média (R\$/kWh)
Fora de ponta	21	87,50	0,41118
Ponta	3	12,50	1,84350
Média	-	-	0,59022

Fonte: Baseado de CEEE (2023).

Logo, a tarifa de energia elétrica base adotada no presente estudo é:

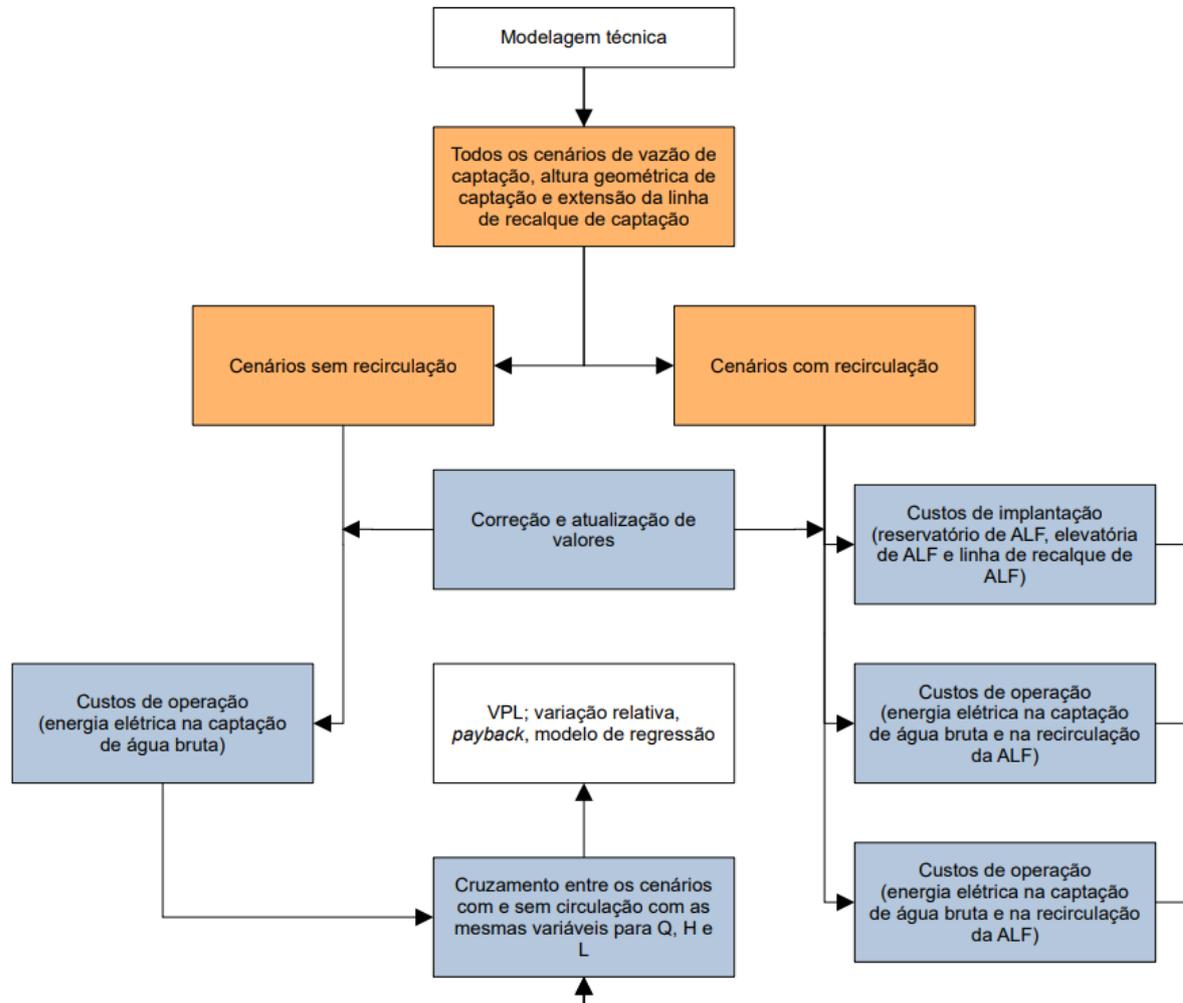
- a) Tarifa de demanda (R\$/kW): R\$ 26,61;
- b) Tarifa de consumo (R\$/kWh): R\$ 0,59022.

### 5.5.6 Roteiro da modelagem econômica.

O roteiro da modelagem econômica é apresentado na Figura 23.

<sup>1</sup> Corresponde à potência máxima demandada do sistema de distribuição para atender à unidade consumidora e é calculada a partir da soma da potência média consumida por 15 min (CEEE, 2023).

Figura 23 – Esquema do roteiro de modelagem econômica.



Fonte: Autor.

## 5.6 MODELO DE REGRESSÃO

Caso a modelagem técnico-econômica produza resultados que atendam a uma distribuição normal, será desenvolvida ferramenta para análise da viabilidade técnica da recirculação da ALF. Assim sendo, será utilizada a ferramenta Análise de Dados do programa Microsoft® Excel®.

A variável dependente a ser adotada será a economia potencial da recirculação (superávit dos cenários com recirculação em relação aos cenários sem recirculação), enquanto as variáveis dependentes serão as mesmas da modelagem hidráulica (vazão, altura e extensão). Verificada a impossibilidade de obter uma regressão para as três variáveis dependentes (vazão, altura e extensão), se testará a regressão de duas variáveis dependentes, ou de uma variável dependente, que representem adequadamente o comportamento da modelagem técnico-econômica.

## 5.7 LIMITAÇÕES

Com o objetivo de desenvolver uma metodologia abrangente para a avaliação da viabilidade da recirculação da água de lavagem dos filtros em ETA, foram considerados apenas aspectos técnicos e financeiros que pudessem ser aplicados em diferentes condições de contorno. Desta forma, desconsiderou-se aspectos socioculturais e externalidades.

Também não foi considerada possível variação nas vazões da ETA ao longo do horizonte de alcance, variável que incorpora tanto a variação da população quanto a variação nas perdas processuais, arbitrando-se vazões constantes ao longo do horizonte de alcance. Neste sentido, destaca-se que, apesar das metas de revisão de perdas da Lei Federal nº 14.026, de 16 de julho de 2020, a variação populacional pode variar entre as diferentes zonas de cobertura dos sistemas correspondentes. Ainda, que a população no Brasil apresenta estabilização da população, sendo observado decaimento na população urbana porto-alegrense de 5,45% entre os censos de 2010 e de 2022 e sendo prospectado redução da população gaúcha de 3,91% entre 2022 e 2058 (IBGE, 2023).

As condições de contorno da modelagem limitam-se a casos em que há recalque de água bruta entre a captação e a ETA e cobre a faixa de vazão de captação de 300 a 3.000 L/s, de altura geométrica de 10 a 100 m e de extensão da linha de recalque de 150 a 1.500 m.

Outra limitação metodológica é que o padrão de turbidez adotado como paradigma para água de lavagem de filtros foi obtido a partir da literatura técnica. Acrescenta-se, também, que a garantia da ausência de protozoários foi verificada a partir dos indicadores turbidez e *Escherichia coli*, tanto na água bruta quanto na água tratada, devido à ausência de tais análises no rol de análises realizadas pelo DMAE e ao alto custo das análises para detecção de cistos de *Giardia* spp. e oocistos de *Cryptosporidium* spp.

Por fim, foram desconsiderados o impacto da recirculação da ALF na dosagem de coagulantes, devido à insuficiência de registros de dosagem destes coagulantes, a variação sazonal nos tipos e quantidades de produtos químicos dosados e grande distinção no tipo de produtos dosados e forma de dosagem destes produtos nas diferentes ETA objeto do estudo.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

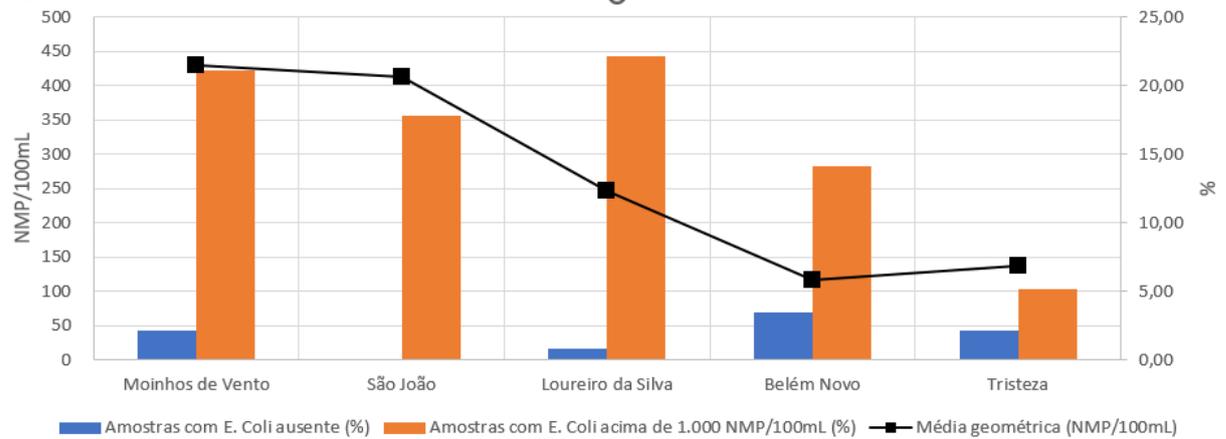
Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados da pesquisa. Eles estão divididos em três etapas sucessivas, desenvolvidos de acordo com a metodologia proposta. A primeira etapa consiste na análise da qualidade da água, buscando verificar se, com base nos analitos de referência e no período de amostragem para as ETA objeto de estudo, a recirculação da ALF impacta na qualidade da água tratada. Também é realizada a comparação entre o padrão de turbidez da ALF e os valores recorrentes de turbidez na água bruta, assim como o desempenho das ETA frente ao padrão de potabilidade. Nas etapas seguintes, são realizadas, sequencialmente, as análises técnica e econômica, modelando os cenários propostos.

### 6.1 QUALIDADE DA ÁGUA

A qualidade da água é analisada a partir da *Escherichia coli* na água bruta, da turbidez na água tratada, da eficiência da remoção da *Escherichia coli* no tratamento e da comparação entre a turbidez na água bruta e a turbidez padrão da ALF.

#### 6.1.1 *Escherichia coli* na água bruta

A presença de *Escherichia coli* na água bruta indica potencial contaminação das águas por fezes humanas ou de animais, indicando a presença de microrganismos, mas não necessariamente se há presença de organismos patogênicos (METCALF & EDDY, 2016). A Portaria nº 888, de 4 de maio de 2021, especifica que, quando a contagem de *E. Coli* superar 1.000 NMP/100mL na média dos últimos 12 meses, o padrão de turbidez na água tratada em 95% das amostras deve passar de 0,50  $\mu$ T para 0,30  $\mu$ T. A Figura 24 apresenta a análise da *Escherichia coli* na água bruta e a Tabela 14 apresenta os resultados consolidados.

Figura 24 – *E. Coli* na água bruta.

Fonte: Autor.

Tabela 14 – Resultados das análises de *E. Coli* na água bruta.

	Moinhos de Vento	São João	Loureiro da Silva	Belém Novo	Tristeza
Amostras com <i>E. Coli</i> ausente (%)	2,16	0,00	0,82	3,43	2,16
Amostras com <i>E. Coli</i> acima de 1.000 NMP/100mL (%)	21,12	17,80	22,13	14,16	5,17
Média geométrica quando <i>E. Coli</i> identificada (NMP/100mL)	430	413	246	117	137

Fonte: Autor.

A partir dos dados apresentados, observa-se que a média geométrica de *E. Coli* em é inferior a 1.000 NP/100mL em todos os sistemas e que predominam amostras com contagem de *E. Coli* abaixo de 1.000 NMP/100mL.

No que tange à locação das EBAB, observa-se que as EBAB situadas mais próximas das confluências dos Rio Jacuí, Rio dos Sinos, Rio Caí e Rio Gravataí (ETA Moinhos de Vento, ETA São João e ETA Loureiro da Silva) apresentaram maiores contagens de *E. Coli*, diferente das demais ETA (ETA Belém Novo e ETA Tristeza).

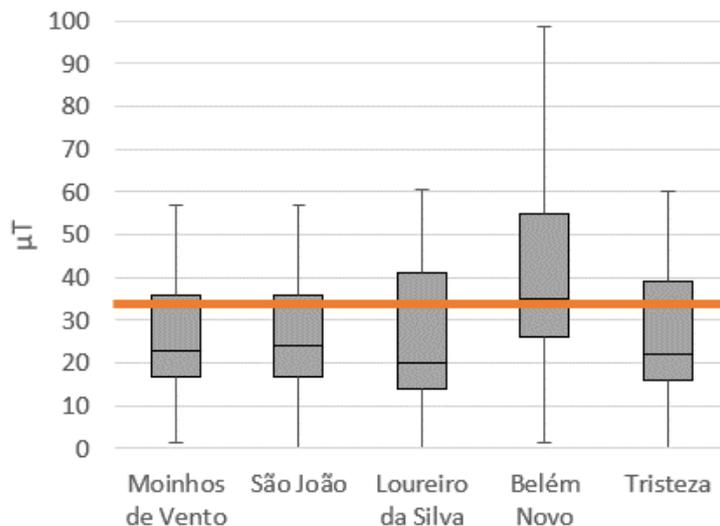
### 6.1.2 Turbidez na água bruta

Altos índices de turbidez na água bruta estão comumente associados à presença de silte, argila, substâncias inorgânicas e substâncias orgânicas, incluindo algas, plâncton, bactérias, vírus e protozoários (TRAIN, 1986), com concentrações variando de 3 a 500  $\mu$ T em mananciais superficiais e não sendo invisível a olho nu em copo transparente quando abaixo de 5  $\mu$ T (SHAMMAS; WANG, 2016). Desta

forma, por correlação, infere-se que baixa turbidez está associada, entre outros fatores, à reduzida presença de microrganismos.

A Figura 25 apresenta o *boxplot* das análises de turbidez na água bruta e a Tabela 15 apresenta os resultados consolidados, com eliminação dos *outliers* pelo método de Tukey, em comparação à turbidez média da ALF adotada no presente estudo, de 35  $\mu\text{T}$ .

Figura 25 – *Boxplot* dos resultados das análises de turbidez na água bruta.



Legenda: Laranja = ALF média.

Fonte: Autor.

Tabela 15 – Resultados das análises de turbidez na água bruta.

	Moinhos de Vento	São João	Loureiro da Silva	Belém Novo	Tristeza
( $\mu\text{T}$ )					
Máximo com <i>outliers</i>	550,00	390,00	191,00	1600,00	370,00
Máximo sem <i>outliers</i>	64,50	64,50	81,50	98,50	73,50
Interquartil #3	36,00	36,00	41,00	55,00	39,00
Média	24,68	25,01	21,56	37,28	24,22
Desvio padrão	14,30	14,29	11,74	87,84	19,04
Interquartil #1	17,00	17,00	14,00	26,00	16,00
Mínimo sem <i>outliers</i>	1,20	0,20	0,15	1,40	0,13
Mínimo com <i>outliers</i>	1,20	0,20	0,15	1,40	0,13
Dias com turbidez superior à média da ALF <sup>1</sup> (%)	19	19	6	81	19

<sup>1</sup> Turbidez média = 35,00  $\mu\text{T}$ .

Fonte: Autor.

Os resultados mostram que, embora as médias em quatro das cinco ETA sejam inferiores aos 35  $\mu\text{T}$  da média da ALF, este valor ainda se encontra entre os interquartis 1 e 3, portanto, dentro de 50% das amostras.

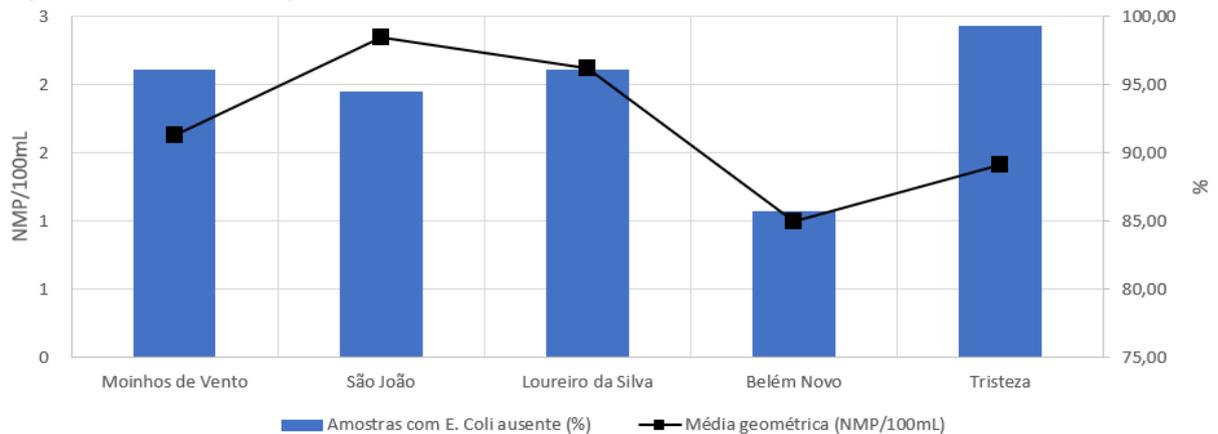
Novamente, consoante observado na análise da *Escherichia coli* na água bruta, a ETA Moinhos de Vento e a ETA São João, cujas EBAB estão locadas no mesmo terreno, apresentam resultados similares. A ETA Loureiro da Silva e a ETATristeza também apresentam resultados similares, com apenas a ETA Belém Novo apresentando comportamento discrepante. Tal discrepância pode ser resultado da sua captação, a única entre as cinco de Porto Alegre que não possui desarenador.

### 6.1.3 *Escherichia coli* na água tratada

A remoção de *Escherichia coli* na água tratada é um indicador da eficiência na remoção de microrganismos e a Portaria n° 888, de 4 de maio de 2021, especifica que deve ser realizado monitoramento de cistos e oocistos quando a eficiência média for inferior a 99,7% (2,5 log).

Os resultados das análises de *Escherichia coli* na água tratada e a eficiência na remoção deste microrganismo são apresentados na Figura 26 e na Tabela 16.

Figura 26 – *E. Coli* na água tratada.



Fonte: Autor.

Tabela 16 – Resultados das análises de *E. Coli* na água tratada.

-	Moinhos de Vento	São João	Loureiro da Silva	Belém Novo	Tristeza
Amostras com <i>E. Coli</i> ausente (%)	96,09	94,50	96,13	85,76	99,36
Máximo (NMP/100mL)	11	36	28	1	4
Média geométrica quando <i>E. Coli</i> identificada (NMP/100mL)	2	2	2	1	1
Eficiência máxima (%)	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Eficiência média (%)	99,97	99,96	99,96	99,80	100,00
Eficiência mínima (%)	99,74	99,71	99,70	99,76	99,96
Dias com eficiência média abaixo de 99,70% (%)	0	0	0	0	0

Fonte: Autor.

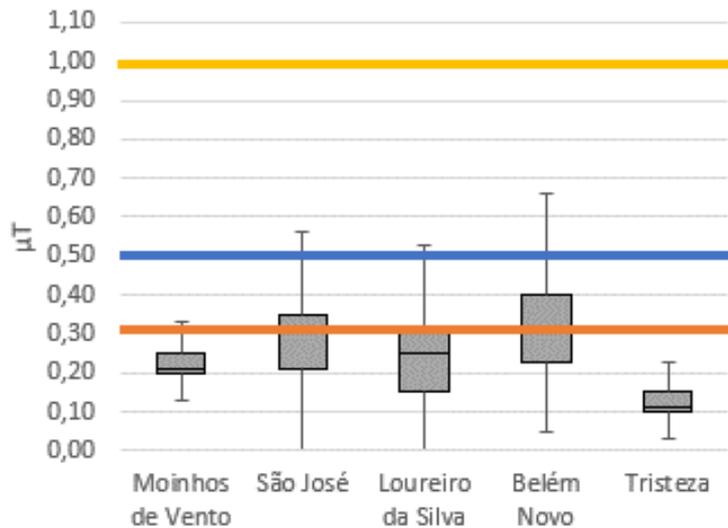
Observa-se que a eficiência se mantém acima do limite de 99,70% em todas as ETA, tanto para as médias quanto para as mínimas, incluindo as ETA Moinhos de Vento, São João e Loureiro da Silva, que apresentaram os piores resultados para *Escherichia coli* na água bruta. Destaca-se que a eficiência média de remoção de *Escherichia coli* em estações de tratamento de ciclo completo, conforme a literatura técnica, é de 2,0 log, abaixo da eficiência da remoção de *Giardia* spp. e de *Cryptosporidium* spp., que são, respectivamente, de 2,5 e 3,0 log.

#### 6.1.4 Turbidez na água tratada

A turbidez na água tratada é o principal parâmetro para atestar a eficiência na remoção de sólidos, sendo associada diretamente ao desempenho dos filtros. Seu limite, pela Portaria n° 888, de 4 de maio de 2021, é de 1,00 µT em 100% das amostras e de 0,50 µT em 95% das amostras, com redução do limite para 95% das amostras para 0,30 µT quando a *Escherichia coli* superar 1.000 NMP/100mL na média móvel dos últimos 12 meses.

A Figura 27 apresenta o *boxplot* das análises de turbidez na água tratada, enquanto a Figura 28 apresenta a distribuição dos resultados e a Tabela 17 apresenta os resultados consolidados, com eliminação dos *outliers* pelo método de Tukey, os comparando em relação à turbidez média da ALF.

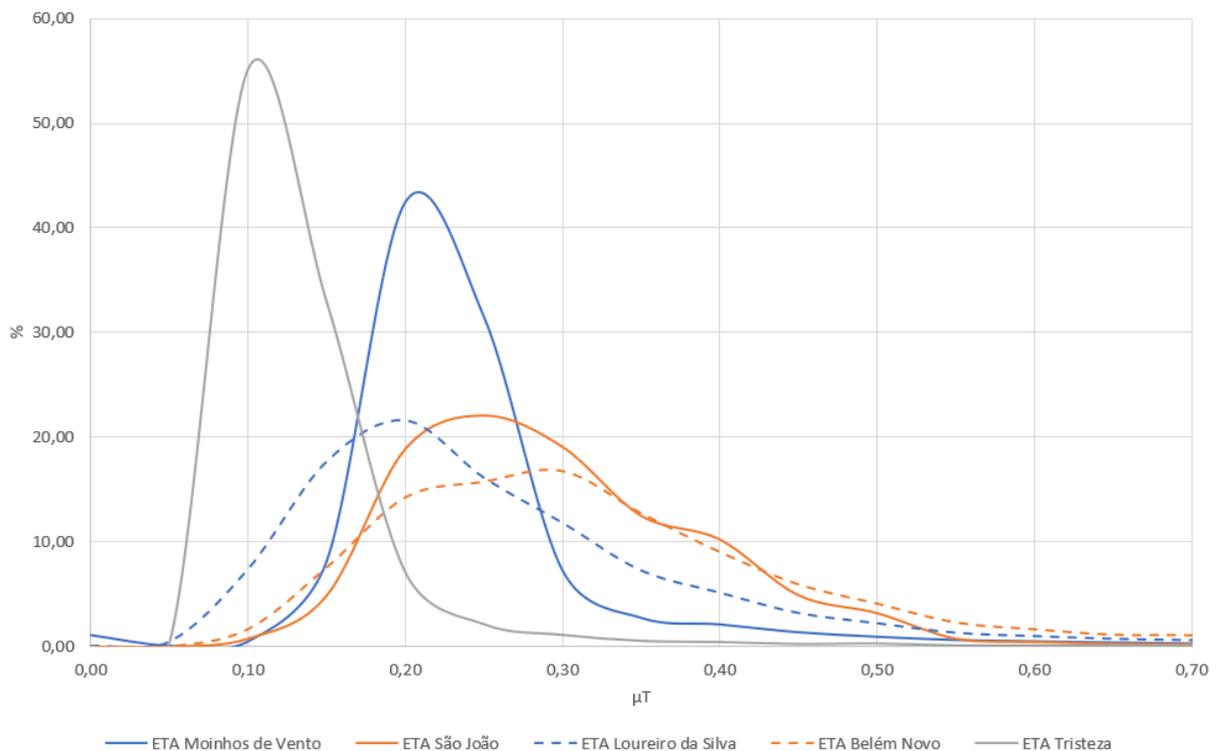
Figura 27 – *Boxplot* dos resultados das análises de turbidez na água tratada.



Legenda: Amarelo = limite para 100% das amostras. Azul = limite para 95% das amostras quando *E. Coli* na água bruta até 1.000 NMP/100mL. Laranja = limite para 95% das amostras quando *E. Coli* na água bruta acima de 1.000 NMP/100mL.

Fonte: Autor.

Figura 28 – Distribuição da turbidez na água tratada.



Legenda: Linhas contínuas = ETA com recirculação. Linhas tracejadas = ETA sem recirculação.

Fonte: Autor.

Tabela 17 – Resultados das análises de turbidez na água tratada.

-	Moinhos de Vento	São João	Loureiro da Silva	Belém Novo	Tristeza
( $\mu\text{T}$ )					
Máximo com <i>outliers</i>	8,60	22,00	12,00	13,00	15,00
Máximo sem <i>outliers</i>	0,33	0,56	0,53	0,66	0,23
Interquartil #3	0,25	0,35	0,30	0,40	0,15
Média	0,21	0,30	0,25	0,30	0,11
Desvio padrão	0,13	0,20	0,27	0,41	0,09
Interquartil #1	0,20	0,21	0,15	0,23	0,10
Mínimo sem <i>outliers</i>	0,13	0,00	0,00	0,05	0,03
Mínimo com <i>outliers</i>	0,00	0,00	0,00	0,05	0,00
Dias atendendo critério < 1,00 $\mu\text{T}$ em 100% das amostras <sup>1</sup>	88	92	58	38	96
Dias atendendo critério < 0,50 $\mu\text{T}$ em 100% das amostras <sup>1,2</sup>	90	92	58	40	100
Meses atendendo critério < 0,30 $\mu\text{T}$ em 100% das amostras <sup>1,3</sup>	25	0	15	2	96
Meses com E. Coli na água bruta superior a 1.000 NMP/100mL na média dos últimos 12 meses (%) e turbidez acima de 0,30 $\mu\text{T}$ (%)	0	33	0	-	-
Meses com E. Coli na água bruta superior a 1.000 NMP/100mL na média dos últimos 12 meses (%) e turbidez acima de 0,50 $\mu\text{T}$ (%)	0	0	0	-	-

<sup>1</sup> Sem considerar *outliers*.

<sup>2</sup> Quando média da *E. Coli* nos últimos 12 meses não é superior a 1.000 NMP/100mL.

<sup>3</sup> Quando média da *E. Coli* nos últimos 12 meses é superior a 1.000 NMP/100mL.

Fonte: Autor.

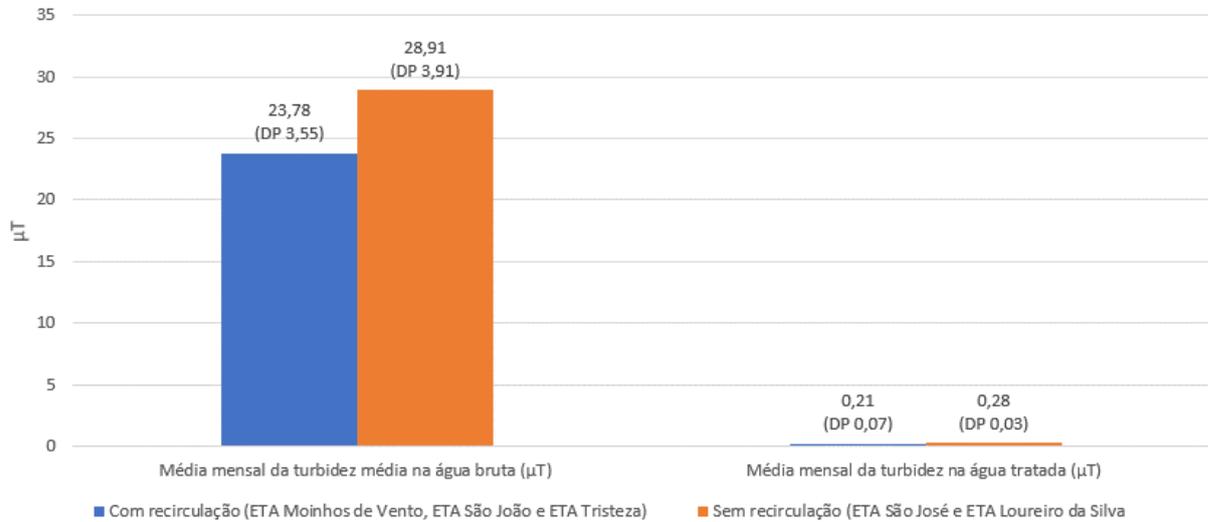
Observa-se, também, que, nos meses em que a *Escherichia coli* supera 1.000 NMP/100mL na média móvel anual, apenas a ETA São João não atendeu ao critério de 0,30  $\mu\text{T}$ . Neste caso, dos 6 meses em que ficou foi identificada *E. Coli* média da água bruta acima de 1.000 NMP/100mL na média dos últimos 12 meses, a ETA São João apenas não atendeu o limite em dois meses.

A partir dos resultados, observa-se que as duas ETA que apresentam os melhores resultados são a Moinhos de Vento e a Tristeza, ambas com recirculação da ALF.

### 6.1.5 Influência da recirculação na qualidade da água tratada

É apresentada a comparação entre os resultados da turbidez das ETA com e sem recirculação da ALF nas Figuras 29 e 30.

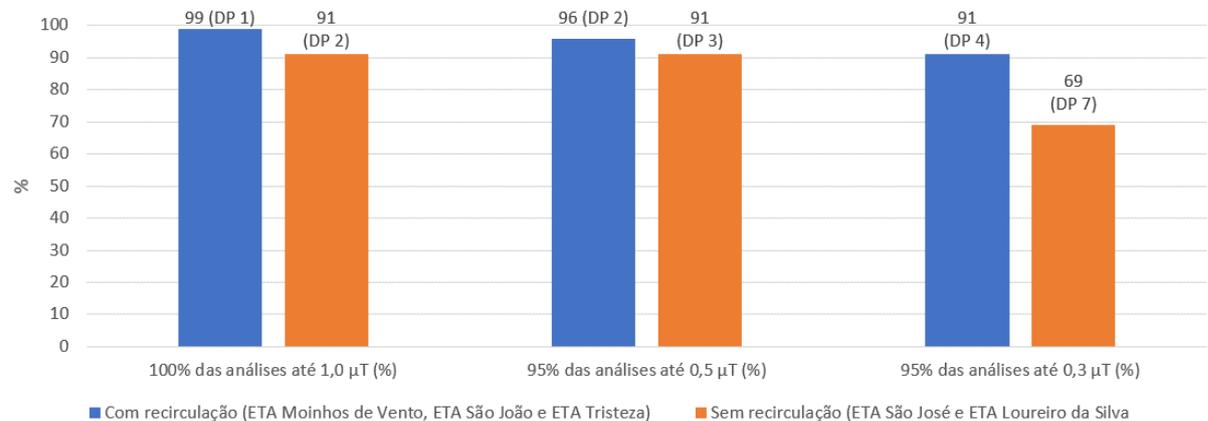
Figura 29 – Comparativo entre ETA com e sem recirculação para água bruta e tratada.



Legenda: DP = Desvio padrão.

Fonte: Autor.

Figura 30 – Comparativo entre ETA com e sem recirculação para água tratada.



Legenda: DP = Desvio padrão.

Fonte: Autor.

Assim, é possível observar que as três ETA que realizam a circulação, no geral, apresentam desempenho superior às duas outras ETA, mesmo que não seja possível concluir alguma influência da recirculação da ALF neste desempenho.

## 6.2 MODELAGEM TÉCNICO-ECONÔMICA

Optou-se por apresentar os resultados da modelagem técnica e da modelagem econômica de forma integrada, visto que se complementam. No entanto, a

modelagem técnica testa 120 cenários com 4 variáveis e a modelagem econômica projeta estes custos ao longo do horizonte de alcance, gerando um grande volume de informações. Desta forma, os resultados são discutidos nos subitens a seguir, mas apresentados nos apêndices, sendo a matriz de resultados da modelagem técnica apresentada no APÊNDICE B, e a matriz de resultados da modelagem econômica no APÊNDICE C.

### 6.2.1 Validação econômica da recirculação

O Quadro 12 apresenta o resumo do VPL para os macrocenários com e sem recirculação. Destaca-se que cada macrocenário abrange os mesmos outros 60 cenários.

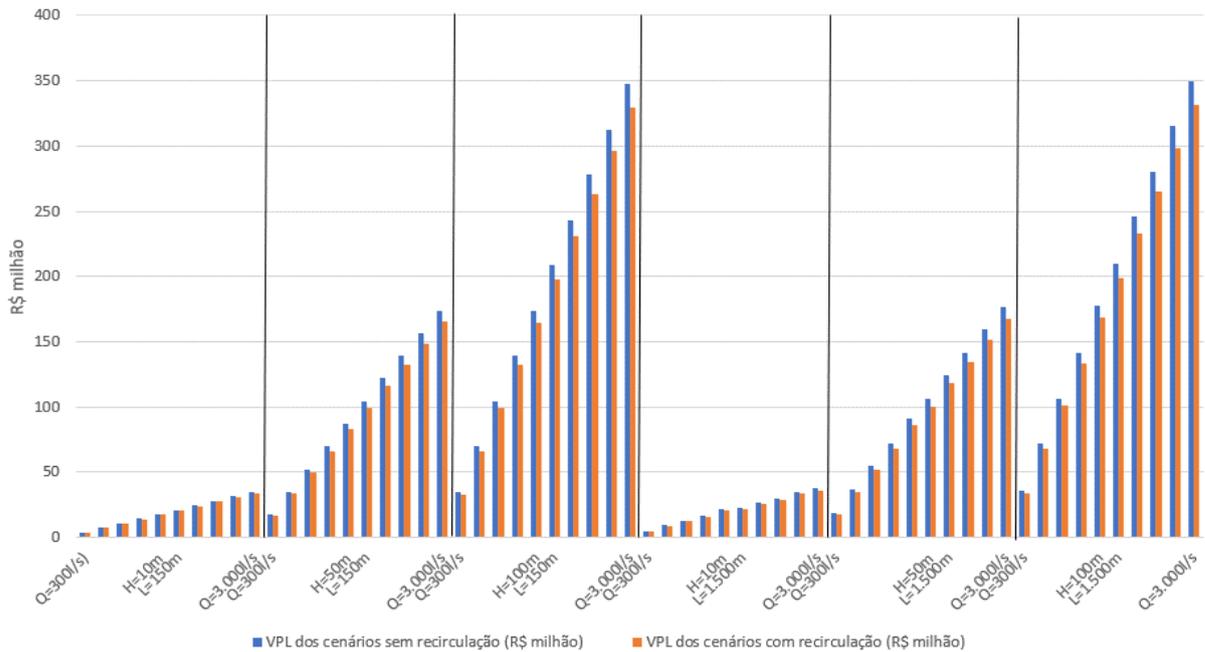
Quadro 12 – Resumo da diferença de VPL entre os cenários com e sem recirculação.

Variáveis	Média (R\$ 10 <sup>6</sup> )	Mínimo (R\$ 10 <sup>6</sup> )	Máximo (R\$ 10 <sup>6</sup> )	Desvio padrão (R\$ 10 <sup>6</sup> )
Q (L/s)				
300	19,3	14,0	18,3	13,2
600	38,3	28,0	36,4	26,4
900	56,9	42,0	54,0	39,6
1.200	75,3	55,9	71,5	52,9
1.500	94,9	70,0	90,1	66,1
1.800	112,0	84,0	106,4	79,3
2.100	131,1	98,0	124,4	92,6
2.400	149,3	111,9	141,8	105,8
2.700	168,3	125,9	159,8	119,0
3.000	186,5	139,9	177,1	132,2
H (m)				
10	20,5	10,4	19,9	10,1
50	96,8	51,3	92,0	48,7
100	192,2	102,4	182,1	97,1
L (m)				
150	102,0	97,1	97,0	91,9
1.500	104,4	97,2	99,0	92,0

Fonte: Autor.

A Figura 31 apresenta o VPL de cada alternativa. Cada faixa vertical representa uma faixa de altura e de extensão, com valores para cada vazão. Nela é possível observar que os cenários em que há recirculação (colunas na cor laranja) são mais vantajosos economicamente. Também se observa que tanto a vazão quanto a altura geométrica e a extensão influenciam ativamente no desempenho econômico.

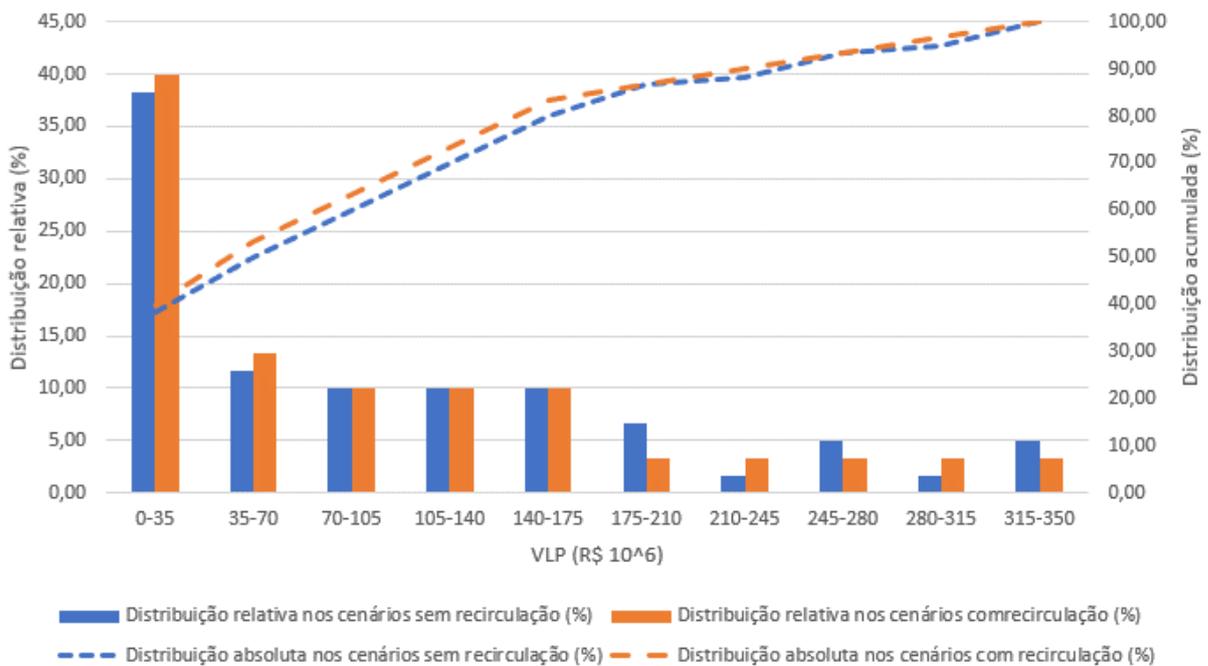
Figura 31 – Gráfico da VPL.



Fonte: Autor.

A Figura 32 apresenta a distribuição relativa e acumulada para os cenários com e sem recirculação, onde é possível observar maior representatividade dos cenários com recirculação nas menores faixas de VPL, com amplitude dos cenários com recirculação nas faixas iniciais.

Figura 32 – Distribuição entre os cenários com e sem recirculação.

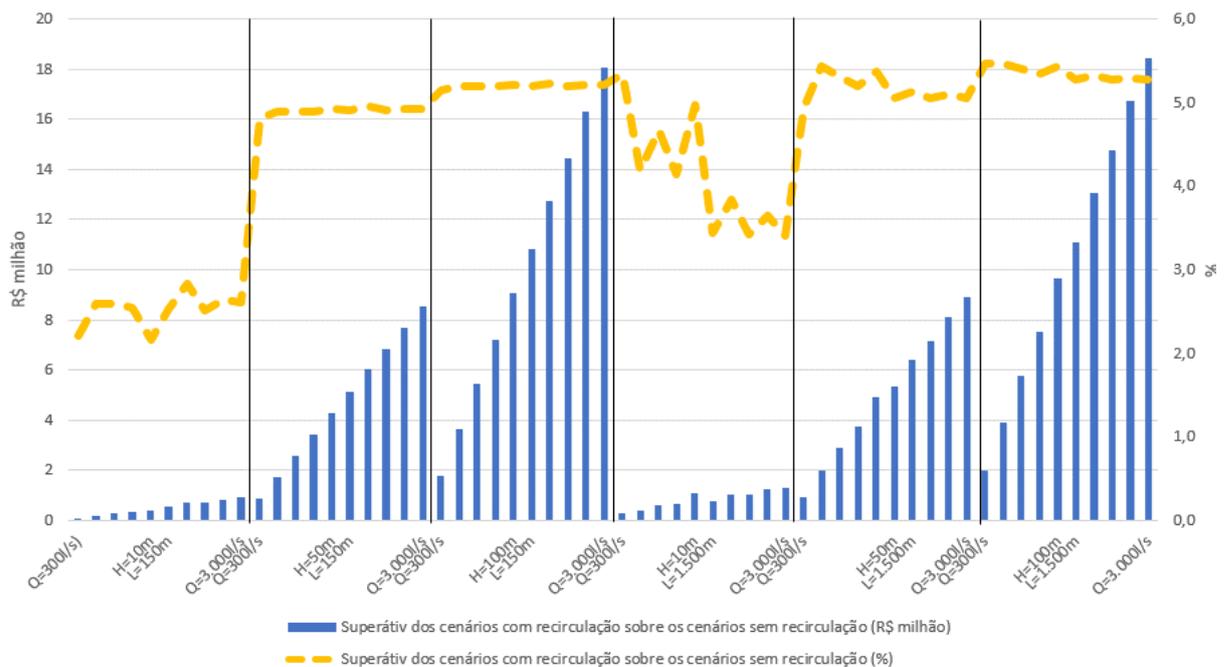


Fonte: Autor.

Os gráficos acima propiciam um bom panorama comparativo em relação aos 60 cenários com recirculação e os 60 cenários sem recirculação, variando em vazão da EBAB, altura geométrica da EBAB e extensão da captação da EBAB. Assim, verifica-se que a recirculação da água da lavagem dos filtros possui potencial para economia nos custos de captação.

Esta economia é representada pela diferença entre o VPL dos cenários com recirculação e sem recirculação, dada pelo superávit do VPL dos cenários com recirculação sobre os cenários sem recirculação (economia do cenário com recirculação em relação ao cenário sem recirculação). A Figura 33 apresenta o gráfico do superávit dos cenários com recirculação sobre os cenários sem recirculação.

Figura 33 – Superávit dos cenários com recirculação sobre os cenários sem recirculação.



Fonte: Autor.

Em continuidade, o Quadro 13 apresenta o resumo da diferença de VPL entre os cenários (superávit dos cenários com recirculação sobre os cenários sem recirculação) em valores absolutos [R\$ milhão], enquanto o Quadro 14 apresenta os mesmos valores, mas em percentual [%].

Quadro 13 – Superávit dos cenários com recirculação sobre os cenários sem recirculação em valores absolutos.

Variáveis	Média (R\$ 10 <sup>6</sup> )	Mínimo (R\$ 10 <sup>6</sup> )	Máximo (R\$ 10 <sup>6</sup> )	Desvio padrão (R\$ 10 <sup>6</sup> )
Q (L/s)				
300	1,0	0,1	2,0	0,8
600	2,0	1,6	3,9	1,6
900	2,9	2,3	5,8	2,3
1.200	3,8	3,1	7,5	3,1
1.500	4,9	3,9	9,7	3,9
1.800	5,6	4,6	11,1	4,6
2.100	6,7	5,4	13,1	5,4
2.400	7,5	6,2	14,8	6,2
2.700	8,5	6,9	16,7	6,9
3.000	9,4	7,7	18,4	7,7
H (m)				
10	0,7	0,1	1,3	0,4
50	4,9	0,8	8,9	2,6
100	10,1	1,8	18,4	5,4
L (m)				
150	5,0	0,1	18,1	5,2
1.500	5,4	0,3	18,4	5,2

Fonte: Autor.

Quadro 14 – Superávit dos cenários com recirculação sobre os cenários sem recirculação em valores percentuais.

Variáveis	Média (%)	Mínimo (%)	Máximo (%)	Desvio padrão (%)
Q (L/s)				
300	4,7	2,2	5,5	1,2
600	4,6	1,1	5,5	1,1
900	4,7	1,1	5,4	1,1
1.200	4,6	1,1	5,3	1,1
1.500	4,7	1,3	5,4	1,3
1.800	4,4	1,1	5,3	1,1
2.100	4,6	1,0	5,3	1,0
2.400	4,4	1,2	5,3	1,2
2.700	4,4	1,1	5,3	1,1
3.000	4,4	1,1	5,3	1,1
H (m)				
10	3,3	2,2	5,3	1,0
50	5,0	4,8	5,4	0,2
100	5,3	5,1	5,5	0,1
L (m)				
150	4,2	2,2	5,2	1,2
1.500	4,9	3,4	5,5	0,7

Fonte: Autor.

Analisando os Quadros 13 e 14, observa-se que embora a economia absoluta seja maior no teto da variável vazão (3.000 L/s), a economia relativa é maior nos dois maiores parâmetros da altura (50 e 100 m) e no teto da extensão (1.500 m).

### 6.2.2 Verificação do *payback* dos investimentos

Uma vez verificado o resultado positivo da realização da recirculação em comparação à não realização da recirculação e que a economia de energia elétrica demandada e consumida pela EBAB é superior aos investimentos necessários para implantação da recirculação na ETA e sua operação, é necessário verificar em quanto tempo estes investimentos se pagam. O *payback* foi testado para os cenários com e sem recirculação combinados, totalizando 60 testes. O Quadro 15 apresenta os principais parâmetros agregados por variável.

Quadro 15 – Resumo dos resultados da verificação do *payback*.

Variáveis	Média (anos)	Mínimo (anos)	Máximo (anos)	Desvio padrão (anos)
Q (L/s)				
300	9,3	2,0	33,0	12,1
600	5,5	5,6	16,0	5,6
900	4,3	4,1	12,0	4,1
1.200	3,7	3,6	10,0	3,6
1.500	3,3	3,4	10,0	3,4
1.800	3,3	2,9	8,0	2,9
2.100	3,0	2,4	7,0	2,4
2.400	3,0	2,4	7,0	2,4
2.700	3,2	12,3	33,0	12,3
3.000	5,0	5,7	16,0	5,7
H (m)				
10	8,7	4,0	33,0	6,5
50	2,2	1,0	4,0	0,7
100	1,3	1,0	2,0	0,5
L (m)				
150	5,0	1,0	33,0	6,5
1.500	3,1	1,0	11,0	2,4

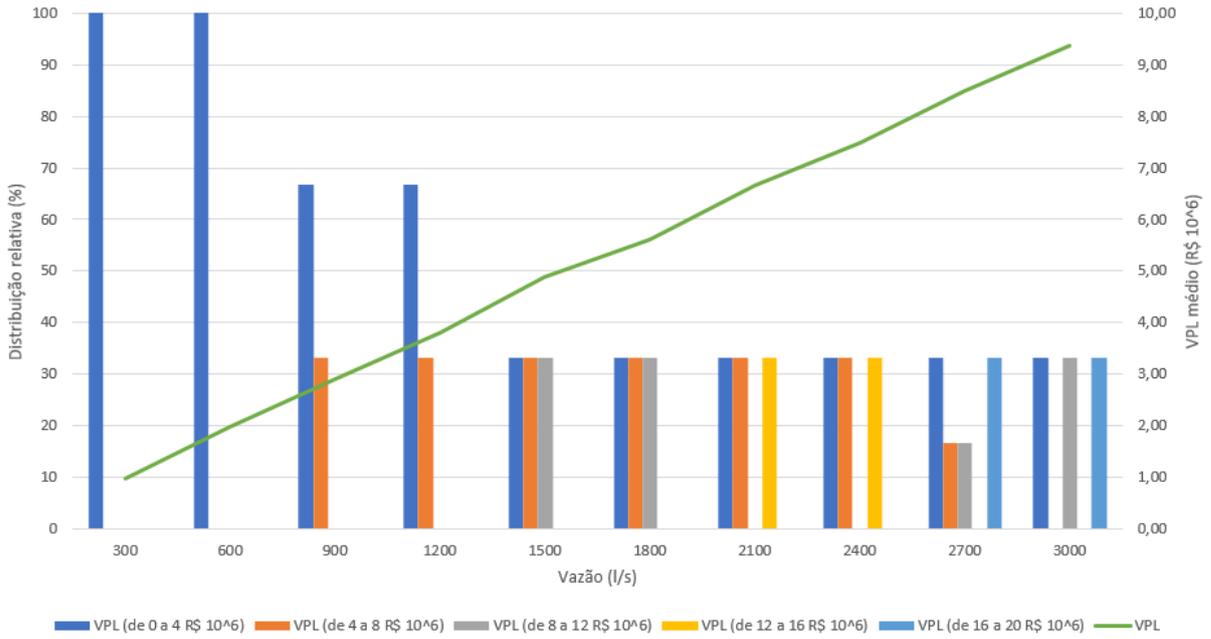
Fonte: Autor.

A partir dos dados, verifica-se que o *payback* é inferior a 10 anos na média de todos os cenários. A variável que melhor desempenhou no *payback* é a altura geométrica, especialmente no recorte de 50 ou 100 m. Ou seja, a economia nos custos com recalque de água cobre os custos com recirculação da ALF, além dos investimentos necessários para tal.

### 6.2.3 Verificação das variáveis

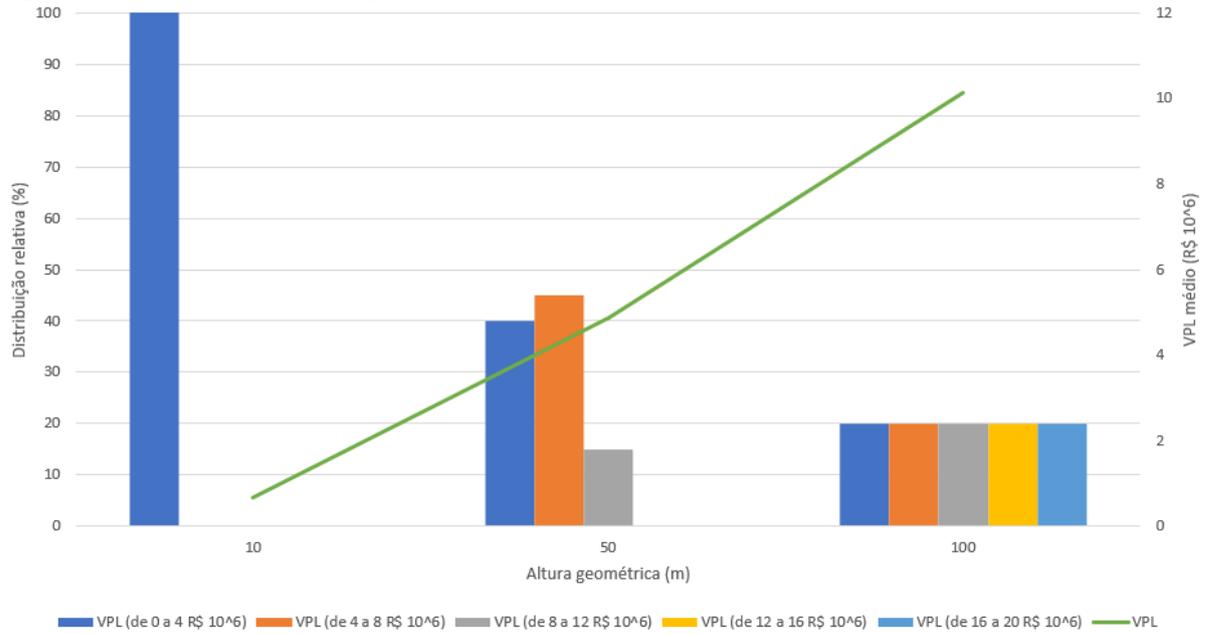
A distribuição do VPL para as variáveis vazão, altura e extensão estão presentes, respectivamente, da Figura 34 à Figura 36.

Figura 34 – Análise da distribuição do VPL para a variável vazão.



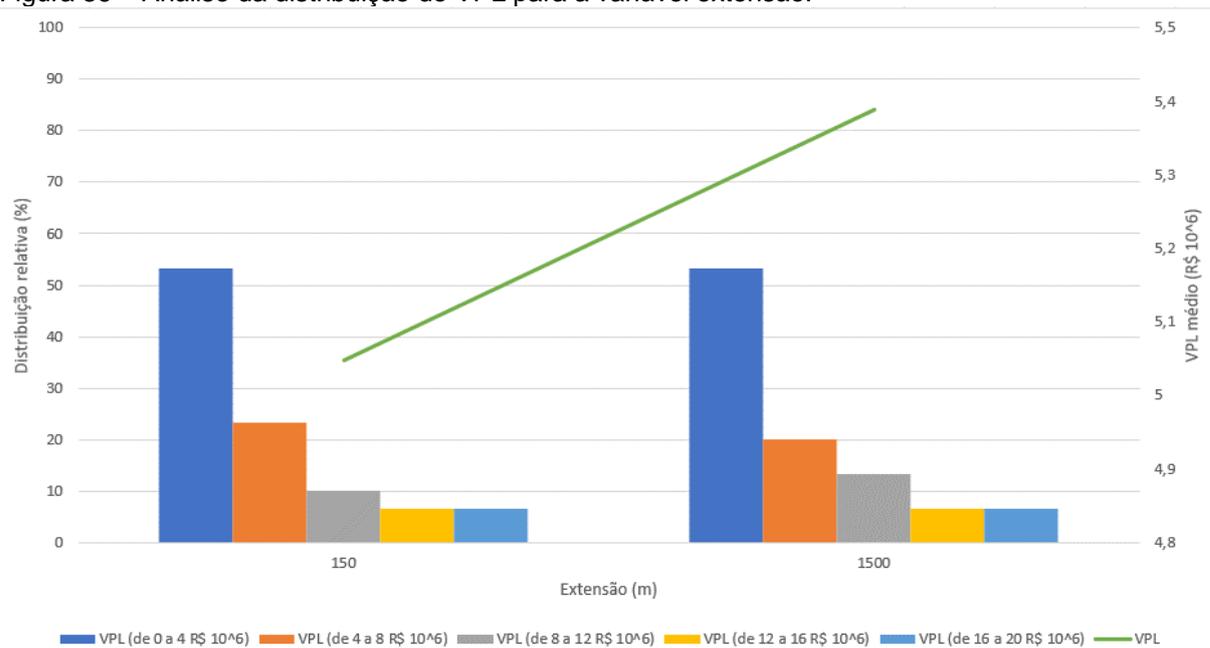
Fonte: Autor.

Figura 35 – Análise da distribuição do VPL para a variável altura.



Fonte: Autor.

Figura 36 – Análise da distribuição do VPL para a variável extensão.



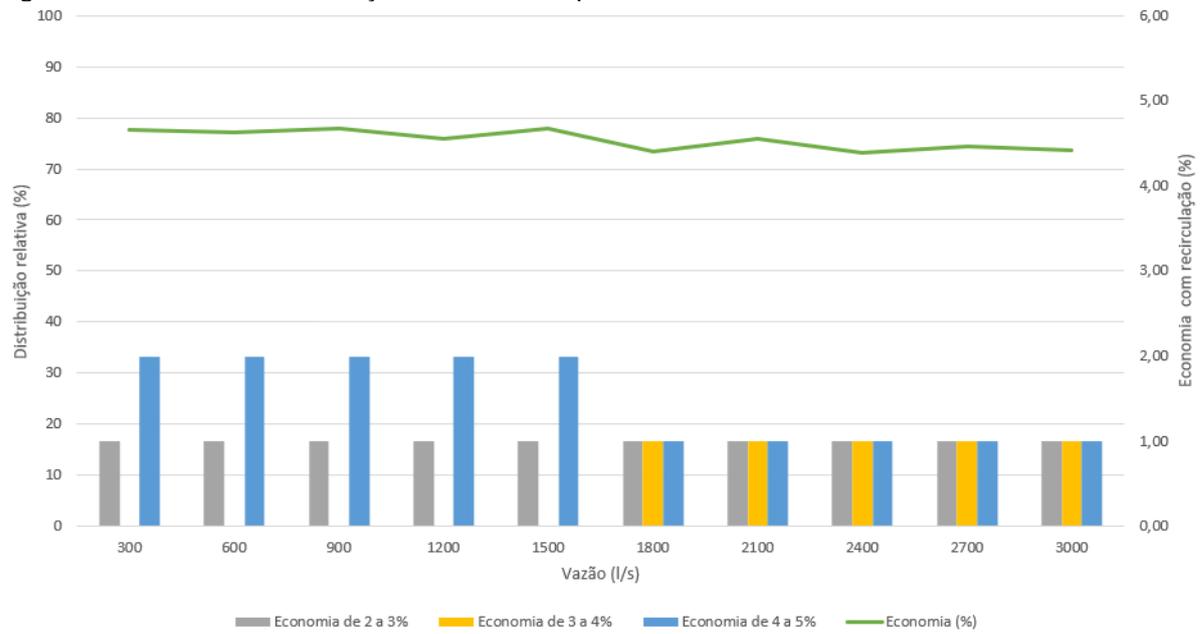
Fonte: Autor.

Os resultados mostram uma tendência linear com valor presente líquido médio menor na extremidade inicial (vazão de 300 L/s, altura de 10 m e extensão de 150 m) e maior na extremidade final (vazão de 3.000 L/s, altura de 10 m e extensão de 150 m) da faixa das variáveis, com concentração de VPL menores junto à extremidade inicial.

No que tange ao comportamento da distribuição, embora todas tenham concentrado a maior parte dos resultados na extremidade inicial, a única variável que apresentou um comportamento estável foi a extensão. Isto potencialmente poderia ser explicado pela posição das perdas de carga na equação da curva do sistema. O comportamento mais instável da variável vazão pode, possivelmente, ser explicado pela variação na velocidade a cada mudança de diâmetro causada pela variação da vazão, o que impacta na manometria e, conseqüentemente, nas potências consumida e instalada.

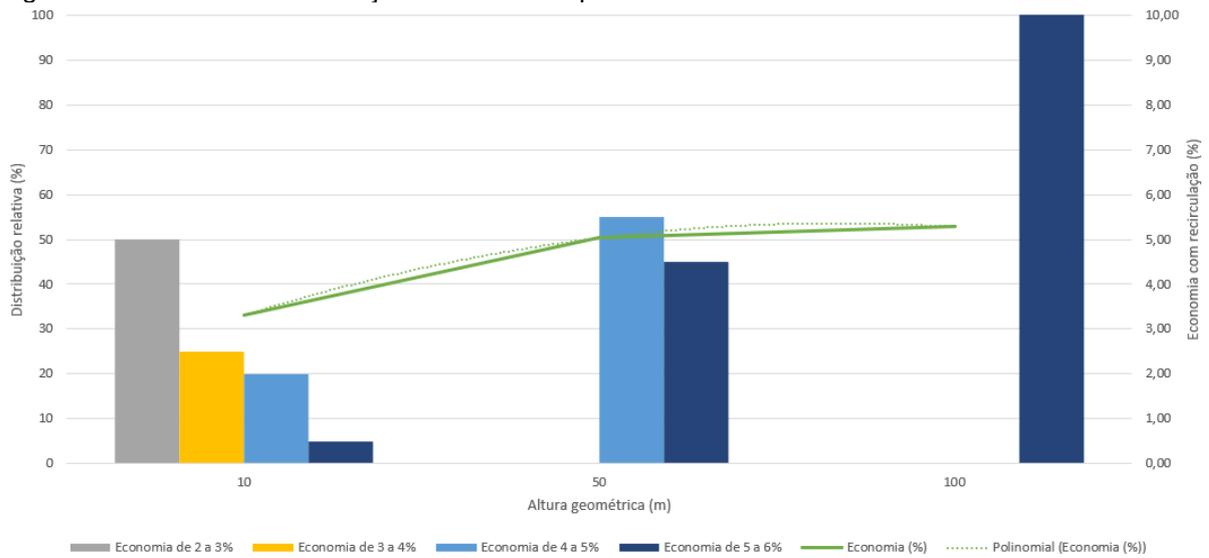
Já da Figura 37 à Figura 39, apresenta-se a distribuição da economia gerada pela recirculação (superávit dos cenários com recirculação em relação aos cenários sem recirculação), respectivamente, para as variáveis vazão, altura e extensão.

Figura 37 – Análise da distribuição da economia para a variável vazão.



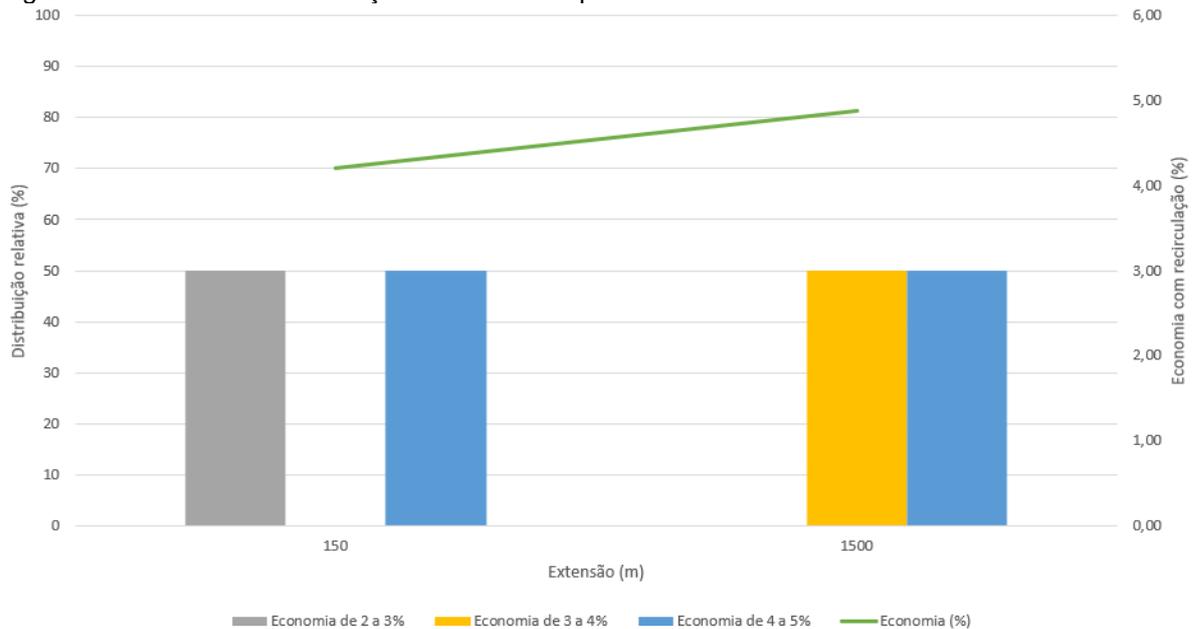
Fonte: Autor.

Figura 38 – Análise da distribuição da economia para a variável altura.



Fonte: Autor.

Figura 39 – Análise da distribuição da economia para a variável extensão.

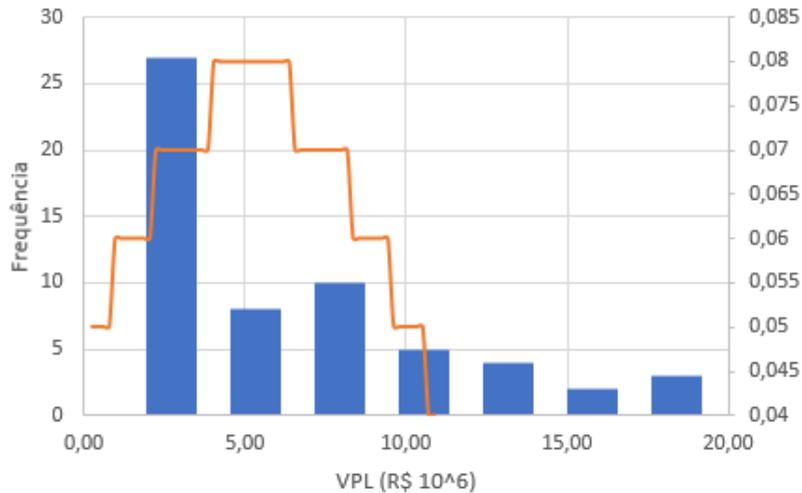


Fonte: Autor.

A partir da análise da economia com a recirculação (superávit dos cenários com recirculação em relação aos cenários sem recirculação), observa-se que a vazão varia de 4,66% de economia para vazões menores a 4,41% de economia para vazões maiores, uma diferença de 5,33% apenas entre a economia para diferentes vazões testadas. Já a variável altura apresenta variação de 3,31% de economia para alturas menores e de 5,28% de economia para alturas maiores, uma diferença de 20,44% entre a economia para as diferentes alturas testadas. No que tange à extensão, a economia variou de 4,21 a 4,88% entre as diferentes extensões testadas, uma variação de 10,17%. Logo, tem-se que os parâmetros que maior influenciam na economia são, respectivamente: (i) a altura; (ii) a extensão; e (iii) a vazão.

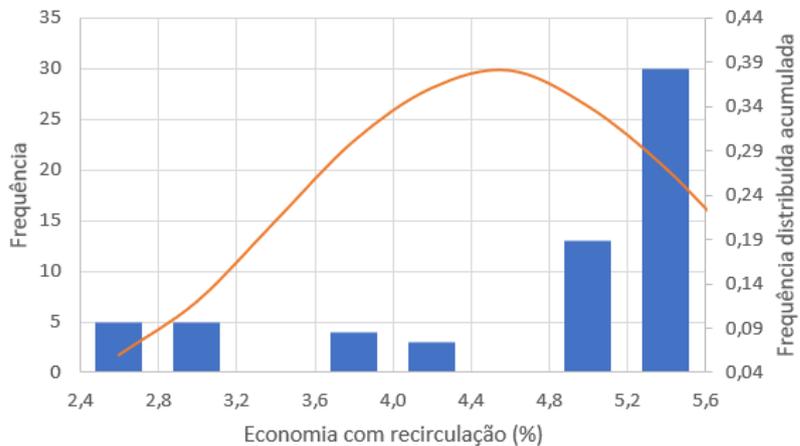
Também se verificou se o resultado da modelagem técnica para as três variáveis dependentes (vazão de recalque, altura geométrica da captação ao tratamento e extensão da captação ao tratamento) atende ao critério de distribuição normal, o que não se confirmou, conforme apresentado na Figura 40 para VPL e na Figura 41 para economia.

Figura 40 – Verificação do VPL para distribuição normal.



Fonte: Autor.

Figura 41 – Verificação da economia com recirculação para distribuição normal.



Fonte: Autor.

Desta forma, não é possível adotar modelos de regressão multivariável para as três variáveis. Sendo assim, verificou-se a possibilidade de aplicar modelos de regressão combinando duas das três variáveis. A Tabela 18 apresenta os resultados da regressão para cada combinação de variáveis: (i) vazão e altura; (ii) vazão e extensão; e (iii) altura e extensão. Adotou-se significância de 95%, considerando-se aplicável aqueles cujo teste ANOVA apresentem significância F inferior a 0,05 e Teste T com significância P inferiores a 0,05.

Tabela 18 – Modelos de regressão para conjuntos de duas variáveis.

-	Vazão (Q) e altura (H)	Vazão (Q) e extensão (L)	Altura (H) e extensão (L)
<b>Estadística de regressão</b>			
R múltiplo	0,68	0,33	0,75
R-Quadrado	0,46	0,11	0,56
R-quadrado ajustado	0,44	0,08	0,54
Erro padrão	0,78	1,00	0,70
Observações	60,00	60,00	60,00
<b>ANOVA</b>			
F de significação	0,00	0,03	0,00
<b>T Test</b>			
Interseção	0,00	0,00	0,00
Q	0,00	0,50	0,00
H	0,00	0,01	0,00
<b>Coefficientes</b>			
Interseção	4,2996	3,8813	3,3059
Q	-0,0001	-0,0001	0,0118
H	0,0005	0,0118	0,0005

Fonte: Autor.

Desta forma, pode-se verificar que as combinações de vazão e altura e de altura e extensão atendem às condições de T Test e de Anova inferiores a 0,05. No entanto, ambas apresentam coeficiente de correlação ( $R^2$  ajustado) abaixo de 0,9.

Logo, considerando que a economia com recirculação é aquela que tem variação mais representativa pela altura (20,44%) do que pela extensão (10,17%) e vazão (5,33%), adota-se modelo de regressão para a variável altura. A Tabela 19 apresenta os resultados da regressão para diferentes equacionamentos.

Tabela 19 – Modelos de regressão para altura.

-	Equação	$R^2$
Exponencial	$y = 2,7914e^{0,2329x}$	0,7902
Linear	$y = 0,9827x + 2,5756$	0,8419
Logarítmica	$y = 1,8636\ln(x) + 3,4279$	0,9344
Polinomial (ordem 2)	$y = -0,7377x^2 + 3,9334x + 0,1167$	1,0000
Potencial	$y = 3,413x^{0,4433}$	0,8983

Fonte: Autor.

Adotando-se o modelo de regressão de maior precisão, cujo coeficiente de correlação  $R^2$  é de 1,00, tem-se que a economia dos sistemas de recirculação em relação aos sistemas sem recirculação pode ser representada pela Equação X:

$$E = -0,7377 * H^2 + 3,9334 * H + 0,1167 \quad (13)$$

Onde E é a economia com recirculação [%] e H é a altura geométrica da captação ao tratamento [m].

### 6.3 VERIFICAÇÃO DAS HIPÓTESES

Das três hipóteses admitidas na presente pesquisa, duas tiveram H0 confirmados e a outra não. As duas hipóteses confirmadas consistem na não interferência da recirculação da ALF na qualidade da água tratada e no benefício econômico da recirculação da barrela. Já a hipótese que não teve H0 confirmada foi a de que os resultados da modelagem técnico-econômica poderiam ser representados por modelo de regressão de três variáveis. Neste caso, foi aceita a hipótese H1, em que a modelagem técnico-econômica foi representada por modelo de regressão de uma variável.

## 7 CONCLUSÃO

A gestão da água de lavagem dos filtros é um desafio, especialmente no Brasil, onde a grande maioria dos SAA lançam seus resíduos sem tratamento em corpos hídricos, o que pode configurar crime ambiental. Inclusive, das cinco ETA de Porto Alegre objeto do presente estudo, duas delas lançam seus resíduos diretamente no Lago Guaíba. O tratamento e a destinação dos resíduos gerados em estações de tratamento de água são caracterizados pelo alto custo. Desta forma, a recirculação da água de lavagem dos filtros se apresenta como uma alternativa ambientalmente adequada.

No entanto, ao recircular a água da lavagem dos filtros corre-se o risco de retornar à cabeceira da planta materiais retidos nos filtros. Logo, infere-se que a viabilidade da recirculação da água de lavagem dos filtros está condicionada à garantia do controle da qualidade da água. Os contaminantes passíveis de recirculação que demandam maior atenção são *Giardia* spp. e *Cryptosporidium* spp., que, quando em forma, respectivamente, de cistos e oocistos, apresentam grande resistência à cloração, sendo retidos nas ETA de ciclo completo apenas nos decantadores e nos filtros. Uma peculiaridade sobre estes microrganismos é o alto custo das análises para sua detecção ou qualificação, sendo monitorados indiretamente através de analitos indicadores de menor custo, como a turbidez e a *Escherichia coli*.

Além do risco em potencial de reintroduzir na cabeceira da planta patógenos anteriormente retidos nos filtros, outras características da recirculação da ALF são a possível redução nos custos operacionais, especialmente nos casos em que se demanda recalque entre a captação e a ETA; a recirculação de produtos químicos retidos nos filtros, o que pode ser benéfico, reduzindo a demanda pelos mesmos, ou não, ao desajustar as dosagens de aplicação destes insumos; e a redução das perdas hídricas no processo de tratamento.

O objetivo geral desta dissertação foi analisar as vantagens e as desvantagens da recirculação da água de lavagem dos filtros em estações de tratamento de água de ciclo completo, o que foi atingido. São pontos positivos: (i) o fim da destinação inadequada ou redução dos custos com tratamento e destinação adequados; (ii) a redução das perdas e conseqüentemente do volume de água bruta captada; (iii) a

redução dos custos com energia elétrica, nos casos em que há recalque de água bruta; e (iv) a potencial redução na demanda de coagulantes, alcalinizantes e oxidantes. Já entre os pontos negativos, identifica-se: (i) possibilidade de recirculação de contaminantes; (ii) possibilidade de desregulação na dosagem de coagulante; e (iii) aumento dos custos com energia elétrica, nos casos em que não há recalque de água bruta.

Quanto aos objetivos específicos, estes contemplam: (i) a avaliação do impacto da recirculação da água de lavagem dos filtros na qualidade da água tratada e nos custos com energia elétrica; (ii) a identificação dos aspectos técnicos mais influentes na viabilidade técnico-econômica; (iii) a modelagem dos custos estimados associados à recirculação da barrela à cabeceira da planta; e (iv) a proposição de ferramenta para análise da viabilidade econômica da recirculação da água de lavagem dos filtros.

No que tange a avaliação, verificou-se que, para as cinco ETA objeto de estudo, não foi detectado impacto da recirculação na qualidade da água. Pelo contrário, o tratamento nas três ETA com recirculação se mostrou mais eficiente do que nas duas ETA sem recirculação. A eficiência na remoção de *Escherichia coli* foi mais eficiente nas ETA com recirculação, com eficiência de remoção de 99% contra 91% de eficiência na remoção nas ETA sem recirculação.

Já a turbidez média nas ETA com recirculação foi reduzida de 23,78  $\mu\text{T}$  na água bruta para 0,21  $\mu\text{T}$  na água tratada, enquanto nas ETA sem recirculação foi reduzida de 28,91  $\mu\text{T}$  para 0,28  $\mu\text{T}$ . Em ambos os casos, uma redução superior a 99%. A turbidez, eliminando-se *outliers*, apresentou-se entre 0,51 e 67,50  $\mu\text{T}$  com desvio padrão de 15,88  $\mu\text{T}$  nas ETA com recirculação e 0,78 e 90,00  $\mu\text{T}$  com desvio padrão de 49,79  $\mu\text{T}$  nas ETA sem recirculação, logo, compatível com a turbidez encontrada na literatura técnica para barrela, de 35,00  $\mu\text{T}$ .

Foram identificados, para cenário padrão analisado, concepção predominante dos SAA brasileiros com captação em manancial superficial com recalque de água bruta até a ETA, que os aspectos técnicos de maior influência na viabilidade técnico-econômica são: a vazão de captação, a altura geométrica entre a captação e o tratamento e a extensão da linha de recalque entre a captação e o tratamento. Assim, definiu-se a testagem de diferentes faixas de vazão (de 300 a 3.000 L/s), de

altura (de 10 a 150 m) e de extensão (de 150 a 1.500 m), totalizando 120 cenários a serem modelados, sendo 60 com recirculação e 60 sem recirculação.

Os custos foram modelados, sendo verificado que a recirculação da barreira tem potencial para economia (superávit de cenários com recirculação em relação a cenários sem recirculação) de 4,41 a 4,66% para os diferentes cenários de vazão, 3,31 a 5,28% para os diferentes cenários de altura e de 4,21 a 4,88% para os diferentes cenários de extensão. A economia em valor presente líquido ao longo dos 35 anos da modelagem variou de 19,3 a 132,2 milhões de reais e o *payback* médio variou de 1,3 a 9,3 anos.

Verificou-se que a altura foi a variável de maior relevância na modelagem técnico-econômica e foi desenvolvida ferramenta para análise da viabilidade técnico-econômica a partir de modelo de regressão, dado pela Equação 14:

$$E = -0,7377 * H^2 + 3,9334 * H + 0,1167 \quad (14)$$

Onde E é a economia com recirculação [%] e H é a altura geométrica da captação ao tratamento [m].

Desta forma, foi possível concluir que:

- a) A recirculação da água de lavagem dos filtros não se mostrou fator determinante na qualidade da água tratada para as cinco estações de tratamento de água objeto de estudo;
- b) A turbidez média da barreira apontada pela literatura não destoa dos valores médios da turbidez da água bruta;
- c) A altura geométrica entre a captação e o tratamento, a extensão da linha de recalque e a vazão de captação, ordenadamente, são os parâmetros significativos na modelagem econômica da recirculação da ALF, sendo a altura geométrica o fator de maior significância;
- d) A redução dos custos com energia elétrica na captação com a redução da vazão captada é superior à soma dos custos com energia elétrica na recirculação da barreira e os investimentos em obra necessários para tal;
- e) Os resultados econômicos positivos da recirculação da barreira são potencializados quanto maior for a vazão, a altura geométrica ou a extensão do recalque, sendo mais significativa para a altura geométrica.

## 8 CONTINUIDADE DA ARTE

A partir desta dissertação e de suas conclusões, sugere-se alguns tópicos para desenvolvimento do tema:

- a) Prosseguir às investigações sobre o impacto da recirculação da água de lavagem dos filtros na qualidade da água tratada em outros sistemas;
- b) Testar os modelos desenvolvidos em sistemas reais;
- c) Calibrar os modelos desenvolvidos, incorporando os produtos químicos, sob a hipótese de que a recirculação deles poderia resultar em redução das dosagens;
- d) Verificar se a economia possui potencial para custear técnicas de pré-tratamento da ALF;
- e) Investigar a presença de cistos de *Giardia* spp. e oocistos de *Cryptosporidium* spp. na água de lavagem dos filtros e na água bruta.

## REFERÊNCIAS

- ACQUOLINI, G. T. **Caracterização do lodo de estações de tratamento de água de Porto Alegre/RS**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUA E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Atlas das águas: segurança hídrica no abastecimento urbano**. Brasília: 2021.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUA E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento. **Atlas das águas: mananciais e sistemas**. Brasília, DF: 2023. Disponível em: <https://portal1.snirh.gov.br/ana/apps/webappviewer/index.html?id=9533a92615b84880b6a7263b6568708b/>. Acesso em: 12 set. 2022.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Tarifação. **Ranking das tarifas**. Brasília, DF: 2023. Disponível em: <https://portalrelatorios.aneel.gov.br/luznatarifa/rankingtarifas#>. Acesso em: 12 set. 2023.
- AGUIRRE, G. H. **Investigação da ocorrência de Cryptosporidium e Giardia em água de lavagem de filtro de estações de tratamento de água de Campinas, São Paulo**. Monografia (Iniciação Científica) – Faculdade de Tecnologia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.
- ANDREOLI, F. C. SABOGAL-PAZ, L. P. Coagulation, Flocculation, Dissolved Air Flotation and Filtration in the Removal of *Giardia* ssp. and *Cryptosporidium* spp. from Water Supply. **Environmental Technology**, v. 40, n. 5, p. 654-663, 15 nov. 2017.
- ANJOS JÚNIOR, A. H. **Gestão estratégica do saneamento**. 1. ed. São Paulo: Manole, 2011.
- AROTA, H. GIOVANNI, G. LECHEVALLIER, M. Spent filter backwash water contaminants and treatment strategies. **Journal AWWA**, v. 93, n. 5, p. 100-112, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12.211: Estudos de concepção de sistemas públicos de abastecimento – procedimento**. Rio de Janeiro, RJ: 1992A.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12.216:** Projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público – procedimento. Rio de Janeiro, RJ: 1992B.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10.004:** Resíduos sólidos – classificação. Rio de Janeiro, RJ: 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12.215-1:** Projeto de adutora de água – parte 1: conduto forçado. Rio de Janeiro, RJ: 2017.

AZEVEDO NETTO, J. M. **Manual de hidráulica**. 9. ed. São Paulo: Blucher, 2018.

AZEVEDO NETTO, J. M. RICHTER, C. A. **Tratamento de água:** tecnologia atualizada. 1. ed. São Paulo: Blucher, 1991.

BANCO CENTRAL DO BRASIL (BCB). Política monetária. **Metas para inflação**. Brasília, DF: 2023. Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/inflacao/indicepreco>. Acesso em 10 ago. 2023.

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL (BNDES). Financiamento. **Taxa de longo prazo**. São Paulo, SP: 2023. Disponível em: <https://www.bndes.gov.br/wps/portaL/site/home/financiamento/guia/custos-financeiros/tlp-taxa-de-longo-prazo>. Acesso em 10 out. 2023.

BASTOS, R. K. X. BEZERRA, N. R. BEVILACQUA, P. D. Planos de segurança da água: novos paradigmas em controle de qualidade da água para consumo humano em nítida consonância com a legislação brasileira. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 24, 2007, Belo Horizonte. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2007.

BERINO, E. C. S. **Ocorrência e detecção de *Cryptosporidium* sp. e *Giardia* sp. em águas brutas de abastecimento de formadores do Lago Guaíba**. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004.

BORDEAUX-RÊGO, R. *et al.* **Viabilidade econômico-financeira de projetos**. 4 ed. Rio de Janeiro: FGV, 2013. 151 p.

BRASIL. **Lei Federal nº 6.938, de 31 de agosto de 1981**. Estabelece a Política Nacional de Meio Ambiente (...). Brasília, DF: Presidência da República, 1981. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/l6938.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6938.htm). Acesso em 12 set. 2018.

BRASIL. Conselho Nacional de Meio Ambiente. **Resolução nº 237, de 19 de dezembro de 1997**. Dispõe sobre a revisão e complementação dos procedimentos e critérios utilizados para o licenciamento ambiental. Brasília, DF: CONAMA, 1997. Disponível em: [http://conama.mma.gov.br/?option=com\\_sisconama&task&id=237](http://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task&id=237). Acesso em 12 set. 2021.

BRASIL. **Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998**. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, 1998. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/l9605.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9605.htm). Acesso em: 12 set. 2022.

BRASIL. Conselho Nacional de Meio Ambiente. **Resolução nº 357, de 17 de março de 2005**. Brasília, DF: CONAMA, 2005. Disponível em: [https://www.icmbio.gov.br/cepsul/images/stories/legislacao/Resolucao/2005/res\\_conama\\_357\\_2005\\_classificacao\\_corpos\\_agua\\_rtfcdaltrd\\_res\\_393\\_2007\\_397\\_2008\\_410\\_2009\\_430\\_2011.pdf](https://www.icmbio.gov.br/cepsul/images/stories/legislacao/Resolucao/2005/res_conama_357_2005_classificacao_corpos_agua_rtfcdaltrd_res_393_2007_397_2008_410_2009_430_2011.pdf). Acesso em 12 set. 2022.

BRASIL. Ministério das Saúde. **Doenças infecciosas e parasitárias: guia de bolso**. 6. ed. Brasília: Ministério da Saúde, 2005.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (...). Brasília, DF: Presidência da República, 2010. Disponível em: [http://planalto.gov.br/ccivil\\_03/ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm](http://planalto.gov.br/ccivil_03/ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm). Acesso em: 12 set. 2022.

BRASIL. Conselho Nacional de Meio Ambiente. **Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011**. Brasília, DF: CONAMA, 2011. Disponível em: <https://www.ibama.gov.br/component/legislacao/?view=legislacao&legislacao=1583>. Acesso em 12 set. 2022.

BRASIL. **Lei nº 14.026, de 16 de julho de 2020**. Atualiza o Marco Legal do Saneamento Básico (...). Brasília, DF: Presidência da República, 2020. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/ato2019-2022/2020/lei/l14026.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2019-2022/2020/lei/l14026.htm). Acesso em: 12 set. 2022.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria nº 888, de 4 de maio de 2021**. Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação nº 5/GM/MS, 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. Brasília, DF: Ministério da Saúde, 2021. Disponível em: [https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2021/prt0888\\_24\\_05\\_2021\\_rep.html](https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2021/prt0888_24_05_2021_rep.html). Acesso em: 10 out. 2023.

CAMPOS, M. C. D. **Influência da recirculação de água de lavagem de filtros na qualidade da água para consumo humano**. Dissertação (Mestrado em Sustentabilidade) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2014.

CERTAD, G. VISCOGLIOSI, E. CHABÉ, M. CACCIÒ, S. M. Pathogenic mechanisms of *Cryptosporidium* and *Giardia*. **Trends in Parasitology**, v. 33, n. 7, p. 561-576, Maryland, 2007.

COMPANHIA ESTADUAL DE ENERGIA ELÉTRICA (CEEE). **Tabela de tarifas**. Porto Alegre, RS: 2023. Disponível em: <https://ceee.equatorialenergia.com.br/tarifas-e-custos>. Acesso em 10 out. 2023.

COMPANHIA RIOGRANDENSE DE SANEAMENTO (CORSAN). **Editais e licitações**. Porto Alegre, RS: 2023. Disponível em: <https://editais.corsan.com.br/>. Acesso em 5 set. 2023.

DEPARTAMENTO MUNICIPAL DE ÁGUAS E ESGOTOS DE PORTO ALEGRE (DMAE/POA). Acervo interno. **Mapoteca: dados de análises da qualidade da água de 2019 a 2022 e projetos executivos das EBAB e ETA**. Porto Alegre, RS: 2023.

DI BERNARDO, L. DANTAS, A.D. VOLTAN, P. N. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. 3. ed. São Carlos: LDiBe. 2017.

DI BERNARDO, L. SABOGAL-PAZ, L. P. **Seleção de tecnologias de tratamento de água**. São Paulo: LDiBe, 2008.

EFSTRATIOU, A. ONGERHT, J. E. KARANIS, P. Waterborne transmission of protozoan parasites: review of worldwide outbreaks. **Water Research**, v. 114, p. 14-22, 2017.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY OF UNITED STATES OF AMERICA (EPA). **The surface water treatment rule**. Washington, DC: EPA, 1989.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY OF UNITED STATES OF AMERICA (EPA). **Filtration, disinfection, turbidity, *Giardia lamblia*, viruses, legionella, and heterotrophic bacteria.** Washington, DC: EPA, 1999.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY OF UNITED STATES OF AMERICA (EPA). **Filter backwash recycling rule: technical guidance manual.** Washington, DC: EPA, 2002.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY OF UNITED STATES OF AMERICA (EPA). **Method 1623: *Cryptosporidium* and *Giardia* in Water by Filtration.** Washington, DC: EPA, 2005.

ESCOLA NACIONAL DE ADMINISTRAÇÃO PÚBLICA (ENAP). **Programa de avaliação socioeconômica de projetos.** Brasília, 2015.

FRANCO, R. M. B. *et al.* Avaliação da performance de metodologias de detecção de *Cryptosporidium* ssp. e *Giardia* spp. em água destinada ao consumo humano para atendimento às demandas da Vigilância em Saúde Ambiental no Brasil. **Epidemiologia e Serviços de Saúde**, v. 21, n. 2, p. 233-242, 2012.

FREITAS, D. G. *et al.* Efeitos da recirculação da água de lavagem de filtros na qualidade da água produzida. In: FENASAN, 28, 2017, São Paulo. **Anais [...].** Porto Alegre: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2017.

FROTA, T. B. **Análise da viabilidade técnica-financeira de alternativas de processos para desidratação de lodos de estações de tratamento de água.** Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL (FEPAM). **Licença de Operação e Regularização nº 3.122, de 9 de setembro de 2022.** Sistema de abastecimento de água de Porto Alegre. Porto Alegre, RS: FEPAM, 2022. Disponível em: [http://ww2.fepam.rs.gov.br/doclics/signed/2022/1282418\\_signed.pdf](http://ww2.fepam.rs.gov.br/doclics/signed/2022/1282418_signed.pdf). Acesso em 12 set. 2022.

FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS (FGV). Portal da inflação. **Indicadores econômicos.** Rio de Janeiro, RJ: 2023A. Disponível em: <https://portal-da-inflacao-ibre.fgv.br/#!/nucleo>. Acesso em 10 abr. 2023.

FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS (FGV). Portal da inflação. **Indicadores econômicos**. Rio de Janeiro, RJ: 2023B. Disponível em: <https://extra-ibre.fgv.br/IBRE/sitefgvdados/Naoidentificado.aspx>. Acesso em 10 abr. 2023.

FUNDAÇÃO OSWALDO CRUZ (FIOCRUZ). Observatório de Política e Gestão Hospitalar. **Dados e Indicadores**. Rio de Janeiro, RJ: 2023. Disponível em: [http://tabnet.fiocruz.br/dhx.exe?observatorio/fat\\_indicadores.def](http://tabnet.fiocruz.br/dhx.exe?observatorio/fat_indicadores.def). Acesso em: 12 ago. 2023.

GOMES, H.P. **Sistemas de bombeamento: eficiência energética**. 2. ed. João Pessoa: LENHS UFPB, 2021. 459 p.

GUERRA, R. C. ANGELIS, D. F. D. Classificação e biodegradação de lodo de estações de tratamento de água para descarte em aterro sanitário. **Engvista**, p. 5, 2005.

HELLER, L. Tratamento de águas de abastecimento e remoção de (oo)cistos de *Giardia* e *Cryptosporidium*. In: Seminário sobre novas tendências no tratamento e na qualidade da água para consumo humano. 2004. Belo Horizonte. **Anais [...]**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2004.

HELLER, L. PÁDUA, V. L. **Abastecimento de água para consumo humano**. 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2016. 870 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Indicadores sociodemográficos e de saúde no Brasil**: 2009. 25. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2009.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Pesquisa nacional de saneamento básico**: tabelas (2017). Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/estatisticas/multidominio/meio-ambiente/9073-pesquisa-nacional-de-saneamento-basico.html?=&t=resultados>. Acesso em 12 set. 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Atlas de saneamento: abastecimento de água e esgotamento sanitário**. 3. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Inflação**. Rio de Janeiro, RJ: 2023A. <https://www.ibge.gov.br/explica/inflacao.php#:~:text=Infla%C3%A7%C3%A3o%20%C3%A9%20o%20nome%20dado,governo%20fePC>.

Acesso em 10 abr. 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **SIDRA. Economia**. Rio de Janeiro, RJ. 2023B. <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pnadca/tabelas>. Acesso em 10 abr. 2023.

KARANIS, P. KOURENTI, C. SMITH, H. Waterborne transmission of protozoan parasites: a worldwide review of outbreaks and lessons learnt. **Journal of Water & Health**, v.5, p. 1-38, 2007.

LECHEVALIER, M. *et al.* Treatment options for *Giardia*, *Cryptosporidium*, and Other Contaminants in Recycled Backwash Water. **American Water Works Research Foundation**, v. 8, n. 15, p. 208-220, Denver, 2001.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. 4. ed. Campinas: Átomo, 2016.

MACINTYRE, A. J. **Bombas e instalações de bombeamento**. 3 ed. São Carlos: LTC, 2010.

MCGUIRE, M. J. **Issue paper on waste stream recycle and filter to waste in water treatment plants**. AWWA. 1997.

METCALF, L; EDDY H. **Tratamento de efluentes e recuperação de recursos**. Tradução: José Carlos Mierzwa, Ivanildo Hespanhol. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2016.

MEYER, Sheila T. O uso de cloro na desinfecção de águas, a formação de trihalometanos e os riscos potenciais à saúde pública. **Cadernos de Saúde Pública**, v. 10, n. 1, p. 99-110, mar. 1994. FapUNIFESP (SciELO).

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE (OMS). **Manual de biossegurança laboratorial**. 3. ed. Genebra: OMS, 2004.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE (OMS). **Guidelines for drinking water quality**. 4. ed. Genebra: OMS, 2017.

PÁDUA, V.L. **Remoção de microrganismos emergentes e microcontaminantes orgânicos no tratamento de água para consumo humano**. Rio de Janeiro: ABES, 2009. PROSAB. 392 p.

PANKIVSKYI, Y. I. OSHURELEVYCH-PANKIVSKA, O. Y. **Water supply and sewerage systems**. 1 ed. Auburndale, MA: Lenox Institute Press, 2023. <https://doi.org/10.17613/x5qn-d460>. Acesso em 04 set. 2023.

RAJ, C. B. C. KWONG, T. E. CHENG, W. W. FONG. L. M. TIONG. S. H. KLOSE. P. S. Wash water in waterworks: contaminants and process options for reclamation. **Journal of Environmental Sciences**, v. 20, n. November, p. 1300-1305, 2008.

RICHTER, C. A. **Tratamento de lodos de estações de tratamento de água**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2001.

RICHTER, C. A. **Água: métodos e tecnologia de tratamento**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2009. 352 p.

RIO GRANDE DO SUL. Comitê de Gerenciamento da Bacia Hidrográfica do Lago Guaíba. **Plano da Bacia Hidrográfica do Lago Guaíba: relatório executivo**. Porto Alegre, 2016.

RIO GRANDE DO SUL. Conselho Estadual do Meio Ambiente. **Resolução nº 372, de 22 de fevereiro de 2018**. Dispõe sobre os empreendimentos e atividades utilizadores de recursos ambientais (...). Porto Alegre, RS: CONSEMA, 2018A. Disponível em: <https://www.sema.rs.gov.br/upload/arquivos/202112/02170410-372-2018-atividades-licenciaveis-compilada.pdf>. Acesso em 12 set. 2022.

RIO GRANDE DO SUL. Centro Estadual de Vigilância em Saúde. Alerta epidemiológico. **Investigação de surto de toxoplasmose em Santa Maria/RS**. Porto Alegre, RS: CEVS, 2018B. Disponível em: <https://cevs.rs.gov.br/upload/arquivos/201805/09144313-0erta-toxoplasmose.pdf>. Acesso em 04 set. 2023.

RIO GRANDE DO SUL. Conselho Estadual do Meio Ambiente. **Resolução nº 461, de 19 de maio de 2022**. Define critérios e procedimentos para o uso de lodos gerados em estações de tratamento de água (LETAs) e seus produtos derivados em solos, e dá outras providências. Porto Alegre, RS: CONSEMA, 2022. Disponível em: <https://www.sema.rs.gov.br/upload/arquivos/202206/15142758-461-2022-letas-em-solo.pdf>. Acesso em 12 set. 2022.

SHAMMAS, N. WANG, L. K. **Water engineering: hydraulics, distribution and treatment**. 1. ed. New Jersey, NJ: John Wiley & Sons, 2016.

SILVA, C. A. *et al.* Classificação dos lodos formados durante o processo de coagulação/floculação da água com os coagulantes PAC e *Moringa Oleifera*. **Engevista**, v. 14, n. 3, 2012.

SOUZA FILHO, A. G. **Caracterização e clarificação por sedimentação da água de lavagem de filtros rápidos de estações de tratamento de água que utilizam cloreto férrico como coagulante primário**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciências da Engenharia Ambiental, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

TRAIN, R. E. **Quality criteria for water**. 2. ed. Michigan, MI: University of Michigan, 1986.

TSUTIYA, M. T. **Abastecimento de água**. 3. ed. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006. 643 p.

VESILIND, P. A. MORGAN, S. M. **Introdução à engenharia ambiental**. 2. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2011.

VIANNA, M. R. **Estações elevatórias de sistemas de abastecimento de água**. 1. ed. Belo Horizonte: Bloom, 2021. 239 p.

WOILER, S. MATIAS, W. F. **Projetos: planejamento, elaboração, análise**. 2 ed. São Paulo: Atlas, 2008. 304 p.

ZINI, L. B. Figueiredo, D. M. S. ROSA, J. A. R. BIASUS, L. LEMOS, A. A. ABREU, M. B. Investigação de surto de doença diarreica aguda no ano de 2016 em Bento Gonçalves: 5.863 casos notificados. **Boletim epidemiológico**. v. 19, n. 3, 2017.

ZINI, L. B. **Contribuições de avaliação de risco para a regulamentação na qualidade da água para consumo humano no Brasil.** Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Departamento de Engenharia Química, Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

### APÊNDICE A – Matriz de cenários.

Quadro 16 – Matriz de cenários.

Cenário	Recirculação	Vazão da EBAB (L/s)	Altura geométrica da EBAB (m)	Extensão da linha da EBAB (m)	Cenário	Recirculação	Altura geométrica da EBAB (m)	Extensão da linha da EBAB (m)	Vazão da EBAB (L/s)	Vazão de recirculação (L/s)
S-1	Não	300	10	150	C-1	Sim	10	150	284	33
S-2	Não	600	10	150	C-2	Sim	10	150	567	66
S-3	Não	900	10	150	C-3	Sim	10	150	851	99
S-4	Não	1.200	10	150	C-4	Sim	10	150	1.134	132
S-5	Não	1.500	10	150	C-5	Sim	10	150	1.418	165
S-6	Não	1.800	10	150	C-6	Sim	10	150	1.701	198
S-7	Não	2.100	10	150	C-7	Sim	10	150	1.985	231
S-8	Não	2.400	10	150	C-8	Sim	10	150	2.268	264
S-9	Não	2.700	10	150	C-9	Sim	10	150	2.552	297
S-10	Não	3.000	10	150	C-10	Sim	10	150	2.835	330
S-11	Não	300	50	150	C-11	Sim	50	150	284	33
S-12	Não	600	50	150	C-12	Sim	50	150	567	66
S-13	Não	900	50	150	C-13	Sim	50	150	851	99
S-14	Não	1.200	50	150	C-14	Sim	50	150	1.134	132
S-15	Não	1.500	50	150	C-15	Sim	50	150	1.418	165
S-16	Não	1.800	50	150	C-16	Sim	50	150	1.701	198
S-17	Não	2.100	50	150	C-17	Sim	50	150	1.985	231
S-18	Não	2.400	50	150	C-18	Sim	50	150	2.268	264
S-19	Não	2.700	50	150	C-19	Sim	50	150	2.552	297
S-20	Não	3.000	50	150	C-20	Sim	50	150	2.835	330
S-21	Não	300	100	150	C-21	Sim	100	150	284	33
S-22	Não	600	100	150	C-22	Sim	100	150	567	66

(continua)

Quadro 16 – Matriz de cenários.

(continuação)

Cenário	Recirculação	Vazão da EBAB (L/s)	Altura geométrica da EBAB (m)	Extensão da linha da EBAB (m)	Cenário	Recirculação	Altura geométrica da EBAB (m)	Extensão da linha da EBAB (m)	Vazão da EBAB (L/s)	Vazão de recirculação (L/s)
S-23	Não	900	100	150	C-23	Sim	100	150	851	99
S-24	Não	1.200	100	150	C-24	Sim	100	150	1.134	132
S-25	Não	1.500	100	150	C-25	Sim	100	150	1.418	165
S-27	Não	2.100	100	150	C-27	Sim	100	150	1.985	231
S-28	Não	2.400	100	150	C-28	Sim	100	150	2.268	264
S-29	Não	2.700	100	150	C-29	Sim	100	150	2.552	297
S-30	Não	3.000	100	150	C-30	Sim	100	150	2.835	330
S-31	Não	300	10	1.500	C-31	Sim	10	1.500	284	33
S-32	Não	600	10	1.500	C-32	Sim	10	1.500	567	66
S-33	Não	900	10	1.500	C-33	Sim	10	1.500	851	99
S-34	Não	1.200	10	1.500	C-34	Sim	10	1.500	1.134	132
S-35	Não	1.500	10	1.500	C-35	Sim	10	1.500	1.418	165
S-36	Não	1.800	10	1.500	C-36	Sim	10	1.500	1.701	198
S-37	Não	2.100	10	1.500	C-37	Sim	10	1.500	1.985	231
S-38	Não	2.400	10	1.500	C-38	Sim	10	1.500	2.268	264
S-39	Não	2.700	10	1.500	C-39	Sim	10	1.500	2.552	297
S-40	Não	3.000	10	1.500	C-40	Sim	10	1.500	2.835	330
S-41	Não	300	50	1.500	C-41	Sim	50	1.500	284	33
S-42	Não	600	50	1.500	C-42	Sim	50	1.500	567	66
S-43	Não	900	50	1.500	C-43	Sim	50	1.500	851	99
S-44	Não	1.200	50	1.500	C-44	Sim	50	1.500	1.134	132
S-45	Não	1.500	50	1.500	C-45	Sim	50	1.500	1.418	165
S-46	Não	1.800	50	1.500	C-46	Sim	50	1.500	1.701	198

(continua)

Quadro 16 – Matriz de cenários.

(continuação)

Cenário	Recirculação	Vazão da EBAB (L/s)	Altura geométrica da EBAB (m)	Extensão da linha da EBAB (m)	Cenário	Recirculação	Altura geométrica da EBAB (m)	Extensão da linha da EBAB (m)	Vazão da EBAB (L/s)	Vazão de recirculação (L/s)
S-47	Não	2.100	50	1.500	C-47	Sim	50	1.500	1.985	231
S-48	Não	2.400	50	1.500	C-48	Sim	50	1.500	2.268	264
S-49	Não	2.700	50	1.500	C-49	Sim	50	1.500	2.552	297
S-50	Não	3.000	50	1.500	C-50	Sim	50	1.500	2.835	330
S-51	Não	300	100	1.500	C-51	Sim	100	1.500	284	33
S-52	Não	600	100	1.500	C-52	Sim	100	1.500	567	66
S-53	Não	900	100	1.500	C-53	Sim	100	1.500	851	99
S-54	Não	1.200	100	1.500	C-54	Sim	100	1.500	1.134	132
S-55	Não	1.500	100	1.500	C-55	Sim	100	1.500	1.418	165
S-56	Não	1.800	100	1.500	C-56	Sim	100	1.500	1.701	198
S-57	Não	2.100	100	1.500	C-57	Sim	100	1.500	1.985	231
S-58	Não	2.400	100	1.500	C-58	Sim	100	1.500	2.268	264
S-59	Não	2.700	100	1.500	C-59	Sim	100	1.500	2.552	297
S-60	Não	3.000	100	1.500	C-60	Sim	100	1.500	2.835	330

Fonte: Autor.

## APÊNDICE B – Matriz de resultados da modelagem técnica.

Tabela 20 – Matriz de resultados da modelagem técnica.

Cenário	Vazão da EBAB (L/s)	Altura geométrica da EBAB (m)	Extensão da linha da EBAB (m)	Diâmetro da linha da EBAB (mm)	Altura manométrica (mca)	Potência instalada da EBAB (cv)	Demanda de energia da EBAB (kW)	Consumo diário de energia da EBAB (kWh/dia)	Vazão da recirculação (L/s)	Diâmetro da linha da recirculação (mm)	Altura manométrica (mca)	Potência instalada da recirculação (cv)	Demanda de energia da recirculação (kW)	Consumo diário médio de energia da recirculação (kWh/dia)
S-1	300	10	150	600	10,39	75	8,21	787,92	-	-	-	-	-	-
S-2	600	10	150	800	10,35	150	16,25	1.559,88	-	-	-	-	-	-
S-3	900	10	150	1.000	10,25	250	23,86	2.290,26	-	-	-	-	-	-
S-4	1.200	10	150	1.200	10,18	250	31,46	3.020,01	-	-	-	-	-	-
S-5	1.500	10	150	1.200	10,26	500	39,42	3.784,62	-	-	-	-	-	-
S-6	1.800	10	150	1.600	10,09	500	46,52	4.466,07	-	-	-	-	-	-
S-7	2.100	10	150	1.600	10,13	500	54,49	5.231,10	-	-	-	-	-	-
S-8	2.400	10	150	1.800	10,08	500	61,97	5.948,88	-	-	-	-	-	-
S-9	2.700	10	150	1.800	10,11	500	69,92	6.712,44	-	-	-	-	-	-
S-10	3.000	10	150	2.000	10,08	750	77,46	7.436,10	-	-	-	-	-	-
S-11	300	50	150	600	50,39	500	38,93	3.736,95	-	-	-	-	-	-
S-12	600	50	150	800	50,35	750	77,38	7.428,54	-	-	-	-	-	-
S-13	900	50	150	1.000	50,25	1.000	115,84	11.120,97	-	-	-	-	-	-
S-14	1.200	50	150	1.200	50,18	1.250	154,24	14.807,31	-	-	-	-	-	-
S-15	1.500	50	150	1.200	50,26	1.250	193,11	18.538,80	-	-	-	-	-	-
S-16	1.800	50	150	1.600	50,09	1.500	230,95	22.171,17	-	-	-	-	-	-
S-17	2.100	50	150	1.600	50,13	1.750	269,66	25.887,12	-	-	-	-	-	-

(continua)

Tabela 20 – Matriz de resultados da modelagem técnica.

(continuação)

Cenário	Vazão da EBAB (L/s)	Altura geométrica da EBAB (m)	Extensão da linha da EBAB (m)	Diâmetro da linha da EBAB (mm)	Altura manométrica (mca)	Potência instalada da EBAB (cv)	Demanda de energia da EBAB (kW)	Consumo diário de energia da EBAB (kWh/dia)	Vazão da recirculação (L/s)	Diâmetro da linha da recirculação (mm)	Altura manométrica (mca)	Potência instalada da recirculação (cv)	Demanda de energia da recirculação (kW)	Consumo diário médio de energia da recirculação (kWh/dia)
S-18	2.400	50	150	1.800	50,08	2.000	307,87	29.555,82	-	-	-	-	-	-
S-19	2.700	50	150	1.800	50,11	2.500	346,56	33.269,88	-	-	-	-	-	-
S-20	3.000	50	150	2.000	50,08	2.500	384,84	36.944,67	-	-	-	-	-	-
S-21	300	100	150	600	100,39	750	77,14	7.405,86	-	-	-	-	-	-
S-22	600	100	150	800	100,35	1.250	154,23	14.805,84	-	-	-	-	-	-
S-23	900	100	150	1.000	100,25	1.500	231,11	22.186,71	-	-	-	-	-	-
S-24	1.200	100	150	1.200	100,18	2.000	307,93	29.561,49	-	-	-	-	-	-
S-25	1.500	100	150	1.200	100,26	2.500	385,22	36.981,42	-	-	-	-	-	-
S-26	1.800	100	150	1.600	100,09	3.000	461,48	44.302,44	-	-	-	-	-	-
S-27	2.100	100	150	1.600	100,13	3.000	538,62	51.707,04	-	-	-	-	-	-
S-28	2.400	100	150	1.800	100,08	3.000	615,25	59.063,97	-	-	-	-	-	-
S-29	2.700	100	150	1.800	100,11	3.000	692,37	66.467,10	-	-	-	-	-	-
S-30	3.000	100	150	2.000	100,08	3.000	769,06	73.830,12	-	-	-	-	-	-
S-31	300	10	1.500	600	13,79	75	10,90	1.046,01	-	-	-	-	-	-
S-32	600	10	1.500	800	13,36	150	20,73	1.989,96	-	-	-	-	-	-
S-33	900	10	1.500	1.000	12,40	250	28,74	2.758,77	-	-	-	-	-	-
S-34	1.200	10	1.500	1.200	11,69	250	36,12	3.467,73	-	-	-	-	-	-
S-35	1.500	10	1.500	1.200	12,55	500	48,22	4.629,03	-	-	-	-	-	-

(continua)

Tabela 20 – Matriz de resultados da modelagem técnica.

(continuação)

Cenário	Vazão da EBAB (L/s)	Altura geométrica da EBAB (m)	Extensão da linha da EBAB (m)	Diâmetro da linha da EBAB (mm)	Altura manométrica (mca)	Potência instalada da EBAB (cv)	Demanda de energia da EBAB (kW)	Consumo diário de energia da EBAB (kWh/dia)	Vazão da recirculação (L/s)	Diâmetro da linha da recirculação (mm)	Altura manométrica (mca)	Potência instalada da recirculação (cv)	Demanda de energia da recirculação (kW)	Consumo diário médio de energia da recirculação (kWh/dia)
S-36	1.800	10	1.500	1.600	10,88	500	50,16	4.815,72	-	-	-	-	-	-
S-37	2.100	10	1.500	1.600	11,17	500	60,09	5.768,28	-	-	-	-	-	-
S-38	2.400	10	1.500	1.800	10,84	500	66,64	6.397,44	-	-	-	-	-	-
S-39	2.700	10	1.500	1.800	11,05	750	76,42	7.336,35	-	-	-	-	-	-
S-40	3.000	10	1.500	2.000	10,76	750	82,69	7.937,79	-	-	-	-	-	-
S-41	300	50	1.500	600	53,79	500	41,34	3.968,16	-	-	-	-	-	-
S-42	600	50	1.500	800	53,36	750	82,01	7.872,69	-	-	-	-	-	-
S-43	900	50	1.500	1.000	52,40	1.000	120,80	11.596,62	-	-	-	-	-	-
S-44	1.200	50	1.500	1.200	51,69	1.250	158,88	15.252,93	-	-	-	-	-	-
S-45	1.500	50	1.500	1.200	52,55	1.500	201,91	19.383,21	-	-	-	-	-	-
S-46	1.800	50	1.500	1.600	50,88	1.500	234,59	22.520,82	-	-	-	-	-	-
S-47	2.100	50	1.500	1.600	51,17	1.750	275,25	26.424,09	-	-	-	-	-	-
S-48	2.400	50	1.500	1.800	50,84	2.000	312,54	30.004,17	-	-	-	-	-	-
S-49	2.700	50	1.500	1.800	51,05	2.500	353,06	33.894,21	-	-	-	-	-	-
S-50	3.000	50	1.500	2.000	50,76	2.500	390,07	37.446,36	-	-	-	-	-	-
S-51	300	100	1.500	600	103,79	750	79,76	7.656,81	-	-	-	-	-	-
S-52	600	100	1.500	800	103,36	1.250	158,85	15.249,78	-	-	-	-	-	-
S-53	900	100	1.500	1.000	102,40	1.500	236,07	22.662,36	-	-	-	-	-	-

(continua)

Tabela 20 – Matriz de resultados da modelagem técnica.

(continuação)

Cenário	Vazão da EBAB (L/s)	Altura geométrica da EBAB (m)	Extensão da linha da EBAB (m)	Diâmetro da linha da EBAB (mm)	Altura manométrica (mca)	Potência instalada da EBAB (cv)	Demanda de energia da EBAB (kW)	Consumo diário de energia da EBAB (kWh/dia)	Vazão da recirculação (L/s)	Diâmetro da linha da recirculação (mm)	Altura manométrica (mca)	Potência instalada da recirculação (cv)	Demanda de energia da recirculação (kW)	Consumo diário médio de energia da recirculação (kWh/dia)
S-54	1.200	100	1.500	1.200	101,69	2.000	312,57	30.007,11	-	-	-	-	-	-
S-55	1.500	100	1.500	1.200	102,55	2.500	394,02	37.826,04	-	-	-	-	-	-
S-56	1.800	100	1.500	1.600	100,88	3.000	465,13	44.652,09	-	-	-	-	-	-
S-57	2.100	100	1.500	1.600	101,17	3.000	544,21	52.244,01	-	-	-	-	-	-
S-58	2.400	100	1.500	1.800	100,84	3.000	619,92	59.512,74	-	-	-	-	-	-
S-59	2.700	100	1.500	1.800	101,05	3.000	698,86	67.091,01	-	-	-	-	-	-
S-60	3.000	100	1.500	2.000	100,76	3.000	774,29	74.331,81	-	-	-	-	-	-
C-1	300	10	150	600	10,35	75	7,73	741,72	33	200	5,90	7,50	0,30	28,88
C-2	600	10	150	800	10,31	150	15,30	1.468,53	66	300	5,45	10,00	0,53	51,04
C-3	900	10	150	1.000	10,23	250	22,50	2.159,85	99	400	5,23	12,50	0,75	71,09
C-4	1.200	10	150	1.200	10,16	250	29,67	2.848,23	132	400	5,41	15,00	0,99	95,24
C-5	1.500	10	150	1.200	10,24	500	37,38	3.588,06	165	500	5,20	17,50	1,20	115,14
C-6	1.800	10	150	1.600	10,08	500	43,92	4.216,38	198	500	5,29	25,00	1,43	137,03
C-7	2.100	10	150	1.600	10,10	500	51,34	4.928,70	231	600	5,16	25,00	1,61	154,67
C-8	2.400	10	150	1.800	10,08	500	58,56	5.621,70	264	600	5,20	30,00	1,86	177,98
C-9	2.700	10	150	1.800	10,10	500	66,01	6.336,96	297	600	5,26	30,00	2,08	198,98
C-10	3.000	10	150	2.000	10,07	750	73,13	7.020,09	330	600	5,31	40,00	2,32	222,81
C-11	300	50	150	600	50,35	500	36,76	3.528,63	33	200	5,90	7,50	0,30	28,88
C-12	600	50	150	800	50,31	750	73,07	7.014,63	66	300	5,45	10,00	0,53	51,04

(continua)

Tabela 20 – Matriz de resultados da modelagem técnica.

(continuação)

Cenário	Vazão da EBAB (L/s)	Altura geométrica da EBAB (m)	Extensão da linha da EBAB (m)	Diâmetro da linha da EBAB (mm)	Altura manométrica (mca)	Potência instalada da EBAB (cv)	Demanda de energia da EBAB (kW)	Consumo diário de energia da EBAB (kWh/dia)	Vazão da recirculação (L/s)	Diâmetro da linha da recirculação (mm)	Altura manométrica (mca)	Potência instalada da recirculação (cv)	Demanda de energia da recirculação (kW)	Consumo diário médio de energia da recirculação (kWh/dia)
C-13	900	50	150	1.000	50,23	1.000	109,43	10.505,25	99	400	5,23	12,50	0,75	71,09
C-14	1.200	50	150	1.200	50,16	1.250	145,70	13.987,26	132	400	5,41	15,00	0,99	95,24
C-15	1.500	50	150	1.200	50,24	1.250	182,42	17.512,11	165	500	5,20	17,50	1,20	115,14
C-16	1.800	50	150	1.600	50,08	1.500	218,20	20.947,50	198	500	5,29	25,00	1,43	137,03
C-17	2.100	50	150	1.600	50,10	1.750	254,67	24.448,62	231	600	5,16	25,00	1,61	154,67
C-18	2.400	50	150	1.800	50,08	2.000	290,94	27.930,00	264	600	5,20	30,00	1,86	177,98
C-19	2.700	50	150	1.800	50,10	2.500	327,44	31.433,85	297	600	5,26	30,00	2,08	198,98
C-20	3.000	50	150	2.000	50,07	2.500	363,60	34.905,78	330	600	5,31	40,00	2,32	222,81
C-21	300	100	150	600	100,35	750	72,87	6.995,73	33	200	5,90	7,50	0,30	28,88
C-22	600	100	150	800	100,31	1.250	145,69	13.985,79	66	300	5,45	10,00	0,53	51,04
C-23	900	100	150	1.000	100,23	1.500	218,36	20.962,41	99	400	5,23	12,50	0,75	71,09
C-24	1.200	100	150	1.200	100,16	2.000	290,94	27.930,00	132	400	5,41	15,00	0,99	95,24
C-25	1.500	100	150	1.200	100,24	2.500	363,96	34.940,43	165	500	5,20	17,50	1,20	115,14
C-26	1.800	100	150	1.600	100,08	3.000	436,06	41.861,61	198	500	5,29	25,00	1,43	137,03
C-27	2.100	100	150	1.600	100,10	3.000	508,84	48.848,31	231	600	5,16	25,00	1,61	154,67
C-28	2.400	100	150	1.800	100,08	3.000	581,41	55.815,48	264	600	5,20	30,00	1,86	177,98
C-29	2.700	100	150	1.800	100,10	3.000	654,22	62.805,12	297	600	5,26	30,00	2,08	198,98

(continua)

Tabela 20 – Matriz de resultados da modelagem técnica.

(continuação)

Cenário	Vazão da EBAB (L/s)	Altura geométrica da EBAB (m)	Extensão da linha da EBAB (m)	Diâmetro da linha da EBAB (mm)	Altura manométrica (mca)	Potência instalada da EBAB (cv)	Demanda de energia da EBAB (kW)	Consumo diário de energia da EBAB (kWh/dia)	Vazão da recirculação (L/s)	Diâmetro da linha da recirculação (mm)	Altura manométrica (mca)	Potência instalada da recirculação (cv)	Demanda de energia da recirculação (kW)	Consumo diário médio de energia da recirculação (kWh/dia)
C-30	3.000	100	150	2.000	100,07	3.000	726,69	69.762,42	330	600	5,31	40,00	2,32	222,81
C-31	300	10	1.500	600	13,41	75	10,01	961,38	33	200	5,90	7,50	0,30	28,88
C-32	600	10	1.500	800	13,03	150	19,33	1.855,77	66	300	5,45	10,00	0,53	51,04
C-33	900	10	1.500	1.000	12,17	250	26,65	2.558,85	99	400	5,23	12,50	0,75	71,09
C-34	1.200	10	1.500	1.200	11,52	250	33,64	3.229,38	132	400	5,41	15,00	0,99	95,24
C-35	1.500	10	1.500	1.200	12,29	500	44,63	4.284,00	165	500	5,20	17,50	1,20	115,14
C-36	1.800	10	1.500	1.600	10,79	500	47,01	4.513,32	198	500	5,29	25,00	1,43	137,03
C-37	2.100	10	1.500	1.600	11,05	500	56,17	5.392,38	231	600	5,16	25,00	1,61	154,67
C-38	2.400	10	1.500	1.800	10,76	500	62,51	6.001,17	264	600	5,20	30,00	1,86	177,98
C-39	2.700	10	1.500	1.800	10,95	750	71,56	6.870,15	297	600	5,26	30,00	2,08	198,98
C-40	3.000	10	1.500	2.000	10,68	750	77,56	7.445,55	330	600	5,31	40,00	2,32	222,81
C-41	300	50	1.500	600	53,41	500	38,99	3.743,25	33	200	5,90	7,50	0,30	28,88
C-42	600	50	1.500	800	53,03	750	77,02	7.393,68	66	300	5,45	10,00	0,53	51,04
C-43	900	50	1.500	1.000	52,17	1.000	113,66	10.910,97	99	400	5,23	12,50	0,75	71,09
C-44	1.200	50	1.500	1.200	51,52	1.250	149,65	14.366,73	132	400	5,41	15,00	0,99	95,24
C-45	1.500	50	1.500	1.200	52,29	1.500	189,86	18.226,53	165	500	5,20	17,50	1,20	115,14
C-46	1.800	50	1.500	1.600	50,79	1.500	221,30	21.244,65	198	500	5,29	25,00	1,43	137,03

(continua)

Tabela 20 – Matriz de resultados da modelagem técnica.

(continuação)

Cenário	Vazão da EBAB (L/s)	Altura geométrica da EBAB (m)	Extensão da linha da EBAB (m)	Diâmetro da linha da EBAB (mm)	Altura manométrica (mca)	Potência instalada da EBAB (cv)	Demanda de energia da EBAB (kW)	Consumo diário de energia da EBAB (kWh/dia)	Vazão da recirculação (L/s)	Diâmetro da linha da recirculação (mm)	Altura manométrica (mca)	Potência instalada da recirculação (cv)	Demanda de energia da recirculação (kW)	Consumo diário médio de energia da recirculação (kWh/dia)
C-47	2.100	50	1.500	1.600	51,05	1.750	259,50	24.912,09	231	600	5,16	25,00	1,61	154,67
C-48	2.400	50	1.500	1.800	50,76	2.000	294,89	28.309,26	264	600	5,20	30,00	1,86	177,98
C-49	2.700	50	1.500	1.800	50,95	2.500	332,99	31.967,25	297	600	5,26	30,00	2,08	198,98
C-50	3.000	50	1.500	2.000	50,68	2.500	368,03	35.331,03	330	600	5,31	40,00	2,32	222,81
C-51	300	100	1.500	600	103,41	750	75,09	7.209,09	33	200	5,90	7,50	0,30	28,88
C-52	600	100	1.500	800	103,03	1.250	149,64	14.365,26	66	300	5,45	10,00	0,53	51,04
C-53	900	100	1.500	1.000	102,17	1.500	222,58	21.367,92	99	400	5,23	12,50	0,75	71,09
C-54	1.200	100	1.500	1.200	101,52	2.000	294,89	28.309,26	132	400	5,41	15,00	0,99	95,24
C-55	1.500	100	1.500	1.200	102,29	2.500	371,41	35.655,06	165	500	5,20	17,50	1,20	115,14
C-56	1.800	100	1.500	1.600	100,79	3.000	439,15	42.158,76	198	500	5,29	25,00	1,43	137,03
C-57	2.100	100	1.500	1.600	101,05	3.000	513,67	49.311,99	231	600	5,16	25,00	1,61	154,67
C-58	2.400	100	1.500	1.800	100,76	3.000	585,36	56.194,74	264	600	5,20	30,00	1,86	177,98
C-59	2.700	100	1.500	1.800	100,95	3.000	659,77	63.338,31	297	600	5,26	30,00	2,08	198,98
C-60	3.000	100	1.500	2.000	100,68	3.000	731,12	70.187,67	330	600	5,31	40,00	2,32	222,81

Fonte: Autor.

### APÊNDICE C – Matriz de resultados da modelagem econômica.

Tabela 21 – Matriz de resultados da modelagem econômica.

Cenário base - sem recirculação	Custo com energia elétrica na captação em 2024 (R\$)	Custo com energia elétrica na captação em 2058 (R\$)	VPL do cenário sem recirculação (R\$ 10 <sup>6</sup> )	Cenário alternativo - com recirculação	Custo com energia elétrica na captação em 2024 (R\$)	Custo com energia elétrica na captação em 2058 (R\$)	Custo com energia elétrica na recirculação em 2024 (R\$)	Custo com energia elétrica na recirculação em 2058 (R\$)	Custo de implantação (R\$ 10 <sup>6</sup> )	VPL do cenário com recirculação (R\$ 10 <sup>6</sup> )	Cenário mais favorável	Superávit do VPL (R\$ 10 <sup>6</sup> )	Superávit do VPL (%)
S-1	170.041,08	87.975,12	3,71	C-1	160.071,12	82.816,92	6.071,88	3.306,36	0,93	3,62	C-1	0,08	2,22
S-2	336.636,60	174.167,76	7,34	C-2	316.922,88	163.968,36	10.854,00	5.780,52	1,02	7,15	C-2	0,19	2,59
S-3	494.259,72	255.718,20	10,77	C-3	466.115,76	241.157,16	15.229,08	7.996,32	1,11	10,49	C-3	0,28	2,60
S-4	651.746,04	337.197,72	14,20	C-4	614.674,08	318.017,76	20.303,40	10.761,72	1,16	13,84	C-4	0,36	2,54
S-5	816.754,32	422.569,08	17,80	C-5	774.337,20	400.623,60	24.698,64	12.932,40	1,22	17,41	C-5	0,38	2,15
S-6	963.817,80	498.656,28	21,00	C-6	909.932,76	470.777,52	29.323,56	15.428,52	1,34	20,47	C-6	0,53	2,53
S-7	1.128.918,48	584.075,52	24,60	C-7	1.063.657,92	550.311,12	33.173,76	17.374,44	1,33	23,90	C-7	0,70	2,83
S-8	1.283.822,88	664.219,32	27,98	C-8	1.213.213,92	627.687,96	38.158,68	20.001,36	1,40	27,27	C-8	0,70	2,51
S-9	1.448.604,84	749.473,56	31,57	C-9	1.367.573,40	707.549,76	42.625,32	22.381,44	1,40	30,73	C-9	0,83	2,64
S-10	1.604.777,88	830.273,76	34,97	C-10	1.515.000,24	783.825,00	47.631,48	25.111,68	1,51	34,06	C-10	0,91	2,60
S-11	806.468,76	417.247,68	17,57	C-11	761.511,36	393.987,84	6.071,88	3.306,36	0,93	16,73	C-11	0,84	4,81
S-12	1.603.145,88	829.429,44	34,93	C-12	1.513.820,88	783.214,80	10.854,00	5.780,52	1,02	33,23	C-12	1,71	4,89
S-13	2.400.004,80	1.241.705,28	52,30	C-13	2.267.128,08	1.172.958,00	15.229,08	7.996,32	1,11	49,74	C-13	2,56	4,90
S-14	3.195.550,68	1.653.301,56	69,63	C-14	3.018.577,08	1.561.739,76	20.303,40	10.761,72	1,16	66,22	C-14	3,41	4,90
S-15	4.000.840,08	2.069.939,04	87,18	C-15	3.779.272,56	1.955.305,32	24.698,64	12.932,40	1,22	82,89	C-15	4,29	4,92
S-16	4.784.739,24	2.475.509,88	104,26	C-16	4.520.659,08	2.338.881,00	29.323,56	15.428,52	1,34	99,15	C-16	5,11	4,90
S-17	5.586.675,60	2.890.412,64	121,74	C-17	5.276.232,48	2.729.796,72	33.173,76	17.374,44	1,33	115,70	C-17	6,04	4,96

(continua)

Tabela 21 – Matriz de resultados da modelagem econômica.

(continuação)

Cenário base - sem recirculação	Custo com energia elétrica na captação em 2024 (R\$)	Custo com energia elétrica na captação em 2058 (R\$)	VPL do cenário sem recirculação (R\$ 10 <sup>6</sup> )	Cenário alternativo - com recirculação	Custo com energia elétrica na captação em 2024 (R\$)	Custo com energia elétrica na captação em 2058 (R\$)	Custo com energia elétrica na recirculação em 2024 (R\$)	Custo com energia elétrica na recirculação em 2058 (R\$)	Custo de implantação (R\$ 10 <sup>6</sup> )	VPL do cenário com recirculação (R\$ 10 <sup>6</sup> )	Cenário mais favorável	Superávit do VPL (R\$ 10 <sup>6</sup> )	Superávit do VPL (%)
S-18	6.378.412,44	3.300.038,28	138,99	C-18	6.027.547,56	3.118.509,12	38.158,68	20.001,36	1,40	132,18	C-18	6,81	4,90
S-19	7.179.940,80	3.714.729,96	156,46	C-19	6.783.710,64	3.509.729,88	42.625,32	22.381,44	1,40	148,76	C-19	7,70	4,92
S-20	7.972.994,04	4.125.036,84	173,74	C-20	7.532.982,72	3.897.385,32	47.631,48	25.111,68	1,51	165,20	C-20	8,54	4,92
S-21	1.598.250,24	826.896,48	34,83	C-21	1.509.741,12	781.104,00	6.071,88	3.306,36	0,93	33,03	C-21	1,79	5,15
S-22	3.195.235,08	1.653.138,36	69,63	C-22	3.018.261,48	1.561.576,44	10.854,00	5.780,52	1,02	66,01	C-22	3,62	5,19
S-23	4.788.092,40	2.477.244,60	104,34	C-23	4.523.878,32	2.340.546,60	15.229,08	7.996,32	1,11	98,91	C-23	5,42	5,20
S-24	6.379.636,44	3.300.671,64	139,02	C-24	6.027.547,56	3.118.509,12	20.303,40	10.761,72	1,16	131,79	C-24	7,23	5,20
S-25	7.980.924,12	4.129.139,64	173,91	C-25	7.540.460,16	3.901.254,00	24.698,64	12.932,40	1,22	164,85	C-25	9,06	5,21
S-26	9.560.866,20	4.946.563,92	208,34	C-26	9.034.114,80	4.674.035,40	29.323,56	15.428,52	1,34	197,51	C-26	10,83	5,20
S-27	11.158.848,84	5.773.321,92	243,16	C-27	10.541.908,44	5.454.131,76	33.173,76	17.374,44	1,33	230,44	C-27	12,72	5,23
S-28	12.746.539,32	6.594.755,16	277,76	C-28	12.045.485,28	6.232.046,52	38.158,68	20.001,36	1,40	263,32	C-28	14,44	5,20
S-29	14.344.203,12	7.421.348,16	312,57	C-29	13.553.913,24	7.012.471,08	42.625,32	22.381,44	1,40	296,29	C-29	16,29	5,21
S-30	15.933.206,88	8.243.460,84	347,20	C-30	15.055.360,92	7.789.284,36	47.631,48	25.111,68	1,51	329,12	C-30	18,08	5,21
S-31	225.739,68	116.792,28	4,92	C-31	207.473,16	107.341,68	6.071,88	3.306,36	0,93	4,66	C-31	0,26	5,34
S-32	429.451,80	222.188,04	9,36	C-32	400.491,60	207.204,72	10.854,00	5.780,52	1,02	8,97	C-32	0,39	4,18
S-33	595.368,36	308.029,44	12,97	C-33	552.221,52	285.706,20	15.229,08	7.996,32	1,11	12,37	C-33	0,61	4,67
S-34	748.366,80	387.187,08	16,31	C-34	696.929,64	360.574,68	20.303,40	10.761,72	1,16	15,63	C-34	0,67	4,13
S-35	998.986,80	516.852,00	21,77	C-35	924.527,52	478.328,52	24.698,64	12.932,40	1,22	20,69	C-35	1,08	4,97

(continua)

Tabela 21 – Matriz de resultados da modelagem econômica.

(continuação)

Cenário base - sem recirculação	Custo com energia elétrica na captação em 2024 (R\$)	Custo com energia elétrica na captação em 2058 (R\$)	VPL do cenário sem recirculação (R\$ 10 <sup>6</sup> )	Cenário alternativo - com recirculação	Custo com energia elétrica na captação em 2024 (R\$)	Custo com energia elétrica na captação em 2058 (R\$)	Custo com energia elétrica na recirculação em 2024 (R\$)	Custo com energia elétrica na recirculação em 2058 (R\$)	Custo de implantação (R\$ 10 <sup>6</sup> )	VPL do cenário com recirculação (R\$ 10 <sup>6</sup> )	Cenário mais favorável	Superávit do VPL (R\$ 10 <sup>6</sup> )	Superávit do VPL (%)
S-36	1.039.274,76	537.695,88	22,65	C-36	974.014,20	503.931,72	29.323,56	15.428,52	1,34	21,87	C-36	0,78	3,44
S-37	1.244.848,20	644.054,76	27,13	C-37	1.163.724,12	602.083,08	33.173,76	17.374,44	1,33	26,09	C-37	1,04	3,84
S-38	1.380.625,44	714.302,64	30,09	C-38	1.295.106,12	670.056,96	38.158,68	20.001,36	1,40	29,06	C-38	1,03	3,42
S-39	1.583.250,72	819.136,08	34,50	C-39	1.482.639,24	767.082,12	42.625,32	22.381,44	1,40	33,24	C-39	1,26	3,65
S-40	1.713.048,36	886.290,36	37,33	C-40	1.606.817,76	831.329,16	47.631,48	25.111,68	1,51	36,06	C-40	1,27	3,40
S-41	856.366,44	443.063,52	18,66	C-41	807.826,44	417.950,16	6.071,88	3.306,36	0,93	17,74	C-41	0,92	4,94
S-42	1.698.998,64	879.021,36	37,02	C-42	1.595.623,80	825.537,72	10.854,00	5.780,52	1,02	35,01	C-42	2,01	5,44
S-43	2.502.656,16	1.294.814,64	54,54	C-43	2.354.687,28	1.218.259,08	15.229,08	7.996,32	1,11	51,64	C-43	2,89	5,30
S-44	3.291.718,92	1.703.056,80	71,73	C-44	3.100.469,28	1.604.108,76	20.303,40	10.761,72	1,16	68,01	C-44	3,72	5,19
S-45	4.183.072,68	2.164.221,96	91,15	C-45	3.933.450,12	2.035.073,16	24.698,64	12.932,40	1,22	86,25	C-45	4,90	5,37
S-46	4.860.196,20	2.514.549,36	105,91	C-46	4.584.788,16	2.372.059,92	29.323,56	15.428,52	1,34	100,55	C-46	5,36	5,06
S-47	5.702.557,44	2.950.367,04	124,26	C-47	5.376.254,28	2.781.545,64	33.173,76	17.374,44	1,33	117,88	C-47	6,38	5,14
S-48	6.475.170,36	3.350.098,56	141,10	C-48	6.109.395,12	3.160.855,20	38.158,68	20.001,36	1,40	133,97	C-48	7,13	5,06
S-49	7.314.675,84	3.784.438,68	159,39	C-49	6.898.821,12	3.569.285,28	42.625,32	22.381,44	1,40	151,27	C-49	8,13	5,10
S-50	8.081.264,52	4.181.053,32	176,10	C-50	7.624.755,60	3.944.866,44	47.631,48	25.111,68	1,51	167,20	C-50	8,90	5,06
S-51	1.652.409,36	854.917,20	36,01	C-51	1.555.785,36	804.926,16	6.071,88	3.306,36	0,93	34,04	C-51	1,97	5,47
S-52	3.291.039,96	1.702.705,44	71,71	C-52	3.100.153,68	1.603.945,44	10.854,00	5.780,52	1,02	67,79	C-52	3,92	5,47
S-53	4.890.743,52	2.530.353,96	106,57	C-53	4.611.389,64	2.385.822,96	15.229,08	7.996,32	1,11	100,82	C-53	5,75	5,40

(continua)

Tabela 21 – Matriz de resultados da modelagem econômica.

(continuação)

Cenário base - sem recirculação	Custo com energia elétrica na captação em 2024 (R\$)	Custo com energia elétrica na captação em 2058 (R\$)	VPL do cenário sem recirculação (R\$ 10 <sup>6</sup> )	Cenário alternativo - com recirculação	Custo com energia elétrica na captação em 2024 (R\$)	Custo com energia elétrica na captação em 2058 (R\$)	Custo com energia elétrica na recirculação em 2024 (R\$)	Custo com energia elétrica na recirculação em 2058 (R\$)	Custo de implantação (R\$ 10 <sup>6</sup> )	VPL do cenário com recirculação (R\$ 10 <sup>6</sup> )	Cenário mais favorável	Superávit do VPL (R\$ 10 <sup>6</sup> )	Superávit do VPL (%)
S-54	6.475.804,68	3.350.426,76	141,11	C-54	6.109.395,12	3.160.855,20	20.303,40	10.761,72	1,16	133,58	C-54	7,54	5,34
S-55	8.163.201,36	4.223.445,60	177,88	C-55	7.694.685,60	3.981.046,68	24.698,64	12.932,40	1,22	168,22	C-55	9,67	5,44
S-56	9.636.326,40	4.985.605,20	209,98	C-56	9.098.240,76	4.707.212,64	29.323,56	15.428,52	1,34	198,90	C-56	11,08	5,28
S-57	11.274.730,68	5.833.276,44	245,69	C-57	10.641.974,88	5.505.903,72	33.173,76	17.374,44	1,33	232,63	C-57	13,06	5,32
S-58	12.843.386,52	6.644.861,52	279,87	C-58	12.127.332,84	6.274.392,48	38.158,68	20.001,36	1,40	265,10	C-58	14,77	5,28
S-59	14.478.845,52	7.491.009,00	315,51	C-59	13.668.979,20	7.072.003,44	42.625,32	22.381,44	1,40	298,79	C-59	16,71	5,30
S-60	16.041.477,48	8.299.477,32	349,56	C-60	15.147.133,80	7.836.765,36	47.631,48	25.111,68	1,51	331,12	C-60	18,44	5,28

Fonte: Autor.

## APÊNDICE D – Custos de referência

Tabela 22 – Base de custos de elevatórias.

Edital	Potência instalada (cv)	Valor corrigido (R\$)	Valor licitado (R\$)
0063/2021	10	63.5409,10	590930,40
0063/2021	10	568.589,00	528.787,80
0063/2021	20	1.460.370,00	1358144,00
010/2022	15	856.713,70	826728,70
005/2022	12,5	433.593,70	418417,90
002/2022	2	306.439,20	295713,80
002/2022	75	159.30210	1537265
002/2022	2,2	432.678,70	417535
002/2022	2,7	370.215,70	357258,20
002/2022	2	394.667,80	380854,40
002/2022	2	397.729,40	383808,90
002/2022	3	372.522,60	359484,30
009/2022	5	493.088,60	475830,50
044/2022	150	1.642.080,00	1584607
Regressão	-	-	Potencial
Equação	-	-	$y = 212445x^{0,4203}$
Correlação	-	-	$R^2 = 0,9245$

Fonte: Adaptado de CORSAN (2023).

Tabela 23 – Base de custos para linha de recalque em ferro fundido.

Edital	DN (mm)	Valor corrigido (R\$)	Valor licitado (R\$)
007/23	200	-	1.349,99
007/23	300	-	1.798,81
007/23	400	-	2.442,29
007/23	500	-	2.761,01
007/23	600	-	2.658,16
007/23	700	-	2.809,21
007/23	800	-	2.940,05
007/23	1000	-	3.158,69
007/23	1200	-	3.337,34
007/23	1600	-	3.619,22
007/23	1800	-	3.734,63
007/23	2000	-	3.837,86

Fonte: Adaptado de CORSAN (2023).

Tabela 23 – Base de custos para reservatório enterrado.

Edital	DN (mm)	Valor corrigido (R\$)	Valor licitado (R\$)
265/23	400	351.815,10	351.815,10

Fonte: CORSAN (2023).