

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA E DE PETRÓLEO

MARCELLE BARBOSA MOTTA

**ESTUDO DE CASO DO REUSO DE ÁGUA COMO UMA
ALTERNATIVA À ESCASSEZ HÍDRICA EM UMA
INDÚSTRIA PETROQUÍMICA**

MARCELLE BARBOSA MOTTA

**ESTUDO DE CASO DO REUSO DE ÁGUA COMO UMA
ALTERNATIVA À ESCASSEZ HÍDRICA EM UMA
INDÚSTRIA PETROQUÍMICA**

Projeto Final apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Química, oferecido pelo departamento de Engenharia Química e de Petróleo da Escola de Engenharia da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Química.

ORIENTADORA

Prof^a. Dra. Luciane Pimentel Costa Monteiro

**Niterói
2/2021**

Ficha catalográfica automática - SDC/BEE
Gerada com informações fornecidas pelo autor

M921e Motta, Marcelle Barbosa
ESTUDO DE CASO DO REUSO DE ÁGUA COMO UMA ALTERNATIVA À
ESCASSEZ HÍDRICA EM UMA INDÚSTRIA PETROQUÍMICA / Marcelle
Barbosa Motta ; Luciane Pimentel Costa Monteiro, orientadora.
Niterói, 2022.
95 f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia
Química)-Universidade Federal Fluminense, Escola de
Engenharia, Niterói, 2022.

1. Uso de água residual. 2. Produção intelectual. I.
Pimentel Costa Monteiro, Luciane, orientadora. II.
Universidade Federal Fluminense. Escola de Engenharia. III.
Título.

CDD -

MARCELLE BARBOSA MOTTA

**ESTUDO DE CASO DO REUSO DE ÁGUA COMO
UMA ALTERNATIVA À ESCASSEZ HÍDRICA EM
UMA INDÚSTRIA PETROQUÍMICA**

Projeto Final apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Química, oferecido pelo departamento de Engenharia Química e de Petróleo, da Escola de Engenharia, da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Química.

Aprovado em 01 de fevereiro de 2022.

BANCA EXAMINADORA



Luciane Pimentel Costa Monteiro, D.Sc. – TEQ-UFF

Presidente da Banca - Orientadora



Ana Carla da S. Lomba S. Coutinho, D.Sc. – TEQ-UFF



Alessandra da Rocha Duailibe Monteiro, D.Sc. – TEQ-UFF



Flavia Mancopes, M.Sc. - Brakem

**Niterói
2/2021**

Agradecimentos

À minha Mãe, que sempre esteve ao meu lado, me apoiou, segurou na minha mão e me deu forças e incentivos para não desistir à cada desafio que eu precisei vencer.

Ao meu irmão, que também sempre me incentivou e acreditou no meu potencial, se formou e sempre foi minha inspiração como um homem sensacional que lutou pelos seus objetivos e sempre reforçava o orgulho que sente por mim.

Ao tio Zé (*in memoriam*) e Tia Dina, que além de cuidarem de mim quando eu era pequena, sempre me incentivaram a estudar e ver na educação o melhor caminho para eu conquistar meu espaço no mundo. Muito obrigada! Também agradeço à Marta e Fillipe, que junto com meus tios, cuidaram de mim e também foram essenciais para meu crescimento.

À minha avó Luzia e ao meu avô Barbosa, que estavam sempre por perto e apoiando no que fosse necessário, desde a minha infância.

À minha tia Carmen, que também sempre esteve e está ao meu lado, solícita a ajudar e apoiar nos momentos que eu mais precisei.

Ao Tinho e à Claudinha, que também sempre apoiaram meus estudos, me forneceram materiais para estudar e sempre estão acompanhando e estimulando a minha evolução pessoal e profissional.

À Beth, com quem convivi muito na adolescência e também me incentivou a estudar, e foi uma das minhas inspirações para eu continuar estudando para eu realizar meus sonhos de viajar, ter minha casa e outros bens pessoais.

Aos meus tios Ângelo e Ana Rita, que apesar de não estarem mais presentes em terra, também sempre torceram por mim e vibravam à cada conquista que tive – seja no âmbito educacional ou profissional.

Às minhas amigas do CPII, que sempre estiveram comigo, me apoiaram, ouviram minhas reclamações quando eu já não tinha mais forças para continuar este curso, mas que também já me fizeram rir muito! Foram minhas companhias de segunda à sábado durante três anos – lutamos juntas para fazermos nossas respectivas graduações, sempre apoiando umas às outras. Vocês, Carol, Milena,

Nathalia, Thays e Gabriela, sempre foram inspirações para mim – meninas inteligentes que eu amo demais!

Aos meus professores do Colégio Pedro II, local onde eu aprendi muito mais do que conhecimento técnico para passar no vestibular, mas também a ter pensamento crítico, a me preocupar com os outros e perceber que sempre podemos questionar e mudar algo. Lá me desenvolvi demais como pessoa, e ainda conquistei minha vaga na universidade.

Aos meus professores da Universidade Federal Fluminense, que compartilharam comigo seus conhecimentos, tempo, experiências, e às vezes até aturavam minhas lágrimas rs. Muito obrigada à esta equipe incrível que fizeram eu me tornar Engenheira Química! Foi muita luta para chegar até aqui, só eu sei! Mas eu só tenho a agradecer a cada um de vocês!

Aos amigos que eu fiz na UFF! Foram algumas pessoas especiais que me apoiaram e me ajudaram a vencer este curso, super desafiador, que já me tirou muita lágrima e noites de sono! Mas graças ao nosso companheirismo, pude chegar até aqui e espero que sejamos colegas de profissão nos próximos anos. Em especial, eu agradeço à Renata, Ana Paula, Leonardo, Nathalia Teodósio, Vitor Bastos, William, Pedro Chediak e, em especial, à minha querida Alana! Todos esses e muitos outros foram essenciais para meu aprendizado, para mostrar meus pontos fortes e para crescermos juntos.

Ainda sobre meus amigos da UFF, fica à Alana o meu agradecimento especial! Pessoa a qual eu vou levar para a vida, porque depois de me aproximado de você em uma disciplina optativa, eu achei alguém que finalmente me identifiquei e me ajudou a fazer novos amigos na faculdade. Sem dúvidas, foi quando meu curso começou a “andar para frente” rs – e você vai me entender quando ler isso! Obrigada por chorar comigo e também por secar minhas lágrimas, por me mostrar o quanto eu era capaz e por segurar a minha mão e seguir comigo quando tudo que o queríamos era que o período acabasse – nossa troca foi incrível, obrigada!

Ao chefe do meu primeiro estágio na área de química, Henrique Vasquez, e à toda a sua equipe, em especial ao Hermes, Theodoro, Juliana, Bete, Simone, Carla, Juliano, Marcelle, Rubem, Renata, Tadzo, Teodoro e Vittoria – todos vocês sempre foram incríveis comigo e aprendi demais com cada um de vocês! Foi uma primeira experiência que com certeza impulsionou a minha carreira. Obrigada por

Niterói
2/2021

sempre acreditarem em mim, flexibilizarem meu trabalho quando eu precisei e, principalmente, por terem me dado a oportunidade de aprender muito sobre inovação, economia circular e a saber observar tudo que um projeto precisa ter para evoluir bem!

Aos meus chefes do meu último estágio profissional - Flavia Mancopes, Afonso Mello, Luciana Ribeiro e Nonato, e aos meus colegas de trabalho da Produção Q4, tanto pelos ensinamentos, quanto pelos incentivos e lições de vida. Aos meus queridos operadores, que tiveram muita paciência para me ensinar e tirar minhas dúvidas, em especial ao Edvan, Alessandra, Diego Esteves e Manuela. Cresci demais com esse time incrível! Foi uma honra poder trabalhar com vocês, e bem como a Finep, ter estagiado na Braskem contribuiu demais para eu me tornar uma Engenheira Química. À Flavia e ao Afonso, em especial, agradeço por todo apoio não só como líderes, mas também em relação ao conhecimento técnico para a execução do meu TCC! Agradeço demais a todo este time!

Um parágrafo especial para agradecer aos amigos que eu fiz na Braskem! À Mariana, Beatriz e Guilherme, que me ajudaram demais nas tarefas diárias, em compartilhar situações da vida, e pela colaboração e troca que tivemos! Ao Pedro e à Clara, do time de Planejamento, que também me ajudaram demais e se tornaram profissionais incríveis! Ao Delcio, com quem também aprendi muito e sempre estive solícito a tirar minhas dúvidas e compreender minhas questões em relação aos levantamentos sobre corrosão.

À minha orientadora, Luciane Pimentel, que foi a minha professora de Engenharia do Meio Ambiente, disciplina a qual eu pude conhecer melhor as etapas de tratamento de água e efluentes, me encantei e tive a curiosidade de pesquisar mais sobre o tema e me deu todo o suporte na execução deste trabalho, com paciência e sabedoria. Muito obrigada pelo cuidado na avaliação e pela disponibilidade em me ajudar sempre!

Às integrantes da minha banca examinadora, Ana Carla, Alessandra que também foram minhas professoras na UFF, me ensinaram muito, e à Flavia, minha educadora de estágio – todas vocês foram essenciais para a minha formação e aceitaram prontamente o meu convite, muito obrigada!

RESUMO

Com a crescente demanda por água, impulsionada pelo crescimento demográfico e expansão de setores como comércio, serviços e indústrias, é cada vez mais necessária a conscientização dos consumidores desde recurso para o seu uso sustentável, para que as gerações futuras também tenham acesso à água potável. Neste contexto, este estudo avalia a reutilização da água residual de uma estação de tratamento de efluentes (ETE) de uma indústria petroquímica como uma alternativa para complementar a água de reposição da torre de resfriamento desta unidade. A metodologia consiste na revisão bibliográfica sobre tratamento de efluentes e da qualidade necessária para a água de resfriamento, além do estudo de caso para reúso da água residuária da ETE de uma indústria petroquímica. Para isso, foram obtidos dados históricos de 2016 a 2021 das análises de água filtrada e do efluente da unidade, a partir dos quais foi evidenciada a necessidade de tratamento do efluente para adequação de carga orgânica e sais dissolvidos, de modo que a água de reúso, após seu tratamento, tivesse a mesma qualidade da água filtrada que era responsável pelo *make-up* da bacia da torre de resfriamento, conforme a média dos dados históricos. Para este fim, foi sugerido que a unidade de tratamento de água de reúso fosse instalada próxima à torre de resfriamento, com cerca de 520 m de tubulação conectando diretamente o efluente da ETE à esta nova estação. Para obter os resultados esperados, de acordo com referências e eficiência de fabricantes, a água de reúso deve ser tratada em uma unidade de Biorreator de Membranas (MBR), para remoção de carga orgânica, vírus e bactérias e, posteriormente, pela Osmose Reversa (OR), para remoção de sais dissolvidos e redução da condutividade. Durante o estudo, foi observado o avanço sobre o reúso de águas no Brasil, com a criação legislações e publicações sobre reúso em diversas empresas, mas ainda há muito o que se evoluir para a consolidação de um documento que padronize o reúso no país, que já é apontada como uma fonte viável para a redução de captação de água potável pelas indústrias.

PALAVRAS-CHAVE: Água de reúso. Escassez hídrica. Qualidade da água. Efluente industrial. Água de resfriamento.

ABSTRACT

With the growing demand for water, driven by demographic growth and expansion of sectors such as commerce, services and industries, it is increasingly necessary to raise consumer awareness of this resource for its sustainable use, so that future generations also have access to potable water. In this context, this paper evaluates the reuse of wastewater from an effluent treatment plant (ETP) of a petrochemical industry as an alternative to complement the replacement water of the cooling tower of this unit. The methodology consists of a literature review on effluent treatment and the quality required for cooling water, in addition to a case study for the reuse of wastewater from the ETE of a petrochemical industry. For this, historical data from 2016 to 2021 were obtained from the analysis of filtered water and the unit's effluent, from which the need for effluent treatment to adapt the organic load and dissolved salts was evidenced, so that the reuse water, after its treatment, had the same quality of the filtered water that was responsible for the make-up of the cooling tower basin, according to the average of the historical data. To this end, it was suggested that the reuse water treatment unit be installed next to the cooling tower, with about 520 m of pipe directly connecting the effluent from the ETE to this new station. To obtain the expected results, according to manufacturers' references and efficiency, the reused water must be treated in a Membrane Bioreactor (MBR) unit, to remove organic load, viruses and bacteria and, later, by Reverse Osmosis (OR), to remove dissolved salts and reduce conductivity. During the study, progress on water reuse in Brazil was observed, with the creation of legislation and publications on reuse in several companies, but there is still a lot to evolve for the consolidation of a document that standardizes reuse in the country, which is already identified as a viable source for the reduction of drinking water abstraction by industries.

KEYWORDS: Reuse water. Reclaimed Water. Water shortage. Water crisis. Water quality. Wastewater treatment. Cooling Water.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVO.....	17
1.1 Introdução	17
1.2 Objetivo.....	20
1.3 Estrutura do trabalho.....	20
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
2.1 Disponibilidade Hídrica no Brasil.....	21
2.2 Água de reúso.....	29
2.3 Tratamento de efluentes industriais	44
2.3.1. Legislações.....	44
2.3.2. Técnicas de tratamento de efluentes industrial.....	49
2.4 Água para torre de resfriamento	52
3. ESTUDO DE CASO DE UMA INDÚSTRIA PETROQUÍMICA: PROPOSTA PARA INSTALAÇÃO DE UMA UNIDADE DE TRATAMENTO DE ÁGUA DE REÚSO	65
3.1 Possibilidades para reúso de água em uma indústria petroquímica	66
3.1.1. O fornecimento de água para o polo petroquímico DCX	69
3.2 Tecnologias para remoção de contaminantes	73
3.3 Expansão da capacidade do projeto	80
4. CONCLUSÃO	82
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Comparação da situação atual e proposta do trabalho - instalação de unidade de tratamento de água residual recebendo efluente da ETE e reenviando para torre de resfriamento após tratamento

Figura 2: Evolução do consumo de água no Brasil e projeção até 2030

Figura 3: Constituição do Planeta Terra

Figura 4: Indicador de Qualidade de Água (IQA) no Brasil.

Figura 5: Ciclo Hidrológico

Figura 6: Disponibilidade Hídrica Superficial no Brasil versus captação.

Figura 7: Total de água consumida no Brasil por setor – média anual de 2018

Figura 8: Diagrama para desenvolvimento do PCRA

Figura 9: Exemplo de reutilização de "águas cinzas" em domicílio

Figura 10: Esquema da Estação de tratamento de água de reúso do Projeto Aquapolo

Figura 11: Esquema de Sistema de resfriamento aberto de circulação

Figura 12: Esquema do Sistema de resfriamento fechado

Figura 13: Esquema de Sistema de resfriamento com recirculação aberta

Figura 14: Esquematização do funcionamento de uma Torre de Resfriamento de tiragem mecânica e fluxo em contracorrente.

Figura 15: Balanço de Massa de sistema de resfriamento

Figura 16: Esquematização da Torre de Resfriamento recebendo água tratada das Estações de Tratamento de Água Bruta (existente) e da Unidade de Tratamento de Água Residuária (proposta)

Figura 17: Histórico Consumo de Água Filtrada x *make-up* AGR

Figura 18: Sistemas de abastecimento de Água do Grande Rio de Janeiro

Figura 19: Vista aérea de uma indústria petroquímica para instalação de sistema de reúso

Figura 20: Tabela com diâmetros nominais de tubulações de PVC

Figura 21: Faixas de remoção de substâncias por processos de tratamento de água

Figura 22: Unidade de Osmose Reversa

Figura 23: Exemplo de Unidade MBR com bioreator, membranas, bombas, aerador e sistema de controle

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Parâmetros avaliados no Indicador de Qualidade de Água

Tabela 2: Classificações para águas de reúso conforme NBR 13.969/1997

Tabela 3: Definições acerca do reúso de água

Tabela 4: Documentos normativos para padronização da água de reúso no Brasil e suas aplicabilidades conforme região

Tabela 5: Principais aplicações de água de reúso mundialmente

Tabela 6: Distribuição do consumo de água na indústria por segmento

Tabela 7: Tipos de mecanismos dispersantes

Tabela 8: Tipos de Controles microbiológico oxidativos e não-oxidativos

Tabela 9: Parâmetros de controle em água de resfriamento com circuito semi-aberto

Tabela 10: Parâmetros médios dos últimos 6 anos de uma indústria petroquímica

Tabela 11: Parâmetros médios do período 2016-2021 para Água de *make-up* da Bacia de AGR, Água de resfriamento circulante no processo e Efluente Final.

Tabela 12: Contaminantes presentes em águas e técnicas de remoção

Tabela 13: Estações de Tratamentos de Efluentes próximas à REDUC e suas capacidades instaladas

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

µm	Micrômetro
ABES-SP	Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental de São Paulo
ABIQUIM	Associação Brasileira da Indústria Química
ABNT	Agência Brasileira de Normas Técnicas
AGR	Água de resfriamento
ANA	Agência Nacional de Águas
apud	Extraído de
CEDAE	Companhia Estadual de Águas e Esgotos do Rio de Janeiro
CERH	Conselho Estadual de Recursos Hídricos
CIESP	Centro de Indústrias de São Paulo
cm	Centímetro
CNRH	Conselho Nacional de Recursos Hídricos
COEMA	Conselho Estadual de Meio Ambiente
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CONERH	Conselho Estadual de Recursos Hídricos
CONSEMA	Conselho Estadual do Meio Ambiente
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DCX	Duque de Caxias
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EBC	Empresa Brasil de Comunicação
EIA	Estudo de Impacto Ambiental
EPA	Environmental Protection Agency of United States
ETA	Estação de Tratamento de Águas
ETE	Estação de Tratamento de Efluentes
FIESP	Federação de Indústrias de São Paulo
IBRAM	Brasília ambiental
IICA	Instituto Interamericano de Cooperação para a Agricultura
INEA	Instituto Estadual do Ambiente

INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
IQA	Índice de Qualidade da Água
L	Litro
MBR	<i>Membrane Bioreactor</i> / Biorreator de Membranas
MDR	Ministério do Desenvolvimento Regional
MMA-SRHU	Ministério do Meio Ambiente - Secretaria de Recursos Hídricos e Ambiente Urbano
mg	Miligrama
mL	Mililitros
MMA	Ministério do Meio Ambiente
Máx	Máximo
NBR	Norma Brasileira
NMP	Número Mais Provável – método de contagem de bactérias
NOP	Norma Operacional – INEA
NR	Norma Regulamentadora
NTU	Unidade de Turbidez Nefelométrica
O&G	Óleos e graxas
OD	Oxigênio dissolvido
OR	Osmose Reversa
PCRA	Plano de Conservação e Reúso de Água
pH	Potencial Hidrogeniônico
PROCON ÁGUA	Programa de Autocontrole de Efluentes Líquidos
RAE	Relatório de Acompanhamento de Efluentes Líquidos
RIMA	Relatório de Impacto Ambiental
SABESP	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
SEBRAE	Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas
SES/ SIMA	Secretaria Estadual da Saúde e de Infraestrutura e Meio Ambiente
SINGREH	Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos
SS	Sólidos Sedimentáveis
SST	Sólidos Suspensos Totais
UF	Membrana de Ultrafiltração

UNESCO

Organização das Nações Unidas para a Educação, Ciência e
Cultura

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVO

1.1 Introdução

A escassez hídrica é um tema estudado há tempos por especialistas no contexto ambiental em grandes organizações mundiais como a Organização das nações Unidas – ONU. Este assunto cada vez tem mais tem sido abordado em jornais, principalmente em meses nos quais há menor incidência de chuvas, entre março e outubro. No Brasil, cuja matriz energética é, em sua maior parte, proveniente de hidroelétricas (SILVEIRA, 2016), a falta de chuvas impacta tanto o fornecimento de energia, quanto na necessidade de racionamento de água pela população. Além disto, têm preocupado às indústrias, que passaram a estudar fontes alternativas de abastecimento, tendo em vista que a água é essencial para seus processos, e sua falta culmina na redução de produção dessas empresas.

Apesar da aparente abundância de água no planeta Terra, apenas uma pequena parte deste recurso é doce e está disponível para o consumo humano. E devido ao crescimento demográfico e econômico, e também da expansão de setores como indústria e agricultura, este bem torna-se cada vez mais escasso, tanto em quantidade como em qualidade. Além destes, outros fatores que contribuem para diminuir a disponibilidade de água são as mudanças climáticas, o seu uso desordenado, a poluição, o desmatamento, o lançamento de contaminantes e resíduos no corpo hídrico, que têm como consequência também a piora na sua qualidade.

Segundo o Relatório de Conjuntura de Recursos Hídricos Brasil publicado em 2019, o setor que mais consome água é o da irrigação, seguido do uso animal e posteriormente, o abastecimento urbano. Estes dois últimos estão em linha com o consumo das indústrias que, de acordo com este relatório, são responsáveis pela captação de quase 10% da água das bacias hidrográficas (ANA, 2019). Considerando que a captação de água no Brasil aumentou em 80% nas duas últimas décadas, e as projeções apontam para uma alavancagem de 26% até 2030, de acordo com estudo divulgado pela ANA (2019), iniciativas para minimizar o

consumo deste bem vem ganhando destaque, como é o exemplo dos estudos sobre reutilização de água. Tendo em vista este contexto, as indústrias também têm se dedicado a buscar alternativas para redução a captação de água potável, onde as práticas de reúso de água vem ganhando destaque frente a outras alternativas.

A água de reúso é definida como a água residuária que está dentro dos padrões definidos para utilização no próprio local onde é gerada, conforma a definição da Resolução Nº 54/2005 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos – CNRH. Esta é uma alternativa viável para reduzir tanto a captação de água potável dos reservatórios quanto o lançamento de efluentes no corpo receptor. Em relação às fontes, de acordo com a resolução, são consideradas águas residuárias o esgoto, a água descartada e os efluentes líquidos de diversas fontes como edificações, indústrias, agroindústrias e agropecuária, sejam eles tratados ou não.

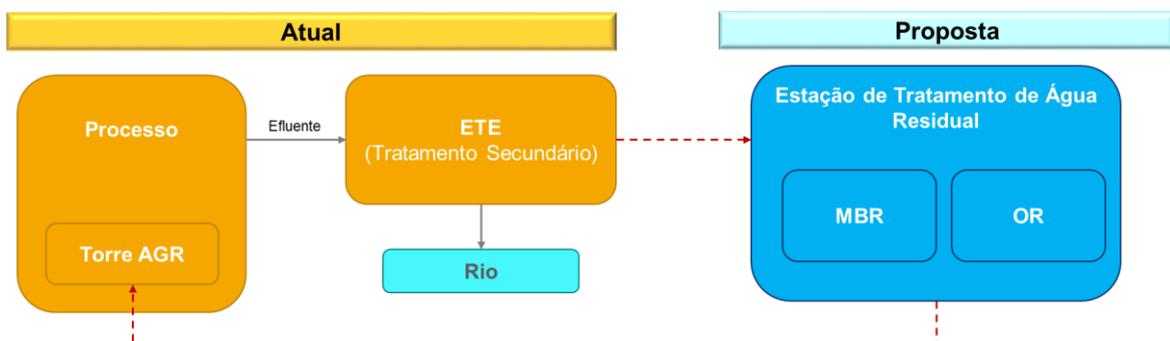
No Brasil, a primeira norma a definir os critérios para reutilização de água foi a Norma Brasileira NBR-13.969, que instituiu a reutilização de água doméstica para diversas aplicações, exceto para consumo e manuseio humano (ABNT, 1997; SEBRAE, 2007). Já para as indústrias, a questão do reúso só foi abordada a partir de 2005, com a publicação da Resolução Nº 54 de 28 de novembro de 2005 do CNRH, que estabelece as modalidades, diretrizes e critérios gerais para a prática de reúso direto não potável de água. Segundo esta resolução, é facultado às indústrias a aplicação de água de reúso em seus processos, atividades e operações.

Neste trabalho são abordados conceitos sobre o tratamento de efluente industrial, noções básicas de torres de resfriamento os parâmetros de qualidade da água utilizada nela, além de um estudo de caso da reutilização de água residual da estação de tratamento de efluentes de indústria petroquímica como uma fonte complementar de *make-up* da bacia da torre de resfriamento desta unidade, visto que essa é a maior fonte consumidora de água deste ramo, devido às perdas por evaporação e respingo durante a troca térmica.

Para a proposta, conforme ilustrada na Figura 1, foi realizado um levantamento de dados históricos de diversas análises laboratoriais e medição de

instrumentos como carga orgânica, sais dissolvidos, sólidos suspensos totais, vazões de água filtrada, água de reposição da torre de resfriamento e efluente final, além de outros. A partir disto, foram comparados os dados da água filtrada que alimenta a torre com aqueles do efluente final e percebeu-se que os valores de condutividade e demanda química de oxigênio – DBO precisariam ser ajustados em uma estação de tratamento de água de residual antes do reaproveitamento.

Figura 1: Comparação da situação atual e proposta do trabalho - instalação de unidade de tratamento de água residual recebendo efluente da ETE e reenviando para torre de resfriamento após tratamento



Fonte: Autoria própria (2022).

Neste caminho, foi verificado o que já existia na literatura em diversas publicações para a escolha do método mais adequado para remoção destes contaminantes, sendo comparadas algumas vantagens e desvantagens. Então, optou-se pela instalação de uma unidade de Biorreatores de Membranas, conhecida também como *Membrane Bioreactor* – MBR e, que precede à unidade de Osmose Reversa – OR. A primeira tem o objetivo de remover carga orgânica e sólidos na faixa de 0,1 e 0,001 μm , incluindo vírus, bactérias e coloides, enquanto a OR prevê a remoção de sais dissolvidos e íons metálicos, que são sólidos de tamanho inferior a 0,001 μm .

1.2 Objetivo

Este trabalho tem como objetivo realizar uma abordagem dos conceitos e parâmetros de águas de reúso e água de resfriamento, e realizar o estudo do efluente final tratado e da água filtrada de uma indústria petroquímica, propondo uma opção de tratamento desta água residual para utilização como *make-up* da bacia da torre de resfriamento da unidade, através da avaliação do histórico de análises dos últimos seis anos e soluções existentes na literatura para a sugestão das formas mais adequadas de tratamento. Esta alternativa considera a água de reúso a partir do efluente industrial como uma fonte adicional de reposição de água à bacia da torre, para reduzir a captação água potável dos corpos hídricos.

1.3 Estrutura do trabalho

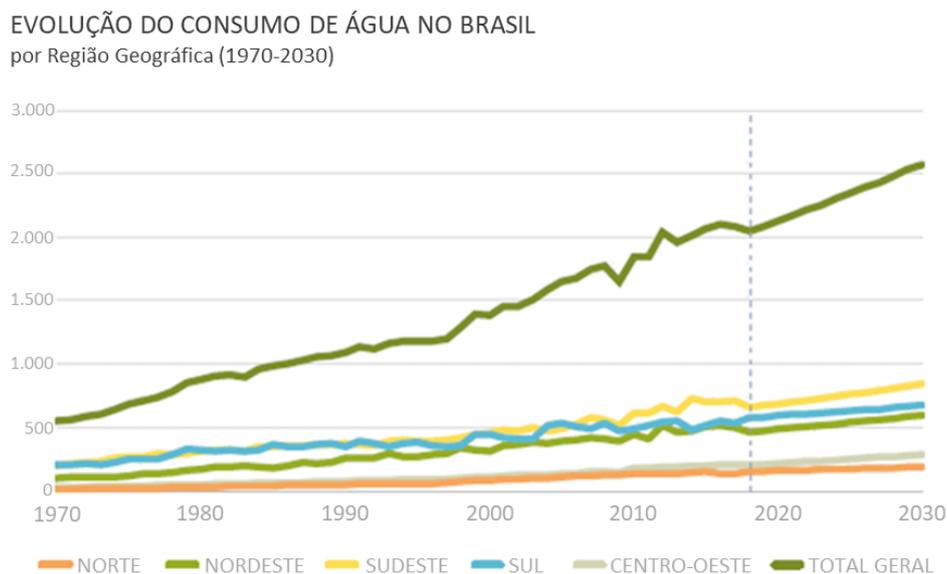
O presente trabalho é organizado em 4 capítulos. No primeiro há uma introdução dos temas do trabalho, enquanto no segundo há a contextualização do cenário de escassez hídrica no Brasil, apresentando uma revisão bibliográfica sobre água de reúso, tratamentos de efluentes e um conceitual sobre os padrões de qualidade da água de reposição em torre de resfriamento. No capítulo três são abordadas metodologias para o tratamento de água de reúso a partir de um efluente industrial que já passou por tratamento secundário, com foco na adequação desta água residuária como fonte complementar de água de *make-up* nas torres de resfriamento em uma indústria petroquímica. Já no quarto capítulo é apresentada a conclusão do trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Disponibilidade Hídrica no Brasil

A água é fundamental para o desenvolvimento socioeconômico da população, e seu consumo tende a aumentar, conforme apontado na Figura 2, proporcionalmente ao crescimento demográfico e industrial (HOEKSTRA *et al.*, 2011; ANA, 2019). No entanto, a poluição e a condição de escassez hídrica, agravada pelas mudanças climáticas tornam este recurso cada vez menos disponível (FARIA *et al.*, 2020). Devido ao mau uso, autores como Barros e Amin (2008) têm falado em “desuso da água”, como forma de expressar que mesmo havendo uma quantidade disponível, sua qualidade tem piorado devido ao uso incorreto, sem moderação e agravado pelo lançamento de esgoto e contaminantes industriais diretamente em rios.

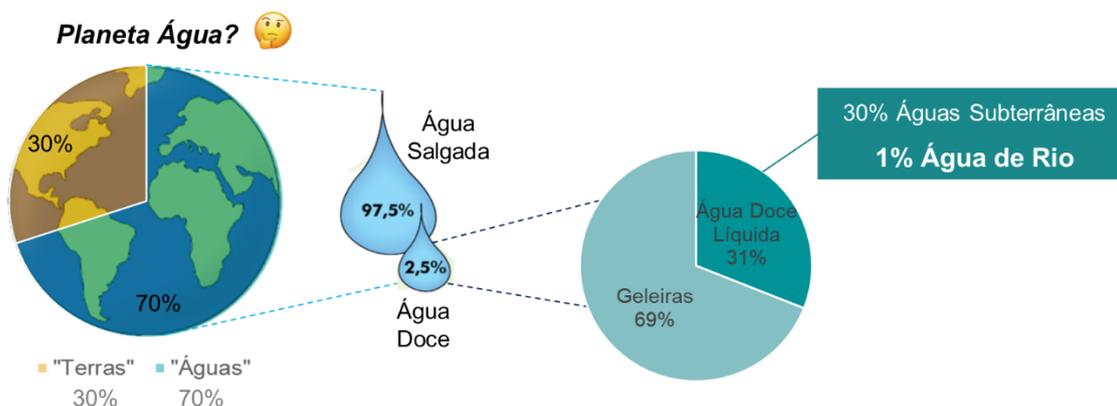
Figura 2: Evolução do consumo de água no Brasil e projeção até 2030



Fonte: Adaptado de ANA (2019).

Apesar de 70% do planeta Terra ser constituído de água, nem toda ela é apta para consumo humano, seja pela salinidade ou pelo estado físico, já que boa parte está em geleiras, restando uma pequena parcela que pode ser tratada para se tornar potável, conforme ilustrado na Figura 3. E embora pareça inesgotável, com o aumento populacional e exploração desordenada deste recurso, cada vez menos é respeitado o ciclo natural da água, dificultando ainda mais a sua disponibilidade (BARROS e AMIN, 2008).

Figura 3: Constituição do Planeta Terra

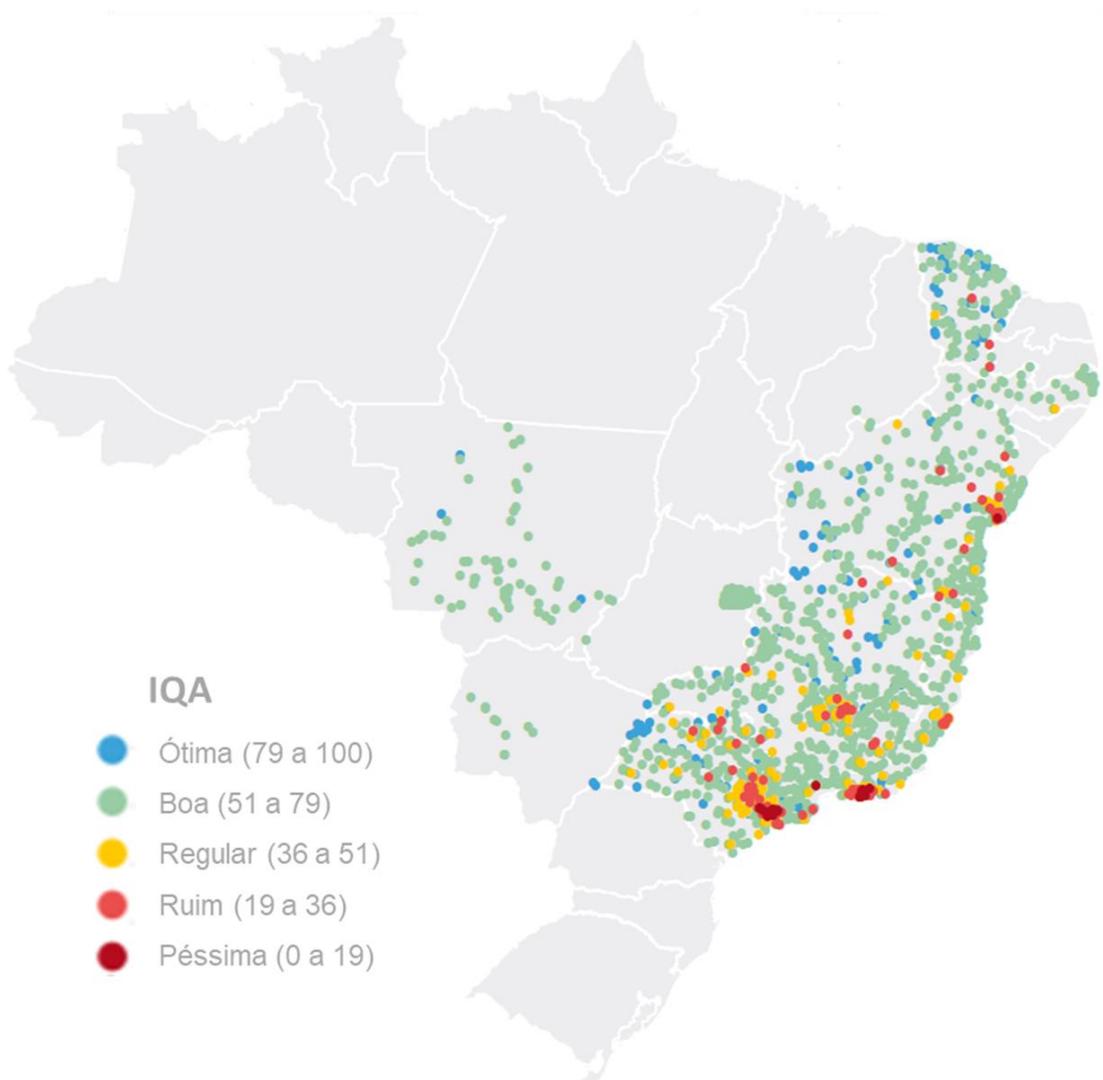


Fonte: Adaptado de MMA-SRHU (2007) apud POSSAS (2011); ANA (2019).

A maneira como a população tem vivido no século XXI está mudando a biosfera do Planeta Terra, e isso pode tornar a sobrevivência aqui insustentável no futuro. Isto pode ser uma das consequências da escassez hídrica, que não inclui apenas a falta de água, mas também a piora da sua qualidade nos corpos hídricos, o desequilíbrio entre a demanda e a disponibilidade, dentre outros fatores que podem ter vir a causar desde a redução da biodiversidade global até a competição entre diversos setores e segmentos da sociedade pela água (LAZAROVA e ASANO, 2013). Em relação à disputa pela água, este cenário já é vivenciado em países como Israel, e uma notícia do *site BBC News* já aponta que a falta de água afeta cerca de 40% da população mundial, o que tem causado conflitos e migração (MILNE, 2021).

Com relação à qualidade da água, no Brasil isto é monitorado pelo Índice de Qualidade da Água – IQA – e divulgado anualmente pela Agência Nacional de Águas. Este indicador é composto por nove parâmetros, citados na Tabela 1. Desta forma, a ANA mapeia a qualidade da água no Brasil, conforme ilustrado na Figura 4, na qual é observada que o problema de qualidade da água é agravado nos centros mais populosos, onde, conseqüentemente, se concentram indústrias, como na Região Sudeste.

Figura 4: Indicador de Qualidade de Água (IQA) no Brasil.



Fonte: ANA (2019).

Tabela 1: Parâmetros avaliados no Indicador de Qualidade de Água

Indicador	Importância
Temperatura da água	Peixes de rios não suportam lançamento de água em temperatura muito alta
pH	Deve ser próximo ao pH neutro para não afetar os peixes
Nitrogênio Total	São nutrientes limitantes para o crescimento de flora aquática em reservatórios. Altas concentrações podem causar crescimento excessivo de algas em rios, tornando água imprópria
Fósforo Total	
Oxigênio Dissolvido (OD)	Baixo OD na água pode apontar poluição por cargas orgânicas
Condutividade elétrica	Serve para relacionar com a quantidade de íons dissolvidos presentes na água.
Turbidez	Indica a possibilidade de passagem de luz através da água, e valores elevados indicam presença de sólidos ou pigmentos
Demanda Bioquímica de Oxigênio - DBO	Relaciona carga orgânica biodegradável presente na água. Valores elevados podem ser prejudiciais aos peixes pois haverá competitividade entre eles e outros micro-organismos em relação ao oxigênio
<i>Escherichia coli</i>	Avalia a contaminação fecal e o potencial da água transmitir doenças

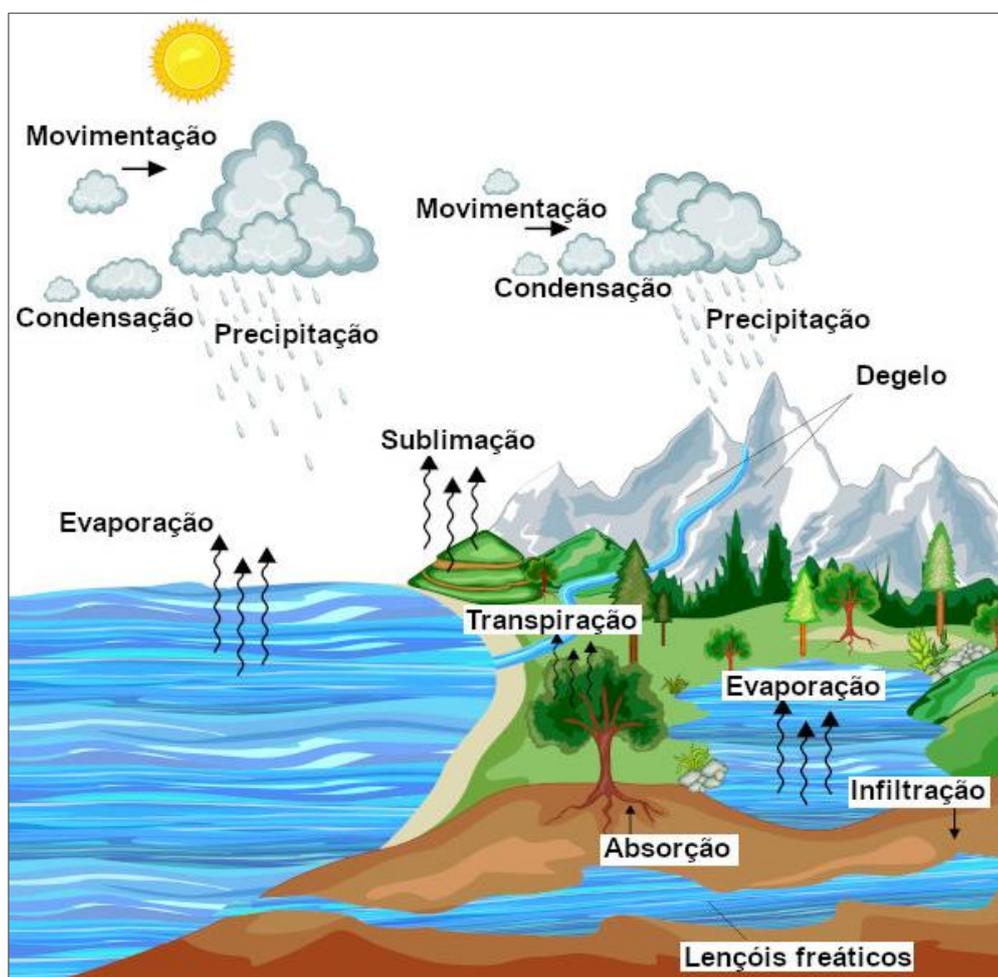
Fonte: Adaptado de ANA (2019).

A Agência Nacional de Águas divulga anualmente o relatório “Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil”, que é referência para o acompanhamento sistêmico da situação dos recursos hídricos no Brasil, apontando um conjunto de indicadores e estatísticas sobre a água, seus usos e como é gerida. Neste documento, do ano

de 2019, é explicado o que é o “ciclo natural da água” e como vem sendo impactado: este ciclo envolve a evaporação da água de oceanos, rios, solo e vegetação, que se condensam na forma de nuvens. Após isso, precipitam na forma de chuva, seguindo o fluxo dos rios em direção ao mar ou compondo as águas subterrâneas através da infiltração no solo, processo ilustrado na

Figura 5.

Figura 5: Ciclo Hidrológico



Fonte: SANTOS (2021).

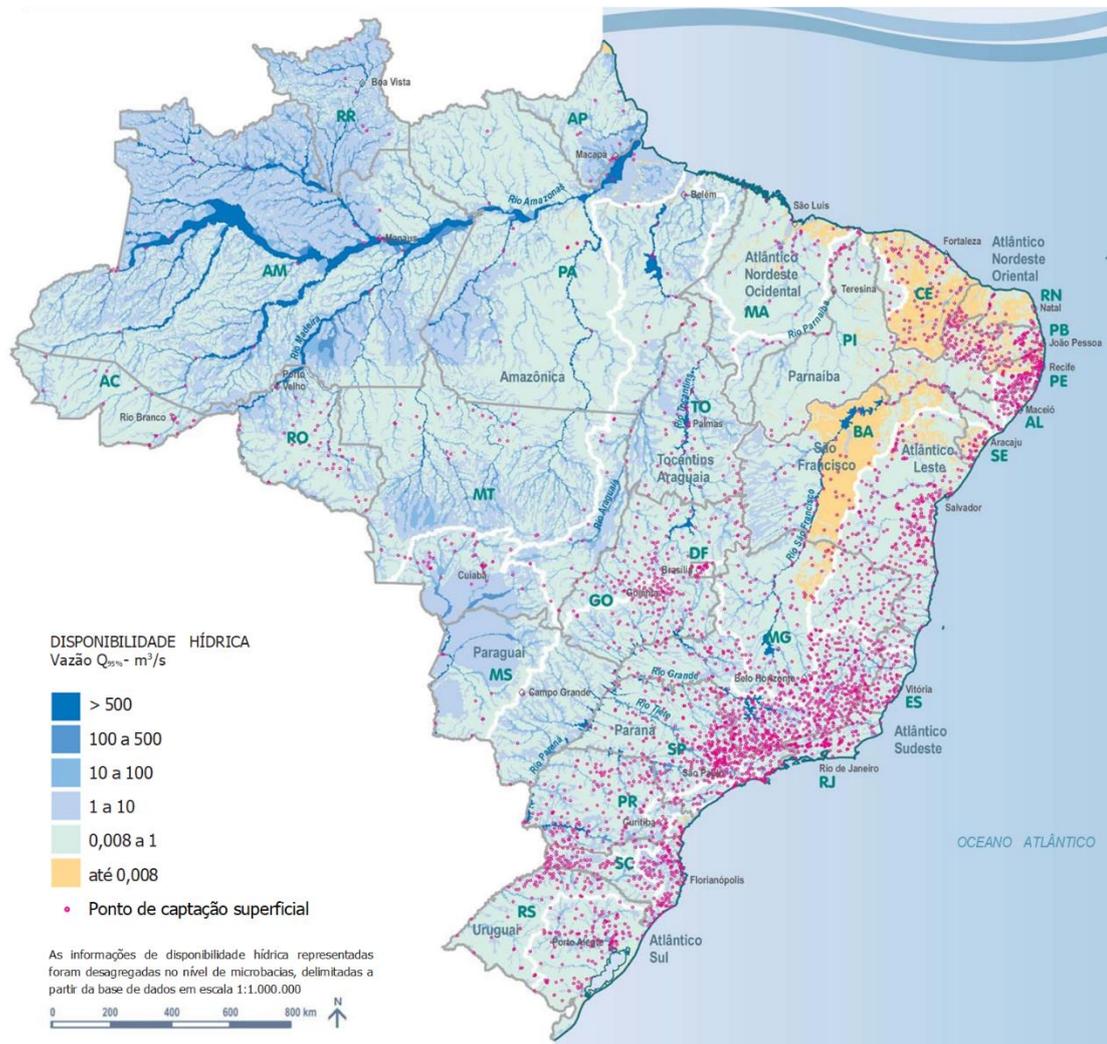
De acordo com o relatório Conjunturas de 2019 da ANA, a chuva é a principal contribuinte para a entrada de água no ciclo hidrológico, que quando precipita, escoam pelos rios, parte infiltra no solo e o restante evapora ou fica retido nas

vegetações. E devido a todo esse percurso, a água pode ser utilizada de diversas formas, e o ciclo se reinicia após encontrar o mar e evaporar. Este ciclo possui interferências externas como a energia térmica do sol e a força dos ventos, que é responsável por carrear o vapor d'água, além da força gravitacional, que tem influência nos fenômenos de precipitação, infiltração e deslocamento de massas de água (ANA, 2019). Fatores como o aumento da temperatura e desmatamento também tem impactando este processo natural.

O Brasil é um dos países com maior disponibilidade hídrica do mundo, com cerca de 8 a 12% da reserva mundial de água doce (MANCUSO e SANTOS, 2003; JADE e FERREIRA, 2022). Apesar disso, também tem sofrido com a escassez de água. Aqui, um dos fatores que corrobora para a falta de água nas regiões Sudeste e Nordeste, principalmente, é a distribuição naturalmente desigual deste bem, já que aproximadamente 80% da água disponível para consumo no país está concentrada na Região Amazônica, restando apenas 20% para utilização na outra parte do território nacional, que é habitada por mais de 90% da população brasileira (MANCUSO e SANTOS, 2003; ANA, 2019). Essa discrepância entre a disponibilidade hídrica e os pontos de maior captação no Brasil é ilustrada na Figura 6.

A questão da escassez hídrica é conhecida há tempos em regiões áridas e semiáridas, que sofrem com a seca, como é o caso de algumas cidades do Nordeste. No entanto, também tem afetado regiões com altos índices pluviométricos, mas que estão sendo insuficientes para suprir o crescimento demográfico desordenado, e expansão de setores como comércio, industrial e agrícola do local (SANTIN e GOELLNER, 2013). Não obstante, uma das consequências desta ocupação é a contaminação do curso hídrico tanto por descarte indevido de rejeitos quanto pela exploração do solo e recursos naturais em uma taxa superior à sua capacidade de renovação (FANTON *et al.*, 2008).

Figura 6: Disponibilidade Hídrica Superficial no Brasil versus captação.

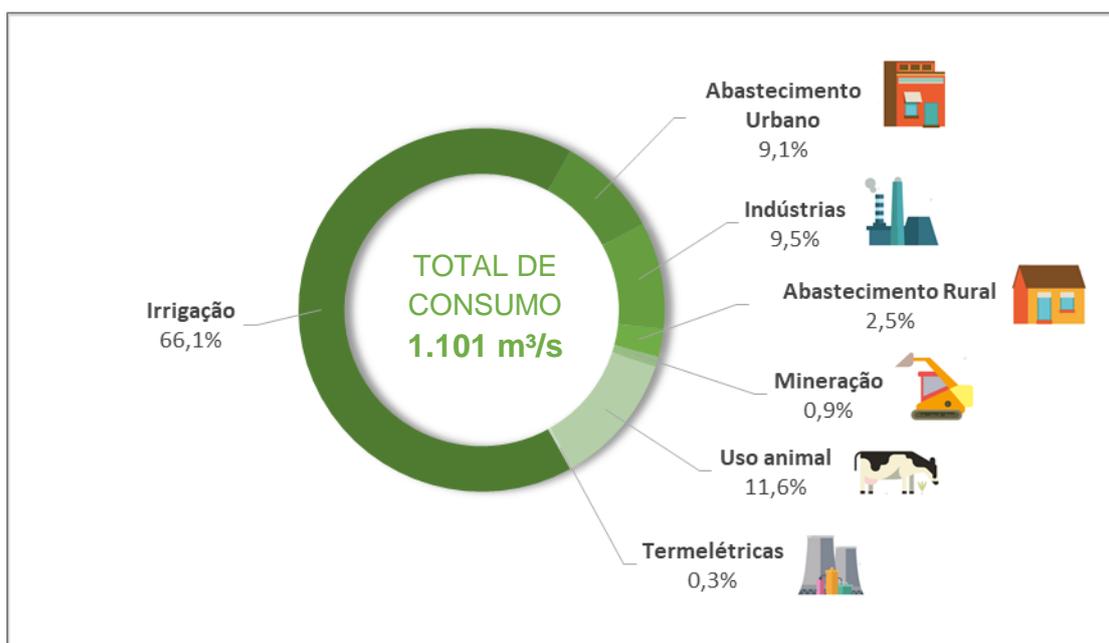


Fonte: ANA (2010).

Em relação ao consumo de água no Brasil, a irrigação é o setor com maior demanda, representando cerca de 72%, conforme ilustrado na Figura 7 (ANA, 2019). O consumo de água pelas indústrias tem valores próximos ao utilizado para o abastecimento urbano, o que acaba ocasionando uma “competição” entre estes setores, uma vez que os polos industriais geralmente se concentram próximo às regiões metropolitanas (ANA, 2019). Diante deste cenário, medidas para racionalização e uso consciente da água tem ganhado importância tanto em fóruns mundiais quanto em grandes indústrias, empresas e empreendimentos imobiliários, visando propor soluções para o problema da água (VENANCIO *et al.*, 2011). Dentre as abordagens, estão a redução de perdas, o uso racional, a gestão

ambiental e a obtenção de água não-potável a partir de novas fontes como dessalinização e o reúso (ASSEBURG, 2018).

Figura 7: Total de água consumida no Brasil por setor – média anual de 2018



Fonte: Adaptado de ANA (2019).

Para um maior controle do uso da água, em 1997 foi instituída a Política Nacional de Recursos Hídricos – PNRH, através da Lei Nº 9.433 de 08 de janeiro de 1997. Esta Política tem o objetivo de assegurar, tanto para a geração atual quanto para as futuras a disponibilidade de água em padrões de qualidade para adequados. Para isso, nesta lei foi estabelecido que a água é um bem de domínio público, sendo um recurso natural limitado e que possui valor econômico, passando então a cobrar pelo seu uso, a fim de estimular a racionalização (SAUTCHÚK *et al.*, 2011). A cobrança também serve como incentivo à prática de reúso de água, pois com a redução de captação, o usuário terá uma cobrança menor – e segundo Sautchúk *et al.* (2011), dependendo das vazões de captação e reúso utilizadas, a redução com o custo de captação pode cobrir os custos com a instalação do sistema de reúso na unidade industrial.

A partir da Lei Federal Nº 9.433/1997 também foi criado o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos – SINGREH, que é regido pelo Poder

Público, e institui alguns instrumentos de controle sobre o uso da água, como a necessidade de outorga para direito de uso hídrico, além da criação de um Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos e dos Planos de Recursos Hídricos (BRASIL, 1997; SAUTCHÚK *et al.*, 2011). Em 2000, a Lei Federal Nº 9.984/2000 instituiu a Agência Nacional de Águas – ANA – como responsável por implementar e articular com os Comitês de Bacia Hidrográfica, além de cobrar pelo uso dos recursos hídricos da União (BRASIL, 2000; SAUTCHÚK *et al.*, 2011).

Tendo em vista o cenário de crise hídrica, este trabalho aborda uma alternativa de reutilização de água para indústrias que possuem em sua instalação unidades de tratamento de efluentes e sistema de resfriamento, onde é possível tratar o este efluente em uma nova unidade para adequar seus parâmetros e reutilizá-lo como uma das fontes de reposição de água da bacia da torre de resfriamento, reduzindo assim a quantidade de água limpa captada para este fim. Para esta abordagem, nas próximas 3 subseções será apresentada uma revisão bibliográfica sobre água de reúso, tratamento de efluentes industriais e água para torre de resfriamento.

2.2 Água de reúso

De acordo com a *Environmental Protection Agency of United States – EPA*, o reúso de água é a prática de recuperação de água de diversas fontes, que pode ou não ser tratada, e isso depende tanto da origem desta água residual como na finalidade a qual pretende-se reaproveitá-la, sendo assim, uma alternativa para minimizar a captação de água potável. Ainda de acordo com a EPA, podem ser fontes de água de reúso aquelas residuais do abastecimento municipal, água de processos e de resfriamento industrial, de fontes agrícolas ou mesmo aquelas produzidas durante a extração de recursos naturais.

As primeiras diretrizes sobre o reúso de água no Brasil foram publicadas em setembro de 1997 pela NBR 13.969/1997, publicada pela Agência Brasileira de Normas Técnicas – ABNT – como uma alternativa local para o tratamento de esgoto utilizando tanques sépticos. Nesta norma foram estabelecidas condições para o

reúso do esgoto de origem doméstica para fins não potáveis, mas sanitariamente seguros, como a irrigação de jardins e lavagem de pisos e veículos (ABNT, 1997). No entanto, este documento não citava nenhuma diretriz para a indústria.

Na NBR 13.969/1997, é estabelecido o grau de tratamento o qual o esgoto deve passar, a depender do tipo de reúso que será realizado. Para isso, as aplicações foram divididas em classes de modo a serem estabelecidos limites máximos permitidos de certos parâmetros, conforme explicitados na Tabela 2.

Tabela 2: Classificações para águas de reúso conforme NBR 13.969/1997

Classe	Aplicações	Limite de parâmetros
Classe 1	Lavagem de carros e outros usos que requerem o contato direto do usuário com a água, com possível aspiração de aerossóis pelo operador, incluindo chafarizes	Turbidez: < 5 NTU Coliformes fecais: < 200 NMP/ 100 mL SST: < 200 mg/L pH: 6,0 - 8,0 Cloro residual: 0,5 – 1,5 mg/L
Classe 2	Lavagens de pisos, calçadas e irrigação de jardins, manutenção dos lagos e canais para fins paisagísticos, exceto chafarizes	Turbidez: < 5 NTU Coliformes fecais: < 500NMP/ 100 mL SST: < 200 mg/L pH: 6,0 - 8,0 Cloro residual: > 0,5 mg/L
Classe 3	Reúso nas descargas dos vasos sanitários	Turbidez: < 10 NTU Coliformes fecais: < 500 NMP/ 100 mL
Classe 4	Reúso nos pomares, cereais, forragens, pastagens para gados e outros cultivos através de escoamento superficial ou por sistema de irrigação pontual	Coliformes fecais: <5000 NMP/ 100mL OD: > 2,0 mg/L

Fonte: Adaptado de ABNT (1997).

Em um breve histórico em relação à reutilização de água, os Estados Unidos se destacaram iniciando esta técnica em 1940. Já no Brasil este tema ganhou maior relevância a partir de 1992, com a divulgação de um relatório com recomendações de reutilização de água pela Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental de São Paulo - ABES-SP (ABIQUIM, 2016). Anos mais tarde, tendo como base a já existente NBR 13.969/1997, foi criada em 2005 a Resolução N° 54 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos – CNRH, com o objetivo de estabelecer as modalidades, diretrizes e critérios para o reúso de água com fins não-potáveis, agora incluindo o contexto industrial.

Como citado no primeiro parágrafo desta seção, apesar de a EPA definir que a água de reúso pode ser tratada para ser utilizada como uma fonte potável, no Brasil isto ainda não é permitido, segundo a Resolução N° 54 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos, de 28 de novembro de 2005 (IBAMA, 2006).

A disponibilidade de água no Brasil para as indústrias ainda não tem sido um problema, porque, teoricamente, este recurso é abundante no país. No entanto, após alguns cenários de escassez hídrica e poluição, tem aumentado a iniciativa por parte das empresas, principalmente as de maior porte, em investimentos em novos modelos para o gerenciamento da água, bem como em técnicas para minimizar o seu desperdício e em tratamentos que possibilitem a sua reutilização (SAUTCHÚK *et al.*, 2011). Neste contexto, para apoiar o setor industrial quanto as possibilidades do reúso de água em suas instalações, foi publicado em 2011 o Manual de Orientações para o Setor Industrial acerca da conservação e reúso da água, a partir de uma iniciativa da Federação de Indústrias de São Paulo – FIESP em parceria com o Centro de Indústrias de São Paulo – CIESP, além do apoio de outras organizações, elaborado por Sautchúk *et al.*

A reciclagem de água sempre foi realizada na natureza através do ciclo hidrológico, que envolve a evaporação, a infiltração e a precipitação de chuvas (SAUTCHÚK *et al.*, 2011). No entanto, o conceito “reúso de água” vem sendo adotado quando é praticado pela ação humana, que ocorre de forma planejada, avaliando as fontes possíveis de captação de água residual e estudo de quais tratamentos necessários para que esta água tenha a qualidade necessária para a aplicação a qual ele objetiva. O reúso de água é uma vertente na qual existem cada

vez mais estudos para viabilização, tendo em vista o receio à crise hídrica e a possibilidade de racionalização ser um gargalo para a produção industrial.

Ainda de acordo com o manual supracitado (SAUTCHÚK *et al.*, 2011), algumas definições relevantes a este estudo são citadas na Tabela 3:

Tabela 3: Definições acerca do reúso de água

Conceito	Definição
Água de reúso	É a água residuária que se encontra dentro dos padrões exigidos para sua utilização
Reúso direto de água	É o uso planejado de água de reúso, conduzido ao local de utilização, sem lançamento ou diluição prévia em corpos hídricos superficiais ou subterrâneos
Reúso indireto de água	Uso de água residuária ou água de qualidade inferior, em sua forma diluída, após lançamento em corpos hídricos superficiais ou subterrâneos
Reúso em cascata	Aplicação direta do efluente gerado em um processo em uma etapa posterior, sem necessidade de tratamento.
Reúso parcial de efluentes	Modalidade de reúso em cascata na qual parte da vazão da água residuária é diluída com água de padrão superior
Reúso de efluentes tratados	É a utilização de efluentes que foram submetidos a tratamento
Reúso de efluentes após tratamento adicional	Alternativa de reúso direto de efluentes tratados que necessitam de sistemas complementares de tratamento para reduzir a concentração de algum contaminante específico

Fonte: Adaptado de Sautchúk *et al.* (2011).

Como destacado na Tabela 3, a água de reúso é definida como a reutilização de água residuária, sendo esta proveniente de diversas fontes, como o esgoto, água descartada após consumo, efluentes de origem industrial tratados ou não, dentre outros, cujas formas de reutilização podem ser direta, quando a fonte da

água de reúso é do próprio local, ou indireta, quando é captado de um rio ou corpos hídricos, por exemplo.

Os autores Hespanhol *et al.* (2015) adotam outras duas definições para o caso de reutilização de efluentes industriais como água de reúso: o reúso macro externo, que é definido como a reutilização de efluentes tratados provenientes de estações administradas por outras indústrias ou concessionárias, e o reúso macro interno, que é definido como o uso na própria indústria dos efluentes gerados por ela em suas atividades

Em relação ao reúso macro interno de efluente industrial, de acordo com os conceitos do Manual de Orientações para o Setor Industrial publicado pela FIESP e CIESP em 2011, pode ser realizado de duas formas (SAUTCHÚK *et al.*, 2011):

- Reúso em cascata: este é o caso da aplicação direta do efluente de um processo industrial em outra etapa, sem a necessidade de tratamento, pois os padrões de qualidade da água residual já estão dentro dos exigidos para esta aplicação.
- Reúso de efluentes tratados: consiste na reutilização de efluentes em outros processos industriais, mas que foram previamente submetidos a um processo de tratamento.

A recomendação dos especialistas, conforme citado no manual, é que o reúso em cascata seja priorizado, uma vez que desta forma tanto a captação de água limpa quanto o volume de efluentes a ser tratado podem ser minimizados. Para este tipo de uso deve-se conhecer as características do efluente disponível, através de análises laboratoriais, bem como da qualidade da água necessária para o local na qual ela será destinada (SAUTCHÚK *et al.*, 2011).

Por outro lado, Hespanhol *et al.* (2015) alerta para o fato de que geralmente os efluentes gerados nos processos industriais são coletados em sistemas centralizados de drenagem, o que dificulta o reúso em cascata. Então, uma alternativa para isso é o reúso parcial de efluentes, que é uma variação do reúso em cascata e consiste na adaptação do sistema de coleta de efluentes, de modo que uma parte do efluente menos contaminada seja desviada e não se misture aos demais. Em síntese, o reúso parcial consiste na utilização de uma parcela do

efluente gerado, sendo esta prática recomendada quando há variação da concentração de contaminantes no efluente com o tempo, como ocorre, por exemplo, durante operações de lavagem de equipamentos.

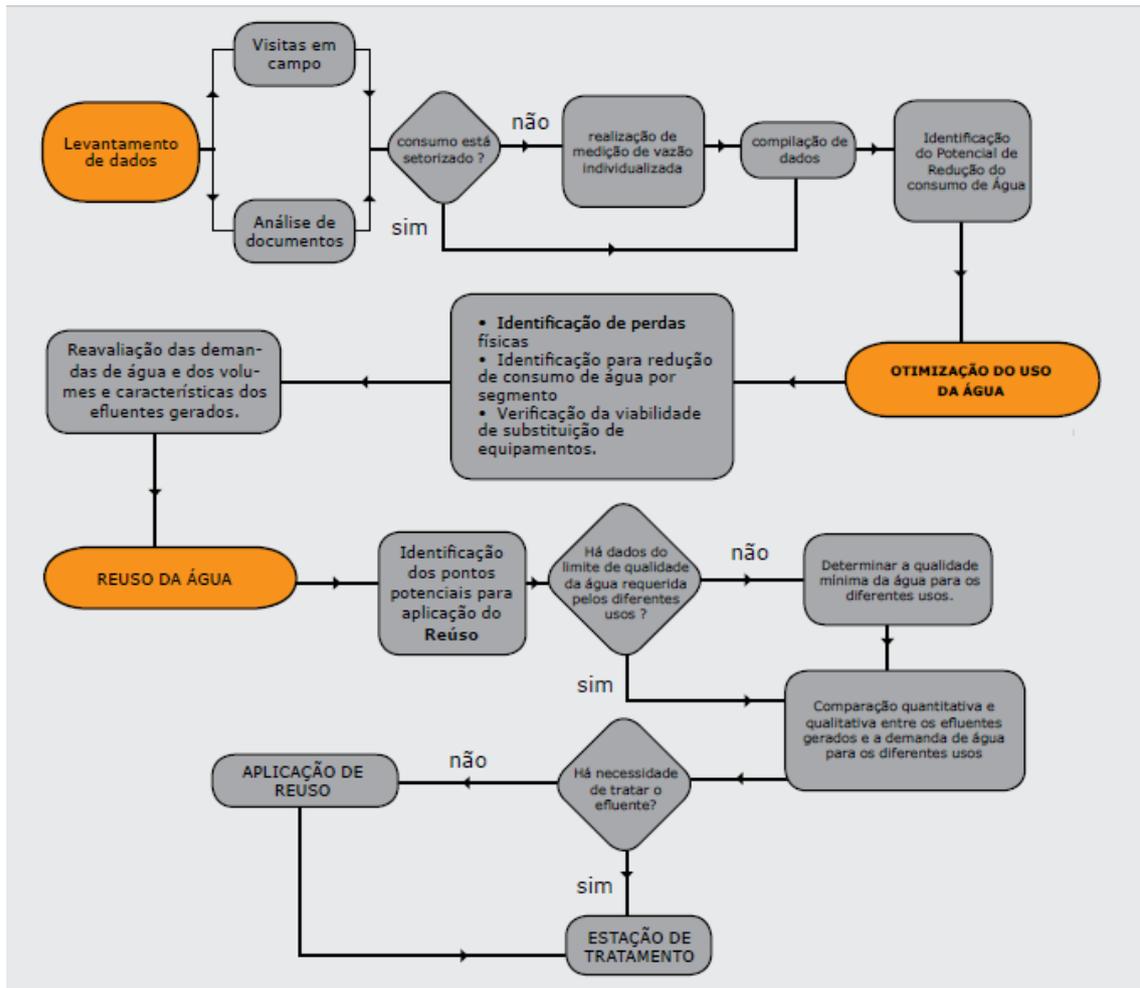
Segundo o Manual de Orientações para o Setor Industrial (SAUTCHÚK *et al.*, 2011), novos instrumentos de gestão, a racionalização e o investimento em técnicas de tratamento da água tem potencial para reduzir os custos de operação industrial em empresas que necessitam de grande demanda, além de promover a preservação e conservação dos recursos hídricos.

Antes de iniciar a prática de reúso, ou concomitante a ela, as indústrias devem verificar possibilidades de reduzir seu consumo. Uma maneira identificar essas fontes para alcançar este objetivo é através da utilização de ferramentas de gestão ambiental e de recursos hídricos, que são importantes tanto para controle interno da empresa quando para fiscalização do poder público.

Um modelo conhecido para facilitar este processo de identificação das fontes de consumo e implementação da política de reúso de águas nas indústrias é o Plano de Conservação e Reúso de Água – PCRA, citado no Manual de Conservação e Reúso de Água Industrial (SEBRAE, 2007), onde é exposto o Diagrama PCRA, conforme apresentado na Figura 8. Este é um fluxograma que contém as etapas chave para o estudo sobre a gestão dos recursos hídricos em uma indústria e começa desde o básico, que é conhecer a sua indústria, saber se as fontes de consumo de água são conhecidas, verificar em campo se há vazamentos, além de estratégias para a otimização do consumo, e só então é apresentado a metodologia para implementação do reúso de águas.

A utilização de ferramentas deste tipo como o Diagrama PCRA auxiliam na avaliação criteriosa do uso da água, desde a investigação das fontes de consumo, redução de perdas e do consumo, aumento da eficiência no uso, além de identificar possíveis fontes para a reciclagem e reutilização da água. Tendo em vista a escassez hídrica, a conservação e o gerenciamento deste recurso são importantes para garantir o desenvolvimento sustentável da população, indústrias e outros setores.

Figura 8: Diagrama para desenvolvimento do PCRA



Fonte: SEBRAE (2007).

Como instituído na Política Nacional de Recursos Hídricos, para o uso legal da água por indústrias, é necessário que esta tenha outorga da instituição ambiental Estadual ou Nacional, a depender da bacia hidrográfica utilizada. A prática de reúso, por não interferir diretamente no corpo hídrico, não necessita de nova outorga. No entanto, por alterar o balanço hídrico do empreendimento e da região, tanto em quantidade como qualidade, deve-se comunicar ao órgão ambiental para que seja feita alteração na outorga já existente. Tendo em vista a cobrança pelo uso da água, quanto maior for a taxa de reúso de uma empresa, menor será sua captação do corpo hídrico, o que irá, conseqüentemente, reduzir seus custos variáveis mensais.

De acordo com SANTOS *et al.* (2020), apesar de o reúso de água ser uma estratégia viável para atenuar a crise hídrica, ainda não há no Brasil uma legislação específica e válida em todo o território acerca dos padrões de qualidade de água para fins de reúso, mas sim diversos normativos e documentos reguladores de caráter Municipal ou Estadual. No estudo realizado por esses pesquisadores, foram abordados 11 documentos regulatórios relacionados ao reúso de água em diferentes regiões do Brasil, com o objetivo de comparar os padrões de qualidade de água exigidos em cada um deles em relação às contaminações microbiológicas (Coliformes termotolerantes e *Escherichia coli*) e físico-químicas (DBO, Sólidos, Turbidez e Cloro Residual).

Através dessa abordagem, SANTOS *et al.* (2020) concluíram que os documentos legais que abordam o uso e reúso de água apresentam valores discrepantes para um mesmo tipo de parâmetro (DBO, coliformes fecais, pH, dentre outros), além apresentarem, em alguns casos, restrições severas em relação ao reúso, o que dificultaria a aplicabilidade desta prática no país, tanto pelos riscos e restrições expostas, quanto pelas divergências das normas e regulamentos aplicados em cada município ou estado, quando existem. Na Tabela 4 são relacionados os documentos estudados pelos autores a fim de conhecer os normativos existentes e seus locais de aplicação.

Tabela 4: Documentos normativos para padronização da água de reúso no Brasil e suas aplicabilidades conforme região

Nome	Tipo de documento	Locais de Validade
Programa Interáguas 2018	Normativo/ Norteador	Federal
Norma Brasileira NBR 16.783/2019	Normativo/ Norteador	Federal
Programa de Pesquisa em Saneamento Básico (PROSAB)	Normativo/ Norteador	Federal
Resolução CONAMA nº 357/2005	Legal	Federal

Tabela 4: Documentos normativos para padronização da água de reúso no Brasil e suas aplicabilidades conforme região

Nome	Tipo de documento	Locais de Validade
Resolução CONAMA nº 274/2000	Legal	Federal
Resolução Conjunta SVDS/SMS nº 09/2014	Legal	Campinas/ SP
Resolução CONERH nº 75/2010	Legal	Bahia/ BA
Resolução COEMA nº 02/2017	Legal	Ceará/ CE
Resolução Conjunta SES/SIMA nº 01/2020	Legal	São Paulo/ SP
Resolução CONSEMA nº 419/2020	Legal	Rio Grande do Sul/ RS
Deliberação Normativa CERH nº 65/ 2020	Legal	Minas Gerais/ MG

Fonte: Adaptado de SANTOS et al. (2020).

Como uma alternativa à esta falta de padronização nas normas de reúso de água no Brasil, entre os anos de 2016 e 2017 foi firmado um contrato entre o Instituto Interamericano de Cooperação para a Agricultura – IICA e o Ministério das Cidades, a partir do Consórcio CH2M Hill BV, para a elaboração de uma “Proposta de plano de ação para instituir uma Política de Reúso de Efluente Sanitário Tratado no Brasil”. Este foi um amplo estudo desenvolvido como uma das alternativas dentro do Programa de Desenvolvimento do Setor Água – Interáguas – e encontra-se disponível no site do Ministério do Desenvolvimento Regional – MDR – subdividido em seis estudos (IICAA, 2017):

- Produto I: Plano de Trabalho Ajustado (RP00)
- Produto II: Relatório de Experiências com Reúso (RP01A)
- Produto III: Relatório de Critérios de Qualidade (RP01B)
- Produto IV: Relatório de Potencialidades de Reúso (RP01C)

- Produto V: Relatório de Modelos de Financiamento (RP02A)
- Produto VI: Relatório de Plano de Ações/Política de Reúso (RF)

O Produto II fala sobre as experiências do reúso e foi o documento norteador para os 4 estudos posteriores, pois foi onde ocorreu o mapeamento dos tipos de reúso de água aplicados no Brasil e no exterior, citando seus benefícios ambientais, sociais e econômicos, os gargalos observados na implementação das políticas de reúso a nível mundial, além de citar as melhores práticas visualizadas na aplicação do reúso em outras nações, comparando com a realidade brasileira. Este estudo é bastante relevante pois também apresenta o nível de tratamento exigido para a água de reúso dependendo de sua aplicabilidade, sendo válido a nível nacional, citando também tecnologias para o tratamento e adequação do esgoto sanitário para reúso.

O Produto III tem ênfase nas questões legais para levantamento das normas já existentes para água de reúso no Brasil, nos âmbitos federal e estadual, com o foco em verificar as lacunas a serem abordadas para, posteriormente, servir como base para a proposta de Política de Reúso, válida em todo o território nacional, com os padrões de qualidade para água de reúso para fins potáveis e não potáveis, com o objetivo de nortear sua utilização no país em um documento único que seja coerente com as políticas e leis de saneamento e recursos hídricos já existentes. O Produto III serve como base para elaboração do Plano de Ações para as políticas de reúso, abordado em outros relatórios técnicos do IICA.

Neste projeto de elaboração de uma proposta para única para instituir a Política de Reúso no Brasil (IICAA, 2017) é abordada a vertente de reúso a partir do efluente sanitário tratado, sendo este constituído pelo despejo líquido constituído de esgotos doméstico e industrial, água de infiltração e a contribuição pluvial parasitária, conforme a NBR 9.648/1986 (ABNT, 1986; IICAA, 2017).

No estudo realizado para a criação da proposta para instituir a Política de Reúso no Brasil (IICAA, 2017), foram levantadas as principais modalidades de reúso potável e não-potável ao redor do mundo, apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5: Principais aplicações de água de reúso mundialmente

Modalidades de Reúso Típicas		Aplicações
Não potável	Agrícola	Irrigação para produção agrícola (culturas forrageiras, hortaliças, etc.); Florestas plantadas
	Urbano	Irrigação paisagística (parques, cemitérios, escolas, centros comerciais, residências, rodoviárias, etc.); Sistemas de ar-condicionado; Bacias sanitárias em edifícios; Desobstrução de rede de esgoto; Sistema de combate a incêndio; Construção civil; Lavagem de veículos
	Industrial	Torres de resfriamento; Caldeiras; Processo; Construção civil
	Melhorias ambientais e recreacionais	Aquicultura; Lagoas; Manutenção de vazão de cursos de águas; Melhoria de banhado
	Recarga de aquífero	Controle de intrusão de cunhas salinas; Controle de subsidência; Recarga de aquífero (não potável)
Potável	Reúso potável indireto	Uso para suplementar fontes de água potável (corpos hídricos superficiais ou subterrâneos)
	Reúso potável direto	Abastecimento direto da rede de água bruta ou água tratada

Fonte: Adaptado de Kubler et al. (2016).

Conforme citado na tabela, há países que possibilitam o reúso de água diretamente como fonte potável, como nos Estados Unidos. No Brasil, as aplicações são apenas não potáveis, conforme estabelece a normas ABNT 13.969 e Resolução Nº 54 do CNRH (ABNT, 1997; IBAMA, 2006).

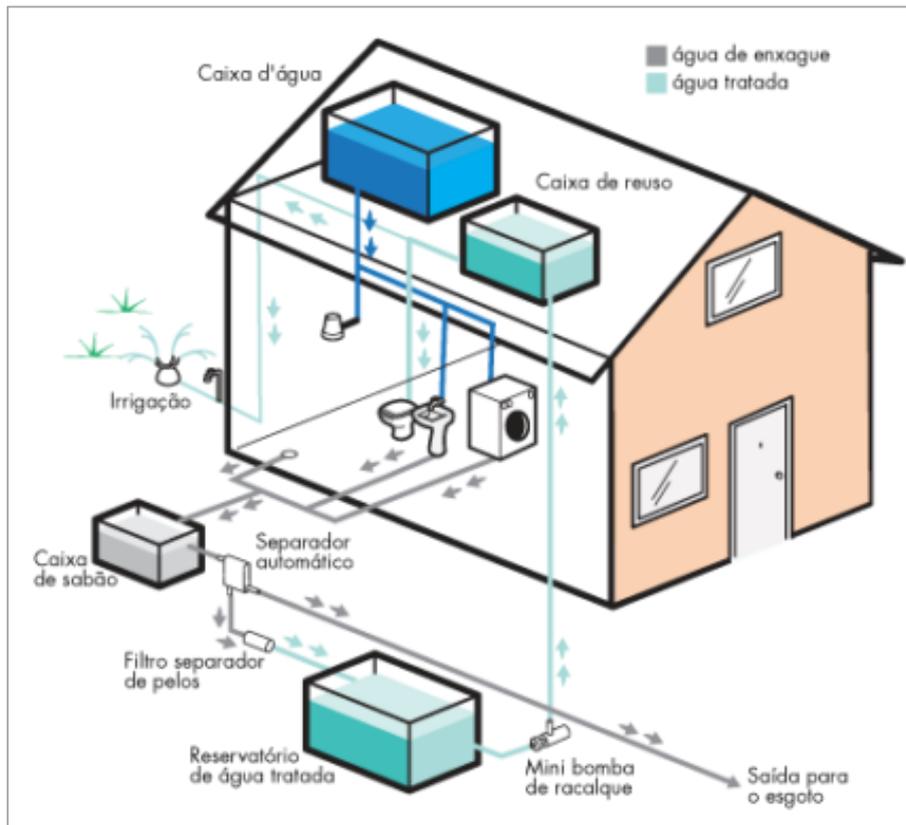
A partir do efluente tratado, há diferentes possibilidades de aplicação para esta água de reúso, a depender do nível de tratamento aplicado, que pode ser secundário, terciário ou avançado, cujas particularidades serão tratadas na seção 2.3 desta revisão bibliográfica.

De acordo com Kubler *et al.* (2016), os Estados Unidos é o país que mais utiliza água de reúso no mundo, com 7,6 milhões m³/dia, segundo levantamento realizado em 2008. Lá, as formas mais comuns de reúso variam de acordo com o Estado – na Flórida, por exemplo, a maior utilização são em irrigação e paisagismo, seguido do reabastecimento de aquíferos e uso industrial. Já no Califórnia, a aplicabilidade que ganha destaque é na agricultura.

Na proposta do IICA é enfatizado o reúso a partir de efluente sanitário. No entanto, há outras formas de reutilização de águas que não aquelas provenientes do esgoto sanitário como, por exemplo, as chamadas “águas cinzas”, que são definidas como a parcela do esgoto que não tem contribuição da rede sanitária, sendo de origem do uso de banheiras, chuveiros, lavatórios, máquinas de lavar roupas e escritórios comerciais (LIMA, 2010), conforme esquema ilustrativo da Figura 9. Na dissertação de Lima (2010), é defendida e exemplificada a utilização de águas cinzas e pluviais em edifícios residenciais como uma solução sustentável ao abastecimento de bacias de vasos sanitários e torneiras para irrigação de jardins e lavagem de áreas comuns.

Os autores Wintgens *et al.* (2012) defendem a aplicação da água de reúso como uma das possibilidades para o gerenciamento do recurso hídrico. Segundo eles, a água residual recuperada tem potencial de suprir diversos fins nos quais hoje a água doce é utilizada, mesmo que em alguns casos seja necessário um pré-tratamento quando é exigida uma qualidade de água superior. Os tipos de reúso podem ser para irrigação no setor agrícola, aplicações urbanas e domésticas, uso industrial como água de resfriamento e complementar à alimentação de caldeiras, dentre outros.

Figura 9: Exemplo de reutilização de "águas cinzas" em domicílio



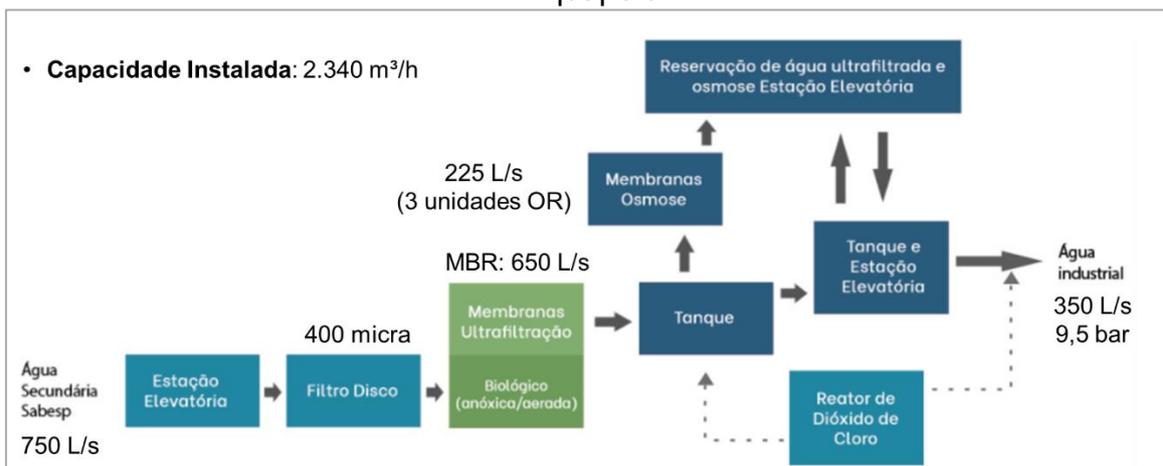
Fonte: EOS (2019).

Uma alternativa simples de reúso de água é a captação de água de chuva e seu armazenamento em tanques para posterior utilização em fins menos nobres como lavagem de pisos ou irrigação de jardins, o que já economiza captação de água para este fim (SAUTCHÚK et al., 2011). Neste caso, pode não ser necessário tratamento adicional, ou este pode ser bem mais simples e barato do que quando comparado à qualidade da água exigida para torre de resfriamento.

Outro exemplo de sucesso quando se fala de reúso de água no Brasil, agora na área industrial, é Projeto Aquapolo, uma estação de tratamento de água de reúso que atende ao Polo Petroquímico da Região do ABC Paulista. Este projeto consiste no tratamento de água residuária a partir do esgoto tratado pela SABESP e sua posterior distribuição para osuprimento de dez empresas do complexo industrial do ABC. O Projeto Aquapolo foi inaugurado em 2012 e tem um potencial de economizar quase 2,6 bilhões de litros de água potável mensalmente (FERREIRA et al., 2022).

O Projeto Aquapolo consiste no envio de 30% do efluente tratado pela SABESP, após o tratamento secundário, para a estação de tratamento de água de reúso da BRK Ambiental. Para garantia da qualidade da água de reúso, os parâmetros do esgoto recebido pela SABESP são continuamente monitorados para que, caso haja algum desvio, sejam tomadas ações corretivas e isso não impacte a qualidade do efluente tratado. A unidade de tratamento da água de reúso do complexo consiste possui decantadores, filtros de disco para remoção de sólidos, tanque biológico para remoção de matéria orgânica, nitrogênio e fósforo, além de membranas de ultrafiltração – UF, que é responsável pela retenção de vírus, bactérias e outros sólidos. A partir desta etapa a água já está límpida, mas para atender à exigência das indústrias quanto à condutividade, parte desta água passa pelo tratamento por Osmose Reversa – OR, que tem o objetivo de reduzir a concentração de sais dissolvidos na água. A água de reúso enviada ao complexo petroquímico é, então, um *blend* da água oriunda da unidade de membranas de filtração complementada pela água dessalinizada da Osmose Reversa. Essa mistura é então armazenada em tanque e há adição de Dióxido de Cloro para desinfecção (FERREIRA *et al.*, 2022; AQUAPOLO, 2022). Na Figura 10 é ilustrado o processo de tratamento utilizado no Projeto Aquapolo.

Figura 10: Esquema da Estação de tratamento de água de reúso do Projeto Aquapolo



Fonte: Adaptado de Aquapolo (2022).

Quando se fala em reúso de água no Brasil, ainda deve-se tomar cuidado pois o reúso potável não é autorizado, conforme a Resolução Nº 54/2005 do CNRH, e isso acaba sendo uma restrição para a sua aplicabilidade em torneiras de banheiro e chuveiros, por exemplo, sendo necessário um sistema de armazenamento exclusivo para água de reúso, que em residências ou atividades industriais, pode ser utilizado nas caixas acopladas para descarga de vasos sanitários. Espera-se que no futuro esta modalidade seja permitida, visto que as técnicas de tratamento existentes atualmente garantem uma água de excelente qualidade, por vezes superior até a oferecida pelas concessionárias responsáveis pelo fornecimento de água potável à população. Em relação às autorizações legais, é recomendável, segundo o Manual de Gestão Eficiente de Recursos Hídricos (ABIQUIM, 2016) que o projeto de reúso de água industrial seja avaliado e informado ao órgão ambiental antes de sua implementação, além de ser necessário o atendimento da legislação ambiental mais restritiva, seja federal, estadual ou municipal.

Para o planejamento de um sistema de reúso, é necessário conhecer as características físico-químicas da água ou efluente a ser utilizado, de modo a não expor as pessoas a riscos ou mesmo piorar a situação operacional do sistema no qual será aplicado. Com este objetivo, devem ser avaliadas características como a vazão disponível para reúso, contaminantes biológicos como microrganismos e elementos inorgânicos como cálcio e sódio, sólidos orgânicos, inorgânicos, suspensos e a toxicidade deste efluente (ABIQUIM, 2016).

O Manual de Gestão de Recursos Hídricos elaborado pela ABIQUIM em 2016 apresenta diversas diretrizes que devem ser controladas em um sistema de água de reúso a partir de efluente industrial. Levando-se em consideração que ele é planejado para uma determinada característica de efluente, o mesmo deve ser monitorado para que não haja contaminações não-previstas, já que poderiam impactar na qualidade da água de reúso caso o sistema não seja capaz de contê-la. Outra questão importante é em relação ao armazenamento da água de reúso, que deve ser adequado tanto para evitar a sua contaminação quanto para evitar que haja conexão deste tanque para outros locais que exijam uso de água para fins potáveis.

Também é recomendado pelo manual a sinalização das tubulações de água de reúso, de modo a garantir a segurança das pessoas, que devem conhecer o fluido que ali passa. Além disso, nos pontos de utilização deve ser instalada sinalização adequada conforme as normas de projeto, no formato de placas ou etiquetas, que sinalizem “ÁGUA DE REÚSO, NÃO POTÁVEL” (ABIQUIM, 2016).

2.3 Tratamento de efluentes industriais

Os efluentes industriais são líquidos aquosos gerados durante seu processo produtivo e que podem ser lançados na rede pública de esgoto, em corpos hídricos ou em estações de tratamento de efluentes. No entanto, antes da destinação deste efluente, a empresa é responsável por tratá-lo de modo a garantir que os parâmetros exigidos pelo órgão ambiental fiscalizador estejam dentro da faixa limite estabelecida (FONTOURA, 2021).

Em relação aos parâmetros dos efluentes para lançamento no corpo hídrico, os limites podem ser encontrados em normas, resoluções ou diretrizes de órgãos ambientais federais, estaduais ou municipais, e a empresa deve seguir aquele que apresentar as exigências mais restritivas, mesmo que seja de uma hierarquia municipal e o órgão fiscalizador seja estadual, por exemplo.

2.3.1. Legislações

Para efluentes líquidos, as regulações existentes e suas esferas de atuação são citadas a seguir, tanto em âmbito nacional, como focado no Rio de Janeiro, Estado no qual está localizada a indústria petroquímica que é utilizada como estudo de caso no capítulo três deste trabalho (IBRAM, 2020; FONTOURA, 2021; CONAMA, 2021):

- **Âmbito Federal:**

- Norma NBR 9.800/1987 - Critérios para Lançamento de Efluentes Líquidos Industriais no Sistema Coletor Público de Esgoto Sanitário (ABNT, 1987)

- Esta norma da ABNT foi criada em 1987, servindo como referência para a elaboração Resoluções do CONAMA criadas posteriormente. Esta NBR estabelece condições e padrões para lançamento de efluentes tanto prediais, residenciais como industriais no sistema público de coleta de esgoto.
- Na NBR 9.800/1987 também é definido que os métodos de análise para determinação dos parâmetros especificados no documento devem ser realizados conforme a orientação do o “*Standard Method for the Examination of Water and Wastewater*”.

- Resolução N° 357, de 17 de março de 2005 – CONAMA* (2005)

* Complementada e/ou alterada pelas resoluções a seguir:

- Resolução N° 393/2007 – CONAMA (2007)

- Complementar à Resolução N° 357/ 2005, e dispõe sobre o descarte contínuo de água de processo ou de produção em plataformas marítimas de petróleo e gás natural, o controle e a fiscalização da poluição causada por lançamento de óleo e outras substâncias nocivas ou perigosas em águas sob jurisdição nacional.

- Resolução N° 397/2008 – CONAMA (2008)

- Altera o inciso II do § 4º e a Tabela X do § 5º do art. 34 da Resolução CONAMA nº 357/05, referente aos Padrões de

lançamento de efluentes, e acrescenta os §6º e 7º, relacionados ao parâmetro Boro em águas salinas e Nitrogênio em sistemas de esgoto sanitário, respectivamente.

- Resolução N° 430/2011 – CONAMA (2011)
 - Complementa e altera parcialmente a Resolução N° 357/2005, dispondo as condições, parâmetros, padrões e diretrizes para gestão do lançamento de efluentes em corpos de água receptores. Também determina no Art. 3º que “os efluentes de qualquer fonte poluidora somente poderão ser lançados diretamente nos corpos receptores após o devido tratamento e desde que obedeçam às condições, padrões e exigências dispostos nesta Resolução e em outras normas aplicáveis.”
 - Nesta resolução também é citada a necessidade da coleta de amostras e análises de efluentes líquidos e em corpos hídricos, que devem ser realizadas de acordo com as normas específicas, por profissional legalmente habilitado, bem como por laboratórios credenciados pelo Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial – INMETRO ou creditados pelo órgão ambiental competente.
 - A Resolução N° 430/2011 do CONAMA, em seu Artigo 27, reforça a responsabilidade das fontes poluidoras dos recursos hídricos por terem um sistema de gestão de efluentes eficiente, com foco no uso eficiente da água, redução de geração e melhoria da qualidade dos efluentes gerados, bem como, sempre que possível, proceder à sua reutilização.
 - Em relação à reutilização de efluentes citada nesta resolução, há um parágrafo específico para permissões diferenciadas para o caso de redução de vazão original devido à reutilização – com uma vazão menor, há aumento das concentrações de substâncias presentes no efluente. E devido a isso, caso esses valores ultrapassem àqueles permitidos por esta resolução, o órgão ambiental competente poderá estabelecer condições e

padrões específicos de lançamento, conforme previsto nos incisos II, III e IV do art. 6º desta Resolução.

As Resoluções supracitadas no âmbito federal são válidas em todo o território nacional e aplicáveis aos Estados e Cidades nos quais não há normas específicas de um órgão ambiental, ou quando estas normas são menos restritivas que as do órgão federal. A Resolução Nº 357/2005, que dispõe da classificação dos corpos hídricos e diretrizes ambientais para seu enquadramento, além de estabelecer as condições e os padrões para lançamento de efluentes, foi alterada ou complementada pelas outras resoluções supracitadas (CONAMA, 2005).

- **Âmbito Estadual (Rio de Janeiro):**

- Diretriz DZ-205.R-6/2007 - Diretriz de Controle de Carga Orgânica em Efluentes Líquidos de Origem Industrial – aprovada pela Deliberação CECA/CN nº 4.887, de 25 de setembro de 2007;
- NOP-INEA-008, de 07 de dezembro de 2018 – INEA (2018)
 - Estabelece critérios e padrões de ecotoxicidade no lançamento de efluentes líquidos em corpos de águas receptores superficiais no Estado do Rio de Janeiro, revogando a NT-213.R-4.
- NOP-INEA-48, de 01 de outubro de 2021 – INEA (2021)
 - Este documento estabelece os procedimentos e critérios do Programa Estadual de Autocontrole de Efluentes Líquidos – PROCON ÁGUA, sistema no qual as indústrias informam mensalmente ao INEA, através do Relatório de Acompanhamento de Efluentes Líquidos – RAE – as características qualitativas e quantitativas de seus efluentes líquidos, que é um dos requisitos do Sistema de Licenciamento Ambiental. Esta norma revoga a DZ-942 e suas revisões,

apresenta definições de termos, bem como quais são as análises que devem ser realizadas e informadas no PROCON ÁGUA e suas frequências mínimas de realização mensal. Na NOP-INEA-48, disponível no *site* do órgão ambiental, é apresentada uma tabela com os tipos de análises e a frequência exigidas por ele.

No Estado do Rio de Janeiro as indústrias licenciadas são fiscalizadas pelo INEA. Durante todo o mês a empresa é responsável por garantir análises de seus efluentes, que devem ser realizadas por laboratórios credenciados pelo INEA para estes tipos de análises, conforme descrito na NOP-INEA-03 (INEA, 2017). Os padrões para lançamento no Estado do Rio de Janeiro estão tabelados na norma, disponível no *site* do INEA. A empresa poluidora é responsável por ter ou contratar um laboratório credenciado pelo INEA para fazer coletar as amostras e realizar as análises, e por enviar mensalmente ao órgão os resultados de suas análises de efluentes.

- Lei Nº 7.599/2017, de 24 de maio de 2017, válida no Estado do Rio de Janeiro:
 - “As indústrias situadas no Estado do Rio de Janeiro, que tiverem em seu quadro 100 (cem) ou mais empregados, ficam obrigadas a instalar equipamentos de tratamento e reutilização de água.”

Conforme a Lei supracitada (RIO DE JANEIRO, 2017), as indústrias situadas no Estado do Rio de Janeiro passaram a ser estimuladas, a partir de 2017, a possuírem sistema de reúso de água em seu interior, sob pena de não receberem benefícios ou incentivos do Estado nem poderem ser contratadas ou firmarem convênios com o mesmo. Ainda segundo a Lei, o sistema deve ser licenciado pelo órgão competente.

2.3.2. Técnicas de tratamento de efluentes industrial

O tratamento de efluentes industriais é importante e necessário para adequá-lo antes de seu despejo na rede pública ou no corpo hídrico. Dependendo das técnicas utilizadas e necessidades de remoção de componentes e microrganismos, pode ser classificado por três métodos: físicos, físico-químicos e biológicos (PEREIRA e GUIMARÃES, 2020). Outra classificação comum é em tratamento primário, secundário e terciário – no primário são usados métodos físico-químico de remoção de impurezas, enquanto no secundário é empregado o tratamento biológico. O tratamento terciário nem sempre está presente na indústria, mas é empregado quando se precisa remover componentes específicos para o enquadramento do efluente, como é o caso de metais pesados.

Os métodos físicos geralmente são utilizados para remoção de sólidos em suspensão e sedimentáveis, além de carga orgânica. Para esta finalidade, algumas das formas de tratamento utilizada na indústria são (PEREIRA e GUIMARÃES, 2020; FONTOURA, 2021):

- **Gradeamento:** as grades são barras metálicas dispostas com um espaçamento específico entre elas, variando entre 0,5 e 2,0 cm (GIORDANO, 2004), podendo estar dispostas paralelamente ou inclinadas, tendo como objetivo a remoção de sólidos grosseiros que estejam presentes no efluente (FONTOURA, 2021).
- **Peneiração:** após o gradeamento, podem ser utilizadas peneiras para a remoção de sólidos mais finos. As peneiras são constituídas por telas ou malhas de aço, sendo o espaçamento (*mesh*) escolhido de acordo com o tamanho de partícula que se deseja segregar.
- **Sedimentação:** técnica utilizada para a remoção de sólidos e areia em tanques, através da decantação por gravidade.
- **Filtração:** é realizada pela passagem de uma mistura sólido-líquido por um meio poroso, com o objetivo de reter sólidos em suspensão (GIORDANO, 2004).

- Separação por gravidade: comumente utilizado para remoção de óleos e gorduras a partir da diferença de densidade entre o contaminante e a fase aquosa.
- Flotação: é um método de separação utilizado para misturas heterogêneas e tem o objetivo de separar partículas sólidas ou líquidos de baixa densidade contidos no efluente. A flotação pode ser realizada pela injeção de ar ou nitrogênio no efluente. Com isto, há a formação de bolhas, nas quais as partículas em suspensão no líquido se aderem e aglutinam-se, formando uma espuma que se acumula na parte superior do tanque de flotação e que é retirada por raspadores, enquanto o efluente líquido da parte inferior flui para as próximas etapas de tratamento (FOGAÇA, 2022).
- *Stripping*: separação em torres, utilizando aquecimento, para remoção de compostos voláteis.

Já os métodos químicos e físico-químicos são definidos pela adição de algum produto ao efluente, podendo ter como objetivos a neutralização de pH pelo uso de ácidos ou bases, ou a facilitar a formação de flocos maiores nas etapas de coagulação quando se adiciona polímeros de alumínio ou outros coagulantes, com o objetivo de aumentar a remoção de sólidos por precipitação (PEREIRA e GUIMARÃES, 2020). A cloração para desinfecção também pode ser empregada (GIORDANO, 2004).

Os métodos biológicos são usados para remoção de matéria orgânica do efluente, podendo ser aeróbios ou anaeróbios, dependendo das características dos microrganismos envolvidos no processo, sendo usadas diferentes espécies de bactérias, algas, protozoários e/ou fungos (FONTOURA, 2021). Para o tratamento aeróbio há necessidade de presença de oxigênio e, para garantir isto, geralmente são usados aeradores. Os métodos mais aplicados industrialmente são o lodo ativado, filtros biológicos ou lagoas de estabilização. Já o tratamento anaeróbico é realizado sem a necessidade de oxigênio, e uma de suas vantagens é a baixa geração de lodo e a possibilidade de transformação da matéria orgânica em biogás, que ainda pode ser utilizado como fonte de energia (PEREIRA e GUIMARÃES, 2020). Por outro lado, o tratamento anaeróbio não é indicado para estações onde

há muita variação das condições do efluente, como carga orgânica, pH e temperatura, pois o tipo de microrganismos utilizados neste caso precisam de um tempo maior de aclimação, o que pode reduzir a eficiência de tratamento nesses casos (FONTOURA, 2021).

No tratamento de efluentes industrial, alguns parâmetros são acompanhados para garantir a especificação do mesmo conforme as legislações ambientais vigentes na localidade onde a indústria é instalada. Como exemplo, algumas análises realizadas são:

- Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO): mede a quantidade de oxigênio necessária para a depuração da carga orgânica biodegradável contida no efluente pela ação de microrganismos (GIORDANO, 2004). Este parâmetro é medido na entrada e na saída da etapa de tratamento biológico, pois um dos parâmetros exigidos pelo órgão ambiental é a eficiência de remoção de DBO, medido percentualmente em relação à diferença do valor medido na entrada e na saída da estação. A análise é realizada pela inoculação de uma amostra de efluente com microrganismos e a medição de oxigênio dissolvido no início do teste e ao final, após 5 dias.
- Demanda Química de Oxigênio (DQO): essa análise é realizada para detectar o quanto de oxigênio é necessário para degradar quimicamente a matéria orgânica. Medir esses parâmetros de DBO e DQO são importantes, pois ao chegar no corpo hídrico, a matéria orgânica, ao ser biodegradada pelos organismos presentes, reduz a quantidade de oxigênio dissolvido no meio, o que pode causar a mortalidade da fauna local, se a carga orgânica for muito alta essas espécies consumirem o oxigênio da fauna local.
- Condutividade: esta análise está relacionada à concentração de sais e presença de íons no efluente.
- pH: esta medida indica o caráter ácido ou básico do efluente. É importante que o pH seja neutro, próximo a 7,0, para não causar desequilíbrio à vida dos peixes do rio ou lago onde o efluente é despejado.
- Sólidos Suspensos Totais (SST): são subdivididos em sólidos coloidais e sedimentáveis/ flutuantes. Os primeiros são aqueles que se mantêm dissolvidos em solução devido ao pequeno diâmetro ($< 1,2 \mu\text{m}$), enquanto

os sólidos sedimentáveis representam a porção de sólidos que se separa da fase líquida por diferença de densidade.

Além dessas, existem muitas outras análises que são realizadas nos efluentes industriais tanto para controle interno da empresa quanto para divulgação mensal ao órgão ambiental. Os parâmetros que devem ser analisados e as frequências de reporte estão referenciadas nas Normas, Diretrizes e Resoluções citadas na seção 2.3.1.

2.4 Água para torre de resfriamento

Usada na indústria para a remoção do calor dos processos produtivos, a água de resfriamento é uma das aplicações nas quais é mais comum o reúso de água em indústrias, visto que exige uma qualidade de água inferior quando comparado com a água utilizada em caldeiras para geração de vapor (SAUTCHÚK *et al.*, 2011).

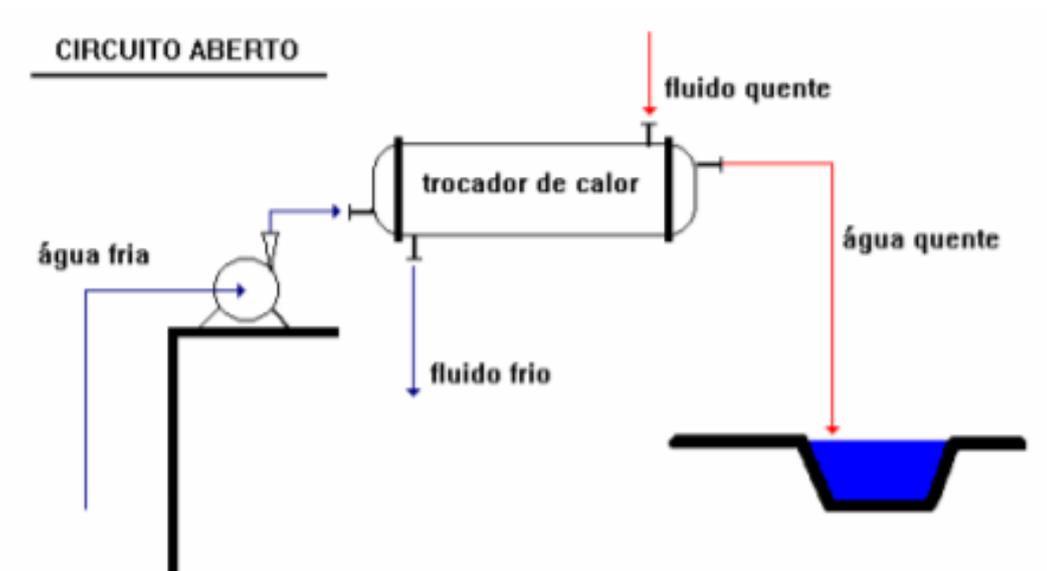
É importante conhecer o tipo de sistema de resfriamento presente na indústria pois isso interfere na qualidade da água utilizada: quando há a recirculação contínua, a preocupação com a presença de contaminantes e outros fatores que favorecem a incrustação e corrosão são ainda maiores do que naqueles sistemas que a água passa apenas uma vez – requer um tratamento químico adequado para evitar esses problemas, e as melhores técnicas a serem empregadas variam de acordo com o tipo de sistema. E segundo Trovati (2004), o sistema de resfriamento pode ser classificado de três formas:

- Sistema Aberto de Resfriamento:

No sistema aberto de resfriamento a água é captada e passa apenas uma vez pelo sistema de trocadores de calor, e sendo descartada posteriormente em temperatura superior à inicial. Geralmente é utilizado quando há grande

disponibilidade de água e a indústria uma fonte próxima de captação, como rios, por exemplo (TROVATI, 2004). Um exemplo deste tipo de sistema é ilustrado na Figura 11.

Figura 11: Esquema de Sistema de resfriamento aberto de circulação

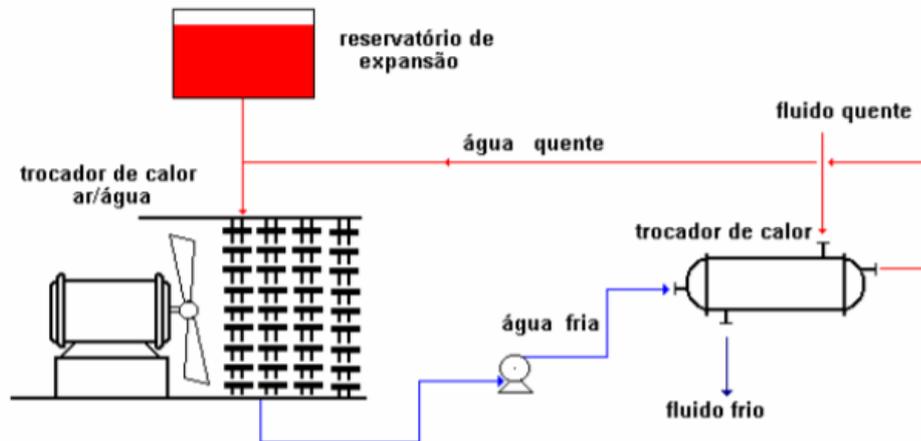


Fonte: MANCUSO e SANTOS (2001).

- Sistemas Fechados de Resfriamento:

Neste tipo de sistema, a água de resfriamento não tem contato com o fluido de processo e é constantemente reutilizada. É comumente empregado como sistema de refrigeração de compressões, turbinas a gás, radiadores de veículos, etc. Neste caso, são necessários dois trocadores de calor no sistema: um que irá resfriar a água de processos e outro que resfriará a água recirculante. Neste caso, pode ser necessária reposição de pequena quantidade de água (TROVATI, 2004). Um exemplo deste tipo de sistema é ilustrado na Figura 12.

Figura 12: Esquema do Sistema de resfriamento fechado

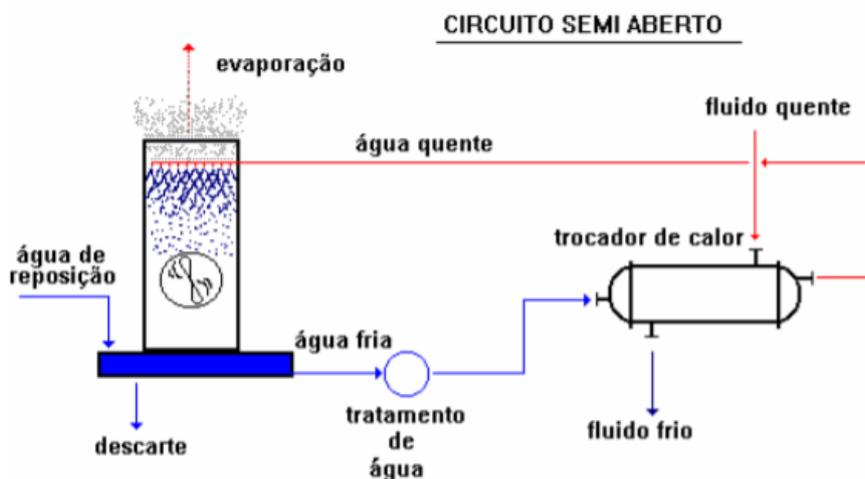


Fonte: MANCUSO e SANTOS (2001).

- Sistema Semiaberto de Resfriamento:

Nesse sistema, após passar pelos trocadores da unidade industrial, a água aquecida retorna à instalação de resfriamento, que pode ser na forma de torre, lagoa, spray ou outros métodos. Após resfriada, a água está apta para ser reutilizada. Este sistema é empregado quando a demanda por água é superior à quantidade disponível, e é o tipo mais comum em indústrias (TROVATI, 2004). Um exemplo deste tipo de sistema é ilustrado na Figura 13.

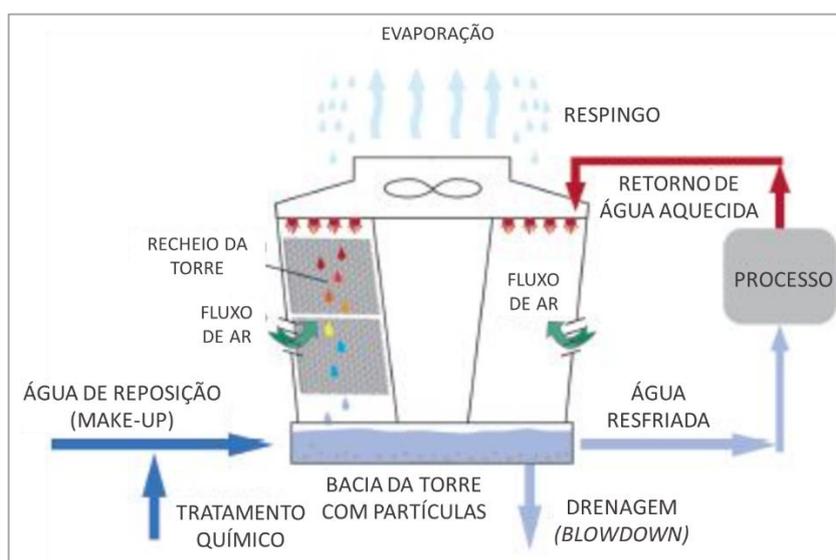
Figura 13: Esquema de Sistema de resfriamento com recirculação aberta



Fonte: MANCUSO e SANTOS (2001).

Como o sistema de resfriamento com circuito semiaberto é o mais empregado industrialmente, e o estudo de caso deste trabalho é baseado em uma petroquímica que adota este tipo de sistema de resfriamento em sua unidade, na Figura 14 é apresentado a esquematização de uma torre de resfriamento de tiragem mecânica induzida com fluxo de ar cruzado (BRUM, 2015), na qual o ventilador é posicionado no topo da célula e o fluxo de ar ocorre em contracorrente em relação ao escoamento da água quente, que ocorre de cima para baixo (FOFANO, 2000).

Figura 14: Esquematização do funcionamento de uma Torre de Resfriamento de tiragem mecânica e fluxo em contracorrente.



Fonte: Adaptado de Legner (2015).

A técnica de água reúso de água em torres de resfriamento já é adotada por algumas empresas, como citado por autores Mancuso e Santos (2001), que fala sobre um Plano de Reaproveitamento de Águas para o Abastecimento das Indústrias do Estado de São Paulo, desenvolvido pela SABESP. Outro exemplo é a utilização de água de reúso como reposição da torre de resfriamento no Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro, estudo realizado por Carvalho e Machado (2010).

Este trabalho enfatiza o reúso como uma alternativa ao abastecimento da bacia de torres de resfriamento, pois segundo dados do Manual de Reúso de Água publicado pelo CIESP (SAUTCHÚK *et al.*, 2011), na maioria das indústrias, a água

de resfriamento é a maior fonte de consumo, conforme são apresentados alguns exemplos na Tabela 6, que mostra o tipo de consumo de água por segmento industrial.

Tabela 6: Distribuição do consumo de água na indústria por segmento

Segmento Industrial	Distribuição do consumo de água (%)		
	Resfriamento sem contato	Processos e Atividades Afins	Uso Sanitário e outros
Laticínios	53	27	19
Gases Industriais	86	13	1
Produtos químicos inorgânicos	83	16	1
Materiais plásticos e resinas	92	7	1
Tintas e pigmentos	79	17	4
Produtos químicos orgânicos	90	9	1
Cimento	82	17	1
Papel e Celulose	18	80	2
Aço	56	43	1

Fonte: Adaptado de SAUTCHÚK *et al.* (2011).

O tratamento adequado da água de resfriamento é importante para evitar prejuízos ao processo, que podem ser causados pela utilização de água de qualidade inadequada, e podem causar corrosão, incrustação ou formação de *slime* nas tubulações e trocadores de calor da unidade, o que pode gerar necessidade de parada de equipamentos ou mesmo da planta para manutenção (SILVA e CARVALHO, 2015).

A corrosão é caracterizada pela tendência natural dos metais de se oxidarem e retomarem ao seu estado natural de sais e óxidos, os quais são energeticamente mais estáveis, através de reações de oxirredução com o meio em que estão (TROVATI, 2004). Como consequência, pode haver furos em tubulações e feixes de trocadores de calor, gerando vazamentos, além da redução da eficiência operacional de equipamentos. Já a incrustação e o *slide* são tipos de depósitos em

tubulação, sendo o primeiro caracterizado pela presença de sais e sólidos dissolvidos em suspensão, enquanto o segundo tem característica orgânica pelo desenvolvimento de microrganismos, formando depósitos em equipamentos e tubulações (SILVA e CARVALHO, 2015).

As principais fontes de incrustações inorgânicas em sistemas de resfriamento são sais de cálcio e magnésio, relacionados à dureza da água, principalmente os carbonatos (CaCO_3) e sulfatos de cálcio (CaSO_4), podendo haver formação de fosfato de cálcio e hidróxido de magnésio. Também são comuns a presença de sílica (SiO_2) e silicatos (SiO_3^{2-}), oriundos do contato da água com areia e rochas. Os óxidos de ferro, originado principalmente do processo corrosivo de tubulações, por vezes também são detectados (SILVA e CARVALHO, 2015).

Tendo em vista estas fontes de incrustação, é necessário que a água de reposição do sistema de resfriamento tenha um tratamento adequado, e ao planejar um sistema de tratamento de água de reúso, é importante que seja capaz de remover esses contaminantes a padrões aceitáveis para água de resfriamento.

Para minimizar esses problemas, a água de resfriamento deve ser adequadamente tratada e alguns parâmetros devem ser monitorados frequentemente. Com o fim de manter a integridade dos equipamentos do sistema de resfriamento, os seguintes tratamentos são comumente aplicados para minimizar os danos corrosivos e incrustantes da água de resfriamento:

- Prevenção de incrustações:
 - Floculante: este é um aditivo químico utilizado para minimizar incrustações de origem orgânica, como contaminações do processo causadas por óleos ou hidrocarbonetos, microrganismos, lodos ou outros materiais particulados. A forma de aplicação geralmente é pela dosagem de polímeros chamados polieletrólitos que tem a função de aglutinar substâncias através de interações eletrostáticas e adsorção. Desta maneira formam-se flocos que ficam sobrenadantes e podem ser retirados do sistema por purga ou raspadores (TROVATI, 2004).

- Dispersante: Este mecanismo é mais empregado em sistemas fechados de resfriamento, onde as contaminações inorgânicas são mais relevantes que as orgânicas. Os dispersantes podem ter diferentes efeitos, e sua aplicabilidade e dosagem dependem da característica da água local. Algumas opções são apresentadas na Tabela 7:

Tabela 7: Tipos de mecanismos dispersantes

Efeito	Ação
Efeito Limiar (“ <i>Threshold</i> ”)	Produto sequestrante que reduz a tendência de precipitação de compostos de Cálcio, Magnésio, Ferro e Manganês, quando dosado subestequiometricamente
Ação dispersiva	Polieletrólitos que se adsorvem em partículas em suspensão, favorecendo a repulsão entre elas.
Efeito Surfactante	Aplicável para material orgânico, principalmente quando há desenvolvimento microbiológico. Aumentam a hidratação das partículas, solubilizando-as, evitando a precipitação
Modificação de Cristais	Distorce os cristais impedindo seu crescimento ordenado para evitar sua aderência a superfícies

Fonte: Adaptado de Trovati (2004).

- Prevenção à corrosão
 - Inibidores de corrosão: Esses são comumente adicionados à composição das tubulações de equipamentos para a prevenção de corrosão. No entanto, também há produtos que podem ser dosados na água de resfriamento com este objetivo, como é o caso de polímeros anódicos, azóis e inibidores catódicos (TROVATI, 2004).
- Controle do desenvolvimento microbiológico (*slime*)
 - Biocidas: os biocidas têm o objetivo de matar fungos, bactérias ou algas, dependendo de sua natureza, e servem para minimizar o crescimento microbiológico no interior de tubulações, evitando a

formação de *slime* nelas, que poderia causar redução de eficiência de troca térmica e até restrições de fluxo (TROVATI, 2004). Para água de resfriamento, os biocidas são comumente classificados como oxidantes e não-oxidantes, conforme a Tabela 8 a seguir:

Tabela 8: Tipos de Controles microbiológico oxidativos e não-oxidativos

Classificação	Composto	Ação	Aplicação
Biocida Oxidante	Compostos de Cloro: Cloro gás (Cl ₂) Hipoclorito de Sódio (NaClO) Hipoclorito de Cálcio (Ca(ClO) ₂) Dióxido de Cloro (ClO ₂) Ácido Tricloro-isocianúrico	A matéria orgânica é formada pela oxidação do composto de cloro, gerando ácido hipocloroso (HClO)	Oxida matéria orgânica, amônia, aminoácidos, proteínas, ferro, manganês, enxofre, cianetos, etc. - Aplicável a águas com pH superior a 8,5 devido a dissociação do composto em água
	Peróxidos (H ₂ O ₂)	Oxida matéria orgânica	Aplicável diretamente no equipamento onde há formação de biofilmes, com desvantagem de ser volátil e corrosivo
	Ozônio (O ₃)	Oxidante semelhante aos peróxidos	Poder sanitizante, porém gás volátil e de alto custo, não costuma ser usado em água de resfriamento

Tabela 8: Tipos de Controles microbiológico oxidativos e não-oxidativos

Classificação	Composto	Ação	Aplicação
Biocidas não-oxidantes	Quaternários de Amônio e Aminas Complexas	Se adsorvem nas superfícies das células de microrganismos, afetando a permeabilidade celular, destruindo-a	Ação rápida contra fungos, bactérias aeróbias e anaeróbias e alguns tipos de algas. - Atua bem em pH 5,0 a 9,0 - Incompatível com inibidores de corrosão aniônicos
	Carbamatos (organossulfuros)	Sequestram elementos essenciais da parede celular de microrganismos, causando sua morte	Efetivo contra bactérias e fungos - Ação eficaz em pH inferior a 8,0

Fonte: Adaptado de Trovati (2004).

Trovati (2004) cita outras formas de prevenção ao crescimento microbiológico, que podem ser consultadas em seu referencial, sendo aqui citadas as mais empregadas como biocidas em água de resfriamento.

Além do tratamento químico, é importante o monitoramento frequente ou contínuo de certos parâmetros da água de resfriamento para garantir a boa performance do sistema. Na Tabela 9 são referenciados os mais relevantes e acompanhados industrialmente, além das faixas de controle sugeridas pela referência utilizada. É válido ressaltar que as referências costumam ser indicadas pelos fabricantes dos sistemas, de acordo com as capacidades de operação. No entanto, os parâmetros citados na Tabela 9 servem como uma referência de projeto.

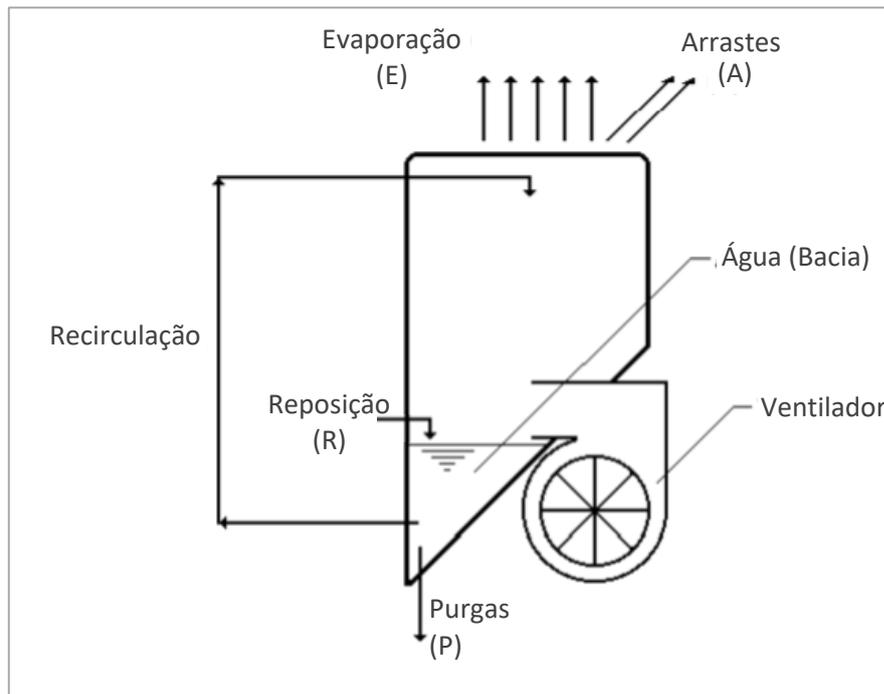
Tabela 9: Parâmetros de controle em água de resfriamento com circuito semi-aberto

Item de Controle	Faixa Sugerida	Observações
pH	6,5 – 8,5	pH abaixo desse limite tendem a causar corrosão ácida e acima podem causar precipitação de sais, além de dificultar a ação de biocidas
Condutividade	Máx. 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$	Valores elevados de condutividade aceleram processos corrosivos, além de serem indicativo de aumento na concentração de sólidos dissolvidos
Alcalinidade Total	Máx. 400 mg/L CaCO_3	Elevação na alcalinidade podem indicar presença de carbonatos e bicarbonatos, que tendem a causar incrustações
Sólidos Dissolvidos Totais (SDT)	Máx. 2.800 mg/L	Valores elevados de sólidos dissolvidos em água indicam tendência incrustante
Dureza Total	Máx. 400 mg/L CaCO_3	A análise tem como objetivo o controle de sais de cálcio e magnésio, precursores de incrustação
Cloretos	Máx. 200 mg/L CaCO_3	Cloretos também são precursores de corrosão
Sílica	Máx. 150 mg/L SiO_3	Este controle visa evitar a incrustação de sílica e silicatos em tubulações
Ferro	Máx. 5,0 mg/L Fe	Ferro é acompanhado para estimar processos corrosivos
DQO	75 mg/L	Avaliação da carga orgânica na água de resfriamento
Turbidez	50 NTU	Indica a presença de partículas suspensas na amostra de água

Fonte: Adaptado de Trovati (2004); SAUTCHÚK *et al.* (2011).

Além desses parâmetros, é comum ver em sistemas de torre de resfriamento a avaliação dos ciclos de concentração, que tem relação com a concentração de sólidos na torre e seu balanço de massa. Portanto, a seguir será apresentado o conceitual do balanço de massa típico de torres de resfriamento, que é ilustrado na Figura 15.

Figura 15: Balanço de Massa de sistema de resfriamento



Fonte: Adaptado de Trovati (2004).

Como no sistema de resfriamento boa parte da troca térmica parte ocorre devido à evaporação da água, e uma parcela por convecção, uma consequência é a concentração de sais e sólidos no sistema, já que com a evaporação, há redução de água no sistema, causando um aumento da concentração deles. Além disso, quando a água entra em contato com o ar em uma torre de resfriamento também ocorre arraste de parte de suas gotículas, o que colabora para perdas no sistema, sendo o balanço de massa contabilizado da seguinte forma:

Entrada = Saída

$$A = E + R + P$$

Eq. 1

A: Alimentação (*make-up* – m³/h)

R: Respingos (m³/h)

E: Evaporação (m³/h)

P: Purga (*blowdown* – m³/h)

(considerando que não há outras perdas, acúmulo ou outras entradas)

A água de alimentação (A) é adicionada ao sistema para compensar as perdas em um sistema de recirculação semiaberta, que é o modelo de torre de resfriamento mais comumente adotado em indústrias. Neste modelo, são consideradas perdas de água os respingos (R), que deixam a torre junto a água evaporada (E), responsável por 80% do fluxo de resfriamento em uma torre, através da transferência de calor latente por evaporação. Outra fonte de perda de água nas torres de resfriamento são as purgas (P), responsáveis por manter o equilíbrio de sais na água de resfriamento recirculante (MANCUSO e SANTOS, 2003; TROVATI, 2004).

O ciclo de concentração (CC) é dito como uma relação entre a quantidade de vezes que a água é concentrada no sistema – muitas vezes avaliada em relação à concentração de sólidos da água de reposição da torre (*make-up*), e a água que está saindo do sistema (TROVATI, 2004). É um parâmetro importante para determinar a quantidade de água que deve ser purgada do sistema para manter a qualidade da água de resfriamento (VIEIRA, 2011).

$$CC = \frac{E + A + D}{A + D} = \frac{R}{A + D} \quad \text{Eq. 2}$$

$$CC = \frac{E}{A + D} + 1 \quad \text{Eq. 3}$$

Pelas equações acima, observa-se que quanto maior a evaporação, maiores são os ciclos de concentração, e quanto maior as descargas, menor ele fica. Portanto, as descargas da torre, também chamadas de purga ou *blowdown*, servem para equilibrar as concentrações de sais ou íons na torre. No entanto, nem sempre é fácil avaliar os valores desta forma porque os dados de respingo e arraste são estimados. Então, geralmente, os ciclos são avaliados em relação aos teores

de concentração de sílica, cálcio e/ou magnésio, a depender do método analítico adotado pela empresa, entre a água recirculante no sistema (SIS) e a água de reposição (REP) (TROVATI, 2004).

$$CC = \frac{Si_{SIS}}{Si_{REP}} \text{ Eq. 4}$$

$$CC = \frac{Ca_{SIS}}{Ca_{REP}} \text{ Eq. 5}$$

$$CC = \frac{Mg_{SIS}}{Mg_{REP}} \text{ Eq. 6}$$

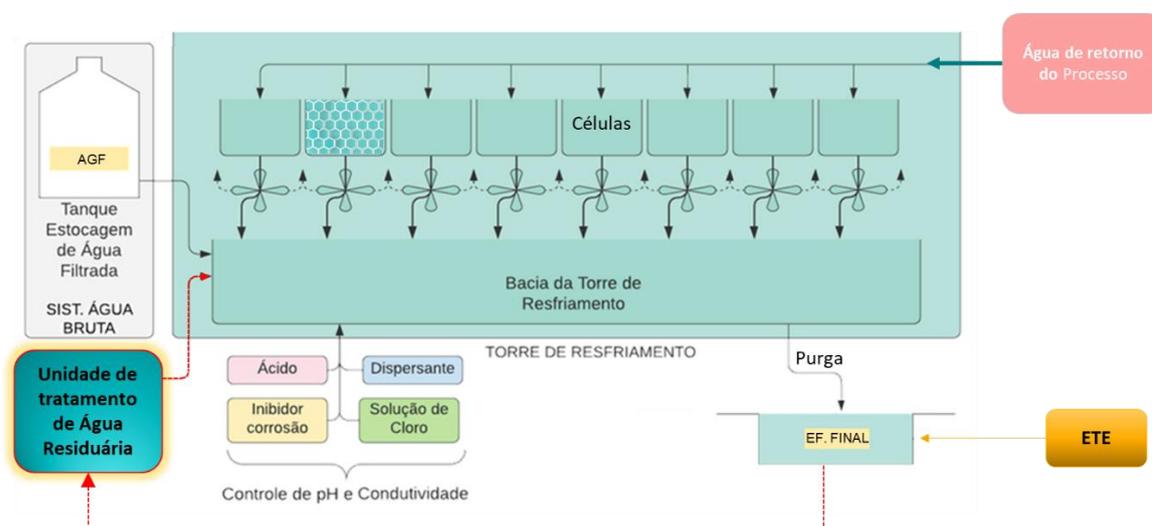
3. ESTUDO DE CASO DE UMA INDÚSTRIA PETROQUÍMICA: PROPOSTA PARA INSTALAÇÃO DE UMA UNIDADE DE TRATAMENTO DE ÁGUA DE REÚSO

Este estudo de caso foi realizado tendo como base uma indústria petroquímica localizada no Complexo Petroquímico de Duque de Caxias (DCX), no Rio de Janeiro. O objetivo desta seção é analisar os dados históricos de análises de água filtrada e efluente final, conhecer qual a vazão média passível de reutilização, avaliar se esta é suficiente para suprir a reposição da torre de resfriamento e verificar quais parâmetros são necessários ajustar na estação de tratamento. Além disso, com base na literatura, serão propostos os equipamentos que devem integrar a unidade de tratamento de água de reúso para que seja possível adequar os parâmetros do efluente residual ao mesmo patamar da água filtrada que supria a torre de resfriamento, conforme média dos dados de 2016 a 2021.

Na configuração atual, o efluente da unidade passa pelos tratamentos primário e secundário para adequação aos parâmetros exigidos pelo INEA e, posteriormente, é lançado no corpo hídrico receptor, conforme Outorga da empresa. A proposta elaborada a seguir sugere a instalação de uma unidade de tratamento de água de reúso nesta indústria, com o objetivo de captar este efluente, que hoje (2021) é lançado no corpo hídrico, e desviá-lo, via tubulação aérea, para a unidade de tratamento de água de reúso, que deve ser instalada próximo à torre de resfriamento para minimizar custos com tubulação e bombeio após tratamento, já que, após adequação dos padrões, esta água tratada servirá como fonte complementar de água da torre de resfriamento da unidade. A sistemática foi esquematizada e é apresentada na Figura 16.

A metodologia consiste em uma proposta teórica, com base nas tecnologias de tratamento de água de reúso existentes e já aplicadas em outras indústrias e abordadas em outros estudos, e nos padrões de água da unidade, conforme o levantamento de dados históricos.

Figura 16: Esquemática da Torre de Resfriamento recebendo água tratada das Estações de Tratamento de Água Bruta (existente) e da Unidade de Tratamento de Água Residuária (proposta)



Fonte: Autoria própria (2022).

3.1 Possibilidades para reúso de água em uma indústria petroquímica

Uma das possibilidades de aplicação de água de reúso na unidade industrial que requer menos tratamentos seria para a lavagem de pisos e como água de utilidades ou reposição da bacia de resfriamento, por exemplo. A utilização de água de reúso como água de utilidades, lavagem de área, utilização nas caixas de vasos sanitários e outros usos menos nobres exigiriam um nível menor de tratamento, no entanto, seria necessário a aquisição de um novo tanque para o armazenamento deste tipo de água, tendo em vista que atualmente os tanques de armazenamento de água também têm fins potáveis como o abastecimento de refeitórios e suprimento de banheiros, e a água de reúso não poderia se misturar pois a legislação brasileira não permite a aplicação de água de reúso para fins potáveis, conforme Resolução N° 54/2005 do CONAMA, em vigor. Logo, além da estação de tratamento de água de reúso, seria necessário adequar o sistema de tancagem, tubulações e sinalização específicas para água de reúso.

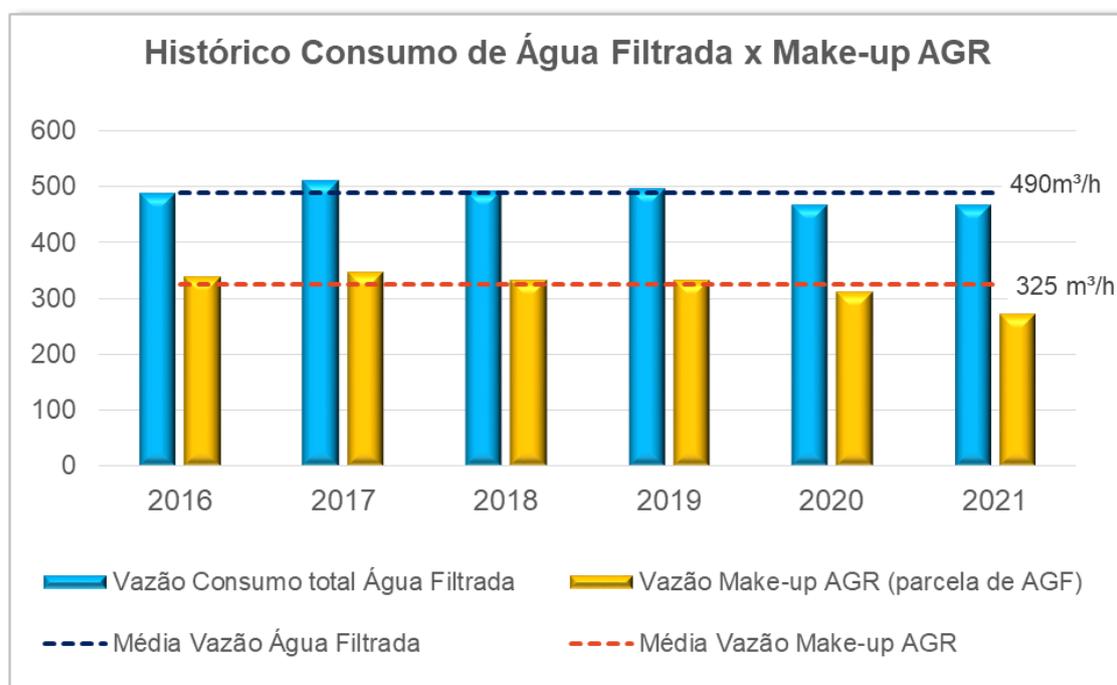
Uma segunda opção seria a aplicação de água de reúso como reposição da bacia de incêndio, que é uma estratégia mais viável economicamente, pois esta

água não tem uma exigência de padrão de qualidade tão alta, seria mais fácil adequar. No entanto, a demanda de água de incêndio não é tão frequente, devido à baixa ocorrência de eventos, o que geraria um passivo de água de reúso tratada que não teria utilidade quando a bacia já estivesse com seu limite de capacidade atingido. Por este motivo, este caso não será a abordagem desse estudo.

A proposta mais interessante, devido à grande demanda, seria reutilizar o efluente tratado como fonte complementar do *make-up* da torre de resfriamento. Apesar de, para este fim, ser necessária uma qualidade de água superior em relação às outras possibilidades citadas nesta seção, a água de resfriamento (AGR) é a principal fonte de consumo de água potável desta indústria, representando quase 70% de seu uso, considerando a média histórica dos últimos 6 anos (2016-2021), conforme apresentado na

Figura 17. O resultado do estudo é apresentado na Tabela 10, com os dados médios de geração de efluentes e vazão de *make-up*, bem como alguns parâmetros relevantes para avaliação do problema e escolha da metodologia de tratamento.

Figura 17: Histórico Consumo de Água Filtrada x *make-up* AGR



Fonte: Pesquisa interna (2021)

Tabela 10: Parâmetros médios dos últimos 6 anos de uma indústria petroquímica

Parâmetro	Água Bruta	Água Filtrada para Make-up da Torre Resfriamento	Efluente Final
Vazão de consumo	550 m ³ /h	325 m ³ /h	-
Vazão gerada	-	-	70 m ³ /h
pH	6,5	6,0	7,9
Sólidos Suspensos Totais – SST	Sem dados*	0,3 mg/L	20 mg/L
Demanda Química de Oxigênio – DQO	3,1 mg/L	2,0 mg/L	120,0 mg/L
Condutividade	Sem dados*	120 µS/cm	4.600 µS/cm

Fonte: Pesquisa interna (2021).

*Sem dados: Análises não realizadas na água bruta.

Pelos resultados obtidos nas análises ao longo dos últimos anos, é notório que mesmo que todo o volume de efluente tratado seja reutilizado, isto corresponde a apenas 20% do necessário para a reposição de água da bacia da torre de resfriamento. No entanto, apesar de parecer pouco representativo, no cenário de crise hídrica e maior conscientização em relação ao consumo sustentável dos bens naturais, esta proposta surge como uma alternativa para reduzir a captação de água dos corpos hídricos da região para esta unidade industrial, com o objetivo de fazer um melhor uso de um recurso natural essencial, que é a água.

Neste estudo, a avaliação econômica não foi o foco da proposta, tendo em vista, por um lado a dificuldade em se obter os dados, pois seriam necessárias licitações para orçamento com diferentes empresas, e por outro, porque com o valor da cobrança pelo uso da água praticado atualmente, economicamente o reúso ainda não é tão atrativo a curto prazo, sendo a outorga e a escassez hídrica os fatores que mais impactam na decisão das empresas em investir em técnicas de reúso (BRASIL, 2017).

No entanto, a proposta de tratamento do efluente para água de reúso será explicitada tendo o foco no uso sustentável da água e na possibilidade de, no futuro, a captação de água pelas indústrias sofrer uma limitação, tendo em vista que em cenários de escassez hídrica, a prioridade de fornecimento de água é para o consumo humano e dos animais, conforme a Lei 9.433/1997 da Política Nacional de Recursos Hídricos, podendo a outorga de direito de uso de recursos hídricos ser suspensão parcial ou totalmente, em definitivo ou por prazo determinado, para atender seus usos prioritários.

No contexto acima citado, há a possibilidade de o Estado restringir a capacidade de captação de água pelas indústrias. Se isto ocorrer no polo petroquímico de Duque de Caxias, por exemplo, uma das consequências que as indústrias podem sofrer é precisarem reduzir suas capacidades de produção – pois se não há água suficiente na bacia para resfriar a carga petroquímica durante o processamento, necessariamente, a carga de entrada precisa ser reduzida para que a temperatura do processo se mantenha adequada.

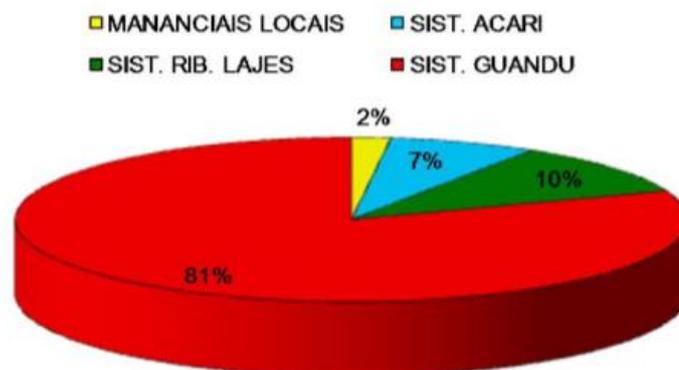
Foi observado que a necessidade de suprimento de *make-up* para a torre é muito superior ao volume de efluente gerado, o que não resolveria o problema da unidade em relação à uma futura crise hídrica estadual, já que ainda permaneceriam com a vulnerabilidade em relação à quantidade de água disponível. No entanto, já é uma fonte alternativa para diminuir a captação de água bruta do sistema de captação. Considerando-se essas premissas, o estudo será baseado em um projeto para tratar 100 m³/h de água residuária oriunda da ETE da petroquímica, para posteriormente ser utilizado como fonte complementar de água à torre de resfriamento.

3.1.1. O fornecimento de água para o polo petroquímico DCX

A região de Duque de Caxias é suprida de água bruta pela represa de Saracuruna e pelo Sistema Guandu, gerido pela CEDAE, com capacidade de abastecimento de 45,0 m³/s, segundo dados do relatório da CEDAE (OLIVEIRA, 2015), que é o maior sistema de abastecimento da cidade do Rio de Janeiro, com

capacidade muito superior aos demais da região do Grande Rio, conforme ilustrado na Figura 18.

Figura 18: Sistemas de abastecimento de Água do Grande Rio de Janeiro



Fonte: OLIVEIRA (2015)

Com o projeto focado apenas em uma indústria petroquímica, visando capacidade de tratamento $100 \text{ m}^3/\text{h}$ de água de reúso a partir da instalação de uma unidade de tratamento internamente, é possível estimar o tamanho de tubulação necessária, em metros, para interligar a saída da ETE ao local onde propõe-se a instalação da nova estação de tratamento de água residuária, situada ao lado da torre de resfriamento. Utilizando o *Google Maps* foi possível obter uma imagem aérea do local e realizar as medições de distância através da ferramenta, que considerando os trechos retos, elevações entre o solo e o *pipe-rack*, curvas e acessórios, foi estimado em 520 m, conforme apresentado na Figura 19.

Para fins de economia para o projeto, sugere-se a utilização de tubulação de PVC rígido flangeado para facilitar a troca do trecho comprometido em caso de rompimentos ou furos, e projetando o sistema com capacidade para operar com uma vazão de $100 \text{ m}^3/\text{h}$, o diâmetro da tubulação é estimado conforme a norma NBR 12.218/1993 (ABNT, 1993), que recomenda que a velocidade de escoamento deve estar entre os limites de 0,6 m/s e 3,5 m/s. Assim, o diâmetro pode ser determinado utilizando-se a lei derivada da equação da continuidade, que afirma que em qualquer ponto do escoamento do fluido, o produto da velocidade de escoamento pela área da seção transversal é constante, conforme a equação 7.

Figura 19: Vista aérea de uma indústria petroquímica para instalação de sistema de reúso



Fonte: Google Maps (2022).

$$Q = v \times A \quad \text{Eq. 7}$$

Q = vazão volumétrica [m³/s]

v: velocidade do fluido [m/s]

A: área [m²]

Usando fatores de conversão de unidades, 100 m³/h equivalem a:

$$\frac{100 \text{ m}^3/\text{h}}{1 \text{ h}} \times \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} \times \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} = 0,0278 \text{ m}^3/\text{s} \quad \text{Eq. 8}$$

Logo, $A = \frac{Q}{v}$, e sendo adotada uma velocidade de 1,5 m/s, valor intermediário dentro da faixa aceitável de acordo com NBR 12.218/1993 da ABNT, a área interna da tubulação recomendada é de:

$$A = \frac{0,028 \text{ m}^3/\text{s}}{1,5 \text{ m/s}} = 0,0187 \text{ m}^2 \quad \text{Eq. 9}$$

A partir do cálculo da área da seção transversal do tubo, é possível obter seu diâmetro nominal através da fórmula matemática que relaciona área e diâmetro de formas circulares, conforme as equações 10 e 11.

$$A = \frac{\pi \times D^2}{4} \quad \text{Eq. 10}$$

$$D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 0,0187 \text{ m}^2}{\pi}} = 0,154 \text{ m} \quad \text{Eq. 11}$$

Para este valor de diâmetro de 0,154 m, que equivale a 154 mm, a tubulação comercial de PVC rígido disponível é a de diâmetro nominal de 6", conforme tabela disponibilizada com dados do *software Hydros*, e apresentados na Figura 20.

Figura 20: Tabela com diâmetros nominais de tubulações de PVC

Diâmetro nominal de projeto		PVC Rígido			Polipropileno			Polietileno Reticulado			
		cl.	DE	φ	cl.	DE	φ	Tipo	cl.	DE	φ
mm	ref	-	mm	mm	-	mm	mm	-	-	mm	Mm
6	1/8										
8	¼										
10	3/8	S	16	13,0				C	16	16	12,0
		R	17	13,0				C	24	16	11,4
		-	-	-				A	24	16	11,4
15	½	S	20	17,0	PN10	20	14,0	C	16	20	16,0
		R	21	16,0	-	-	-	A	16	20	16,0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
100	4	S	110	97,8	PN 10	110	90,0	A	16	110	90,0
		R	113	97,8	PN 6	110	97,4	-	-	-	-
		-	-	-	PN 4	110	101,6	-	-	-	-
125	5				PN 10	140	114,6				
					PN 6	140	124,0				
					PN 4	140	129,2				
150	6				PN 10	160	130,8				
					PN 6	160	141,8				
					PN 4	160	147,6				

Fonte: Adaptado de SILVA e GNIPPER, 2009.

Em relação aos detalhes hidráulicos, também são necessárias duas bombas centrífugas, uma para enviar a água da ETE até a nova estação de tratamento de água de reúso, com capacidade para bombear cerca de 0,03 m³/s de água, a uma

velocidade estimada de 1,5 m/s, e com capacidade para elevar o fluido em 5 m verticalmente e de trecho reto em 520 m, além de acessórios como curvas, conexões e válvulas para isolar o sistema quando necessário. Para o dimensionamento das bombas é necessário cálculo da perda de carga do sistema, que depende da quantidade de conexões utilizadas, trecho reto, além da curva da bomba, que variam de acordo com o fabricante, portanto, não serão aqui indicados.

3.2 Tecnologias para remoção de contaminantes

Em relação aos tratamentos necessários para reutilizar este efluente como *make-up* da torre de resfriamento, seriam necessárias análises adicionais para verificar os teores de nitratos e fosfatos no efluente, para avaliar se há a necessidade de inserção de sistemas de desnitrificação e desfosfatização no circuito. Como estima-se que essas concentrações sejam baixas, o projeto foi planejado utilizando apenas unidades de Biorreatores de Membranas (MBR) para remoção de sólidos, carga orgânica e turbidez, e posteriormente, passando por uma unidade de Osmose Reversa para redução do teor de sais, que será avaliado por analisadores de condutividade. No entanto, dependendo das análises de nitratos e fosfatos, o projeto deve ser reconsiderado para a inserção de unidades removedoras destes contaminantes.

Em relação às Estações de tratamento de água – ETA – existentes no Rio de Janeiro, geralmente o tratamento de água para distribuição para população e indústrias envolve a captação de água dos rios e posterior tratamento envolvendo as etapas de coagulação, floculação, cloração e filtração. E por isso muitas indústrias ainda tem dentro de suas instalações unidades de tratamento de água para adequá-la aos padrões de qualidade necessários para seu processo. Nas ETAs geridas pela CEDAE, por exemplo, o processo de coagulação e floculação é realizado pela aplicação de insumos químicos para aglutinar e aumentar o tamanho dos flocos formados pelos sólidos suspensos, seguido da etapa de decantação do lodo, desinfecção geralmente pela adição de cloro ou seus compostos, e por fim a filtração. Este caso foi citado para fins de comparação, já que a proposta deste estudo envolve unidades bem mais modernas e, conforme referências da literatura,

acredita-se que seja possível entregar uma qualidade de água superior à oferecida pela concessionária.

Para o projeto da unidade de tratamento de água de reúso, foram coletados dados médios de análises de efluentes realizadas nos últimos 6 anos. A proposta para instalação da unidade é tratar a água residuária de modo que ela obtenha parâmetros próximos a média histórica de valores da água filtrada que alimenta a torre de resfriamento, conformes os dados obtidos e apresentados na Tabela 11.

Tabela 11: Parâmetros médios do período 2016-2021 para Água de *make-up* da Bacia de AGR, Água de resfriamento circulante no processo e Efluente Final.

Parâmetros	Água Filtrada para <i>make-up</i> da bacia da torre de AGR	Água de Resfriamento recirculante	Efluente Final
Vazão	325 m ³ /h	30.000 m ³ /h	70 m ³ /h
Turbidez	0,1 NTU	5,4 NTU	40,3 NTU
pH	6,3	7,8	7,7
Condutividade	130 µS/cm	1495 µS/cm	4.655 µS/cm
Dureza Total	21,5 mg/L	255 mg/L	Sem dados**
DQO	2,1 mg/L	4 mg/L	123 mg/L
Sólidos Sedimentáveis Totais	0,18 mg/L	17,5 mg/L	0,08 mg/L
Sílica ¹	Sem dados*	140 ppm	Sem dados**

Fonte: Análises internas.

*Sem dados: Esta análise não é realizada na água filtrada.

**Sem dados: Esta análise não é realizada no efluente final.

Para os parâmetros de turbidez o limite adotado pela empresa é que o valor seja abaixo de 2 NTU para a água de reposição da bacia. Já para condutividade, sólidos suspensos, dureza, DQO e sílica não há referências, mas será adotado

¹ É um tipo de análise de sólidos, mas é feita à parte pois esse dado é utilizado para calcular os ciclos de concentração da torre.

neste trabalho que a água de reúso deve ser tratada para atingir os valores médios praticados nos últimos anos para estes parâmetros, conforme os valores apresentados na Tabela 11 para a “Água Filtrada para *make-up* da bacia da torre de AGR”.

Com este objetivo, foi pesquisado na literatura técnicas comumente utilizadas para remoção de carga orgânica, sólidos e sais com objetivo de adequação do efluente para torná-lo apto à servir como água de reúso na torre de resfriamento desta unidade petroquímica.

Para a escolha do melhor método de tratamento de modo a adequar a água residuária da ETE desta unidade industrial aos mesmos parâmetros de sua água filtrada, que atualmente é a que supre a bacia de resfriamento, propõe-se a instalação de uma unidade de tratamento de água de reúso próxima a sua torre de resfriamento. Há atualmente diversos métodos de tratamento de água de reúso disponíveis na literatura, desde a simples desinfecção até estações avançadas. Neste contexto, foi feito o levantamento das tecnologias existentes e suas eficiências de remoção de contaminantes, listados na Tabela 12.

Tabela 12: Contaminantes presentes em águas e técnicas de remoção

Técnica de Tratamento	Classes de Compostos					
	Sólidos Dissolvidos Ionizáveis	Gases Dissolvidos Ionizáveis	Compostos Orgânicos Dissolvidos	Particulados	Bactérias e Vírus	Endotoxinas
Evaporação	E / B	NE	B	E	E	E
Deionização, Eletrodialise e Eletrodeionização	E	E	NE	NE	NE	NE
Osmose Reversa	B	NE	B	E	E	E
Carvão Ativado	NE	NE	E/B	NE	NE	NE
Desinfecção com radiação ultravioleta	NE	NE	NE	NE	B	NE
Filtração em meio granular ou poroso	NE	NE	NE	E	NE	NE
Microfiltração	NE	NE	NE	E	NE	NE
Ultrafiltração	NE	NE	E	E	E	NE

Tabela 12: Contaminantes presentes em águas e técnicas de remoção

Técnica de Tratamento	Classes de Compostos					
	Sólidos Dissolvidos Ionizáveis	Gases Dissolvidos Ionizáveis	Compostos Orgânicos Dissolvidos	Particulados	Bactérias e Vírus	Endotoxinas
Oxidação ou Redução Química	B	B	B	NE	B	E
Abrandamento	B	NE	NE	B	NE	NE
Coagulação, floculação e sedimentação	NE	NE	NE	E	NE	NE
E = Eficaz (Remoção completa ou quase total) B = Bom (Remoção de grandes porcentagens) NE = Não eficaz (Baixa remoção ou ineficaz)						

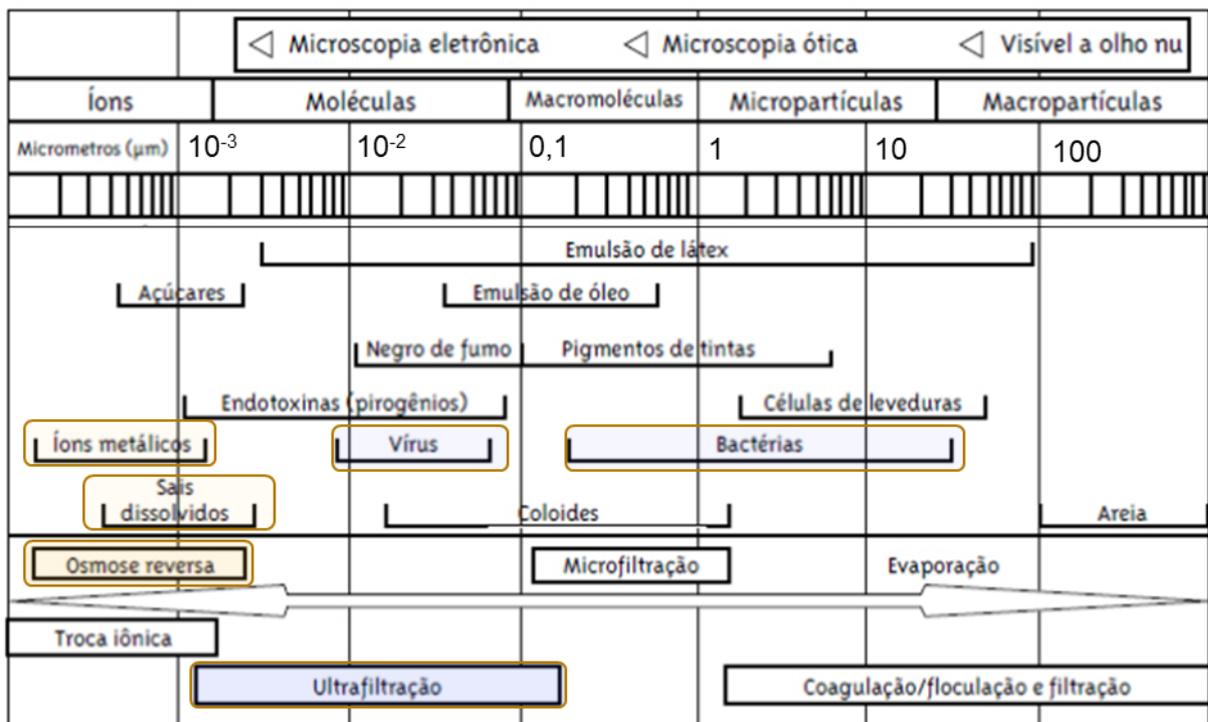
Fonte: HESPANHOL, 2005 apud SILVA, 2018.

Na água de resfriamento o maior problema é a presença de sais dissolvidos, pois está diretamente relacionado ao ciclo de concentração da torre, o que pode causar depósito nos trocadores de calor e conseqüente perda de troca térmica. Portanto, o tratamento escolhido precisa ser eficiente para minimizar este parâmetro, que é notoriamente alto devido à alta condutividade do efluente final (4.655 $\mu\text{S}/\text{cm}$) em relação à água filtrada (130 $\mu\text{S}/\text{cm}$), precisando o tratamento ter uma eficiência de remoção de quase 3.500%, o que faz necessário a instalação de uma Unidade de Osmose Reversa – OR – no circuito. Além disso, é necessária a remoção da carga orgânica, conforme indicado pela expressiva diferença entre a DQO do efluente final (123 mg/L) e da água filtrada (2,1 mg/L).

Apesar de na tabela acima indicar que a Osmose Reversa é eficiente para remoção de carga orgânica, tanto estudos quando a experiência na indústria mostram que este tipo de membrana é sensível, e entrar com uma carga rica em DQO, as membranas são prejudicadas e acaba sendo necessário uma frequência maior de paradas da unidade para limpeza. Por conta disso, também será indicado a instalação de uma unidade de pré-tratamento anterior à OR, na qual a mais recomendada é a *Membrane Bioreactor* – MBR, também chamada de biorreator de membranas ou membranas de ultrafiltração.

Para corroborar com a eficiência das unidades de MBR e osmose reversa para remoção de vírus, bactérias, e coloides, além de íons e sais dissolvidos. Isto ocorre porque, para cada um destes equipamentos, é intrínseco que suas membranas são capazes de reter sólidos de determinados tamanhos, conforme apresentados na Figura 21. Além disso, como já citado na revisão bibliográfica, as técnicas de MBR e Osmose reversa são responsáveis por entregar água de altíssima qualidade para o complexo industrial do ABC paulista no Projeto Aquapolo, com a OR sendo responsável por produzir água com condutividade na faixa de 30 $\mu\text{S}/\text{cm}$, bem inferior ao valor necessário pela petroquímica de Duque de Caxias em sua água filtrada para reposição da bacia torre de resfriamento, que está na faixa de 130 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Isto mostra a tendência desta proposta atender às necessidades de tratamento da água de reúso.

Figura 21: Faixas de remoção de substâncias por processos de tratamento de água

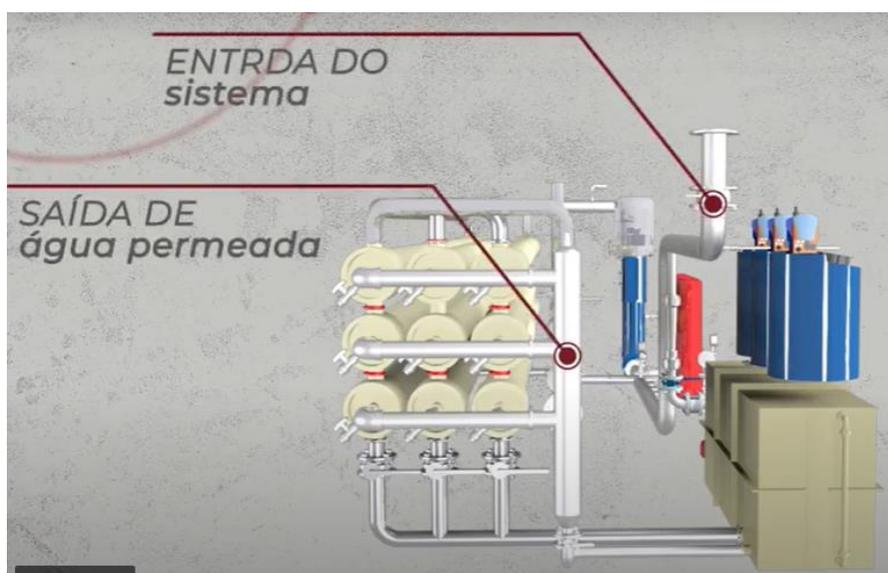


Fonte: Adaptado de Mierzwa e Cruz (2020).

Para maior detalhamento da proposta, a Osmose Reversa, ilustrada na Figura 22, consiste em um tipo de tratamento de água para remoção de sais por

meio de separação utilizando alta pressão, superior à pressão osmótica no lado mais concentrado, forçando a passagem da água pelas membranas para o lado menos concentrado, retraindo, desta forma, os sais e demais contaminantes. Neste processo, a eficiência de remoção de sais fica entre 90 e 95% quando bem dimensionado, obtendo valores de condutividade de até 0,2 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (FLUXO FILTRAÇÃO, 2020).

Figura 22: Unidade de Osmose Reversa



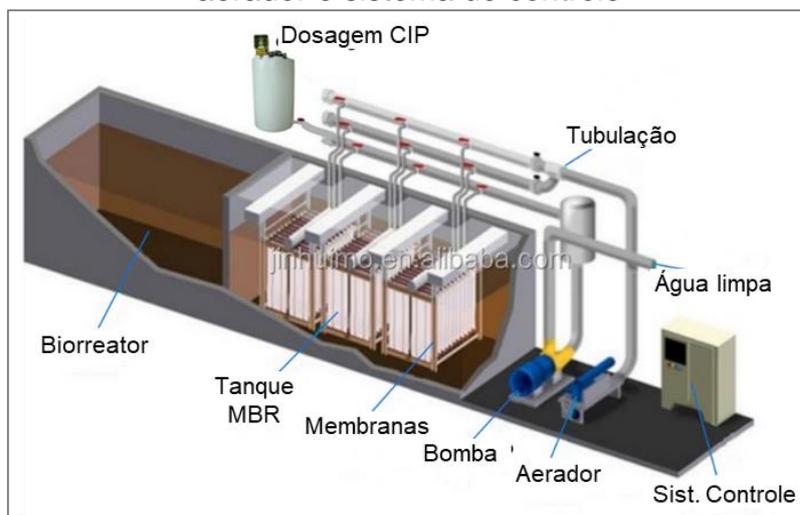
Fonte: GRATT (2022).

Em relação à remoção de matéria orgânica, uma outra opção seria a instalação de um sistema de lodo ativado seguido de filtros de carvão ativado, que atuaria pela adsorção de matéria orgânica. No entanto, o uso de MBR é mais econômico e eficiente para a remoção de compostos orgânicos e nutrientes como nitrogênio e fósforo do que quando comparado aos filtros de carvão ativado, além de ser necessário um menor tempo de residência para obter o mesmo grau de remoção de sólidos (CÔTÉ, MASINI e MOURATO, 2004). Por isso essa técnica não foi adotada.

O Biorreator de Membranas, comumente chamado de MBR, consiste em uma membrana permeável e seletiva com um processo biológico. O MBR é um tratamento biológico que, em parte, se assemelha com os sistemas de lodos ativados clássicos. No entanto, o tanque de decantação secundária, necessário no

processo de lodo ativado e que ocupa grandes espaços, é substituído por uma membrana de ultrafiltração, que pode ser instalada no interior do reator ou anexa a ele. Desta forma, consegue-se uma separação efetiva entre a biomassa e a água tratada (PEREIRA, 2016). Na Figura 23 é apresentado o esquema de uma unidade MBR, mostrando a disposição do biorreator, das membranas, do sistema de controle, bombas e aeradores.

Figura 23: Exemplo de Unidade MBR com biorreator, membranas, bombas, aerador e sistema de controle



Fonte: Adaptado de Indiamart (2022).

No mercado, a unidade MBR está disponível de duas formas: com a membrana externa ou submersa. No primeiro caso, o conteúdo do reator é bombeado para os módulos tubulares e o processo opera em fluxo cruzado, de modo que o efluente escoar paralelamente à superfície da membrana, enquanto o permeado escoar transversalmente à ela. Já no caso da MBR com módulo de membranas submerso, o feixe de membranas é imerso no tanque aerado e o conteúdo do biorreator fica em contato com a superfície externa das membranas. Desta forma, o permeado é obtido pela sucção do conteúdo do reator que atravessa as paredes da membrana. A separação ocorre pela aplicação de vácuo do lado permeado ou pela coluna de líquido no interior do reator (PEREIRA, 2016). Para este projeto, adota-se o MBR com módulo externo por ser mais simples e facilitar a limpeza, já que Pereira (2016) cita a complexidade na manutenção do reator do tipo membranas submersas.

O tratamento biológico e a separação física por membrana asseguram que a qualidade do efluente é mantida ao longo do tempo, em relação aos parâmetros turbidez, sólidos suspensos e microbiológicos, independentemente das variações de fluxo e a contaminação da água de entrada (SANTASMASAS, 2013 apud PEREIRA, 2016)

De acordo com Skouteris (2012 apud PEREIRA, 2016), a unidade MBR tem como desvantagens o consumo de energia. Além disso, devem ser contabilizados os custos futuros com a substituição da membrana, que envelhece com o tempo até chegar ao fim de campanha, que é verificado pelo lento aumento da pressão de operação devido ao entupimento das membranas, sendo necessário o aumento da frequência de limpezas químicas. No entanto, ainda é viável pela facilidade de instalação e por requerer um espaço bem menor para instalação, quando comparado com sistema de lodos ativados.

3.3 Expansão da capacidade do projeto

Para o caso de expansão da captação de efluente tratado para garantir 100% de suprimento à bacia da torre de resfriamento, a proposta é captação de efluentes das ETEs próximas à região, em convênio com a Companhia Estadual de Águas e Esgotos – CEDAE, para criação de conveniências como tubulações, conexões e sistema de bombeio deste efluente até a estação elevatória da REDUC, responsável por distribuir água bruta ao polo petroquímico de Duque de Caxias (BRITTO, QUINTSLR e MAIELLO, 2015), onde seria o local ideal para a instalação de um sistema de tratamento para água de reúso que abastecesse todo o complexo industrial da região, tal qual é feito com o Projeto Aquapolo, em São Paulo. Neste caso, na Tabela 13 são apresentadas as ETEs mais próximas à região e suas capacidades instaladas. Neste caso, vale ressaltar que seria necessário realização prévia do Estudo de Impacto Ambiental – EIA e elaboração do Relatório de Impacto Ambiental – RIMA, já que as obras impactariam a população e é necessário a análise para a aprovação pelo órgão ambiental e sociedade.

Tabela 13: Estações de Tratamentos de Efluentes próximas à REDUC e suas capacidades instaladas

ETE	Distância aprox. da REDUC	Capacidade Instalada
ETE Alegria	16 km	5000 L/s
ETE Penha	12 km	1086 L/s
ETE Pavuna	10 km	1500 L/s
ETE Sarapuí	9 km	1500 L/s

Fonte: *Google Maps* (2022); BIELSCHOWSKY (2014).

Pela maior proximidade e pela vazão atender à demanda, recomenda-se, neste estudo, que caso seja de interesse da empresa ou do polo petroquímico local, adotar a captação de efluente tratado da ETE Sarapuí, localizada em Belford Roxo, sendo necessário construção de tubulação desde a saída desta ETE até a adutora da REDUC, onde deve ser instalada a estação de tratamento de água de reúso. De acordo com BIELSCHOWSKY (2014), na Estação de Tratamento de Efluentes de Sarapuí há capacidade para tratamento de 1.500 L/s, com o tratamento primário quimicamente assistido e o tratamento secundário utilizando lodo ativado.

Caso no futuro haja permissão para o uso potável (como água de processos e em banheiros) de água de reúso, seria viável a instalação de uma estação para tratamento de água de reúso na própria indústria, pois a quantidade de água seria suficiente para a demanda da planta, e provavelmente haveria incentivos fiscais do Governo devido à não-poluição do corpo hídrico por não lançar seus efluentes, e também por não captar água diretamente dos rios, isentando-a destes custos.

Em relação às técnicas de tratamento, seria necessário realizar um estudo mais detalhado da qualidade do efluente da ETE Sarapuí para verificar seriam adequados as mesmas unidades de tratamento citadas na seção anterior, apenas adequando ao aumento de capacidade, ou se seria necessário remoção de algum outro parâmetro específico além de carga orgânica e teores de sais.

4. CONCLUSÃO

A prática de reúso de águas vem sendo cada vez mais estudada como uma alternativa à minimizar a captação de água potável por indústrias e setores agrícolas, sendo uma ferramenta importante para gestão mundial dos recursos hídricos. Nota-se engajamento dos setores regulatórios em criar normas que institucionalizem, estimulem e crie padrões para a água de reúso no Brasil, como pode ser citado o pelo avanço de Normas da ABNT para o reúso doméstico, pela elaboração da Proposta para instituir Política de Reúso de Efluente Sanitário Tratado no Brasil e também pelo investimento e instalação de um centro de tratamento de água de reúso na Região do ABC Paulista, a partir do Projeto Aquapolo, que é responsável por suprir todo o polo petroquímico da região, e que se tornou referência para muitas outras indústrias.

O potencial do reúso industrial de água é benéfico por diversos motivos como a redução da captação de água potável pelas indústrias, o que diminui a competitividade por este recurso hídrico em regiões muito populosas, que é o que geralmente ocorre próximo a polos industriais, mas outra razão é que ao se reutilizar a água internamente, evita-se o lançamento de poluentes e contaminantes no corpo hídrico, uma vez que essa água será tratada novamente e os resíduos gerados deste processo podem ser destinados para locais ambientalmente corretos, seja para incineração, coprocessamento, aterro industrial ou outros locais de coleta de resíduos adequados.

Neste contexto, o reúso é uma prática que também contribui para a despoluição dos corpos hídricos devido ao menor lançamento de cargas, promovendo a melhoria da qualidade ambiental. Esse também é um argumento válido quando fala-se sobre a viabilidade de se investir em reutilização de água, pois sabe-se que o problema da escassez hídrica não se restringe apenas à falta de água, mas também pela sua baixa qualidade, o que pode torna-la inviável para consumo dentro de alguns anos se ações de controle não forem tomadas.

No estudo de caso da indústria petroquímica realizado nesse trabalho foi possível estimar a vazão disponível para reúso neste local em cerca de 70 m³/h,

conforme dados históricos, além de conhecer os parâmetros necessários para ajustar a qualidade do efluente final para aplicação complementar à água de reposição da torre de resfriamento. E apesar de a vazão disponível para reúso ser inferior à necessária para operação da unidade de resfriamento, a prática é válida quando se leva em consideração a crescente preocupação do ramo industrial com as questões ambientais e com o receio pela crise hídrica, sendo o reúso uma alternativa viável para diminuir a captação de água da rede de distribuição de concessionárias ou corpos hídricos.

De acordo com o levantamento de dados históricos, foi proposta a unidade de tratamento de água de reúso composta por biorreatores de membranas e osmose reversa para adequação dos parâmetros acima da média, que foram carga orgânica e sólidos dissolvidos. Para a interligação entre a atual estação de efluentes e a nova unidade, foi estimada a necessidade de cerca de 520 m de tubulação de PVC rígido com 6" de diâmetro nominal.

Em relação ao contexto econômico, o investimento inicial em instalações para tratamento de reúso de água é alto, mas é válido pois como citado no Manual de Gestão de Recursos Hídricos, este custo se paga ao longo do tempo em relação ao que se economiza com a captação deste volume de água – o que varia é o tempo de retorno em relação à vazão de reutilização e a vazão solicitada pela indústria.

Ao decorrer deste estudo foi possível conhecer algumas normas vigentes para reutilização de água no Brasil e no mundo, uma expansão das técnicas de reúso tanto em indústrias quanto em aeroportos e meio agrícola. Ainda há muito o que avançar em relação às legislações e necessidade de existir um documento que institucionalize e apresente os padrões de reúso para cada tipo de atividade no Brasil. No entanto, esta pauta está em andamento e a elaboração da "Proposta de plano de ação para instituir uma Política de Reúso de Efluente Sanitário Tratado no Brasil" é promissora para a elaboração deste documento nos próximos anos, além da expectativa de permitir o reúso de águas também para outros fins que não apenas os não-potáveis. Isto facilitaria bastante a adoção da prática de reúso por indústrias, que não necessitariam mais de um sistema de exclusivo de armazenamento e distribuição deste tipo de água.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIQUIM – Associação Brasileira da Indústria Química e de Produtos Derivados. **Manual de Gestão Eficiente de Recursos Hídricos**. Grupo de Trabalho sobre Recursos Hídricos, São Paulo, 2016. Disponível em: < [https://abiquim-files.s3-us-west-](https://abiquim-files.s3-us-west-2.amazonaws.com/uploads/guias_estudos/Manual_Recursos_Hidricos_Vs8_WEB_FINAL_.pdf)

[2.amazonaws.com/uploads/guias_estudos/Manual_Recursos_Hidricos_Vs8_WEB_FINAL_.pdf](https://abiquim-files.s3-us-west-2.amazonaws.com/uploads/guias_estudos/Manual_Recursos_Hidricos_Vs8_WEB_FINAL_.pdf)>. Acesso em: 16 nov. 2021.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 9.948/1986 – Estudo de concepção de sistemas de esgoto sanitário**, 1986. p. 5. Disponível em: <<https://pdfcoffee.com/nbr-96481-pdf-free.html>>. Acesso em: 09 jan. 2022.

ABNT –. **NBR 12.218/1994 – Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público**, 1994. p. 4. Disponível em: <<http://www.emiliaweb.com.br/site/wp-content/uploads/2012/10/Nbr-12218-Projeto-De-Rede-De-Distribuicao-De-Agua-Para-Abastecimento-Publico.pdf>>. Acesso em: 09 jan. 2022.

ABNT –. **NBR 13.969/1997 – Tanques sépticos - Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos - Projeto, construção e operação**. Rio de Janeiro, 1997. Disponível em: <https://www.acquasana.com.br/legislacao/nbr_13969.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2021.

ABNT –. **NBR 9.800/1987 – Critérios para lançamento de efluentes líquidos industriais no sistema coletor público de esgoto sanitário**, 1987. p. 3. Disponível em: <<https://supremoambiental.com.br/wp-content/uploads/2018/07/nbr-n.-9.800-abnt-1987.-criterios-para-lancamento-de-efluente-liquidos-industriais.pdf>>. Acesso em: 09 jan. 2022.

ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **ATLAS Brasil - Abastecimento Urbano de Água**. Panorama Nacional, Brasília, v. 1, 2010. Disponível em: <<https://www.aris.sc.gov.br/uploads/revista/2735/YXwFOHqcDQSDQEA2bJfi2KfS2Pt-Binw.pdf>>. Acesso em: 07 nov. 2021.

ANA –. **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil**. Brasília, 2019. Disponível em: <http://www.snirh.gov.br/portal/snirh/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/conjuntura_informe_anual_2019-versao_web-0212-1.pdf>.

Acesso em: 07 nov. 2021.

ANA –. **Conjuntura Recursos Hídricos Brasil**. 2020. Disponível em: <<http://conjuntura.ana.gov.br/static/media/conjuntura-completo.23309814.pdf>>.

Acesso em: 07 nov. 2021.

AQUAPOLO. **Águas Industriais – Processo de Produção**. 2022. Disponível em: <<http://www.aquapolo.com.br/processo-producao/>>. Acesso em: 27 jan. 2022.

ASSEBURG, Marcos Koehler. **Case Aquapolo Água de Reúso Industrial**. IX Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, São Bernardo do Campo, p. 17, nov. 2018. Disponível em:

<http://www.ibeas.org.br/congresso9/Apresenta%C3%A7%C3%A3o_IX%20CONGEA_Aquapolo.pdf>. Acesso em: 02 nov. 2021.

BARROS, F. G. N.; AMIN, M. M. **Água: um bem econômico de valor para o Brasil e o mundo**. Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional, Taubaté, Jan-Abr 2008. Disponível em: <<https://docplayer.com.br/66219-Agua-um-bem-economico-de-valor-para-o-brasil-e-o-mundo-1.html>>. Acesso em: 15 nov. 2021.

BIELSCHOWSKY, M. C. **Modelo de gerenciamento de lodo de estação de tratamento de esgotos: aplicação do caso da bacia da Baía de Guanabara**, Rio de Janeiro, p. 185, 2014. Disponível em: <<http://www.repositorio.poli.ufrj.br/dissertacoes/dissertpoli1317.pdf>>. Acesso em: 18 nov. 2021.

BRANDÃO, A. S.; CABRAL, A. E. B.; DEUS, E. P.; SILVA, W. K. D.; SILVA, W. M. M. **Estudo de caso: uso de água recuperada na construção civil**, 2017. Disponível em: <http://revistadae.com.br/artigos/artigo_edicao_217_n_1782.pdf>. Acesso em: 04 nov. 2021.

BRASIL, D. F. **Avaliação da eficiência de biorreatores com membranas no tratamento de efluente industrial com enfoque na viabilidade de reúso**. XI ENGEMA, dez. 2017. Disponível em:

<<http://engemausp.submissao.com.br/19/anais/arquivos/281.pdf>>. Acesso em: 10 jan. 2022.

BRASIL. **Lei Nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997**. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. 176º da Independência e 109º da República. Brasília, 8 jan. 1997. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9433.htm>. Acesso em 21 nov. 2021.

BRASIL. **Lei Nº 9.984, de 17 de julho de 2000**. Dispõe sobre a criação da agência nacional de águas - ANA, entidade federal de implementação da política nacional de recursos hídricos e de coordenação do sistema nacional de gerenciamento de recursos hídricos, e dá outras providências. Diário Oficial da União de 18/07/200, p. 01. Brasília, 18 jul. 2000. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9984compilado.htm>. Acesso em 21 nov. 2021.

BRITTO, A. L. N. P.; QUINTSLR, S.; MAIELLO, A. **Acesso diferencial à água em Duque de Caxias - RJ; Quem Define os caminhos da Água na MetrÓpole?** 12º SILUSBA - Gestão da Água e do TerritÓrio: perspectivando sinergias, Brasília, nov. 2015. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/323458943_Acesso_Diferencial_a_Agua_em_Duque_de_Caxias_-_RJ_quem_define_os_caminhos_da_agua_na_metropole>. Acesso em: 15 jan. 2022.

BRUM, L. S. **Avaliação Operacional de Torres de Resfriamento: Um Estudo de Caso em uma Torre no RS**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – URGs. Escola de Engenharia. Porto Alegre, jul. 2015. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/127732/000970362.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 20 jan. 2022.

CARVALHO, D. D.; MACHADO, B. J. F. **Reúso de efluentes em torres de resfriamento - estudo conceitual: Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro**.

Acta Scientiarum. Technology, Maringá, v. 32, n. 3, p. 8, 2010. Disponível em: <<https://periodicos.uem.br/ojs/index.php/ActaSciTechnol/article/view/865/865>>.

Acesso em: 24 dez. 2021.

CONAMA – **Conselho Nacional do Meio Ambiente - Ministério do Meio Ambiente**, 2021. Disponível em: <<http://conama.mma.gov.br/atos-normativos-sistema>>. Acesso em: 09 jan. 2022.

CONAMA – **Resolução N° 357/2005 – CONAMA, de 17 DE MARÇO DE 2005**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. p. 36, 2005. Disponível em: <https://www.icmbio.gov.br/cepsul/images/stories/legislacao/Resolucao/2005/res_conama_357_2005_classificacao_corpos_agua_rtfcda_altrd_res_393_2007_397_2008_410_2009_430_2011.pdf>. Acesso em: 09 jan. 2022.

CONAMA – **Resolução N° 393/2007 – CONAMA, de 8 de agosto de 2007**. Dispõe sobre o descarte contínuo de água de processo ou de produção em plataformas marítimas de petróleo e gás natural, e dá outras providências. p. 3, 2007. Disponível em: <https://www.cbhdoce.org.br/wp-content/uploads/2018/08/CONAMA_RES_CONS_2007_393.pdf>. Acesso em: 09 jan. 2022.

CONAMA – **Resolução N° 397/2008 – CONAMA, de 3 de abril de 2008**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes. p. 3, 2008. Disponível em: <http://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=546>. Acesso em: 09 jan. 2022.

CONAMA – **Resolução N° 430/2011 – CONAMA, de 13 de maio de 2011**. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA. p. 9, 2011. Disponível em: <http://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=627>. Acesso em: 09 jan. 2022.

CÔTÉ, P.; MASINI, M.; MOURATO, D. **Comparison of membrane options for water reuse and reclamation**. Elsevier, p. 11, 2004. Disponível em: <[https://pdf.sciencedirectassets.com/271370/1-s2.0-S0011916400X03219/1-s2.0-S0011916404003327/main.pdf?X-Amz-Security-Token=IQoJb3JpZ2luX2VjEjR%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2FwEaCXVzLWVhc3QtMSJGMEQCIADK3jTbeKhvLPuK1gQYY4TmGG6ZW%2F77h4%2BvKzdSe6GsAiAB9hl6ZvDP](https://pdf.sciencedirectassets.com/271370/1-s2.0-S0011916400X03219/1-s2.0-S0011916404003327/main.pdf?X-Amz-Security-Token=IQoJb3JpZ2luX2VjEjR%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2FwEaCXVzLWVhc3QtMSJGMEQCIADK3jTbeKhvLPuK1gQYY4TmGG6ZW%2F77h4%2BvKzdSe6GsAiAB9hl6ZvDP)>. Acesso em: 16 jan. 2022.

EOS – Organização e Sistemas. **Formas de reúso de água**, 20 mar. 2019. Disponível em: <<https://www.eosconsultores.com.br/formas-de-reuso-de-agua/>>. Acesso em 30 jan. 2022.

EPA – Environmental Protection Agency. **Basic Information about Water Reuse**, 2021. Disponível em: <<https://www.epa.gov/waterreuse/basic-information-about-water-reuse#types>>. Acesso em: 13 nov. 2021.

FANTON, G.; NECKEL, A.; BONATTO, D.; PANDOLFO, A.; ROJAS, José W. J. **CONDIÇÕES AMBIENTAIS DO ESPAÇO URBANO DO MUNICÍPIO DE DAVID CANABARRO-RS**, Rio Claro, 2008. Disponível em: <<https://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/estgeo/article/download/3692/3036#:~:text=Segundo%20o%20sistema%20K%C3%B6ppen%2C%20David,temperatura%20m%C3%A9dia%20de%2020%20graus>>. Acesso em: 06 nov. 2021.

FARIA, A. A.; OBRACZKA, M.; SILVA JUNIOR, L. C. S.; MURICY, B.; OLIVEIRA, Kelly; MONTEIRO, Ana C. **Avaliação do Potencial de Reúso Industrial de Água na Região Metropolitana do Rio de Janeiro**, Rio de Janeiro, out. 2020. Disponível em: <<https://www.e-publicacoes.uerj.br/index.php/ric/article/view/55692>>. Acesso em: 04 nov 2021.

FERREIRA, A. P. T.; OLDEMBURG, C. H.; COSTA, C. F.; ZANZINI, J. C.; TAVARES, R. **TRATAMENTO DE EFLUENTE PARA REÚSO INDUSTRIAL - O PROJETO AQUAPOLO**. XX Encontro Internacional sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente – ENGEMA. 2022. Disponível em <<http://engemausp.submissao.com.br/20/anais/arquivos/120.pdf>>. Acesso em: 02 jan 2022.

FLUXO FILTRAÇÃO. **Sistema de Osmose Reversa Industrial**, 2020. Disponível em: <<http://fluxofiltracao.com.br/sistema-osmose-reversa-industrial/>>. Acesso em: 16 jan. 2022.

FOFANO, S.; PONTE, H. A. **Avaliação de técnicas de monitoração de corrosão em sistema de água de resfriamento contaminada com sulfetos**. In: Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos, 1999, Rio de Janeiro. Disponível em: <<https://docs.ufpr.br/~gea/Dissertacao/Socrates/Capitulo2-Fofano.pdf>>. Acesso em: 29 dez. 2021.

FOGAÇA, J. R.V. **Flotação – um processo de separação de misturas**. Mundo Educação. Disponível em: <<https://mundoeducacao.uol.com.br/quimica/flotacaoum-processo-separacao-misturas.htm>>. Acesso em: 07 jan. 2022.

FONTOURA, G. A. T. **Gestão de Resíduos e Efluentes Industriais**, Niterói, set. 2021. Universidade Federal Fluminense. Slides disponibilizados na disciplina de Gestão de Resíduos e Efluentes Industriais.

GRATT. **SKID Sistema de osmose reversa com membranas**, 2022. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=_oxGg_OKAb8>. Acesso em: 28 jan. 2022.

GIORDANO, G. **Tratamento e controle de efluentes industriais**. Revista ABES, v. 4, p. 84, 2004. Disponível em: <https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/50511334/Apostila_Tratamento_de_efluentes_industriais_original-with-cover-page-v2.pdf?Expires=1642117494&Signature=WE4uSwZZu8JOfxwG3-qqKd9dLeOxGfNrF7yWC6kRTIPgbSgwPf3FDrXONfE3bctycPaPz6-i8NxbQi1Nm5XBXwy9aX0O9zLDrsOz4E>. Acesso em: 10 jan. 2022.

HESPANHOL, I.; MIERZWA, J. C.; RODRIGUES, L. D. B.; SILVA, M. C. C. CENTRO INTERNACIONAL DE REFERÊNCIA EM REÚSO DE ÁGUA. **Conservação e Reúso de Água na Indústria**. Manual Empresarial do SENAI, Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: <<https://siquirj.com.br/site2013/wp-content/uploads/publicacoes-manual-de-reúso-de-agua-alerta-agua-e-energia.pdf>>. Acesso em: 15 jan. 2022.

HOEKSTRA, A. Y.; CHAPAGAIN, A. K.; ALDAYA, M. M.; MEKONNEN, M. M. **The Water Footprint Assessment Manual - Setting the Global Standard**, Londres, 2011. Disponível em: <https://waterfootprint.org/media/downloads/TheWaterFootprintAssessmentManual_2.pdf>. Acesso em: 05 nov 2021.

IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. **Resolução Nº 54 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos – CNRH, de 28 de novembro de 2005**. Diário Oficial da União, Nº 47, p. 91-92, Brasília, 9 mar. 2006. Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br/sophia/cnia/legislacao/MMA/RE0054-281105.PDF>>. Acesso em: 10 dez. 2021.

IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração. **Brasília Ambiental**, 2020. Disponível em: <<https://www.ibram.df.gov.br/legislacao-especifica-de-atividades-industriais/>>. Acesso em: 09 jan. 2022.

IICA – Instituto Interamericano de Cooperação para a Agricultura. **Elaboração de proposta do plano de ação para instituir uma política de reúso de efluente sanitário tratado no Brasil**. Interáguas - Programa de Desenvolvimento Setor Água, ago. 2017. Disponível em: <https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosSNSA/interaguas/reuso/produto_3_criterios_de_qualidade_da_agua_de_reuso.pdf>. Acesso em: 21 nov. 2021.

INDIAMART. **Semi-Automatic NA Submerged Membrane Bio Reactor, Capacity: Custom**. 2022. Disponível em: <<https://www.indiamart.com/proddetail/submerged-membrane-bio-reactor-12980634762.html>>. Acesso em: 27 jan. 2022.

INEA – Instituto Estadual do Ambiente. **DZ-205.R-6 – DIRETRIZ DE CONTROLE DE CARGA ORGÂNICA EM EFLUENTES LÍQUIDOS DE ORIGEM INDUSTRIAL**, Rio de Janeiro, p. 6, 2007. Disponível em: <<http://www.inea.rj.gov.br/wp-content/uploads/2019/10/DZ-0205.R-6-.pdf>>. Acesso em: 09 jan. 2022.

INEA –. **NOP-INEA-008 - Critérios e padrões para controle da ecotoxicidade**, Rio de Janeiro, p. 6, 2018. Disponível em: <<http://www.inea.rj.gov.br/wp-content/uploads/2019/01/NOP-INEA-08.pdf>>. Acesso em: 09 jan. 2022.

INEA – **NOP-INEA-03 - Credenciamento de laboratórios**, p. 61, 2017. Disponível em: <http://www.inea.rj.gov.br/wp-content/uploads/2019/01/NOP-INEA-03-Credenciamento-de-Laborat%C3%B3rios.pdf>. Acesso em: 09 jan. 2022. Estabelecer as responsabilidades, os procedimentos e os critérios técnicos para o credenciamento de Laboratórios.

INEA – **NOP-INEA-48 - Programa estadual de autocontrole de efluentes líquidos - PROCON ÁGUA**, Rio de Janeiro, p. 39, 2021. Disponível em: <http://www.inea.rj.gov.br/wp-content/uploads/2021/11/NOP-INEA-48.pdf>. Acesso em: 09 jan. 2022.

JADE, L.; FERREIRA, L. C. **Onde está a água no brasil?** EBC – Empresa Brasil de Comunicação. Disponível em <https://www.ebc.com.br/especiais-agua/agua-no-brasil/#:~:text=Cerca%20de%2012%25%20da%20disponibilidade,dos%20recursos%20h%C3%ADricos%20do%20pa%C3%ADs.>>. Acesso em 27 jan. 2022.

KUBLER, H.; CORREIA, P.; SCHIMMOLLER, L.; MARCATO, F.; SCAZUFCA, P.; ORSINI, F. **Elaboração de proposta do plano de ação para instituir uma política de reúso de efluente sanitário tratado no brasil - produto II – Experiências de reúso**, v. II, dez. 2016. Disponível em: https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosSNSA/interaguas/reúso/produto2_experiencias_de_reúso.pdf. Acesso em: 02 jan. 2022.

LAZAROVA, V.; ASANO, T. **Introductory Chapter: Milestones in water reuse: main challenges, keys to success and trends of development. An overview. Milestones in Water Reuse - The Best Success Stories**, 2013. Disponível em: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00UA2621/milestones-in-water-reuse/introductory-chapter>. Acesso em: 09 dez. 2021.

LEGNER, C. **Filtros Para Sistema De Resfriamento Na Indústria**, nov. 2015. Revista e Portal Meio Filtrante. Disponível em: <https://meiofiltrante.com.br/Artigo/882/filtros-para-sistema-de-resfriamento-na-industria>. Acesso em: 03 fev. 2022.

LIMA, R. M. A. **Gestão da água em edificações: utilização de aparelhos economizadores, aproveitamento de água pluvial e reúso de água cinza**, Belo

Horizonte, jul. 2010. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUOS-9AZK24/1/monografia_rodrigo__especializa__o_const._civil_.pdf>. Acesso em: 26 dez. 2021.

MANCUSO, P. C. S.; SANTOS, H. F. **Reúso de água para torres de resfriamento**, São Paulo, nov. 2001. Disponível em: <<http://colecoes.sibi.usp.br/fsp/files/original/952afbf74da1f8655a67bbedbbb0dac3.pdf>>. Acesso em: 28 dez. 2021.

MANCUSO, P. C. S.; SANTOS, H. F. **Reúso de Água**. Ed. Manole. Barueri, 2003. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=ATxDFRuxInUC&oi=fnd&pg=PR13&dq=%C3%A1gua+de+re%C3%BAso+industrial&ots=-Kj-M25Lrd&sig=EYsXxlQ8Sz42gnXLXnOQnj6poHY#v=onepage&q=%C3%A1gua%20de%20re%C3%BAso%20industrial&f=false>>. Acesso em: 14 nov. 2021.

MAPS, Google. **Ferramenta** utilizada para estimar o tamanho da tubulação necessária para o estudo de caso. Disponível em: <<https://www.google.com/maps/>>. Acesso em: 09 dez. 2021.

MIERZWA, J. C.; CRUZ, N. **Saúde pública e inovações tecnológicas para abastecimento público**. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental. São Paulo, 2020. Saúde Soc. São Paulo, V.29, N.1, 2020. Disponível em: <<https://www.scielo.org/pdf/sausoc/2020.v29n1/e180824/pt>>. Acesso em: 27 jan. 2022.

MILNE, S. **Onde a escassez de água já provoca guerras no mundo (e quais as áreas sob risco iminente)**, ago. 2021. BBC News Brasil. Disponível em: <<https://www.bbc.com/portuguese/geral-58319129>>. Acesso em: 29 jan. 2022.

OLIVEIRA, E. F. **Sistemas de abastecimento de água da Cidade do Rio de Janeiro, com ênfase no GUANDU**, Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: <<https://seaerj.org.br/pdf/Guandu/ApresentacaoparaaSEAERJ.pdf>>. Acesso em: 01 jan. 2022.

PEREIRA, A. C.; GUIMARÃES, Eveline O. **Modelagem do Sistema de Tratamento de Efluentes Industriais da Unidade PVC 2 AL**. CENPEQ - Curso de Formação em Engenharia de Processamento Petroquímico, Rio de Janeiro, p. 10, 2020.

PEREIRA, A. R. **Reator biológico com Membrana (MBR) aplicado ao tratamento de esgotos gerados por unidades residenciais unifamiliares**. Universidade de Brasília - Faculdade de Tecnologia - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, p. 128, set. 2016. Disponível em: <<http://ptarh.unb.br/wp-content/uploads/2017/03/Disserta%C3%A7%C3%A3o-PTARH.DM-190-2016-Anne-Relvas-Pereira.pdf>>. Acesso em: 03 jan. 2022.4

POSSAS, M. **Distribuição da água na Terra**. Fonte Hídrica, nov. 2011. Disponível em: <<http://fontehidrica.blogspot.com/2011/11/distribuicao-da-agua-na-terra.html>>. Acesso em: 27 jan. 2022.

RIO DE JANEIRO. **Lei Nº 7.599/2000, de 24 de maio de 2017**. Dispõe sobre a obrigatoriedade de indústrias situadas no estado do rio de janeiro instalarem equipamentos de tratamento e reutilização de água. Diário Oficial do Estado do Rio de Janeiro, Poder Executivo – Parte I, p. 01. Disponível em: <http://www.ioerj.com.br/portal/modules/conteudoonline/mostra_edicao.php?session=VDFWVmVWSnFiRUppUkZWMFRsUk9SMDE1TURCT1ZFSkhURIZHUIU5RVkzUk5SVWsxVG10Tk1VNVZTa2RPVkJZFMQ==&p=MQ==&tb=TEVJIDc1OTkmlzAxMzs=>>. Acesso em: 16 jan. 2022.

SANTIN, J. R.; GOELLNER, E. **A Gestão dos Recursos Hídricos e a Cobrança pelo seu uso**, Passo Fundo, dez. 2013. Disponível em: <<https://periodicos.ufsc.br/index.php/sequencia/article/view/2177-7055.2013v34n67p199/25849>>. Acesso em: 06 nov. 2021.

SANTOS, A. S. P.; GONÇALVES, R. F.; MELO, M. C.; LIMA, M. A. M.; ARAUJO, B. M. **Uma análise crítica sobre os padrões de qualidade de água de uso e de reúso no Brasil**, Rio de Janeiro, Jul-Dez 2020. Disponível em: <<https://www.e-publicacoes.uerj.br/index.php/sustinere/article/view/48976/36345>>. Acesso em: 04 nov. 2021.

SANTOS, V. S. D., maio 2021. **Ciclo da água**. Disponível em: <<https://mundoeducacao.uol.com.br/biologia/ciclo-agua.htm>>. Acesso em: 27 jan. 2022.

SAUTCHÚK, C. A.; LANDI, F. D. N.; MIERZWA, J. C.; VIVACQUA, M. C. R.; SILVA, M. C. C.; LANDI, P. D. N.; SCHMIDT, William. **Conservação e reúso de água – Manual de orientações para o setor industrial**. Centro Estadual das Indústrias do Estado de São Paulo - CIESP, São Paulo, v. 1, nov. 2011. Disponível em: <<http://www.ciesp.com.br/pesquisas/conservacao-e-reuso-de-agua-manual-de-orientacoes-para-o-setor-industrial>>. Acesso em: 12 nov. 2021.

SEBRAE – Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas. **MANUAL DE CONSERVAÇÃO E REÚSO DA ÁGUA NA INDÚSTRIA**, Rio de Janeiro, 2007. Disponível em <<https://www.sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/bis/manual-de-conservacao-e-reuso-da-agua-na-industria,3aa6381b363dd510VgnVCM1000004c00210aRCRD>>. Acesso em: 26 mai. 2021.

SILVA, D. O.; CARVALHO, A. R. P. **Conceitos Básicos de Tratamento de Água de Resfriamento**. Kurita, p. 4, jan. 2015. Disponível em: <<https://kurita.com.br/index.php/artigos-tecnicos/tratamento-de-agua-de-resfriamento/>>. Acesso em: 26 dez. 2021.

SILVA, J.; GNIPPER, S. F. **Diâmetro interno de tubos comerciais para dimensionamento**, set. 2009. Disponível em: <<https://faq.altoqi.com.br/content/127/75/pt-br/di%C3%A2metro-interno-de-tubos-comerciais-para-dimensionamento.html>>. Acesso em: 02 jan. 2022.

SILVA, R. D. V. **Estudo sobre a ampliação da oferta da água de reúso da ETE Penha para fins industriais**. Agência Nacional de Águas – ANA, São Paulo, p. 104, 2018. Disponível em: <<https://capacitacao.ana.gov.br/conhecerh/bitstream/ana/2815/1/ROSIANE%20ENOFRE%20VENTURA%20DA%20SILVA.pdf>>. Acesso em: 16 jan. 2022.

SILVEIRA, P. G. **Energia e mudanças climáticas: impactos socioambientais das hidrelétricas e diversificação da matriz energética brasileira**, Santa Catarina, v. Vol. 17 Núm. 33 (2018): Enero-Junio, 2016. Disponível em:

<<https://revistas.udem.edu.co/index.php/opinion/article/view/2463/2156>>. Acesso em 20 nov. 2021.

TROVATI, J. **Curso Tratamento de Água de Resfriamento**, São Paulo, set. 2004. Disponível em: <https://www.snatural.com.br/PDF_arquivos/Torre-Caldeira-Tratamento-Agua.pdf>. Acesso em: 28 out. 2021.

VENANCIO, D. F. V.; SANTOS, R. M.; CASSARO, S.; PIERRO, P. C. C. **A crise hídrica e sua contextualização mundial**, Goiânia, 2011. Enciclopédia Biosfera. Disponível em: <<https://www.conhecer.org.br/enciclop/2015E/a%20crise%20hidrica.pdf>>. Acesso em: 02 nov. 2021.

VIEIRA, F. C. **Viabilidade Técnica e Econômica do Reaproveitamento de Efluentes de Torres de Resfriamento**, nov. 2011. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/38411/000823845.pdf?sequence>>. Acesso em: 28 dez. 2021.

WINTGENS, T.; HOCHSTRAT, R.; KAZNER, C.; JEFFREY, P.; JEFFERSON, Bruce; MELIN, Thomas. **Managed Aquifer Recharge as a component of sustainable water strategies – a brief guidance for EU policies. Water Reclamation Technologies for Safe Managed Aquifer Recharge**, p. Chapter 22, 2012. Disponível em: <<https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpWRTSMAR2/water-reclamation-technologies/water-reclamation-technologies>>. Acesso em: 08 dez. 2021.