

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

CAMPUS LONDRINA

CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA

GIOVANA SAVIAN NERI

**USO DE RESINA DE TROCA IÔNICA PARA
REAPROVEITAMENTO DE REJEITO DE ÁGUA DA
OSMOSE REVERSA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

LONDRINA

2023

GIOVANA SAVIAN NERI

**USO DE RESINA DE TROCA IÔNICA PARA
REAPROVEITAMENTO DE REJEITO DE ÁGUA DA
OSMOSE REVERSA**

**USE OF ION EXCHANGE RESIN FOR REUSE OF REVERSE
OSMOSIS WATER WASTE**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação,
apresentado à Universidade Tecnológica Federal
do Paraná (UTFPR), Campus Londrina como
requisito parcial para obtenção do título de
Engenheiro Químico.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Larissa Maria Fernandes

LONDRINA

2023



Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

GIOVANA SAVIAN NERI

**USO DE RESINA DE TROCA IÔNICA PARA
REAPROVEITAMENTO DE REJEITO DE ÁGUA DA
OSMOSE REVERSA**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação,
apresentado à Universidade Tecnológica Federal
do Paraná (UTFPR), Campus Londrina
como requisito parcial para obtenção do título de
Engenheiro Químico.

Orientadora: Prof.^a. Dr.^a Larissa Maria Fernandes
Gatti

Data de aprovação: 13 de dezembro de 2023

Larissa Maria Fernandes

Doutorado em Engenharia Química Universidade Estadual de Maringá

Joel Fernando Nicoleti

Doutorado em Engenharia de Alimentos Universidade Estadual de Campinas

Sidmara Bedin

Doutorado em Engenharia Química Universidade Estadual de Campinas

LONDRINA

2023

RESUMO

A água é um elemento essencial nas interações e reações biológicas, além de ser considerada um recurso finito, sendo assim, a falta de água potável e a depreciação de sua qualidade é uma das principais problemáticas envolvendo a sobrevivência e a melhoria na qualidade de vida. A água pode ser reaproveitada de diversas maneiras, e essa prática gera inúmeros benefícios ambientais por conta da capacidade de redução da poluição hídrica ao minimizar o descarte de efluentes. O presente estudo aborda a possibilidade de reuso da água de rejeito industrial na área de utilidades oriunda de osmose reversa e visando a redução de seu consumo e desperdício por meio de tratamento em resinas de troca iônica para utilização em torres de resfriamento, bem como a destinação correta dos efluentes gerados nesse processo. Realizou-se análises dos parâmetros da água de rejeito para verificar a possibilidade de fazer sua passagem em resinas de troca iônica e obter resultados análogos aos parâmetros físico-químicos estabelecidos pela empresa. As análises foram em relação ao pH, condutividade e concentração de íons de acordo com os dados obtidos em literatura. Através de simulação em planilha Excel, confrontou-se os dados com a coluna existente. Posteriormente realizou-se uma estimativa da característica da água do processo de regeneração das resinas de modo a qualificar o efluente para destinação correta em sua etapa de tratamento. As considerações de operação do processo foram definidas para uma vazão de 10 m³/h e tempo de operação de 24h. Pela planilha, foi possível concluir que a resina suportava os parâmetros propostos e confirmou-se os dados dimensionais estimados. Através das resinas indicadas, identificou-se o processo de regeneração, assim os parâmetros da água de lavagem foram estimados com base na água potável no ponto de saída de água tratada e constatou-se que esse efluente pode ser ajustado. Segundo o tratamento de efluentes padrão indicado na literatura, pode-se concluir que o local mais indicado para o destino do efluente de regeneração das resinas são nas etapas de equalização e de coagulação, uma vez que podem influenciar nos processos biológicos, e nessas etapas podem ser tratados de forma a amenizar os riscos e até mesmo serem retirados do processo. Diante do exposto, o processo de reuso acarreta na diminuição do inventário de água residuária em 10%, tratando-se 10 m³/h. Portanto, conclui-se que a proposta de implementação do reuso de água por tratamento em resinas iônicas é uma alternativa atraente, por reduzir o consumo de água e aumentar a capacidade industrial, tornando-a mais circular e sustentável.

Palavras-chave: Osmose Reversa; Reuso; Torre de Resfriamento; Tratamento de Efluentes; Troca Iônica.

ABSTRACT

Water is an essential element in biological interactions and reactions, in addition to being considered a finite resource, therefore, the lack of potable water and the depreciation of its quality is one of the main problems involving survival and improving quality of life. Water can be reused in several ways, and this practice generates numerous environmental benefits due to its ability to reduce water pollution by minimizing the disposal of effluents. The present study addresses the possibility of reusing industrial waste water in the area of utilities originating from reverse osmosis and aiming to reduce its consumption and waste through treatment in ion exchange resins for use in cooling towers, as well as the disposal of the effluents generated in this process. Analyzes of the waste water parameters were carried out to verify the possibility of passing it through ion exchange resins and obtaining results analogous to the physical-chemical parameters established by the company. The analyzes were in relation to pH, conductivity and ion concentration in accordance with data obtained in the literature. Through simulation in an Excel spreadsheet, the data was compared with the existing column. Subsequently, an estimate of the water characteristics of the resin regeneration process was carried out in order to qualify the effluent for correct destination in its treatment stage. The process operation considerations were defined for a flow rate of 10 m³/h and an operating time of 24 hours. Using the spreadsheet, it was possible to conclude that the resin supported the proposed parameters and the estimated dimensional data was confirmed. Using the indicated resins, the regeneration process was identified, thus the washing water parameters were estimated based on the drinking water at the treated water outlet point and it was found that this effluent can be adjusted. According to the standard effluent treatment indicated in the literature, it can be concluded that the most suitable place for the destination of the resin regeneration effluent is in the equalization and coagulation stages, since they can influence biological processes, and in these stages they can be treated in a way that mitigates the risks and even be removed from the process. In view of the above, the reuse process results in a reduction in the wastewater inventory by 10%, treating 10 m³/h. Therefore, it is concluded that the proposal to implement water reuse through treatment with ionic resins is an attractive alternative, as it reduces water consumption and increases industrial capacity, making it more circular and sustainable.

Keywords: Reverse Osmosis; Reuse; Cooling Tower; Wastewater Treatment; Ion Exchange.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processo produtivo do café solúvel.....	20
Figura 2 - Fluxograma de produção da empresa.....	21
Figura 3 - Setor de utilidades da empresa.	21
Figura 4 - Distribuição de água nos continentes.....	23
Figura 5 - Média anual total das fontes renováveis de água doce por países.....	24
Figura 6 - Nível de estresse hídrico por país em 2015.	25
Figura 7 - Evolução de retirada de água no mundo (1990-2018) em km ³ /ano.	26
Figura 8 - Esquema do sistema de resfriamento semi-aberto.....	31
Figura 9 - Esquema do sistema de resfriamento fechado.	32
Figura 10 - Torres de circuito fechado e aberto, respectivamente.	35
Figura 11 - Esquema do funcionamento da torre de resfriamento por indução mecânica.	36
Figura 12 - Esquema de uma torre de resfriamento.....	43
Figura 13 - Esquema de um processo de separação por membrana.	46
Figura 14 - Fluxos e pressões envolvidos na osmose e osmose reversa.	47
Figura 15 - Esquema de uma membrana para purificação de fluidos.	48
Figura 16 - Separação por membranas de osmose reversa.	49
Figura 17 - Funcionamento da troca iônica em resinas catiônicas.	53
Figura 18 - Estrutura de resinas macroporosas (a) e microporosas/gel (b).	55
Figura 19 - Estrutura de resinas aniônicas.	56
Figura 20 - Estrutura de resinas catiônicas.	56
Figura 21 - Regeneração de resinas catiônicas.....	60
Figura 22 - Regeneração de resinas aniônicas.....	60
Figura 23 - Planilha eletrônica para inserção dos dados.....	72
Figura 24 - Planilha eletrônica para inserção dos dados.....	73
Figura 25 - Proposta de recuperação da água.....	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estimativa da evolução do consumo humano diário per capita de água.....	24
Tabela 2 - Parâmetros de controle físico-químico do tratamento de água de resfriamento e caldeiras.....	40
Tabela 3 - Porcentagem de rejeição da membrana de poliamida.	49
Tabela 4 - Ordem de seletividade dos íons.....	58
Tabela 5 - Condições para descarte de efluente segundo Resolução 430/2011.	61
Tabela 6 - Parâmetros da água de rejeito de osmose da literatura e o usado como estimativa.....	74
Tabela 7 - Parâmetros da água potável segundo PORTARIA GM/MS N°888/2021	75
Tabela 8 - Parâmetros estimados da água de limpeza das resinas.....	76

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANA	Agência Nacional de Água
AOV	Ácidos Orgânicos Voláteis
CA	Acetato de Celulose
CNRH	Conselho Nacional de Recursos Hídricos
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COT	Carbono Orgânico Total
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
DVB	Divinilbenzeno
EPA	Environmental Protection Agency
ERWR	External Renewable Water Resources
ETE	Estação de Tratamento de Efluentes
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Renováveis
IRWR	Internal Renewable Water Resources
MBR	Membrane Bioreactor
MF	Microfiltração
NBR	Norma Brasileira
NF	Nanofiltração
NTU	Unidades Nefelométricas de Turbidez

OD	Oxigênio Dissolvido
OI	Osmose Inversa
OMS	Organização Mundial da Saúde
ONU	Organização das Nações Unidas
OR	Osmose Reversa
PNMA	Política Nacional de Meio Ambiente
PNRH	Política Nacional de Recursos Hídricos
PSM	Processos de Separação por Membranas
SINGREH	Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos
SDI	Índice de Densidade do lodo
SDT	Sólidos Dissolvidos Totais
SST	Sólidos Suspensos Totais
SSVTA	Sólidos Suspensos Voláteis no Tanque de Aeração
TDH	Tempo De Detenção Hidráulica
TRWR	Total Renewable Water Resources
UC	Unidade de Coloração
UF	Ultrafiltração
UNESCO	United Nations Educational Scientific And Cultural Organization
UNDESA	United Nations Department of Economic and Social Affairs
UASB	Upflow Anaerobic Sludge Blanket

WWAP

United Nations World Water Assessment Program

LISTA DE SÍMBOLOS

$CaCO_3$	Carbonato de Cálcio
H^+	Íon Hidrônio
$PtCo$	Platina-Cobalto
SiO_2	Dióxido de Silício
A	Vazão de Perdas por Arrase [m^3/h]
B	Vazão de Purga [m^3/h]
C	Ciclo de Concentração [adimensional]
C_f	Concentração de Solutos na Alimentação [kg/m^3]
C_p	Concentração de Solutos no Permeado [kg/m^3]
E	Vazão de Perdas por Evaporação [m^3/h]
M	Vazão de Reposição [m^3/h]
R_j	Rejeição/Retenção de Solutos [adimensional]
x_m	Fração Mássica de Contaminantes no Make-Up [adimensional]
x_b	Fração Mássica de Contaminantes na Purga [adimensional]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	17
2.1	OBJETIVOS GERAIS	17
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
3	REFERENCIAL TEÓRICO	18
3.1	PROCESSO PRODUTIVO DE CAFÉ SOLÚVEL	18
3.2	ESCASSEZ DA ÁGUA	22
3.2.1	Reuso	27
3.2.2	Legislação	28
3.3	SISTEMAS DE RESFRIAMENTO	30
3.3.1	Torres de resfriamento	32
3.3.2	Tratamento da água de resfriamento.....	36
3.3.3	Parâmetros de controle da água de resfriamento.....	39
3.3.4	Balanço em torres de resfriamento.....	43
3.4	MÉTODOS DE TRATAMENTO DE ÁGUA	45
3.4.1	Processos de Separação por Membranas.....	45
3.4.2	Troca Iônica.....	52
3.5	TRATAMENTO DE EFLUENTES	61
3.5.1	Tratamento preliminar	62
3.5.2	Tratamento primário ou físico.....	62
3.5.3	Tratamento secundário ou biológico	65
3.5.4	Tratamento terciário ou químico.....	70
4	METODOLOGIA	71
5	ANÁLISE DOS DADOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	74
5.1	ANÁLISE DO USO DAS RESINAS IÔNICAS	74
5.2	ESTUDO DO RESÍDUO DO TRATAMENTO PROPOSTO E SUA DESTINAÇÃO NO TRATAMENTO DE EFLUENTES DA EMPRESA	76
5.3	RESUMO DO MODELO PROPOSTO	78
6	CONCLUSÃO	79
7	RECOMENDAÇÕES	81
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82
	APÊNDICE A – FLUXOGRAMA DE PRODUÇÃO DA EMPRESA	95
	APÊNDICE B – PROPOSTA DE RECUPERAÇÃO DE ÁGUA	96

1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural finito, ela é componente essencial dos seres vivos, meio de vida, elemento representativo de valores sociais e culturais, além de importante fator de produção no desenvolvimento de atividades econômicas pela utilização em atividades domésticas, irrigação, pesca, geração de energia, processos industriais, entre outros (SILVA e TEIXEIRA, 2011). Sendo assim, a falta de água potável é um dos principais problemas para a sobrevivência e melhoria na qualidade de vida (PORTO *et al.*, 1997).

Apesar de ser naturalmente renovável, a manutenção da qualidade da água está reduzida. Segundo a Organização das Nações Unidas (ONU), a quantidade de água doce existente no planeta é de apenas 2,5%. A maior parte da água doce está nas geleiras polares e menos de 1% está nos rios e nos leitos subterrâneos. Assim, a depreciação da qualidade da água pode comprometer a sobrevivência humana, sendo necessárias a manutenção da sua qualidade e medidas para evitar o seu desperdício. (ANDRADE, 2014)

A distribuição da água no planeta é bastante desigual, a América Latina é a região com maior abundância, compreendendo cerca de 30% da água doce superficial do planeta (HELLER e DE PÁDUA, 2006 *apud* ANDRADE, 2014). O Brasil, por estar no continente que possui o maior volume hídrico, adquiriu um consumo desordenado e um desperdício de água pelas indústrias durante muito tempo, porém, o ritmo acelerado de industrialização e a necessidade de captação de água para processo, passaram a impactar o meio ambiente de forma significativa, agravando a sustentabilidade dos recursos hídricos (BUNGE, 2015).

Na década de 70, o esgotamento dos recursos naturais preocupava a sociedade, levando muitos países a revisarem suas estratégias e políticas governamentais sobre a gestão de recursos (VIEIRA, 2011). De acordo com Careta *et al.* (2019), a gestão de recursos hídricos mobiliza a cada ano mais cientistas, organizações e a sociedade, mostrando preocupação com a manutenção do recurso que tem perdido muito sua qualidade diante do crescimento populacional e das atividades econômicas e pela redução da oferta.

Segundo a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) (BRASIL, 1997, p. 1), “a água é um bem de domínio público, recurso natural limitado, dotado de valor e seu uso prioritário é o consumo humano e dessedentação de animais”. Apesar disso, os maiores usos da água estão nas atividades agropecuárias e industriais (HESPANHOL e GONÇALVES, 2004). No Brasil, 60% do uso são destinados à agricultura, 27% nas indústrias e 13% para uso doméstico (HELLER e DE PÁDUA, 2006 *apud* ANDRADE, 2014).

A indústria é o segundo maior usuário mundial de água, sendo que a quantidade de água necessária para os mais variados usos nesse setor depende do tipo de atividade, da capacidade produtiva, das condições climáticas, da disponibilidade, da cultura organizacional, da tecnologia usada, dos métodos de produção, entre outras (ANDRADE, 2014). A água industrial pode ser de uso direto, quando entra em contato com o produto nos processos industriais, ou indireto, quando participa nas utilidades coadjuvantes. Assim, a água pode ser incorporada no produto final, participar em processos de produção, preparo de reagentes, nas torres de refrigeração, nas caldeiras, consumo humano, cozinhas, banheiros, manutenção, serviços de jardinagem e lavagem das áreas comuns (HESPANHOL, 2002; CASANI, ROUHANY e KNOCHEL, 2005). A água utilizada para obtenção de vapor e nos sistemas de resfriamento de equipamentos são os principais pontos de consumo, além de produzir grande volume de efluentes (VIEIRA, 2011).

Embora atualmente muitas empresas não façam tratamento de seus resíduos industriais, a regulamentação e a busca por maiores mercados fez com que houvesse um ajuste na redução do consumo de água e mitigação dos impactos ao meio ambiente (SILVA JÚNIOR, 2009 *apud* ANDRADE, 2014). A política de recursos hídricos no Brasil tem tentado minimizar os impactos através da taxação pelo uso da água e descarte de efluentes fora dos padrões e o compromisso com as Metas do Milênio, através da Lei das Águas (BRASIL, 1997) pela Agência Nacional de Água (ANA) e o lançamento do Plano Nacional de Recursos Hídricos, além da institucionalização do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos – SINGREH (BRASIL, 2007).

Ademais, a indústria vê os resíduos como perdas de insumo e energia, dessa forma a necessidade de reduzir o desperdício e custos e minimizar o

consumo de água e sua escassez de oferta, vem forçando mudanças e criação de políticas internas de revisão dos procedimentos operacionais e modernização dos seus processos, sendo crescente práticas de reuso e recuperação de água e uso de efluente e águas de qualidade inferior (BUNGE, 2015).

A Resolução do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) n° 54 (BRASIL, 2005, p. 1) define a água de reuso como "água residuária, que se encontra dentro dos padrões exigidos para sua utilização nas modalidades pretendidas", além de considerar o reuso uma prática de racionalização e de conservação de recursos hídricos que "reduz a descarga de poluentes em corpos receptores, [...]reduz os custos associados à poluição e contribui para a proteção do meio ambiente e da saúde pública".

Segundo vários estudos, o reuso pode se dar em torres de resfriamento, caldeiras, água de processo, construção civil, lavagem de pisos e equipamentos, irrigação e recreação, sendo que as torres de resfriamento e caldeiras consomem 70% de toda a água que entra no setor industrial (MACHADO, 2004 *apud* ANDRADE, 2014). A água pode ser reaproveitada de diversas maneiras uma vez que as características físico-químicas e biológicas exigidas são distintas nos vários processos presentes numa mesma indústria (NASCIMENTO, 2004). Essa prática traz benefícios ambientais já que pode reduzir a poluição hídrica por meio da minimização da descarga de efluentes (VIEIRA, 2011).

Segundo Vieira (2011), alguns efluentes com potencial para reuso são: correntes de retrolavagens, rejeitos de osmose inversa, regeneração de resinas de troca iônica, rinsagem e purga das torres de resfriamento, entre outras; que devem ser escolhidos de acordo com o uso desejado e o seu tratamento.

Para a água poder ser usada para qualquer fim, deve-se fazer uma análise da sua qualidade física, química e microbiológica, pois há uma certa exigência em relação a contaminantes dependendo do tipo de atividade onde será inserida, possuindo regulamentações e normas específicas para cada utilidade, com diversos tratamentos a serem realizados (VIEIRA, 2011). Alguns fatores que alteram e influenciam a qualidade são a origem, o tratamento da água residuária, a confiabilidade do tratamento e a operação dos sistemas de

distribuição, assim, para garantir a qualidade da água e assegurar seu uso, esses fatores são importantes (Crook, 1993 *apud* VIEIRA, 2011).

Vários processos podem ser utilizados para o tratamento da água, a escolha vai depender da qualidade mínima exigida no seu destino e da qualidade da água de reuso (ANDRADE, 2014). Segundo Alves (2009), os métodos de purificação de água partindo da água potável podem ser troca iônica, osmose reversa e/ou eletrodeionização, nanofiltração, ultrafiltração e ozonização, já para a produção de água para injetáveis é indicado a destilação de água purificada.

O uso dos processos de separação por membranas (PSM), como a osmose reversa, vêm se ampliando na área de recuperação e reaproveitamento de águas e correntes e no tratamento de efluentes, uma vez que possibilitam a separação seletiva, são tecnologias limpas e de fácil operação, podem se combinar com outros processos e possuem equipamentos compactos (VIEIRA, 2011). Os efluentes produzidos pelos sistemas de osmose reversa possuem elevada qualidade físico-química e microbiológica que podem ser reaproveitadas das mais variadas formas, reduzindo o consumo de água e gerando menos efluentes (ANDRADE, 2014). Além disso, a troca iônica é muito usada para desmineralização da água, geralmente as resinas utilizadas no processo são bem resistentes e geram águas de ótima qualidade para uso industrial restritivo.

É neste contexto que este trabalho se insere, através de um estudo para o reaproveitamento de efluentes de torres de resfriamento e de água residual da área de utilidades, por tratamento através de resinas de troca iônica para reposição em torres de resfriamento.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVOS GERAIS

Diante da tendência de consumo consciente e escassez de água, este trabalho propõe a avaliação de reutilização de água de descarte de uma indústria do norte do Paraná dentro do processo industrial, a fim de minimizar os desperdícios e o consumo de água.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Com este propósito principal, verificou-se a possibilidade de reuso no sistema de resfriamento do setor de utilidades, com a recuperação da água residual tratada por meio de resinas de troca iônica para reposição nas torres de resfriamento. Para a factibilidade da hipótese, avaliou-se os parâmetros de qualidade da água.

No decorrer do estudo procurou-se alcançar os seguintes objetivos específicos:

- Analisar o tratamento do resíduo da osmose reversa por meio de resinas de troca iônica para confirmar sua reutilização nas torres de resfriamento;
- Verificar em qual etapa do tratamento de efluentes a água residual do processo de troca iônica (águas de contra lavagem da regeneração das resinas) deve ser destinada para não haver alterações do tratamento.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

A fim de embasar o presente trabalho este capítulo apresenta os principais fundamentos teóricos dos assuntos abordados neste estudo e uma revisão bibliográfica.

O capítulo é dividido em cinco seções: a primeira discorre sobre uma breve descrição do processo produtivo de café solúvel e o setor de utilidades, área onde foi efetuado o estágio, a fim de compreender a hipótese de melhoria elencada neste trabalho; a segunda traz um estudo dos recursos hídricos, sua escassez, possibilidades de reuso e a legislação envolvida; a terceira discorre sobre sistemas de resfriamento, contextualizando com o reuso de água e sua caracterização para poder ser usada nesses sistemas; a quarta aborda métodos de tratamento de água, incluindo o uso de resinas de troca iônica, operação sugerida como sistema de tratamento no decorrer do trabalho para reuso de água de rejeito; e a última traz os tipos de tratamento de efluentes industriais.

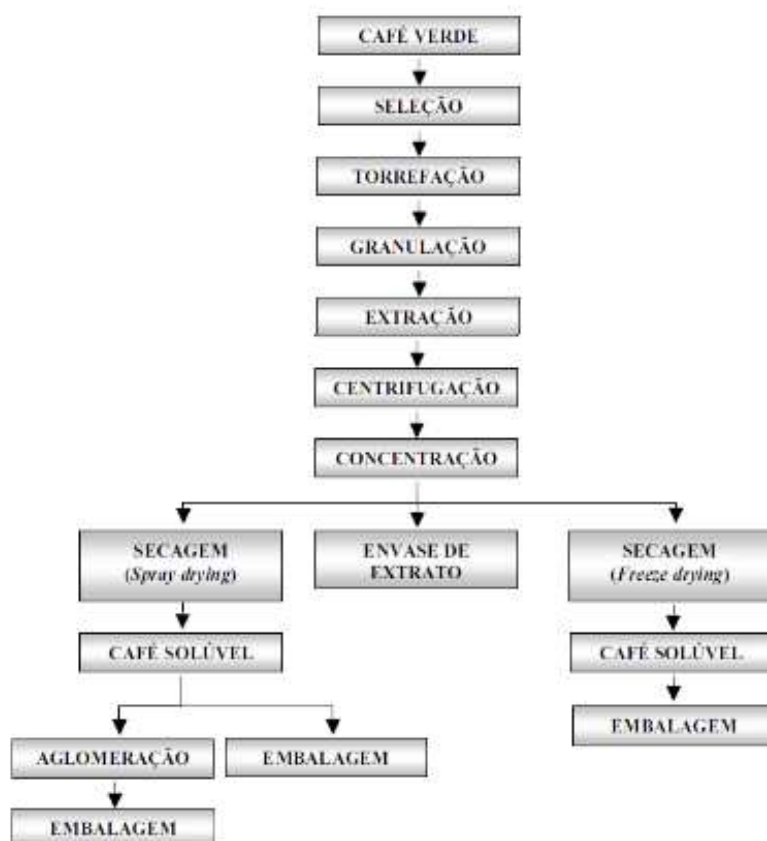
3.1 PROCESSO PRODUTIVO DE CAFÉ SOLÚVEL

O café solúvel é fabricado a partir do café em grão, o café verde ou o torrado, passando por vários processos, sendo eles: torra, moagem, extração, tratamento do extrato, concentração, secagem, aglomeração e envase (TAKANO *et al.*, 2020). O café solúvel pode ser de vários tipos, sendo eles: spray drying, onde o extrato aquoso é volatilizado por meio de altas temperaturas e pressão, sendo atomizado e transformado em pó após entrar em contato com o ar quente, fazendo com que haja uma grande área superficial de troca de calor e taxa de evaporação, o produto obtido é conhecido como café solúvel em pó; freeze drying, onde o extrato aquoso previamente congelado é sublimado usando temperaturas muito baixas, o produto final é conhecido como café solúvel liofilizado; aglomerado, que é um processo que preserva a essência natural do produto, aromatizado pela adição de óleo de café, onde é adicionado vapor de água ao café solúvel em pó produzindo o café solúvel aglomerado; e extrato líquido, obtido por crioconcentração, tendo a água como o único agente condutor que não é derivado do café (GONZALEZ, 2010).

O processo de fabricação do café solúvel geralmente começa com a limpeza, secagem e seleção de grãos para que estes sigam um padrão, seguido pela etapa de torrefação, onde o grão de café é torrado. Antes de ocorrer a torra, os grãos de café arábica e conilon são misturados formando um blend, o blend é aquecido até o ponto de torra e depois triturado. Durante a torra, ocorrem muitas reações que formam aromas e sabores característicos dependendo do grau de torra, assim a temperatura e tempo durante esse processo devem ser controlados para que não ocorra a carbonização. O peso do grão de café se reduz em 15 a 20% durante o processo de torração. Em seguida, há a extração onde o café torrado e granulado é carregado dentro de colunas percoladas contínuas junto com o solvente, água, em condições controladas de temperatura e pressão, aumentando o teor de sólidos solúveis. Na extração há a produção de um resíduo denominado borra que pode ser usado como biomassa em caldeiras para geração de vapor. Após a extração ocorre a concentração por meio de evaporadores, uma vez que o teor de sólidos solúveis do extrato de café é relativamente baixo sendo necessário concentrá-lo. Depois de concentrado, o licor passa pelo processo de secagem. A secagem pode ser realizada por dois processos principais: “freeze drying”, onde o extrato é congelado a aproximadamente -50°C , triturado em moinhos e sublimado em uma câmara de vácuo; e “spray drying”, onde o extrato é atomizado por meio de pulverização numa câmara de secagem em forma de ciclone onde há a passagem de uma corrente de ar quente (130 a 280°C) que capta o vapor de água, resultando em um pó como produto que também pode passar por uma etapa de aglomeração por meio de adição de vapor de água ao café seco, obtendo o café aglomerado. (OLIVEIRA, 2021; MORALES, 2014; MERGULHÃO, 2017; SILVA e PASQUIM, 2018; JUNIOR *et al.*, 2017)

Os produtos são embalados de acordo com suas características. O processo produtivo geral pode ser demonstrado pelo diagrama em blocos da Figura 1.

Figura 1 - Processo produtivo do café solúvel.



Fonte: SPX, 2013 *apud* MORALES, 2014.

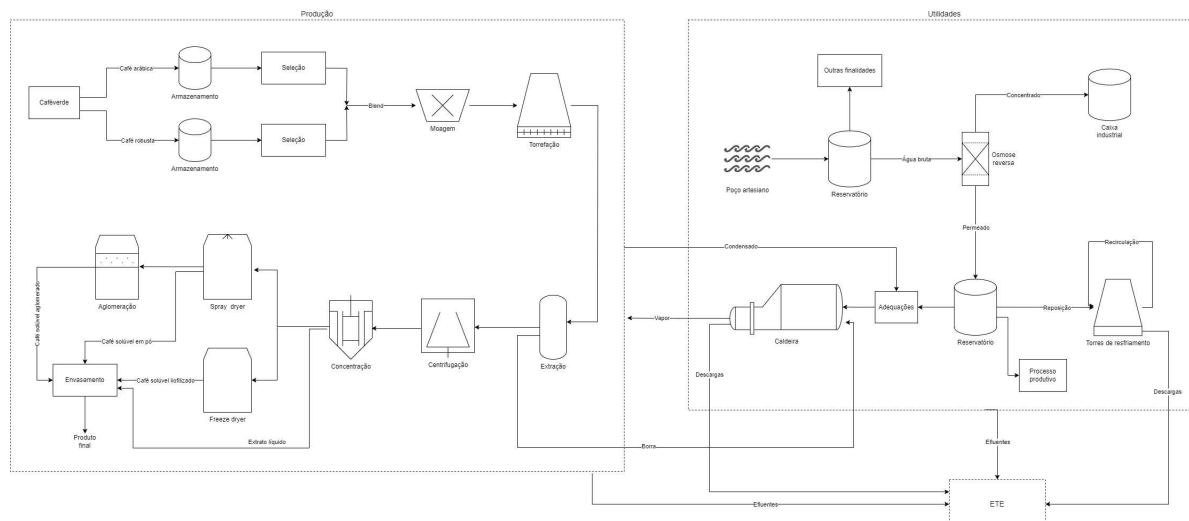
Para se ter um processo produtivo, é necessário insumos ou serviços auxiliares, de forma a proporcionar as devidas transformações a cada etapa para obtenção do produto. Esses insumos ou serviços na indústria são denominados utilidades, que podem ser definidas como suportes para exercer as funções básicas que dão sequência a um processo. As utilidades contribuem para o processo e funcionamento dos equipamentos uma vez que são fundamentais nas diversas operações energéticas e unitárias exigidas na maioria das transformações físicas, químicas e biológicas de um composto ou a mistura deles (LINCK, 2022).

As utilidades podem ser divididas em três principais categorias: fluidos de transferência de energia, como combustíveis, eletricidade, vapor, fluidos de aquecimento e de refrigeração, entre outros; água, seja ela potável, de processo, de rejeito, para uso em serviços gerais ou para combate de incêndio; e gases, como fluidos hidráulicos, gases inertes, ar comprimido ou para

ventilação e condicionamento do ambiente. As principais utilidades usadas nas indústrias são vapor, água, energia elétrica e ar comprimido. (LINCK, 2022)

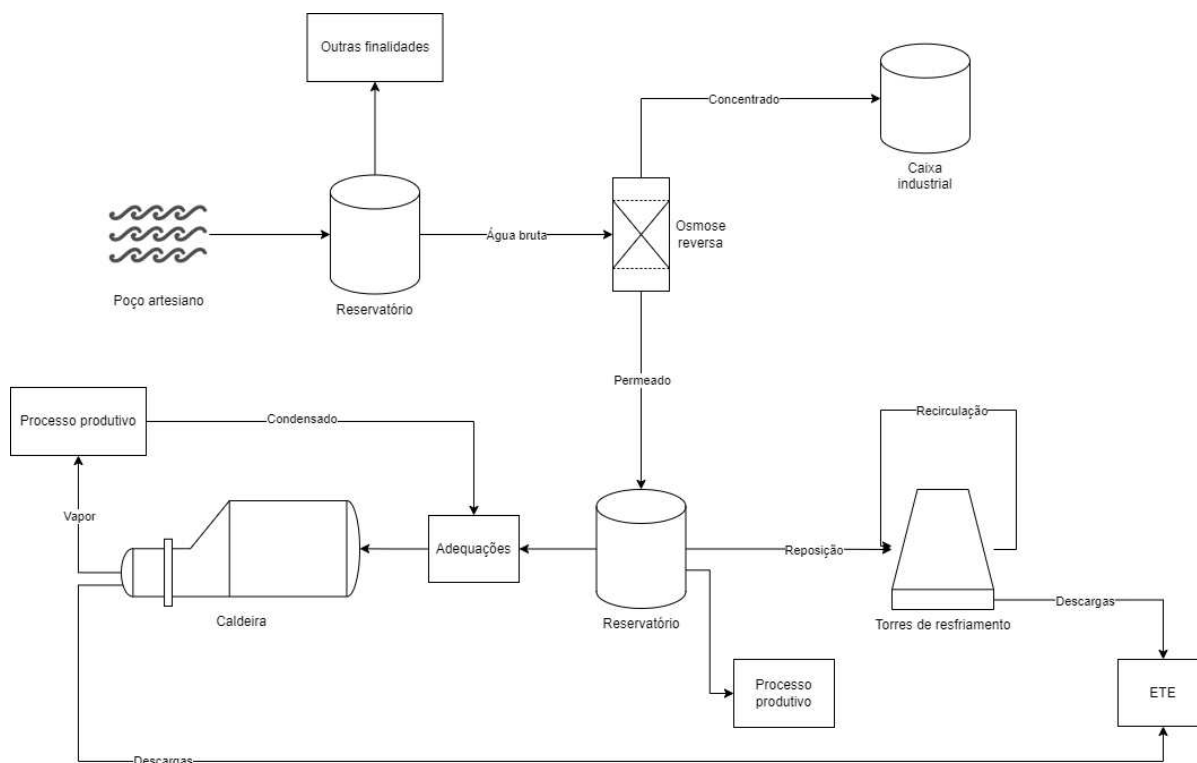
A Figura 2 (Apêndice A) retrata o fluxograma geral da produção de café solúvel, com destaque para a área de interesse deste trabalho, o setor de utilidades, que se dá de forma separada do processo produtivo, demonstrado na Figura 3.

Figura 2 - Fluxograma de produção da empresa.



Fonte: Autor, 2023.

Figura 3 - Setor de utilidades da empresa.



Fonte: Autor, 2023.

No setor, há os equipamentos de osmose que fazem o tratamento de água, as torres de resfriamento que produzem água para troca térmica no processo produtivo, a caldeira que produz o vapor para toda a fábrica e os compressores que produzem ar comprimido para os equipamentos e etapas onde é necessário esse ar.

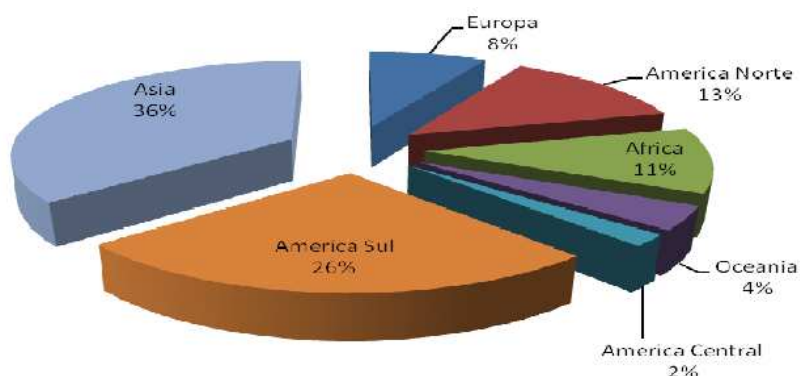
3.2 ESCASSEZ DA ÁGUA

De acordo com a Lei 6.938/81, o meio ambiente é o “conjunto de condições, leis, influências e interações de ordem física, química e biológica, que permite, abriga e rege a vida, em todas as suas formas”, equivalente, portanto, aos recursos naturais acessíveis à apropriação dos grupos sociais (CARETA, 2017, p. 16). O mundo todo está em constante preocupação com a degradação e o desrespeito ao meio ambiente, e pode-se dizer que o sistema capitalista é um dos grandes responsáveis nessa degradação já que a produção é estimulada pelo consumo constante.

Segundo Silva e Pruski (2000 *apud* CARETA, 2017), a água que se encontra no meio ambiente está em constante movimento, por meio de transporte de massa, que caracteriza o ciclo Hidrológico. Como a água é um dos recursos mais usados, é necessária sua administração para garantir qualidade e oferta adequada.

O volume total de água no planeta é constante, na ordem de $1,386 * 10^6 \text{ km}^3$, sendo que aproximadamente 97,5% corresponde a água salgada e 2,5% a água doce que está localizada em geleiras (68,9% desses 2,5%), águas subterrâneas e aquíferos (29,9%), pântanos, permafrost e umidade do solo (0,9%) e na superfície de rios, lagos, reservatórios e bacias hidrográficas (0,3%) (SILVA e PEREIRA, 2019). A Figura 4 apresenta a distribuição desigual da água entre os continentes, com o escoamento de $42.700 \text{ km}^3/\text{ano}$ de água nos rios. A América Latina é uma das regiões com maior abundância, principalmente devido às bacias Amazônica, Orinoco, São Francisco, Paraná, Paraguai e Magdalena (ANDRADE, 2014).

Figura 4 - Distribuição de água nos continentes.

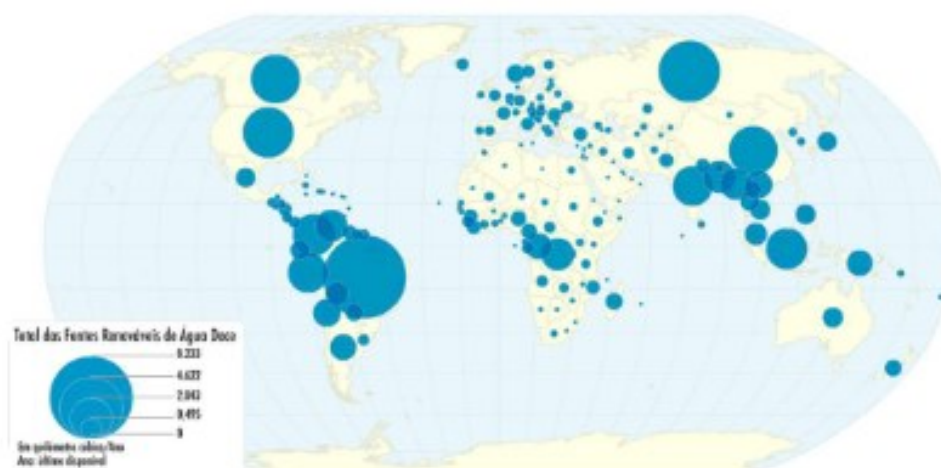


Fonte: ANDRADE, 2014.

O Brasil possui cerca de 13,7% da disponibilidade de água doce, e, segundo Tavares e Araujo (2020), tem um volume médio anual de 8.730 km^3 e um volume per capita de $50.810 \text{ m}^3/\text{hab}/\text{ano}$. A distribuição entre as regiões brasileiras também é bem desigual, o norte é o maior detentor com 70%, onde há apenas 7% da população brasileira, seguido do centro oeste com 14%, e as regiões com maior número de habitantes possuem a menor disponibilidade hídrica tendo o sudeste 6% (com 42,63% da população) e o nordeste 3,3% (com 28,91% da população) (PICCOLI *et al.*, 2016). Além disso, os locais com maior potencial industrial ficam nas regiões com menos recursos hídricos.

A Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) define fonte renovável de água doce como água de rios e recarga de aquíferos a partir da precipitação, e fontes não renováveis as águas subterrâneas e aquíferos profundos, sendo a distribuição dessas fontes apresentadas na Figura 5. O total das fontes renováveis de água doce (TRWR) de um país é a soma das fontes internas (IRWR) e externas renováveis de água doce (ERWR), que corresponde ao volume anual máximo teórico de água doce disponível no ano (SILVA e PEREIRA, 2019). De acordo com a FAO (2018), o Brasil é o país com maior TRWR e IRWR com 8647 km^3 e 5661 km^3 ao ano, respectivamente, já países como o Kuwait e Maldivas são os que possuem os menores índices de TRWR com 0,02 e 0,03 km^3 ao ano, respectivamente. Segundo a United Nations Educational Scientific And Cultural Organization (UNESCO) (2023), os recursos hídricos renováveis internos (IRWR) diminuíram cerca de 20% entre 2000 e 2018 e a captação global de água doce foi de cerca de $3.800 \text{ km}^3/\text{ano}$ em 2017, 10% dos recursos hídricos renováveis.

Figura 5 - Média anual total das fontes renováveis de água doce por países.



Fonte: FAO, 2010.

Segundo a PNRH (BRASIL, 1997, p. 1), “a água é um bem de domínio público, recurso natural limitado, dotado de valor e seu uso prioritário é o consumo humano e dessedentação de animais”. Apesar disso, os maiores usos da água estão na irrigação e produção de alimentos para atender às necessidades humanas (WWAP, 2012). De acordo com a FAO (2020), a água retirada é usada da seguinte forma: 69% para agricultura, 19% para indústria e 12% para a municipalidade. Segundo FAO (2014 *apud* ANDRADE, 2014), o consumo industrial médio de água nas américas passou de 20% em 1980 para 34% em 2006, na Europa é 57% e na Ásia 10%.

O problema da produção de água com qualidade para atender as necessidades humanas vem aumentando a cada ano. O aumento do consumo de água durante os anos, decorrente do desenvolvimento urbano, é apresentado na Tabela 1.

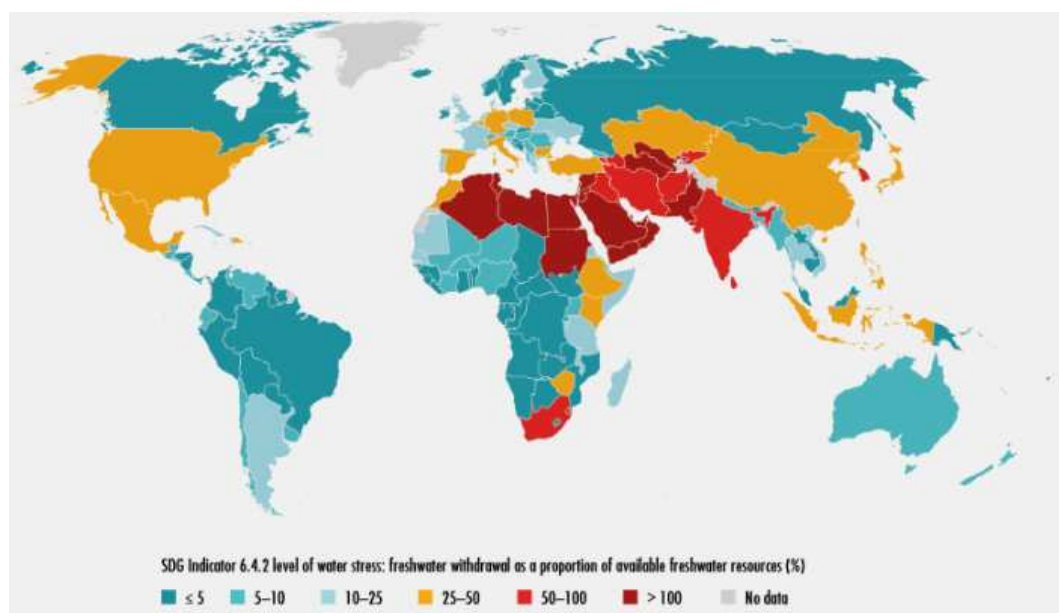
Tabela 1 - Estimativa da evolução do consumo humano diário *per capita* de água.

Período	Consumo (L/dia/pessoa)
Século I a.C.	12
Romano	20
Século XIX (cidades pequenas)	40
Século XIX (cidades grandes)	60
Século XX	800

Fonte: NASCIMENTO, 2004.

A água é um recurso cada vez mais escasso considerando que, dentro da disponibilidade hídrica, os recursos acessíveis ao consumo humano direto são uma parcela pequena, o que gera o estresse hídrico já que há o aumento do consumo e o esgotamento das águas subterrâneas. O nível de estresse hídrico por país pode ser visualizado pela Figura 6 com base na retirada de água e a sua quantidade disponível. Isso se dá principalmente pelo crescimento da população e atividades econômicas, aumento da demanda e redução da oferta, que além de causarem intenso consumo degradam os recursos, poluindo-os (BERNARDI, 2003).

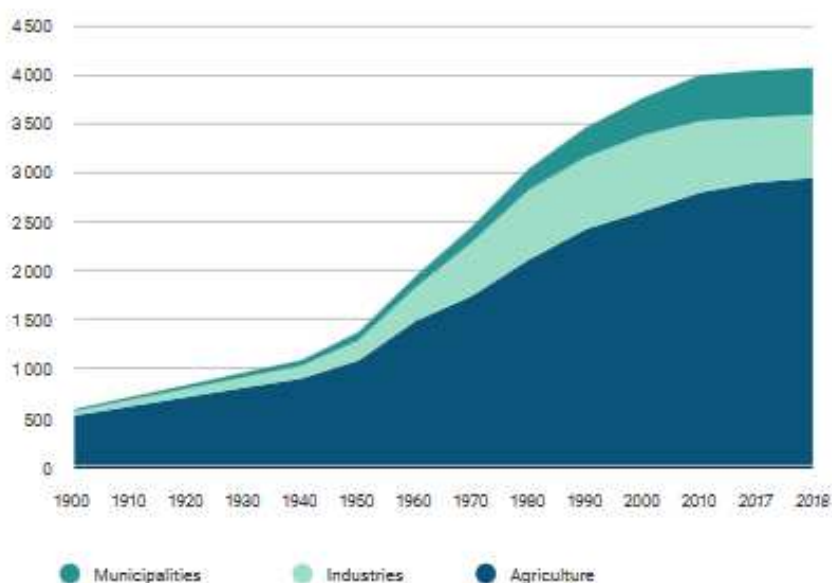
Figura 6 - Nível de estresse hídrico por país em 2015.



Fonte: FAO, 2020.

Segundo dados da UNESCO (2023), houve uma perda de 80% na extensão da área úmida natural desde a era pré-industrial (1700). O uso da água tem aumentado cerca de 1% ao ano nos últimos 40 anos, sendo impulsionado pelo crescimento populacional e desenvolvimento socioeconômico. Segundo a FAO (2022 *apud* UNESCO, 2023), a América do Norte e a Ásia Central foram as regiões com as maiores retiradas de água per capita, e entre 2010 e 2018 as retiradas municipais aumentaram 3% e as agrícolas 5%, representando 72% das retiradas totais, e as retiradas industriais diminuíram 12%. A Figura 7 mostra a evolução da retirada de água no mundo de 1900 a 2018.

Figura 7 - Evolução de retirada de água no mundo (1990-2018) em km³/ano.



Fonte: UNESCO, 2023.

O total de retirada de água per capita permaneceu estável de 2000 a 2018, e se espera que essas tendências persistam à medida que as populações crescem (FAO, 2022 *apud* UNESCO, 2023)

O relatório da ONU “Água para um mundo sustentável” (WWAP, 2015) apresenta o crescimento populacional, a urbanização, as políticas de segurança alimentar e energética e a globalização como fatores que afetam a qualidade e disponibilidade dos recursos hídricos, sendo determinantes na sua escassez.

Segundo o United Nations Department of Economic and Social Affairs (UNDESA) (2017), a população mundial deverá crescer quase 1 bilhão em 2016 e atingirá 8,5 bilhões de pessoas em 2030, 9,7 bilhões em 2050 e, seguindo os parâmetros, aproximadamente 11,1 bilhões de habitantes em 2100. Esse aumento populacional acarretará um aumento na demanda por alimentos, exigindo um crescimento de cerca de 38% da produção agrícola anual do mundo até 2030 e 60% até 2050, e conseqüentemente o aumento na produção gerará maior consumo de água doce e energia.

O aumento da população e o desenvolvimento econômico acarretará um aumento na demanda por energia que por conseqüência aumentará a demanda por água. De acordo com o United Nations World Water Assessment

Programme (WWAP) (2014), a demanda mundial de energia deverá crescer em mais de um terço até 2035, aproximadamente 70%, e por consequência afetará a disponibilidade de água, elevando sua vazão de retirada, já que todas as fontes de energia e técnicas de geração de eletricidade utilizam a água em vários processos de produção. Além disso, o tratamento de água também é um fator que influencia na demanda de energia, já que cada vez mais as fontes de retirada de água estão com qualidade comprometidas, necessitando de tratamentos adequados (SILVA e PEREIRA, 2019).

Outra questão que influencia na disponibilidade dos recursos hídricos é as mudanças climáticas, uma vez que pode haver tanto fatores naturais envolvidos quanto a ação humana, além das tendências hidrológicas passadas não poderem ser referências para prever a disponibilidade futura de água. (SILVA e PEREIRA, 2019)

3.2.1 Reuso

A reutilização da água torna-se uma alternativa viável em detrimento da escassez de água e sua qualidade, sendo possível fazer uma melhor gestão dos recursos hídricos a partir do reuso. De acordo com Andrade (2014), a cobrança pelo uso da água e efluentes lançados e o comprometimento com o meio ambiente pelo uso racional evitando desperdícios, têm promovido a adoção do reuso industrial de água no Brasil.

A Organização Mundial da Saúde (OMS) classifica o reuso em (WHO, 1973):

- A. reuso indireto: ocorre quando a água já usada é lançada nas águas superficiais ou subterrâneas e utilizada novamente à jusante, de forma diluída, sendo a autodepuração utilizada para deteriorar os poluentes descartados com o esgoto;
- B. reuso direto: uso planejado e determinado de águas residuárias tratadas para outras finalidades como irrigação, consumo, uso industrial e recarga de aquíferos, sendo necessário tratamentos adequados de acordo com a qualidade exigida em cada uso;
- C. reciclagem interna: reaproveitamento de águas industriais com o propósito de economia de água e o controle da poluição, esse reuso é

feito por um ciclo fechado onde há reposição de água de outra fonte devido a perdas e afins;

- D. reuso potável direto: ocorre quando o esgoto é diretamente reutilizado no sistema de água potável, depois do tratamento adequado;
- E. reuso potável indireto: o esgoto tratado é enviado para águas superficiais ou subterrâneas para ser diluído, passar por purificação e subsequente coleta, tratamento e posterior uso como água potável.

Segundo Andrade (2014), o reuso pode ser definido de várias formas e para vários fins, sendo a água tratada ou não, usado de forma direta ou indireta e de forma planejada ou não. A Resolução CNRH n° 54 (BRASIL, 2005, p. 1) define a água de reuso como "água residuária, que se encontra dentro dos padrões exigidos para sua utilização nas modalidades pretendidas", além de considerar o reuso uma prática de racionalização e de conservação de recursos hídricos que "reduz a descarga de poluentes em corpos receptores, [...]reduz os custos associados à poluição e contribui para a proteção do meio ambiente e da saúde pública". Essa prática traz benefícios ambientais já que pode reduzir a poluição hídrica por meio da minimização da descarga de efluentes e requer menor quantidade de energia em relação à captação de água (VIEIRA, 2011). Para a indústria, o reuso é economicamente vantajoso pois reduz os custos e reduz o volume de efluentes lançados em estações de tratamento ou descartados diretamente em um corpo d'água (NASCIMENTO, 2004). Para que a água possa ser usada para qualquer fim específico é necessário ter uma certa qualidade física, química e microbiológica.

3.2.2 Legislação

No Brasil, o Código das Águas elaborado em 1934 foi a primeira legislação que abordou o uso da água, definindo os vários tipos de água do país, seu aproveitamento, derivações e possíveis fontes de contaminação. Além disso, há os primeiros indícios que possibilitaram a cobrança pelo uso da água (ANDRADE, 2014).

Em 1971, a OMS demonstrou sua preocupação microbiológica em relação às águas residuárias e a segurança desses efluentes, que poderiam trazer riscos à saúde. Em 1972, a ONU realizou a 1ª Conferência Internacional para o Meio Ambiente Humano que gerou a publicação do Guia de Reuso de

Efluentes: Métodos de Tratamento de Esgoto e Seguridade da Saúde Pública. (ANDRADE, 2014)

A partir da instituição da Política Nacional de Meio Ambiente (PNMA) e criação do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), pode-se regularizar as questões ambientais e o uso racional da água no Brasil. Pela Resolução do CONAMA nº 20 de 18 de junho de 1986 (BRASIL, 1986), as águas dos corpos hídricos passaram a ser classificadas com base nos usos, estabelecendo nível de qualidade a ser alcançado para atender às necessidades e medidas necessárias para manter essas condições, e o descarte de efluentes somente pode ser feito em determinado corpo hídrico se seus parâmetros característicos fossem respeitados. O Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Renováveis (IBAMA) foi criado pela Lei nº 7.735 de 22 de fevereiro de 1989 e tem papel fundamental no cumprimento da PNMA (CARETA, 2017).

Segundo Vieira (2011, p. 14), “a Constituição de 1988 estabeleceu que a água é um bem da União ou dos estados, e o seu aproveitamento econômico e social deve buscar a redução das desigualdades”. Além disso, a partir da Constituição, foi elaborada a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), que definiu a água como um bem de domínio público e outorgou o seu direito de uso e apresentou fatores que motivaram a recuperação e o reuso da água, como a redução da poluição dos cursos d’água, a disponibilidade de efluentes tratados com elevada qualidade, o planejamento dos recursos hídricos e o incentivo à conservação da água e à adoção de práticas do reuso (ANDRADE, 2014).

Em 1992, o Guia de Reuso da Água foi publicado pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA) e a Agência de Desenvolvimento Internacional, com o objetivo de regularizar e orientar as práticas de reuso em locais que ainda não a tinham adotado. No mesmo ano, a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento do Rio de Janeiro (Rio-92) abordou a preocupação ambiental em função da escassez de água doce e do desperdício. (ANDRADE, 2014)

A partir da promulgação da Lei nº 9.433/97 (Lei das Águas), que institui a PNRH (BRASIL, 1997), houve um avanço na gestão de recursos hídricos e

introdução do conceito de usuário pagador. O uso da água passou a ser cobrado como forma de equilibrar a oferta e a demanda, racionalizando seu uso, e para incentivar a melhoria na qualidade dos efluentes lançados nos corpos hídricos, que devem ser lançados somente dentro dos padrões estabelecidos, forçando seu tratamento (BERNARDI, 2003).

Em 2000, foi criada a Agência Nacional de Águas (ANA), vinculada ao Ministério do Meio Ambiente, com o objetivo de regular o uso da água de domínio da União, assegurando quantidade e qualidade para usos múltiplos, e impulsionar a PNRH diante das dificuldades ligadas à implementação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, dando uma maior atuação aos Comitês de Bacia e executando um novo conjunto de instrumentos de gestão dos recursos hídricos (ANA, 2003 *apud* ANDRADE, 2014).

Ainda não há leis específicas no Brasil referente à obrigatoriedade ou incentivo explícito ao reuso e/ou recuperação de água, mas há o incentivo por meio de medidas locais e isoladas (ANDRADE, 2014).

3.3 SISTEMAS DE RESFRIAMENTO

Os processos industriais na maioria das vezes necessitam de remoção de carga térmica nos equipamentos e correntes, e, para que isso aconteça, geralmente são usados sistemas de resfriamento. Algumas operações, onde é necessária essa remoção, são em resfriamento de reatores e compressores, destilação, trocadores de calor e outras. (VIEIRA, 2011)

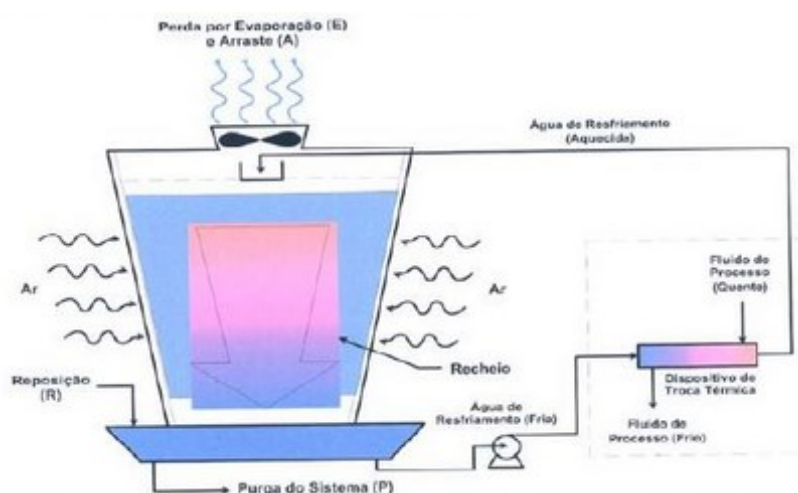
Há vários tipos de sistema de resfriamento, sendo os três tipos básicos o sistema aberto, sistema semi-aberto e o sistema fechado. O sistema aberto (once-through), é utilizado quando se tem grande quantidade de água com qualidade e temperatura aceitáveis para as necessidades do processo, a água é descartada ao final com uma maior temperatura (TROVATI, 2004). A água é bombeada diretamente de uma fonte, como rios e lagos, passa pelos trocadores de calor e é lançada onde foi coletada ou reutilizada em outro lugar, sendo que sua concentração de sais continua basicamente inalterada por só ser usada uma vez no sistema e somente para absorção do calor (NASCIMENTO, 2004). Como o volume de água é grande, não há como ser feito um tratamento, e esse sistema também pode comprometer a qualidade do

curso de água onde é despejada já que o despejo está com temperatura elevada.

O sistema semi-aberto (open recirculating system) é empregado para alta demanda e baixa disponibilidade de água, principalmente quando a qualidade dessa água não é adequada. A água aquecida após as trocas térmicas tem sua temperatura reduzida passando por um sistema de resfriamento, tornando-se própria para o reuso. Este sistema possibilita menor volume de captação e evita a poluição térmica, mas possui um custo elevado. A água também pode ser submetida a um tratamento químico a fim de deixar o sistema em condições operacionais adequadas e reduzir os custos. Alguns exemplos da utilização desse sistema são torres de resfriamento e condensadores evaporativos. (TROVATI, 2004)

Nesse sistema, a água sofre evaporação o que causa a perda de parte dela, sendo necessárias reposições constantes, e o aumento da concentração de sais e outras substâncias na água de recirculação, podendo ocorrer precipitação de sais, sendo necessária a remoção de parte dessa água por meio de purgas. A parcela de água descartada, mais a perda por evaporação, é substituída por um volume igual denominado água de reposição ou make-up. O sistema semi-aberto e suas correntes é representado pela Figura 8. (NASCIMENTO, 2004)

Figura 8 - Esquema do sistema de resfriamento semi-aberto.

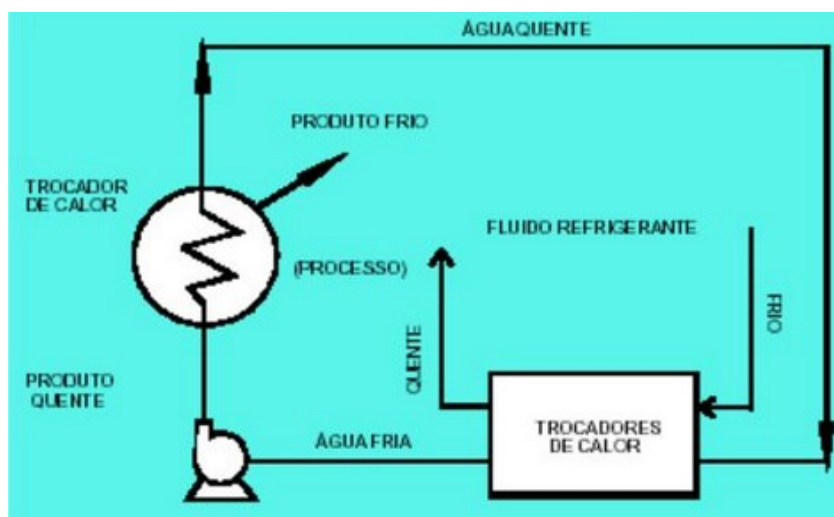


Fonte: NASCIMENTO, 2004.

O sistema fechado (closed-systems) é aplicado em processos em que a água necessita estar em temperaturas menores ou maiores do que os sistemas

semi-abertos, também é usado em instalações pequenas e móveis. A água passa por um processo de resfriamento em trocador de calor, não entrando em contato com o fluido de resfriamento. Como não há evaporação de água, a concentração de sais permanece praticamente constante, exceto por perdas através de vazamentos que requerem uma reposição de água. Segundo Trovati (2004, p. 7), este sistema é utilizado em “circuitos fechados para resfriamento de compressores, turbinas a gás, instalações de água gelada, radiadores de motores a combustão interna e outros”. Um sistema fechado de resfriamento é representado na Figura 9.b6

Figura 9 - Esquema do sistema de resfriamento fechado.



Fonte: NASCIMENTO, 2004.

3.3.1 Torres de resfriamento

Geralmente, as torres de resfriamento são utilizadas para o resfriamento da água industrial, existem vários modelos e disposições diferentes. De acordo com o CTI (2012 *apud* SAMPAIO, 2013), as torres de resfriamento são equipamentos de rejeição de calor, que extraem o calor do resfriamento de um fluxo de água e lançam-no na atmosfera.

O resfriamento da água em uma torre ocorre por dois processos: transferência de calor sensível (convecção) através do contato com o ar com menor temperatura, responsável por cerca de 20% do calor transferido; e transferência de calor latente por evaporação da água que tem menor concentração no ar (umidade), responsável por 80% da transferência de calor. De acordo com Careta (2017, p. 55), “a evaporação da água ocasiona a

redução da temperatura da água que escoar ao longo da torre de resfriamento”. Há uma diferença de concentração entre a água líquida e a presente no ar (umidade) que gera uma força motriz fazendo com que tenha uma tendência a equilibrar a concentração das fases, ocorrendo assim uma transferência simultânea de calor e de massa. Esses sistemas são projetados para proporcionar uma grande área superficial de contato da água com o ar, pois os mecanismos envolvidos na transferência de calor dependem dessa área de troca térmica, que geralmente é feita através de bicos para pulverização/distribuição e recheios (TROVATI, 2004).

Na torre de resfriamento há uma bacia que coleta a água resfriada e a retorna para o processo. As perdas de água são ocasionadas essencialmente pela evaporação, pelos respingos e pela purga, e a reposição dessas perdas é necessária e feita com água tratada, geralmente água clarificada, sendo essa corrente chamada de água de Make-Up. A qualidade da água de resfriamento depende da água de reposição, sendo necessário ter baixas concentrações de sais e material orgânico, além de baixos níveis de materiais suspensos e microrganismos. (VIEIRA, 2011)

A purga (ou blowdown) é empregada para que a concentração de sais ou outras impurezas na água de recirculação seja mantida, onde é feito o descarte de uma parte da água que se torna efluente inorgânico, esse descarte varia de acordo com a qualidade da água de alimentação. Há um dreno instalado nos equipamentos para fazer a retirada dos resíduos em excesso, como material orgânico, sais, sujeiras e outros. As impurezas dissolvidas na água são medidas em termos de ciclos de concentração (C), parâmetro usado para determinar a quantidade de água que deve ser removida do sistema e definir a relação entre a qualidade da água de reposição e de purga. O ciclo de concentração pode ser definido por meio da Equação 1 (VIEIRA, 2011):

$$C = \frac{\text{concentração de sólidos dissolvidos na água de resfriamento}}{\text{concentração de sólidos dissolvidos na água de reposição}} \quad (1)$$

Onde C é o ciclo de concentração.

Quando o ciclo de concentração aumenta e a taxa de purga diminui tem-se um uso satisfatório da água, para isso há a necessidade de um bom tratamento da água e boa qualidade da água de reposição. Além disso, o

tratamento é importante pois existem limites de concentração para o descarte dos efluentes impostos pela legislação, podendo até ser feitas pesquisas nesses efluentes para possível reuso (VIEIRA, 2011). Para sistemas alimentados com água potável geralmente ocorre de 5 a 10 ciclos de recirculação, enquanto que nos alimentados com água de reuso tem-se de 2 a 5 ciclos (ANDRADE, 2014).

De acordo com Mancuso (2001 *apud* ANDRADE, 2014), a eficiência de uma torre de resfriamento gira em torno de 85 a 95%, enquanto as perdas de água por arraste são de 0,01 a 0,30% da vazão de recirculação.

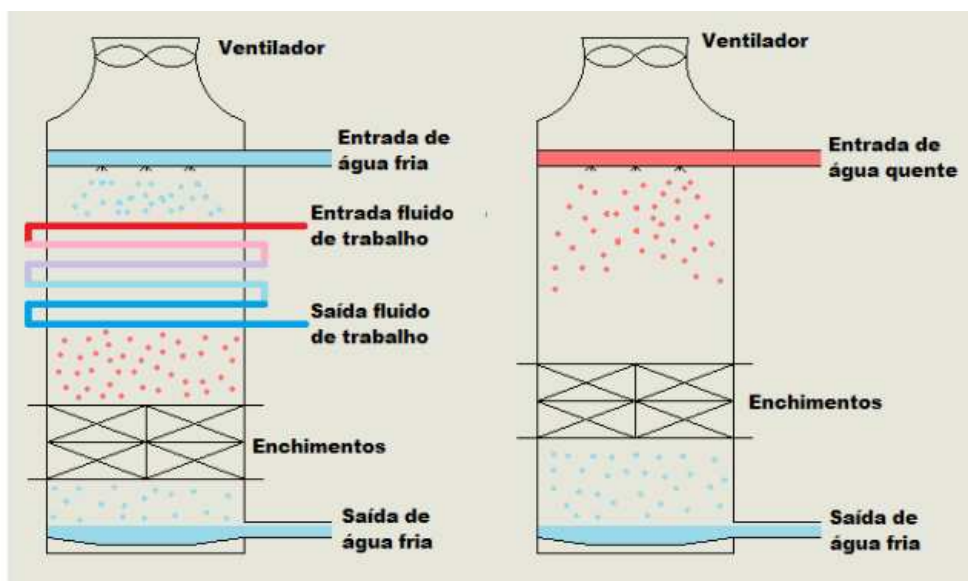
Segundo Careta (2017), as variáveis a serem analisadas nas torres de resfriamento e no seu dimensionamento são: a carga térmica a ser retirada; a vazão de circulação da água; o range, que é a diferença de temperatura da água quente (água de alimentação da torre) e da água fria (água na saída da torre); o approach, que é a diferença entre a temperatura da água fria (água que sai da torre) e a temperatura de bulbo úmido do ar na entrada da torre, este valor fica em torno de 5°C nas indústrias; e as condições ambientais, principalmente a temperatura e umidade do ar e temperatura de bulbo úmido.

Outros fatores que devem ser controlados nas torres de resfriamento são a incrustação, a corrosão e a proliferação de microrganismos (slime). Para manter a água de resfriamento dentro dos limites de especificação estabelecidos, também são adicionados diferentes produtos químicos para evitar que os contaminantes precipitem na superfície dos equipamentos, sendo feitos controles de parâmetros como dureza, sílica, pH, condutividade, DBO e outros. (VIEIRA, 2011)

3.3.1.1 Classificação das torres

As torres de resfriamento podem ser classificadas conforme o tipo de contato existente entre as correntes de água e o ar em: torres diretas (abertas), a água é resfriada pelo ar em escoamento contracorrente através do recheio, que espalha a água e facilita essa troca de calor, promovendo alta eficiência; e torres indiretas (fechadas), onde não há contato direto entre o fluido a ser resfriado e o ar, esse fluido passa por meio de dutos e é exposto a uma corrente de ar em fluxo cruzado que absorve o calor (SAMPAIO, 2013). A Figura 10 ilustra torres de circuito aberto e fechado.

Figura 10 - Torres de circuito fechado e aberto, respectivamente.

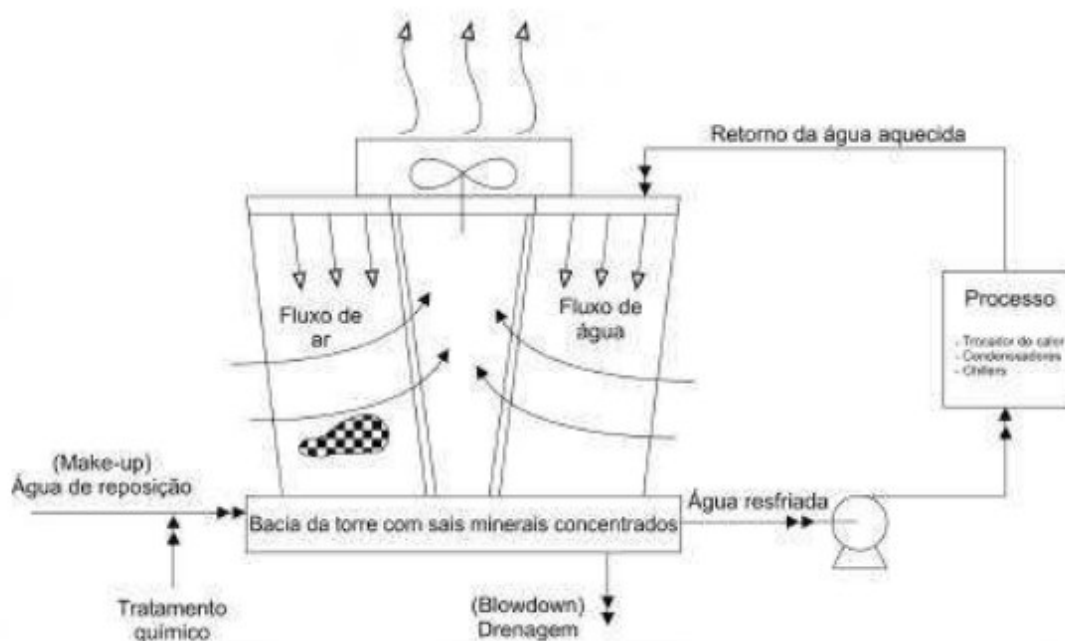


Fonte: SAMPAIO, 2013.

Em relação a forma de alimentação de ar, as torres de resfriamento podem ser: com ventilação natural, onde o movimento do ar varia de acordo com a direção do vento ou a densidade do ar; e tiragem mecânica, que possuem um ventilador que faz controle da vazão de ar, sendo que a aspiração do ar pode acontecer de forma induzida (os ventiladores ficam na saída do ar) ou forçada (os ventiladores ficam na entrada de ar) (LIMA JUNIOR, 2011 *apud* CARETA, 2017).

Numa torre de tiragem mecânica induzida, representada na Figura 11, a água proveniente dos processos entra por cima, fica em contato com o ar que entra através da indução do ventilador no topo, e parte dela evapora umidificando o ar e resfriando. Também há um fluxo de água de reposição uma vez que parte da água foi evaporada e a concentração de sais aumentou. (VIANA, 2010)

Figura 11 - Esquema do funcionamento da torre de resfriamento por indução mecânica.



Fonte: VIANA, 2010.

Já em termos de escoamento, as torres podem ser de fluxo cruzado (cross-flow) ou contracorrente (counter-flow). No escoamento cruzado, o ar é direcionado de forma perpendicular à água, proporcionando menor resistência ao ar e diminuindo a potência do ventilador para o resfriamento. No escoamento contracorrente, o fluxo de ar é ascendente, oposto ao da água, proporcionando alta eficiência já que a água fria entra em contato com o ar mais seco e a água quente com o ar mais úmido. (CARETA, 2017)

3.3.2 Tratamento da água de resfriamento

A água é o principal fluido usado e ela precisa estar em condições ideais para alimentar esses sistemas, uma vez que geralmente as águas encontradas na natureza nunca são puras, apresentando uma certa quantidade de impurezas.

A água possui uma predisposição de dissolver outras substâncias, e quanto mais pura ela for maior é essa tendência, elevando a concentração dessas substâncias que tendem a precipitar, assim, deve ser feito um tratamento da água de resfriamento. Geralmente, a solubilidade das substâncias na água é dependente da temperatura, pH, espécies químicas e outros (TROVATI, 2004).

O tratamento da água pode ser feito por diversas técnicas e métodos químicos, físicos ou uma combinação, a escolha do método deve se basear na eficiência e custo, além dos efeitos ambientais e legislação de controle.

Os objetivos do tratamento da água de resfriamento são evitar a formação de incrustações, minimizar os processos corrosivos e controlar o desenvolvimento microbiológico, minimizar depósitos orgânicos, minimizar a emissão de poluentes e maximizar eficiência da torre, possibilitando a convivência com esses problemas e otimizando a relação custo/benefício do processo (TROVATI, 2004).

3.3.2.1 Incrustação

Em sistemas de resfriamento ocorre o aumento na concentração das substâncias dissolvidas devido a evaporação da água, essas substâncias podem acabar precipitando e aderindo nas superfícies dos equipamentos, compondo as incrustações. Outras substâncias também podem se incrustar como: material orgânico, lodo e acúmulo de material microbiológico, produtos de corrosão, sólidos em suspensão e produtos insolúveis originados de reações químicas. As incrustações nesses sistemas causam a diminuição das taxas de troca de calor devido à baixa condutividade térmica, a obstrução e até estrago do enchimento de torres, a oclusão de tubulações limitando a área de fluxo e a vazão, o entupimento de dispositivos de distribuição de água propiciando canais preferenciais de escoamento e menor eficiência do equipamento, e o aumento dos processos corrosivos. (TROVATI, 2004)

As substâncias formadoras de incrustações, se precipitam sob a forma de pequenos cristais com estrutura molecular bem ordenada e podem se aderir fortemente às superfícies metálicas dos equipamentos e se desenvolverem rapidamente, se convertendo em incrustações cada vez maiores. Geralmente, para remoção dessas incrustações utiliza-se de limpezas químicas ou limpezas mecânicas de grande intensidade, como hidrojateamento a altas pressões. Os principais formadores de incrustações em sistemas de resfriamento são: sais de cálcio e magnésio, principalmente o carbonato de cálcio (CaCO_3) e o sulfato de cálcio (CaSO_4); sílica solúvel (SiO_2) e silicatos (SiO_3^{2-}) de vários cátions; e óxidos de ferro de outros metais, como o Fe_2O_3 , originado principalmente de processos corrosivos. (TROVATI, 2004)

3.3.2.2 Corrosão

A água de resfriamento possui fatores que favorecem a oxidação dos metais causando a corrosão dos equipamentos, além dos metais ter uma tendência a virarem óxidos e sais. Segundo Kurita (2004), a corrosão pode ser definida como “um processo eletroquímico de óxido-redução, no qual se desenvolve uma diferença de potencial elétrico entre dois metais ou entre diferentes partes de um único metal” (*apud* VIEIRA, 2011, p. 27). Os processos corrosivos causam grandes prejuízos aos sistemas de resfriamento pois afetam as tubulações e os trocadores de calor, reduzindo sua eficiência, causando vazamentos e diminuindo sua vida útil.

3.3.2.3 Desenvolvimento microbiológico

A água de resfriamento possui faixas ótimas de temperatura e pH, abundância de nutrientes e matéria orgânica, e qualidades físico-químicas que proporcionam um meio ideal para a proliferação de microrganismos. Esses microrganismos fazem deposição ou adesão na superfície de contato com a água, originando um depósito endurecido denominado de slime (VIEIRA, 2011).

O crescimento exagerado desses microrganismos é um grande problema, causando prejuízos econômicos e técnicos significativos. O controle microbiológico é feito através da adição de biocidas apropriados no circuito e utilização de água de reposição de boa qualidade. Os principais inconvenientes causados são: a formação de depósitos sobre superfícies de troca térmica diminuindo as taxas de transferência de calor; obstrução e entupimento de tubos e equipamentos, podendo diminuir a eficiência e restringir a vazão; a formação de lodo no fundo das bacias e canais de distribuição; obstrução e crescimento exagerado em recheios de torres, diminuindo a eficiência no resfriamento; formação de espuma pelo excesso de material orgânico na água; incrustações formadas pelas substâncias excretadas por alguns seres que se combinam com material inorgânico (sais, produtos de corrosão); aumento da incidência de corrosão pelo depósito de microrganismos sobre as superfícies metálicas; e aumento da demanda química e bioquímica de oxigênio (DQO e DBO), podendo causar complicações para o tratamento de efluentes (TROVATI, 2004).

3.3.3 Parâmetros de controle da água de resfriamento

Já que há a concentração da água nos sistemas de resfriamento, é necessário que a água de reposição apresente uma boa qualidade, ou seja, baixas concentrações de sais e material orgânico e baixos níveis de materiais suspensos e microrganismos, a fim de evitar uma maior concentração. (TROVATI, 2004)

A qualidade da água que alimenta os sistemas de resfriamento deve atender a alguns parâmetros definidos pelo Guia da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos - EPA (EPA, 1992). Um dos métodos mais empregados para o tratamento da água de resfriamento é por meio de adição/uso de produtos químicos que inibem a formação de corrosão, incrustação e microrganismos. O controle do tratamento químico está relacionado com as características físico-químicas e microbiológicas da água e do sistema como um todo (TROVATI, 2004). O controle físico-químico é realizado por meio de análises físico-químicas da água, com certa periodicidade, sendo feitas análises de pH, alcalinidade, concentração de íons, condutividade, etc. O controle das taxas de corrosão e incrustação permitem qualificar e quantificar os principais formadores de incrustações permitindo a tomada de medidas corretivas específicas.

A dureza não é um fator tão crítico para a água de alimentação das torres, mas deve-se fazer o controle dos íons sulfato, fosfato e nitrato, já que a proliferação de bactérias favorece a redução do enxofre e do nitrogênio, levando a biocorrosão pela formação de gás sulfídrico e amônia (ANDRADE, 2014). Os principais itens de controle físico-químico e suas faixas sugeridas estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros de controle físico-químico do tratamento de água de resfriamento e caldeiras.

Parâmetros	Torres de resfriamento	Caldeira de média pressão	Caldeira de alta pressão
pH	6,9 - 9,0	8,2 - 10,0	8,2 - 9,0
Condutividade ($\mu\text{S/cm}$)	máx. 3000	máx. 3500	máx. 3500
Dureza (mg CaCO_3/L)	650	1,0	0,07
Alcalinidade Total (mg CaCO_3/L)	350	100	40
Ferro (mg/L)	0,5	0,3	0,05
Cloreto (mg/L)	500	-	-
SDT (mg/L)	500	-	-
SST (mg/L)	100	500	200
DQO (mg/L)	75	0,007	0,0007
DBO (mg/L)	25	-	-
Turbidez (NTU)	50	-	-
Sílica (mg SiO_2/L)	50	10	0,7

Fonte: ANDRADE, 2014.

3.3.3.1 pH

O termo pH (potencial hidrogeniônico) é usado para indicar o quão ácida ou alcalina é uma solução, para isso mede a concentração do íon hidrogênio ou sua atividade. O pH também determina a percentagem de carbono presente na forma de dióxido de carbono, bicarbonato ou carbonato, além de indicar se há possibilidade de precipitação de carbonato de cálcio (VIEIRA, 2011).

Richter e Netto (1991 *apud* VIEIRA, 2011) afirmam que águas com baixo pH tendem a ser corrosivas ou agressivas a certos metais, já águas com pH elevado tendem a formar incrustações já que podem comprometer a eficiência dos inibidores de corrosão, fazendo ter uma perda gradativa da capacidade de troca térmica. Assim, o controle do pH em sistemas de resfriamento é necessário para minimizar processos corrosivos.

3.3.3.2 Condutividade

A condutividade elétrica depende da quantidade de íons dissociados na água, sendo expressa em $\mu\text{S/cm}$ (micro Siemens por centímetro), ela varia de

forma proporcional à concentração total de sais em solução. De acordo com Libânio (2010), a condutividade indica a capacidade da água de transmitir corrente elétrica devido a presença de substâncias que se dissociam em íons. Quando há um aumento da condutividade, há um potencial aumento de corrosão e incrustação, por isso deve ser um parâmetro controlado (VIEIRA, 2011).

3.3.3.3 Dureza

A dureza de uma água é proporcional ao número de átomos de cálcio e magnésio presentes, sendo que esses elementos reagem e formam precipitados sólidos insolúveis, como bicarbonatos, sulfatos, cloretos e nitratos de cálcio e magnésio. A dureza é expressa em mg/L de carbonato de cálcio (CaCO_3). A água pode ser classificada como branda, moderada, dura, muito dura e extremamente dura. De acordo com Tomar (1999 *apud* VIEIRA, 2011), a dureza total é a soma das concentrações de dureza cálcio e magnésio.

A água dura não pode ser usada no abastecimento de equipamentos geradores de vapor, já que os sais de cálcio e magnésio têm a tendência de se agregarem nas tubulações e formar incrustações em superfícies de troca térmica. O controle do teor de dureza previne a formação de incrustações.

3.3.3.4 Alcalinidade

Segundo Vieira (2011) a alcalinidade é a capacidade da água de neutralizar íons hidrônio (H^+) devido à presença de hidróxidos, carbonatos e bicarbonatos de metais como cálcio, magnésio, sódio e potássio. A combinação desses compostos com outros, pode resultar em deposição nas tubulações e outros equipamentos, além disso os bicarbonatos também podem liberar gás carbônico quando submetidos a altas temperaturas, deixando a água altamente corrosiva (VIEIRA, 2011).

O controle da alcalinidade garante o controle de pH no sistema de resfriamento, ela influencia os índices de estabilidade da água, quanto maior for a alcalinidade mais será a presença de carbonatos e bicarbonatos que estão ligados a incrustação de cálcio e magnésio e a precipitação de silicatos.

3.3.3.5 Cloreto

O cloreto pode causar severas corrosões e deve ser monitorado para identificar possíveis alterações de carga no circuito e nas características da água de reposição. Ele é usado para diminuir o potencial de incrustação de outros sais já que possui alta solubilidade na água, não formando incrustações. Segundo Vieira (2011), o teor de cloro residual após a cloração permite avaliar se a água está em condições de uso e isenta de bactérias patogênicas.

3.3.3.6 Sólidos dissolvidos totais e sólidos suspensos totais

Sólidos totais é toda a matéria que permanece como resíduo após evaporação, são usados para garantir níveis aceitáveis de impurezas evitando a precipitação de alguns compostos. Segundo Metcalf & Eddy (2003), são os sólidos orgânicos, inorgânicos e coloidais que não ficaram retidos na filtração dos sólidos em suspensão totais (SST). Valores altos de sólidos dissolvidos (SDT) podem causar incrustações e aumentar a corrosividade no sistema. Já concentrações altas de sólidos suspensos (SST) indicam deficiência de pré-tratamento ou excesso de material orgânico.

3.3.3.7 Demanda química e bioquímica de oxigênio (DQO e DBO)

A DQO é um parâmetro importante no monitoramento dos efluentes e contaminação de águas, ela inclui valores relacionados a substâncias biodegradáveis e não biodegradáveis. Segundo Tomar (1999 *apud* VIEIRA, 2011), a determinação da DQO é feita em relação a quantidade de oxigênio requerida para oxidar a matéria orgânica, produzindo gás carbônico e água. Já a DBO determina indiretamente a concentração de matéria orgânica biodegradável pela demanda de oxigênio da respiração de microrganismos (VALENTE, PADILHA e SILVA, 1997).

3.3.3.8 Turbidez

A turbidez é uma característica da água devido à presença de partículas suspensas que provoca a dispersão e a absorção da luz. O conteúdo de sólidos suspensos é usado como indicador da qualidade global (VIEIRA, 2011). É medido em unidades nefelométricas de turbidez (NTU). A turbidez permite avaliar o crescimento microbiológico e detectar concentrações excessivas de sais, além de possíveis contaminações externas.

3.3.3.9 Sílica

A sílica está presente normalmente na água, porém para uso industrial é indesejável pois se combina com metais como cálcio, magnésio e alumínio e gera dióxido de silício (SiO_2), formando incrustações de difícil remoção em superfícies de troca térmica, sendo essencial a sua remoção da água. O teor de sílica é expresso em mg/L de SiO_2 ou em termos de ppm (partes por milhão). Ela é um dos elementos com menor solubilidade presente na água de resfriamento, deve-se ter um controle apurado sobre ela na água de recirculação devido essas incrustações rígidas. (VIEIRA, 2011)

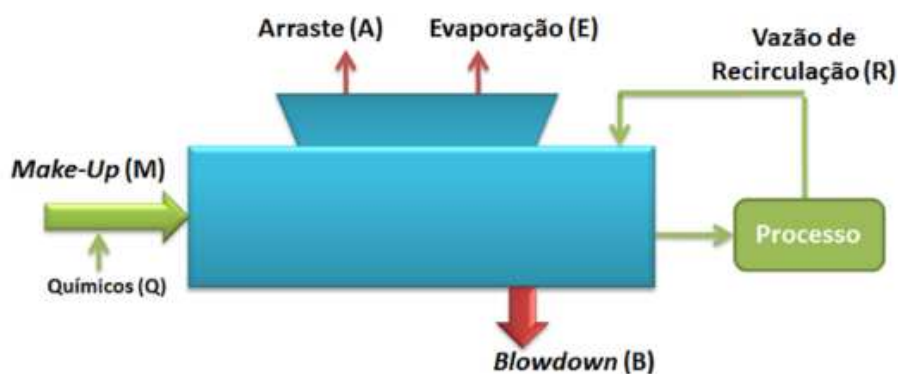
3.3.3.10 Cor

A coloração dos efluentes está vinculada aos SDT, podendo esses sólidos provir da decomposição de matéria orgânica, ferro e manganês, ou por meio de resíduos orgânicos e/ou inorgânicos da indústria. Segundo Von Sperling (2014), a medição é feita em unidade de coloração (UC) que equivale a 1 mg de platina-cobalto por litro (PtCo/L).

3.3.4 Balanço em torres de resfriamento

As torres de resfriamento estão suscetíveis a diversas formas de perda de água, assim, sua reposição é muito importante, principalmente devido ao aumento da concentração de sais que pode causar implicações no sistema. As formas de perda de água são: evaporação, arraste de gotículas pelo ar, purga e perdas indeterminadas. A Figura 12 representa esquematicamente um sistema de resfriamento. (SAMPAIO, 2013)

Figura 12 - Esquema de uma torre de resfriamento.



Fonte: VIEIRA, 2011.

Tomando como base a representação do sistema na Figura 6, pode ser feito balanços de massa no sistema. A corrente de químicos, adicionados para condicionamento da água da torre, pode ser desprezada já que sua vazão é muito pequena se comparada às demais. Considerando todo o sistema da água como um volume de controle, funcionando em condições normais sem perdas indeterminadas, o balanço global pode ser obtido pela Equação 2.

$$M = B + A + E \quad (2)$$

Onde M é a vazão de reposição em m^3/h ; B é a vazão de purga em m^3/h ; A é a vazão de perdas por arraste em m^3/h ; E é a vazão de perdas por evaporação em m^3/h .

A perda total do sistema pode ser chamada de Blowdown total e deve ser igual à vazão de reposição em regime permanente. Além disso, a fração mássica de contaminantes na corrente evaporada é zero e a fração mássica de contaminantes nas correntes de purga e arraste é a mesma. Assim, pela Equação 2 em termos de concentração de impurezas temos a Equação 3:

$$M * x_m = (B + A) * x_b \quad (3)$$

Onde M é a vazão de reposição em m^3/h ; B é a vazão de purga em m^3/h ; A é a vazão de perdas por arraste em m^3/h ; x_m é a fração mássica de contaminantes no make-up em porcentagem (%); x_b é a fração mássica de contaminantes na purga em porcentagem (%).

Em regime permanente, o ciclo de concentração é constante, assim com a relação dada pela Equação 1 juntamente com a Equação 2, obtém-se a Equação 4, que se incorporada a Equação 3 do balanço de massa e rearranjados os termos, obtém-se a Equação 5. (VIEIRA, 2011)

$$C = \frac{M}{B + A} \quad (4)$$

Onde C é o ciclo de concentração, adimensional; M é a vazão de reposição em m^3/h ; B é a vazão de purga em m^3/h ; e A é a vazão de perdas por arraste em m^3/h . O ciclo de concentração representa a quantidade de vezes que a água está concentrada em relação a uma concentração padrão.

$$B = \frac{E}{C - 1} - A \quad (5)$$

Onde C é o ciclo de concentração, adimensional; B é a vazão de purga em m^3/h ; A é a vazão de perdas por arrase em m^3/h ; e E é a vazão de perdas por evaporação em m^3/h .

A Equação 5 é importante, pois modificações no processo produtivo alteram a carga térmica do sistema e, conseqüentemente, aumentam a taxa de evaporação na torre de resfriamento e a concentração de impurezas na água da torre, sendo necessário maior descarte de água. Quanto maior a evaporação da água, maior será o Ciclo de Concentração, e quanto maior as descargas, menor será o ciclo de concentração. Assim, para manter o ciclo de concentração, os parâmetros usualmente controlados e a eficiência dos tratamentos da água, utiliza-se a purga. (VIEIRA, 2011)

3.4 MÉTODOS DE TRATAMENTO DE ÁGUA

Dependendo do tipo de atividade a ser usada na indústria, é exigido processos de tratamento na água para a remoção de contaminantes. As técnicas empregadas vão das mais simples como filtração até as mais avançadas como a osmose reversa, e a decisão de qual será usada no tratamento dependerá da qualidade requerida a qual será destinada e da qualidade da água captada. (ANDRADE, 2014)

3.4.1 Processos de Separação por Membranas

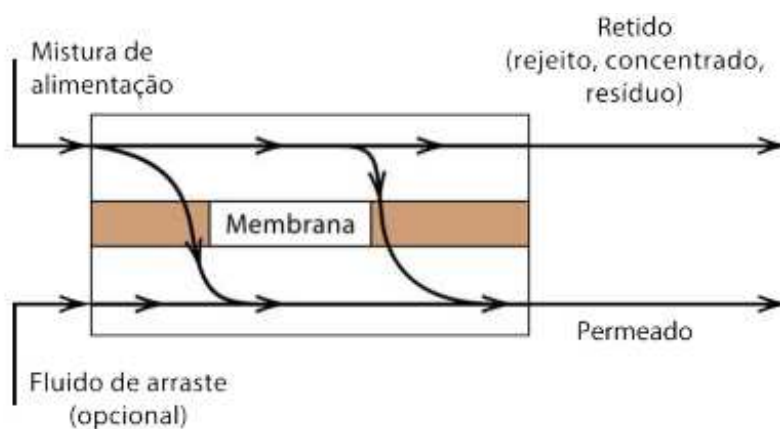
As membranas são filmes finos que atuam como uma barreira seletiva entre duas soluções, separando-as e fazendo o transporte de componentes das mesmas ao se aplicar uma força externa. Essa força é necessária para que ocorra o transporte das espécies químicas, é o gradiente de potencial químico e/ou elétrico (NASCIMENTO, 2004). A classificação delas pode ser quanto à natureza (biológicas ou sintéticas), estrutura (densas ou porosas) e mecanismo de transporte (convectivo ou difusivo) (TADINI *et al.*, 2016). As sintéticas são produzidas de forma orgânica (materiais poliméricos) e inorgânica (materiais cerâmicos). Geralmente, as membranas nos processos industriais se encontram em forma de módulos ou cartuchos e nos mais variados tipos de configuração (tubular, espiral, placas e fibras ocas) (TADINI *et al.*, 2016).

Segundo Vieira (2011), os processos de separação por membranas (PSM) são amplamente adotados para obtenção de águas ultra puras, os mais

conhecidos são: a osmose inversa (OI) ou reversa (OR), a troca iônica, os métodos eletroquímicos, a adsorção em carvão ativado, a nano (NF), micro (MF) e a ultrafiltração (UF). A aplicação desses processos têm sido em difundida pelas suas vantagens, que segundo DBRUM, SANTOS JÚNIOR e BENEDETTI (2009) são: geralmente são processos isotérmicos, não envolvem mudança de fase, não necessitam de aditivos químicos, são de simples operação, tem facilidade na ampliação de escala, consomem pouca energia, apresentam um uso racional de matérias primas e recuperação de subprodutos. O principal desempenho dos PSM é avaliado mediante o fluxo do permeado e a seletividade (TADINI *et al.*, 2016).

Nos processos de separação por membranas, a alimentação produz duas correntes distintas: o permeado, que atravessa a membrana, onde foram removidos os contaminantes; e o concentrado ou rejeito, que contém a maior parte dos contaminantes (NASCIMENTO, 2004). A separação acontece conforme representado pela Figura 13.

Figura 13 - Esquema de um processo de separação por membrana.



Fonte: SEADER, HENLEY e ROPER, 2010.

O uso dos PSM vem se ampliando na área de recuperação e reaproveitamento de águas e correntes e no tratamento de efluentes, uma vez que possibilitam a separação seletiva, são tecnologias limpas e de fácil operação, podem se combinar com outros processos e possuem equipamentos compactos (VIEIRA, 2011).

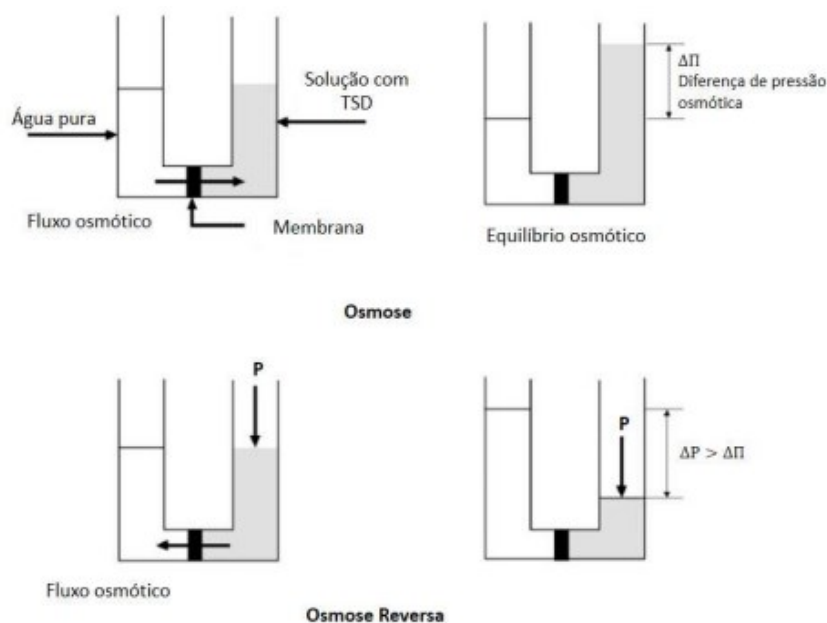
Para Farrugia (2013 *apud* CARETA, 2017), a osmose reversa é considerada o sistema de purificação mais ecologicamente correto, com baixíssimo consumo de água e de energia, uma vez que somente ela é

suficiente para produzir uma água de boa qualidade, não necessitando de mais processos.

3.4.1.1 Osmose

Naturalmente a osmose acontece quando há um fluxo difusivo entre duas soluções de concentrações diferentes, por meio de uma membrana semipermeável, da mais diluída para a mais concentrada, até que atinjam um equilíbrio. Na osmose inversa esse fluxo é invertido, a solução concentrada passa pela membrana ao ser exercida uma pressão acima da pressão osmótica (NASCIMENTO, 2004). Assim, a membrana rejeita seletivamente moléculas e íons dissolvidos e permitindo a passagem da água pura, sendo um fator dependente da temperatura, concentração de sais na água de alimentação, pressão do sistema e diâmetro de corte ou poro (VIEIRA, 2011). A Figura 14 representa os processos de osmose e osmose reversa.

Figura 14 - Fluxos e pressões envolvidos na osmose e osmose reversa.

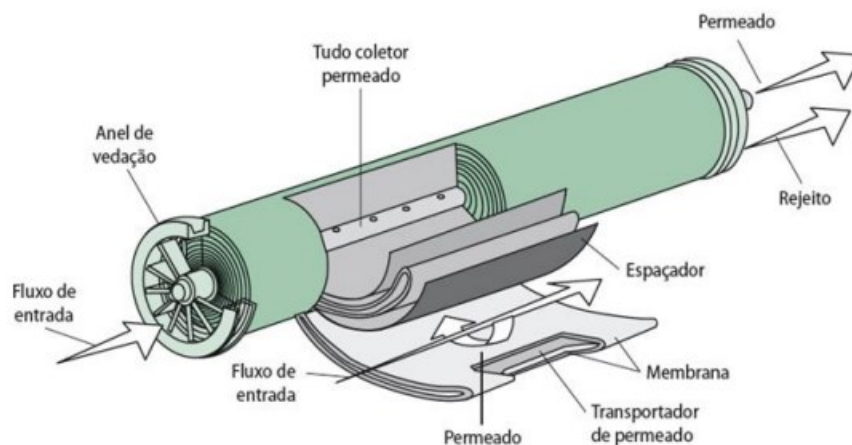


Fonte: TADINI *et al.*, 2016.

Osmose reversa ou osmose inversa, é uma técnica de desmineralização baseada em membranas, transportando água contra o gradiente de concentração por meio da pressão aplicada sobre a solução mais concentrada e separando sólidos dissolvidos com alta eficiência (NASCIMENTO, 2004). As membranas que constituem esse sistema são camadas de barreira compostas de polímeros que fazem a maior parte da separação, são feitas para permitir

somente a passagem de água, impedindo a passagem de solutos (CARETA, 2017). A Figura 15 mostra a representação de uma membrana.

Figura 15 - Esquema de uma membrana para purificação de fluidos.



Fonte: CARETA, 2019.

As membranas de OR possuem três camadas: a primeira é um suporte de poliéster, garantindo a resistência mecânica; a segunda é a polisulfona com característica ultrafiltrante, sendo responsável pela resistência mecânica da membrana já que funciona como suporte para a fixação da terceira camada; e a última é, geralmente, a membrana ultrafina de poliamida com espessura de aproximadamente $0,2 \mu\text{m}$ (micrômetros), que estabelece a barreira de rejeição dos sais. Também pode ser uma membrana de acetato de celulose, todo este conjunto tem cerca de $0,1 \text{ mm}$ (milímetro) e poros em torno de $0,0005 \mu\text{m}$ (micrômetros), sendo muito eficientes para remover partículas maiores e microrganismos. (CARETA, 2017; FLYNN, 2009)

A remoção nos sistemas de osmose inversa são geralmente de 95 a 99% das partículas orgânicas, inorgânicas e microrganismos (SILVA *et al.*, 1996). A Tabela 3 retrata a taxa de rejeição em membranas de poliamida composta.

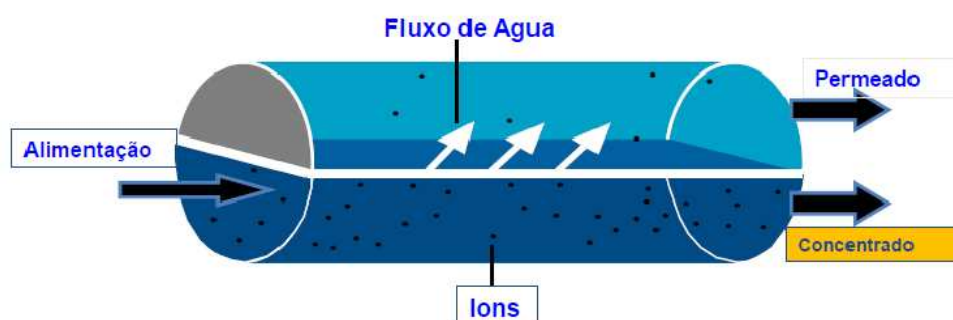
Tabela 3 - Porcentagem de rejeição da membrana de poliamida.

Compostos	Rejeição (%)
Sódio	92 - 98
Cálcio	93 - 99
Magnésio	93 - 98
Potássio	92 - 96
Manganês	96 - 98
Alumínio	96 - 98
Zinco	96 - 98
Dureza	93 - 99
Sulfato	96 - 99
Fosfato	96 - 98

Fonte: Adaptado de Kucera, 2015.

Para que somente a água passe pelas membranas é necessário aplicar uma pressão maior do que a pressão osmótica sobre a solução mais concentrada. A pressão osmótica, segundo Soares *et al.* (2006 *apud* CARETA, 2017), é a diferença de nível entre duas soluções após o equilíbrio ser atingido. Assim, as moléculas de água passam pela membrana dividindo a solução em duas partes: o permeado, que transpõe a membrana; e o rejeito, que não permeia na membrana, sendo desprezado. A Figura 16 retrata o processo de separação pela membrana. (CARETA, 2017)

Figura 16 - Separação por membranas de osmose reversa.



Fonte: CARETA, 2017.

A retenção ou rejeição (R) é a fração de soluto na corrente de alimentação retida pela membrana, como mostra a Equação 6.

$$R_j = \frac{C_f - C_p}{C_f} = 1 - \frac{C_p}{C_f} \quad (6)$$

Onde R_j é a rejeição/retenção de solutos pela membrana em porcentagem (%); C_f é a concentração de solutos na corrente de alimentação em kg/m^3 ; e C_p é a concentração de solutos na corrente de permeado em kg/m^3 .

A corrente de concentrado ou rejeito, que possui os elementos retidos pela membrana, pode ser reaproveitada já que possui elevadas qualidade físico-química e microbiológica que poderiam ser reaproveitadas, gerando menos efluentes. O reaproveitamento, além de reduzir custos por lançar menos efluentes, também gera benefícios socioambientais possibilitando a melhoria na qualidade das águas. (FARIA *et al.*, 2016)

Os processos de osmose inversa apresentam vantagens, pois não necessitam de energia na forma de calor para mudança de fase e nem de grande quantidade de produtos químicos. A osmose inversa tem seu uso amplamente difundido no tratamento de efluentes inorgânicos por ser bastante eficiente na remoção de sais dissolvidos, além de ser bastante utilizado no setor industrial, hospitalar, ambiental e social. (VIEIRA, 2011)

3.4.1.1.1 Parâmetros de controle na osmose

A osmose também está suscetível a sofrer incrustações, corrosão e crescimento microbiológico, como o sistema de resfriamento, assim deve-se fazer um controle dos parâmetros que podem causá-los. O entupimento das membranas é um dos maiores problemas nas osmose, podendo ser causado por várias substâncias como hidróxidos metálicos, coloides, partículas, substâncias orgânicas, biológicas e precipitação de sais pouco solúveis (NASCIMENTO, 2004).

A incrustação pode se dar por uso incorreto de produtos químicos, controle deficiente da água e saturação de sais na água, sendo os principais elementos causadores a sílica, ferro e dureza. A água de alimentação da osmose possui elevado teor de sílica, sendo necessário limitar a recuperação ou manter a temperatura elevada para evitar incrustações, além de alto pH que tem potencial de provocar incrustações de carbonato de cálcio e magnésio, podendo ser utilizado anti-incrustante ou abrandamento para evitar.

As membranas são ambiente ideal para microrganismos viverem e se multiplicarem. Os microrganismos causam deposição e obstrução na membrana, além de as substâncias do seu metabolismo poderem provocar corrosão. Desse modo, o controle de contagem bacteriológica total é importante, já que o aumento microbiológico causa formação de biofilmes, espumação e redução de retenção de sais, esse valor deve estar abaixo de 10000 unidades formadoras de colônias (UFC) por mL.

Para que esses problemas sejam controlados, deve ser feita limpeza química no equipamento periodicamente, que pode variar de 1 semana até 2 meses dependendo da qualidade da água. A queda na vazão do permeado e na rejeição dos sais e o aumento na diferença de pressão de entrada e saída são indicativos da necessidade de uma limpeza (SCHNEIDER e TSUTIYA, 2001).

A caracterização das correntes de permeado e rejeito e de seus componentes é indispensável para que essa água possa ser reutilizada nos processos, fazendo as devidas adequações por meio de procedimentos com essas correntes e respeitando os parâmetros microbiológicos, para que seu retorno ao processo industrial seja possível. (DBRUM, SANTOS JÚNIOR e BENEDETTI; 2009)

Segundo Machado (2004 *apud* ANDRADE, 2014), valores de pH acima de 8,5 devem ser evitados em sistema de osmose pois podem aumentar os riscos de incrustações e deposições e prejudicar a ação de biocidas, e valores abaixo de 6,5 também, já que aumentam as chances de corrosão e reduzem a eficiência de seus inibidores. Assim, a faixa de pH comumente usada para controle é de 7 a 9, onde os anti-incrustantes tem melhor atuação.

Em relação à osmose, o monitoramento da sílica é fundamental para evitar a formação e precipitação de sais nas membranas que podem causar incrustações duras e cristais grandes, podendo até furá-las, causa frequente da perda de membranas. Geralmente o nível de controle é de até 50 mg/L na alimentação ou de 150 ppm (partes por milhão), acima pode ocorrer a precipitação da sílica, causando danos ao sistema (VIEIRA, 2011). O residual de cloreto também é, já que indica a dosagem de hipoclorito de sódio, quando em excesso pode acarretar a passagem de cloro livre para as membranas,

sendo agressivo. Os sólidos totais dissolvidos e nível de ferro devem ser controlados para evitar incrustações e garantir níveis aceitáveis de impurezas na água. A dureza é um parâmetro importante devido a insolubilidade e ao alto poder incrustante dos íons ferro, cálcio, magnésio, carbonatos, sulfatos e silicatos (ANDRADE, 2014).

3.4.2 Troca Iônica

Em 1850, Way e Thompson estudaram a capacidade dos solos de remover íons amônio e potássio de soluções que os atravessavam (GUIMARÃES, 2010). As primeiras tentativas de aplicação da troca-iônica para a recuperação de metais foram para o cobre e a prata, sendo o urânio o primeiro metal a realmente ser recuperado (RIANI, 2008). Já em 1935, Adam e Holmes começaram a produzir resinas de troca iônica orgânicas sintéticas (GUIMARÃES, 2010).

Segundo MENDHAM *et al.* (2002), a troca iônica pode ser definida como “a permuta de íons de mesmo sinal, entre uma solução e um corpo sólido altamente insolúvel que está em contato com ela”. Como definido por Barros (2016), também pode ser a troca dos íons presos em um sólido poroso e insolúvel por íons presentes em uma solução. Assim, é um processo unitário que permite a troca reversível de íons entre duas fases imiscíveis ou uma solução e uma resina, sem que haja alteração da mesma (KAUTZMANN, 1999). Esse processo é altamente utilizado para remoção de metais e de íons indesejáveis de um meio (LEVINDO, SILVA e MARINHO, 2016). No tratamento de efluentes, a troca iônica substitui íons indesejáveis por outras espécies iônicas menos perigosas (RIANI, 2008).

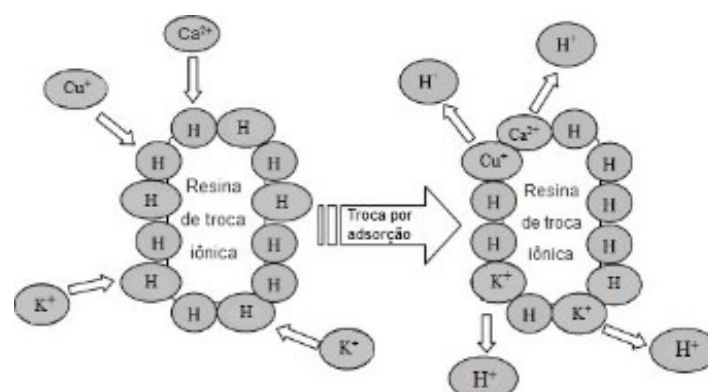
A troca iônica é muito utilizada para remover íons indesejáveis de águas, efluentes e soluções, como no caso da deionização de licores açucarados e da purificação de fármacos e macromoléculas. Além disso, o processo de troca iônica com resinas sintéticas é muito utilizado na catálise de reações químicas, como hidrólise, esterificação e epoxidação, além de uso na indústria alimentícia, farmacêutica, cosmética, petroquímicas, químicas, em processos galvânicos, agricultura e metalurgia. (GUIMARÃES, 2010; KARVAT, 2017)

A grande vantagem da troca iônica é ser um processo reversível, podendo ser reutilizável várias vezes. Além de serem inertes, não causando

risco à saúde humana. O esquema de funcionamento da troca iônica é apresentado na Figura 17. (KARVAT, 2017)

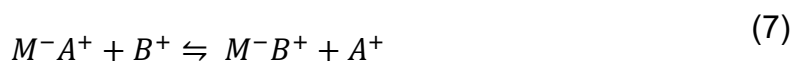
De acordo com Araújo *et al.* (2009 *apud* Levindo, Silva e Marinho, 2016), em relação ao carvão ativado, a resina se iguala em eficiência devido às características químicas e físicas do material, que melhoram a seletividade e a resistência mecânica, tornando-o menos passível de ser afetado por materiais orgânicos.

Figura 17 - Funcionamento da troca iônica em resinas catiônicas.

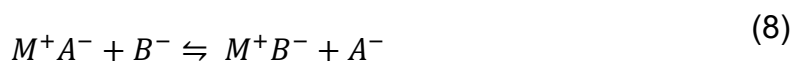


Fonte: Cisilotto, 2017.

Desta maneira, para um trocador catiônico M^-A^+ (onde M^- é o grupo funcional da resina e A^+ os contra-íons), os cátions A^+ são trocados em solução aquosa pelos cátions B^+ presentes na solução, assim a troca iônica pode ser representada pela equação (7): (RIANI, 2008)



Similarmente, também temos a reação para troca aniônica, representada pela equação (8). Neste caso, os ânions A^- são trocados pelos ânions B^- presentes na solução. (RIANI, 2008)



3.4.2.1 Resinas de Troca Iônica

Segundo Kremer (2007 *apud* LEVINDO, SILVA e MARINHO, 2016) a resina de troca catiônica é definida como “um material sintético que quando colocado em meio aquoso pode liberar íons sódio ou hidrogênio (resina catiônica) ou hidroxila (resina aniônica)” e, dessa forma, captando os cátions ou ânions indesejáveis desse meio aquoso.

De acordo com Guimarães (2010), as resinas:

São constituídas de uma matriz porosa, natural ou sintética, inerte, insolúvel em água e em solventes orgânicos, a qual é ligada, por ligações covalentes, a grupos trocadores iônicos, os quais definem o tipo da resina e são os responsáveis por receber os íons presentes no fluido.

Antes eram usados trocadores orgânicos naturais, sendo eles substâncias sólidas contendo grupos ativos ou inorgânicos, como HSO_3 , HCO_2 , OH , HS , NH_2 e derivados. Também poderia haver mais de um grupo no mesmo material, como no caso das proteínas. Exemplos desses trocadores são o ágar, celulose sulfonada (catiônico) e carvão natural (catiônico). (ABRÃO, 1972)

As resinas sintéticas de troca iônica são feitas por meio da polimerização de substâncias como o estireno a partir da síntese de sua matriz e copolimerização com o DVB (divinilbenzeno) gerando ligações cruzadas, seguida de sua funcionalização por meio do acréscimo de grupos funcionais capazes de adquirir carga. (KARVAT, 2017)

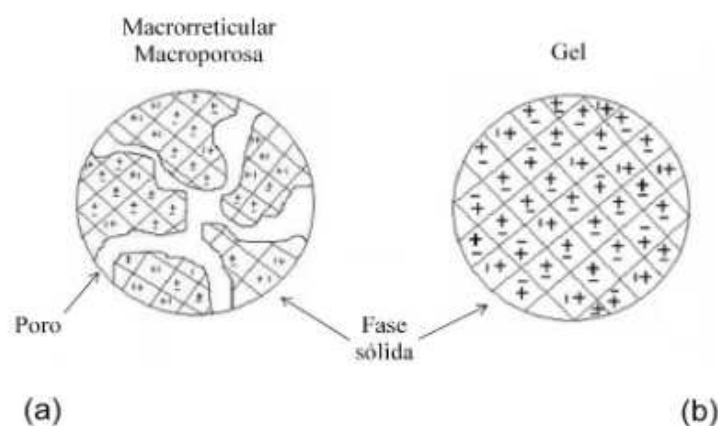
A quantidade de DVB influenciará diretamente na porosidade (ligações cruzadas) da resina e na solubilidade, essa quantia é representada pela taxa DVB. Quanto maior essa taxa menor a solubilidade, uma vez que representa os cruzamentos das cadeias. Além disso, altas taxas DVB diminuem a porosidade e inchamento, aumentando a rigidez, que acarreta na diminuição da eficiência por haver maior resistência na mobilidade das moléculas. Assim, as taxas de DVB em resinas comerciais variam entre 8 a 12%. (KARVAT, 2017)

Resinas com poucas ligações cruzadas possuem características de um gel, sendo microporosas (entre 10 a 15 angstroms), elas possuem baixa proporção de DVB, até 9%, o que afeta a resistência mecânica e osmótica (KAUTZMANN, 1999; KARVAT, 2017). Já as resinas com teor médio e elevado de ligações cruzadas são classificadas como isoporosas e macroporosa (diâmetros entre 20 a 100 nanômetros), respectivamente, indicadas para a purificação de água e tratamento de efluentes (BARROS, 2016). As resinas isoporosas possuem poros uniformes e entre 10 e 11% de DVB, e apesar de terem pouca seletividade a contaminantes orgânicos, tem grande capacidade e uma regeneração eficiente (KAUTZMANN, 1999; KARVAT, 2017). As resinas macroporosas são bem resistentes a choques osmóticos e possuem área

superficial interna maior que $100 \text{ m}^2/\text{g}$, além de altos teores de DVB ($>11\%$) (KAUTZMANN, 1999; KARVAT, 2017).

As características estruturais das resinas (tamanho da partícula, porosidade, área superficial) definem os compostos que podem ser removidos ou recuperados (BARROS, 2016). A Figura 18 apresenta um esquema da superfície de resinas macroporosas e microporosas (GUIMARÃES, 2010).

Figura 18 - Estrutura de resinas macroporosas (a) e microporosas/gel (b).



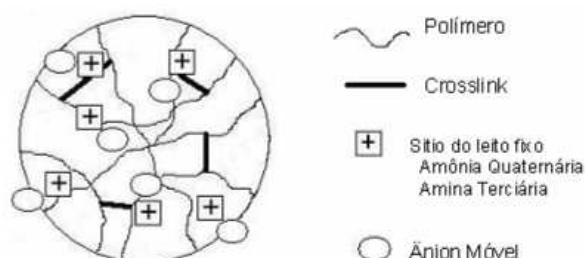
Fonte: Guimarães, 2010.

As resinas podem ser classificadas de acordo com as características ácido-base (aniônica e catiônica) e também segundo seu grau de dissociação (fortes e fracos). Muitos fatores interferem nessa eficiência, como as propriedades do grupo funcional, as densidades de cargas de troca, o tamanho e a polarização dos íons. (KAUTZMANN, 1999)

Nas resinas catiônicas, a funcionalização é feita com grupos capazes de se carregarem negativamente, o que pode ser feito por meio de reações de sulfonação, fosforilação ou carboxilação, sendo capazes de fixar cátions. Os principais grupos são o sulfônico HSO_3 (fortemente ácido), H_2PO_3 (fracamente ácido) e carboxílico HCO_2 (fracamente ácido). Já nas resinas de troca aniônica, são inseridos grupos capazes de se carregarem positivamente, por meio de aminação, sendo capazes de fixar ânions. Os principais grupos são de amina terciária R_3N (tipo I) e quaternárias R_4N^+ (tipo I), fortemente básicos, e amina secundária R_2NH e primária RNH_2 , fracamente básicos. (GUIMARÃES, 2010; KAUTZMANN, 1999)

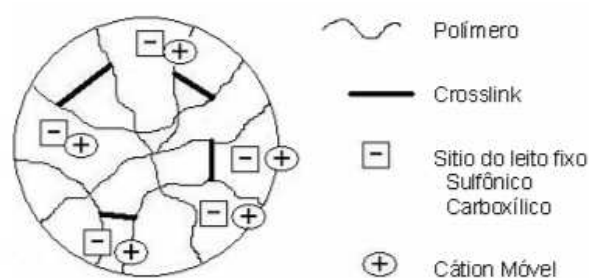
Assim, diferentes tipos de resinas podem ser produzidas a depender da constituição da matriz, grupos funcionais e características físico-químicas. As estruturas de resinas aniônicas e catiônicas são apresentadas nas Figuras 19 e 20, respectivamente. (RIANI, 2008)

Figura 19 - Estrutura de resinas aniônicas.



Fonte: Riani, 2008.

Figura 20 - Estrutura de resinas catiônicas.



Fonte: Riani, 2008.

De acordo com Barros (2016), “a concentração de resina influencia no processo de remoção dos íons metálicos”, assim quanto maior a concentração maior a remoção, uma vez que há maior superfície de troca iônica. Já segundo Cisilotto (2017), a temperatura é um fator importante, influenciando na cinética de troca e na estabilidade dos grupos, que diminui para grupos aniônicos com o aumento da temperatura e aumenta para os grupos catiônicos com o aumento da temperatura.

As resinas Tipo I e Tipo II, podem ter, respectivamente, grupos trimetilamina, que tem afinidade com todos os ânions, e dimetiletanolamina, que tem menor afinidade com sílica.

De acordo com Karvat (2017),

As resinas tipo I fortemente básica possuem maior interação com ácidos fracos, como ácido carbônico e ácido silícico, tendo maior

retenção da sílica do que a resina aniônica do tipo fracamente básica. As resinas fracamente básicas têm grupo funcional dimetilamina, tendo afinidade com sulfatos e cloretos, mas não tem grande afinidade com sílica e gás carbônico dissolvido.

A troca iônica acontece geralmente com os íons H^+ , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Fe^{3+} , Th^{4+} , $FeCl_2^+$, $Cu(NH_3)_4^{2+}$ e íons orgânicos RNH_3^+ , R_4N^+ , para resina catiônica; e com os íons OH^- , Cl^- , SO_4^{2-} , HSO_4^- , PO_4^{3-} , HPO_4^{2-} , $H_2PO_4^-$, $FeCl_4^-$, $ZnCl_3^-$ e íons orgânicos $R-COO^-$, para resina aniônica. (ABRÃO, 1972)

Uma resina se torna mais seletiva por ter: grande número de ligações cruzadas; alta carga iônica, aumentando a afinidade do íon com o sítio ativo; tamanho maior da partícula, uma vez que pode ocorrer polarização do íon hidratado em decorrência da menor afinidade causada por raios maiores. (KARVAT, 2017)

A quantidade de um íon pode favorecer sua afinidade, se houver uma alta concentração do íon na solução ele será adsorvido mais facilmente, sobrepondo o efeito da valência, que é a responsável pela afinidade dos íons às resinas. As resinas dão preferência para íons que têm alta carga, íons pequenos (penetram nos poros facilmente), íons com grande capacidade de polarização, íons com fraca interação com o fluido. (KARVAT, 2017)

As resinas catiônicas fortes possuem as seguintes ordens de seletividade: $Li^+ < Na^+ < K^+ < Rb^+ < Cs^+$; $Mg^{2+} < Ca^{2+} < Sr^{2+} < Ba^{2+}$. Já as resinas catiônicas fracas (carboxílicas) são seletivas para H^+ , Cu^{2+} e Ca^{2+} . E as aniônicas possuem as seguintes ordens de seletividade: $Ac^- < F^- < OH^- < HCOO^-$ (formiato) $< Cl^- < SCN^- < Br^- < CrO_4^{2-} < NO_3^- < I^- < O^{2-} < SO_4^{2-} < [C_6H_5O_7]^{3-}$ (citrato). Além disso, as resinas aniônicas fracas têm grande afinidade por OH^- , sendo pouco dissociadas. (ABRÃO, 1972)

A Tabela 4 mostra a afinidade das resinas catiônicas e aniônicas em ordem decrescente.

Tabela 4 - Ordem de seletividade dos íons.

Cátions	Ânions	Afinidade
Fe ⁺³	CrO ₄ ⁻²	↓
Al ⁺³	SO ₄ ⁻²	
Pb ⁺³	SO ₃ ⁻²	
Ba ⁺²	HPO ₄ ⁻²	
Sr ⁺²	CNS ⁻	
Cd ⁺²	CNO ⁻	
Zn ⁺²	NO ₃ ⁻	
Cu ⁺²	NO ₂ ⁻	
Fe ⁺²	Br ⁻	
Mn ⁺²	Cl ⁻	
Ca ⁺²	CN ⁻	
Mg ⁺²	HCO ₃ ⁻	
K ⁺	HSiO ₃ ⁻	
NH ₄ ⁺	OH ⁻	
Na ⁺	F ⁻	
H ⁺		
Li ⁺		

Fonte: Silva e Pasquim, 2018.

3.4.2.1.1 Regeneração das Resinas

As resinas podem ser colocadas em colunas de modo a obter um maior número de equilíbrios ao mesmo tempo, como uma série de estágios simples. O uso de colunas é altamente favorável, uma vez que na coluna os íons trocáveis encontram muitos grupos ativos a cada centímetro. (ABRÃO, 1972)

As resinas possuem um certo número de sítios ativos, havendo, portanto, uma limitação da capacidade de troca em relação a este número, dessa forma haverá um momento onde não será possível mais trocas, acontecendo a saturação das resinas. (KARVAT, 2017)

Uma vez que a troca iônica é reversível, são realizados processos de regeneração das resinas por meio de produtos químicos que ativam seus grupos funcionais, removendo os íons capturados, que torna a resina apta

novamente para troca iônica (KARVAT, 2017). Nesse processo de regeneração, os íons aderidos pela resina são trocados pelos íons presentes nas soluções regenerantes, voltando a resina ao seu estado inicial.

Altas concentrações de sílica na água de saída são indício de saturação das resinas, necessitando de uma regeneração. Caso não haja regeneração, o pH e condutividade irão aumentar. (SILVA e PASQUIM, 2018)

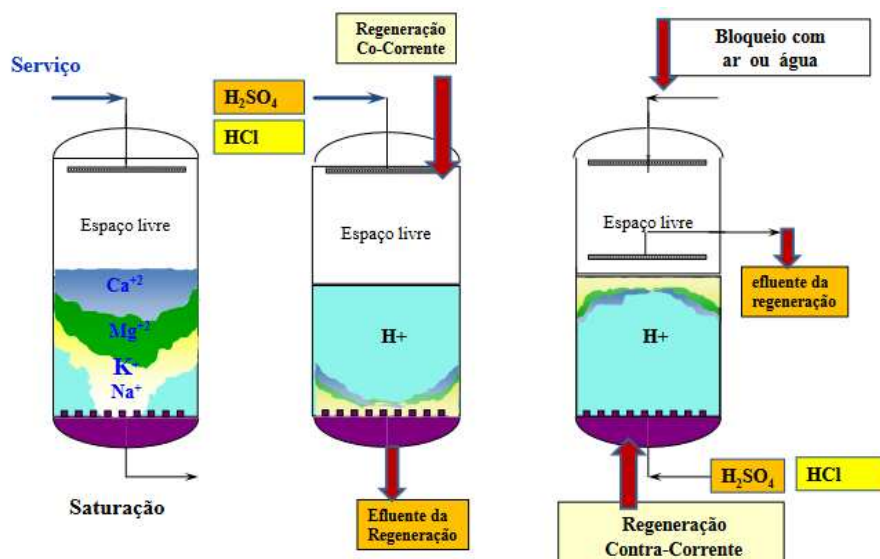
Geralmente as soluções regenerantes para resinas catiônicas são soluções com 5 a 10% de HCl ou H₂SO₄, e para as resinas aniônicas são usadas soluções 4% de NaOH (CISILOTTO, 2017). Especialmente em resinas utilizadas no abrandamento de água são utilizadas soluções de NaCl 10% como regenerante. Para resinas usadas na desmineralização de água, usa-se soluções de HCl 5 a 10% ou H₂SO₄ 2 a 4% nas resinas catiônicas, e solução 4% de NaOH nas aniônicas. (DYNA, RODRIGUES e BARBOSA, 2010)

Após a regeneração, os resíduos dos trocadores são enviados ao tanque de neutralização uma vez que possuem muitas cargas livres, necessitando realizar a neutralização para enquadrar às condições de efluente na entrada da ETE. Para tanto, adiciona-se H₂SO₄ ou NaOH a fim de obter um pH do fluido entre 6,0 e 9,0 para poder ser encaminhado à ETE. (SILVA e PASQUIM, 2018)

De acordo com Macedo (2014), as operações básicas de uma regeneração são: contra-lavagem, aplicação de regenerante, deslocamento (lavagem lenta) e enxágue (lavagem rápida). Na contra-lavagem, ocorre a passagem de água em fluxo ascendente para remover materiais retidos pela resina, além da expansão do leito de 50 a 80%. Na segunda etapa, ocorre a passagem de uma solução ácida ou básica de forma a repor os íons da resina, retirando os íons adsorvidos na troca iônica. Em seguida, há a passagem de água em baixa velocidade pelo leito de forma a retirar a solução regenerante residual. Por fim, ocorre a passagem de água na velocidade da solução tratada na troca iônica, para remover o restante do regenerante, até que a água de saída esteja nas mesmas condições que a de entrada. (MACEDO, 2014)

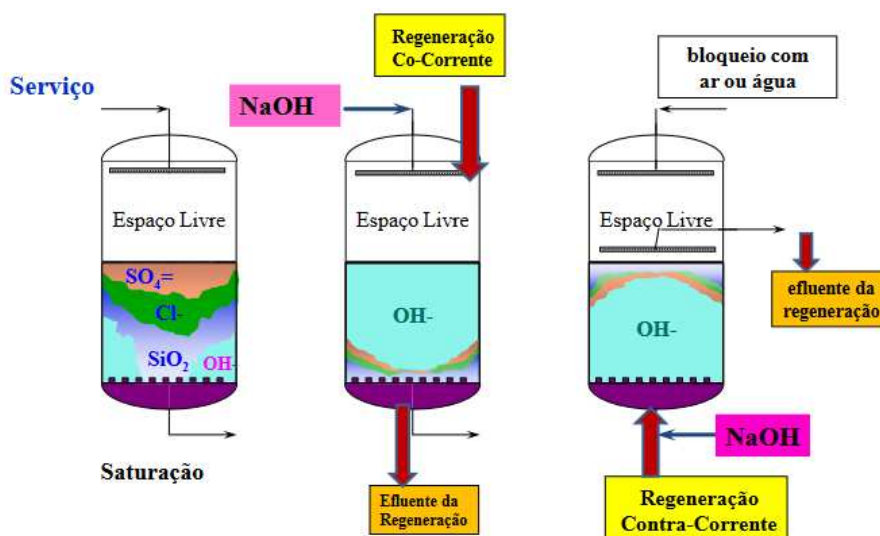
O processo de regeneração de resinas catiônicas e aniônicas é apresentado na Figura 21 e 22, respectivamente.

Figura 21 - Regeneração de resinas catiônicas.



Fonte: Cunha, 2015.

Figura 22 - Regeneração de resinas aniônicas.



Fonte: Cunha, 2015.

A regeneração pode ser feita de forma ascendente ou descendente. Quando feita no sentido descendente é necessária uma retrolavagem antes da etapa de regeneração, sendo essa uma desvantagem. Além disso, deve-se ter cuidado na escolha das condições experimentais de dessorção e regeneração adotadas, uma vez que as resinas podem reagir quando expostas a condições severas de temperatura e pH, ou em contato com agentes oxidantes fortes. (GUIMARÃES, 2010)

3.5 TRATAMENTO DE EFLUENTES

As indústrias geram resíduos sólidos, líquidos e gasosos, sendo esse um ponto fundamental uma vez que envolve a preservação de recursos naturais, necessitando de tratamento de efluentes (SILVA e PASQUIM, 2018).

Uma questão importante é o retorno da água captada ao meio ambiente, já que a mesma não se encontra nas condições iniciais. Ao ser utilizada, a água acumula impurezas e contaminantes que alteram suas características físicas, químicas e biológicas, por meio de gases, sólidos, substâncias inorgânicas e orgânicas e seres vivos. Dessa forma, há a necessidade de haver um tratamento das águas residuais para que atinjam condições e padrões estabelecidos que permitam seu lançamento nos corpos hídricos, além de possível reuso de águas. (ALVES, 2009)

Esses padrões de qualidade são definidos por meio de legislações como a Resolução do CONAMA nº 357 de 2005, do Ministério do Meio Ambiente, e a Resolução do CONAMA nº 430 de 2011, para emissão de efluentes líquidos em corpos d'água. Essa resolução dispõe das condições e padrões de lançamento de efluentes, como o pH, temperatura, DBO, DQO, materiais orgânicos, inorgânicos e sedimentáveis, entre outros, a Tabela 5 mostra alguns dos padrões estabelecidos. (CONAMA, 2011; BRASIL, 2011)

Tabela 5 - Condições para descarte de efluente segundo Resolução 430/2011.

Propriedade	Características
pH	5,0 a 9,0
Temperatura (°C)	< 40
Materiais sedimentáveis (mg/L)	Até 1
Materiais flutuantes	Ausente
DQO (mg/L)	400
DBO (mg/L)	120 ou redução de 60%
Substâncias voláteis em hexano (mg/L)	Até 100

Fonte: Adaptado de CONAMA, 2011.

O tratamento de efluentes pode ser classificado em três métodos de acordo com as técnicas/operações usadas e a natureza dos poluentes a serem removidos, sendo eles físicos, físico-químicos e biológicos. Outra classificação

é por tratamento primário (métodos físico-químicos), secundário (tratamento biológico) e terciário (remoção de componentes específicos, como metais pesados). No tratamento primário há a remoção dos sólidos grosseiros, sólidos sedimentáveis e parte da matéria orgânica, por meio de grades, peneiras, sedimentadores e flotadores. Já no secundário, há a remoção da matéria orgânica dissolvida ou coloidal e nutrientes. E no terciário, são removidos sólidos coloidais e dissolvidos, poluentes específicos ou que não foram removidos adequadamente no tratamento secundário. (MOTTA, 2021; GIORDANO, 2004; ALVES, 2009)

Geralmente os tratamentos de efluentes líquidos na indústria possuem etapas de pré-tratamento, tratamento primário e tratamento secundário biológico. (JUNIOR, 2015)

3.5.1 Tratamento preliminar

Em alguns casos não é feito, é utilizado para remoção de: sólidos sedimentáveis grosseiros, como a areia, carvão e pó de pedra, em caixas de areia; sólidos com diâmetros maior que 1 mm, como penas, plásticos e fios, por meio de peneiras; sólidos com diâmetros maior que 10 mm por grades; além da remoção de óleos e graxas por diferença de densidade. (GIORDANO, 2004)

3.5.2 Tratamento primário ou físico

Geralmente são usados processos de coagulação-floculação, decantação, filtração, entre outros, sendo a coagulação a mais usada devido sua maior eficiência na remoção da DQO, óleos e graxas, que impactam no tratamento biológico. (JUNIOR, 2015)

Nessa etapa são removidos sólidos em suspensão sedimentáveis, que geralmente são carga orgânica, havendo assim a redução de carga orgânica, além de remoção de gorduras, metais pesados dissolvidos e componentes tóxicos (GIORDANO, 2004). O objetivo é fazer com que o efluente prossiga no tratamento com melhores características (menor teor de sólidos, gordura e DBO) para que as próximas etapas operem em melhores condições (SCAPINI, 2007). Segundo Giordano (2004), os processos físicos também podem ser utilizados com finalidade de desinfecção, como a radiação ultravioleta.

Alguns processos desse tratamento são mostrados a seguir.

3.5.2.1 Gradeamento

Tem como objetivo separar os sólidos grosseiros do efluente que podem causar problemas como obstruções e desgastes em tubulações e equipamentos de tratamento. (SCAPINI, 2007)

Geralmente, a calha Parshall é a mais utilizada, possuindo grades fixas para barragem dos sólidos e também funciona como medidor de vazão (SILVA e PASQUIM, 2018). As grades são dispostas com um espaçamento específico que varia de 0,5 a 2,0 cm, podendo estar dispostas paralelamente ou inclinadas (MOTTA, 2021).

3.5.2.2 Peneiramento

São utilizadas peneiras para remoção de sólidos mais finos após o gradeamento. Segundo Motta (2021), “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”.

3.5.2.3 Homogeneização

Também chamada de equalização, é responsável por misturar os diversos efluentes para que fiquem uniformes, mantidos sob agitação. Assim, o equipamento promove uma mistura apropriada, minimizando a variação de vazão, carga e pH para as demais etapas. Essa etapa aumenta a eficiência do tratamento biológico, uma vez que as cargas podem ser minimizadas, substâncias inibidoras podem ser diluídas e o pH estabilizado. Além disso, também aumenta a eficiência do tratamento químico já que o efluente fica contínuo e homogêneo, reduzindo a quantidade de insumos químicos utilizados. Porém, geralmente esses tanques necessitam de áreas grandes e também geram cheiros ruins devido ao acúmulo de efluentes. (SCAPINI, 2007; SILVA e PASQUIM, 2018)

3.5.2.4 Neutralização

Tem como objetivo melhorar as condições de floculabilidade e decantar os sólidos suspensos por meio do ajuste do pH de 8,0 a 8,5, geralmente utilizando cal hidratada. Se o efluente possui pH ácido é neutralizado com um produto alcalino, e se possui pH alcalino é neutralizado com ácido. (SCAPINI, 2007)

3.5.2.5 Coagulação e floculação

Na coagulação ocorre a desestabilização das partículas coloidais ou em suspensão por meio da adição de produtos químicos, que interagem com os sólidos aumentando o seu peso, devido ao desenvolvimento de cargas superficiais. Assim, as partículas começam a se atrair, agregando-se umas às outras, causando a formação de flocos de maior tamanho e peso, sedimentando. Os produtos mais utilizados são o sulfato de alumínio $Al_2(SO_4)_3$ e cloreto férrico $FeCl_2$, sendo adicionados de forma diluída com concentração de 5 a 40%. (SCAPINI, 2007)

A floculação é usada como uma etapa complementar à coagulação para acelerar a sedimentação das partículas coaguladas. Para tal, são utilizados produtos químicos orgânicos, como polímeros sintéticos, unindo as partículas por meio das cadeias e facilitando a sua aglutinação. Os polímeros podem ser catiônicos, aniônicos ou não aniônicos, dependendo da carga das partículas do efluente. Essa etapa é realizada em tanques com agitadores com velocidade moderada para promover o crescimento dos flocos sem rompê-los e sem formar sedimentos no fundo. Quanto mais próximo da neutralidade estiver o pH, maior será a eficiência. (SCAPINI, 2007)

3.5.2.6 Flotação

Essa etapa é utilizada para misturas heterogêneas com objetivo de separar do efluente partículas sólidas ou líquidos de baixa densidade. Pode ser realizada pela injeção de ar ou nitrogênio, formando bolhas que aderem as partículas em suspensão, aglutinando-as, resultando em uma espuma na parte superior do tanque. A espuma é retirada por raspadores e o líquido da parte inferior continua no tratamento. (MOTTA, 2021)

Essa etapa é necessária para retirar o tanino presente no efluente. Segundo Silva e Pasquim (2018), “são adicionados no flotador ácido sulfúrico para que haja a correção do pH, polímeros para que se tenha a floculação, e por fim $FeCl_3$ (cloreto férrico) para a coagulação”.

3.5.2.7 Decantação primária

Tem como objetivo remover os sólidos em suspensão e sedimentáveis do efluente. Nessa etapa, o efluente fica em repouso por um determinado

tempo em tanques, de forma a sedimentar as partículas sólidas pela gravidade. Os sólidos, ao sedimentar, se depositam no fundo do tanque, constituindo o lodo primário. É recomendado uma retenção de 2 a 2,5 horas para uma decantação efetiva, além disso deve haver a remoção periódica do lodo sedimentado. (SCAPINI, 2007; SILVA e PASQUIM, 2018)

3.5.2.8 Remoção de óleos e graxas

Utiliza-se caixa de gordura nessa etapa para remoção de óleos e graxas, uma vez que seu alto teor pode acarretar em problemas como entupimento de orifícios. (SCAPINI, 2007)

3.5.3 Tratamento secundário ou biológico

São usados para remoção de matéria orgânica biodegradável e podem se dar por meio de processos aeróbios ou anaeróbios de acordo com as características dos microrganismos envolvidos (MOTTA, 2021). Os nutrientes como nitrogênio e fósforo também podem ser removidos no tratamento biológico (GIORDANO, 2004). Entre os processos aeróbios se destacam o lodo ativado, filtro biológico e lagoas aeradas e de estabilização. Já entre os anaeróbios, tem-se os filtros anaeróbios e os digestores anaeróbios de fluxo ascendente (reatores UASB), que precisam de menor área para instalação e geram baixa quantidade de lodo (JUNIOR, 2015).

O tratamento aeróbio necessita da presença de oxigênio, usando aeradores para tal, já o anaeróbico não necessita. Além disso, quando há muita variação das condições do efluente, o tratamento anaeróbio não é indicado uma vez que os microrganismos precisam de um tempo maior para se adequarem, que pode reduzir a eficiência. (MOTTA, 2021)

Esse tratamento é utilizado para acelerar a degradação que ocorre naturalmente, transformando a matéria orgânica dissolvida e em suspensão em sólidos sedimentáveis (flocos biológicos) ou gases. Assim, ocorre a utilização da matéria orgânica como substrato para microrganismos, como bactérias, fungos e protozoários, transformando-a em gases, água e novos microrganismos. Nesses processos, as algas utilizam o gás carbônico produzido pelas bactérias para produzir oxigênio, através da fotossíntese, e as bactérias utilizam esse oxigênio para oxidar o material orgânico biodegradável,

produzindo mais gás carbônico, de forma a dar continuidade ao processo. Quando não há oxigênio, os microrganismos anaeróbios transformam o material orgânico em biogás, pela digestão anaeróbia. (GIORDANO, 2004; SANTOS, 2007)

Cerca de 6 a 60% da matéria orgânica é transformada em sólidos, esse valor depende de fatores como o processo adotado e a relação alimento/microrganismos (A/M). O restante é transformado principalmente em gás carbônico, ou metano nos sistemas anaeróbios. O excesso de lodo, flocos biológicos, são retirados e submetidos à secagem. Como há a remoção da matéria orgânica em suspensão e dissolvida, e redução de microrganismos, o efluente final é considerado tratado. (GIORDANO, 2004)

A relação A/M é definida como a demanda bioquímica fornecida por dia por unidade de biomassa do reator (Sólidos Suspensos Voláteis no Tanque de Aeração - SSVTA), expressa em kgDBO/kgSSVTA*dia. (SANTOS, 2007)

Como esse tratamento envolve fenômenos biológicos, ele depende de fatores físico-químicos do meio, como temperatura, pH, concentração de oxigênio dissolvido (OD) e presença de inibidores, que são responsáveis pelo desenvolvimento dos microrganismos. A temperatura ideal é de 20 a 30°C, valores acima de 40°C não são suportados e valores abaixo de 10°C diminuem a atividade biológica. O pH ideal varia de 6,0 a 8,0. A concentração de OD depende da pressão atmosférica e da temperatura, seu valor ideal é de 1 a 2 mg/L, valores maiores que 4 mg/L podem causar a flotação do lodo. Além disso há a necessidade de uma concentração ideal de nutrientes para o desenvolvimento dos microrganismos, se o efluente for pobre em nutrientes como nitrogênio e fósforo deve-se adicioná-los. (SCAPINI, 2007)

O pH também é um indicador do desequilíbrio, se ele cai bruscamente pode não estar havendo neutralização dos ácidos pela ausência de alcalinidade no meio ou pode não estar havendo transformação em metano indicando problema com as *archaea* metanogênicas. (SANTOS, 2007)

Um outro parâmetro muito importante é a DBO, que é medida na entrada e na saída do tratamento biológico, pois a remoção de DBO é um dos parâmetros exigidos pela legislação. Além disso, a DQO, SST e condutividade são outros parâmetros controlados na entrada e saída. (MOTTA, 2021)

O equilíbrio entre os microrganismos acidogênicos e metanogênicos é medido pelos ácidos orgânicos voláteis (AOV), se há acúmulo de ácidos há um desequilíbrio do processo. O controle é feito através de métodos cromatográficos. A relação de AOV e alcalinidade é usada para prever e evitar a queda de pH, sendo recomendados valores de concentração entre 0,06 e 0,2 mg/L (0,1 e 0,35 em concentrações molares de AOV e alcalinidade). (LANGE, 2012)

Em relação às características do efluente, são analisados os sais separadamente e metais de forma elementar. Os principais sais são: sulfatos (reduzidos a sulfetos), nitratos e nitritos (desnitrificados), e sais de amônia (nitrificados). A toxicidade dos metais depende do número de oxidação, além de outros fatores, os metais tóxicos são: alumínio, cobre, cromo, chumbo, estanho, níquel, mercúrio, vanádio e zinco. Metais como o sódio, cálcio, magnésio e potássio são analisados quando se deseja fazer reuso de água ou quando a salinidade do efluente influenciar na corrosão, incrustação e osmose. (GIORDANO, 2004)

Estudos apontam que concentrações de 5 mg/L de zinco e entre 1 e 3 mg/L de chumbo, cobre, níquel e cromo, influenciam negativamente nos processos aeróbicos. O cloro em concentrações acima de 0,2 mg/L também influencia negativamente, sendo inibidores do processo de lodos ativados. Além disso, várias substâncias orgânicas, como fenol, formaldeídos, inseticidas e herbicidas, são tóxicas para a flora bacteriana. Os tensoativos aniônicos favorecem a formação de espuma em concentrações acima de 0,5 mg/L, influenciando negativamente nos processos físicos e biológicos, além de possuírem substâncias de origem proteica que podem ser um obstáculo na aeração redutora e em processos biodegradáveis. (LANGE, 2012)

Segundo Giordano (2004), a presença excessiva de sais mesmo que inertes, como o cloreto de sódio, pode retardar ou inviabilizar os processos biológicos por efeito osmótico.

Para o equilíbrio do processo anaeróbio, deve haver a presença de macronutrientes, como nitrogênio, fósforo, enxofre e potássio. Indica-se uma relação mínima entre DQO, nitrogênio e potássio (DQO/N/P) de 350/7/1. O enxofre é considerado necessário em quantidades tão grandes quanto o

fósforo, porém se estiver na forma de sulfato pode ser tóxico para as archaea metanogênicas por se reduzir a sulfeto. Também são necessários micronutrientes, como níquel, cobalto, molibdênio, ferro e selênio, uma vez que são essenciais a várias enzimas, porém em baixas concentrações já que valores elevados podem inibir o processo. (SANTOS, 2007)

Os principais processos desse tratamento são descritos a seguir. Sendo que os processos aeróbios são representados por lodos ativados, lagoas aeradas facultativas e lagoas aeradas aeróbias. E os processos anaeróbios por meio de lagoas anaeróbias e biodigestores. Há também os processos facultativos que utilizam biofilmes e lagoas facultativas. Também há as lagoas de estabilização, onde ocorre a estabilização do material orgânico por meio de um longo tempo de detenção, de 20 a 30 dias, sendo benéfico por remover os ovos de helmintos e coliformes termotolerantes. (SANTOS, 2007)

3.5.3.1 Lagoa aerada ou lodo ativado

O sistema consiste em uma lagoa com reatores biológicos, um decantador secundário e uma bomba que faz o reciclo parcial do lodo, o restante do lodo é encaminhado para uma centrífuga. Esse reciclo tem como objetivo aumentar a massa microbiana. Os microrganismos se nutrem, reproduzem e movimentam pela energia obtida da aeração dos reatores. É geralmente a última etapa dos processos biológicos. (SCAPINI, 2007)

A lagoa possui aeração, ocorrendo reações bioquímicas em que os microrganismos convertem matéria orgânica em gás carbônico e lodo biológico (SANTOS, 2007). De acordo com Silva e Pasquim (2018), as bactérias aeróbicas fazem “o consumo da matéria orgânica carbonácea e a nitrificação do nitrogênio orgânico total remanescente”.

Após passar pelo reator, vai para o decantador secundário que separa o lodo do efluente tratado por ação da gravidade, separando os sólidos produzidos no reator. O lodo é dividido em duas partes: uma que retorna ao reator para equilíbrio do processo, mantendo a concentração de biomassa elevada que aumenta sua eficiência; e outra que vai para a centrífuga para poder ser destinada a aterros sanitários. (SILVA e PASQUIM, 2018)

Nesses sistemas, o tempo de detenção hidráulica (TDH) do líquido é baixo, de modo que o volume do reator seja reduzido. O tempo de retenção dos

sólidos, denominado idade do lodo, é superior devido à recirculação, e é definido como a relação entre a quantidade de lodo biológico existente no reator e a removida por dia. Por esse tempo ser maior, a biomassa consegue metabolizar praticamente toda a matéria orgânica. Assim, para manter o sistema em equilíbrio deve-se retirar a mesma quantidade de biomassa que é aumentada por reprodução (lodo biológico excedente). Esse lodo excedente é tratado por meio de adensamento, digestão e desidratação. (SANTOS, 2007)

Essas lagoas possuem cerca de 1,0 metro de profundidade de modo a proporcionar um ambiente predominantemente aeróbio. Assim, permitem elevado TDH e decaimento dos coliformes por radiação solar. (SANTOS, 2007)

Nesses sistemas, cerca de 40 a 50% da matéria é degradada e convertida em CO₂, assim há uma enorme incorporação (50 a 60%) de matéria orgânica no lodo excedente, que necessita de estabilização. Conforme Santos (2007), “o material orgânico não convertido em gás carbônico, ou em biomassa, deixa o reator como material não-degradado (5 a 10%)”.

3.5.3.2 Lagoa anaeróbia

Geralmente, é a primeira etapa do processo biológico, suportando elevadas cargas de DBO. Elas são profundas (mais de 3 metros) e geralmente seguidas de lagoas facultativas. Nessa etapa, ocorre a remoção do material orgânico por digestão anaeróbia (hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese/sulfetogênese), além de quase não ocorrer fotossíntese devido aos baixos valores de TDH. (SANTOS, 2007)

Nesses sistemas, ocorre a conversão de 70 a 90% do material orgânico biodegradável em biogás, e cerca de 5 a 15% é convertido em biomassa microbiana que forma o lodo excedente. O resto do material não convertido em biogás ou biomassa, deixa o reator como material não degradado (cerca de 10 a 30%). (SANTOS, 2007)

O reator anaeróbio de fluxo ascendente (UASB) é utilizado para reter biomassa na zona de sedimentação e queimar o biogás produzido, permitindo altas concentrações de lodo no reator e a independência da idade do lodo e do TDH. Assim, é possível ter um TDH reduzido e uma alta idade de lodo. Esse reator consegue reduzir em 65% a DBO com TDH de cerca de 6 horas em esgotos sanitários. Vem sendo muito usado como pré-tratamento e digestor de

lodo de outros processos biológicos, produzindo pouquíssimos sólidos. (SANTOS, 2007)

A faixa ótima de pH do reator no processo anaeróbio é entre 6,6 e 7,6, fora dessa faixa é o tratamento será menos estável pela menor diversidade de microrganismos que se adaptam a essas condições. (SANTOS, 2007)

3.5.3.3 Lagoa facultativa

Possui um ambiente aeróbio na parte superior, em consequência da fotossíntese das algas, e anaeróbio na parte inferior. Sua profundidade varia de 1,5 a 2,5 metros. Nessa etapa, ocorre tanto a oxidação do material orgânico nas camadas mais próximas à superfície, como a digestão anaeróbia no fundo da lagoa. (SANTOS, 2007)

3.5.3.3 Lagoa areada facultativa

Utilizada quando é desejado uma alta eficiência do processo de estabilização da matéria orgânica com uma área reduzida, por meio de lagoas com aeração artificial. (SANTOS, 2007)

A fonte de oxigênio provém da aeração mecânica ao invés da fotossíntese. A oxigenação da água é feita pela energia dos aeradores, não influenciando na manutenção dos sólidos em suspensão, que formam um lodo que será decomposto anaerobiamente. A DBO solúvel e finamente particulada sofre decomposição aeróbia. (SANTOS, 2007)

3.5.4 Tratamento terciário ou químico

São processos químicos que promovem a remoção de poluentes por meio de reações químicas utilizando agentes de coagulação, floculação, neutralização de pH, oxidação, redução e desinfecção. Os mais usuais são: clarificação química, eletrocoagulação, precipitação de fosfatos e outros sais, cloração (desinfecção), oxidação por ozônio (desinfecção), redução do cromo hexavalente, precipitação de metais tóxicos, PSM e troca iônica. Esse tratamento visa a melhoria da qualidade dos efluentes, removendo cor, turbidez (remoção de coloides, metais pesados, nitrogênio, fósforo, compostos orgânicos residuais) e desinfecção. (GIORDANO, 2004)

4 METODOLOGIA

Com o intuito de reduzir o consumo e desperdício de água industrial, foi feito um estudo sobre a possibilidade de reuso de água de rejeito na área de utilidades, provindas das osmose reversas. Para tanto, o tratamento dessa água foi feito pela passagem em resinas de troca iônica, para ser reutilizada nas torres de resfriamento.

Como mencionado anteriormente na seção de referencial teórico, a água do setor de utilidades (bruta) é captada de poços artesianos, sendo coletada e transportada para reservatórios. Dos reservatórios, a água pode ir para o tratamento por meio de sistema de osmose reversa ou ser usada para outros fins. Ao passar pelas osmose, a água tratada (permeado) é destinada tanto para os sistemas de resfriamento quanto para a caldeira ou para alguma outra etapa do processo de produção.

As osmose produzem a água de rejeito ou concentrado que é descartada e vai para um reservatório, a caixa industrial, essa água é utilizada para fins não nobres como lavagem de pisos e nos banheiros. Apesar dessa água ser usada nessas atividades, a sua quantidade é bem grande, sobrando um inventário considerável, o que acaba por ser um problema já que essa água não pode ser descartada sem tratamento. Assim, viu-se uma possibilidade de reutilizá-la nas torres de resfriamento, que não necessitam de uma água tão pura ou desmineralizada, passando-a novamente por um tratamento através de resinas de troca iônica.

De modo a averiguar se esse tratamento para reuso era viável, primeiramente, fez-se análise dos parâmetros da água de rejeito para verificar se era possível fazer sua passagem em resinas de troca iônica e obter resultados parecidos com os parâmetros físico-químicos estabelecidos pela empresa, para tal foi utilizada uma planilha de Excel com balanço de íons disponibilizada pela empresa PUROLITE, fabricante de resinas, a qual é aplicado na coluna existente. Após verificar a possibilidade de tratamento de redução salina pelas resinas, a solução referente ao processo de regeneração das mesmas, agora carregada de íons salinos, foi investigada para verificar em que local no sistema de tratamento de efluentes poderia ser despejada.

As análises feitas na água foram em relação ao pH e condutividade, e foram realizadas no laboratório interno, sendo que a metodologia específica utilizada está referenciada nas normas técnicas brasileiras. O procedimento para determinação do pH foi feito por meio da metodologia eletrométrica com uso de um pHmetro (ABNT, 1986), já a condutividade foi determinada por meio de condutímetro (ABNT, 1999).

Os demais dados da água de rejeito da osmose foram coletados da literatura a partir do valor de condutividade de referência medido, de forma a apresentar similaridade com a água da empresa. Após coleta dos dados, foi utilizada uma planilha eletrônica (Excel) do fabricante de resinas PUROLITE, de forma a averiguar se esta se encaixava nos dados obtidos, já que há uma coluna de troca iônica na empresa. O modelo da planilha é representado nas Figura 23 e 24.

Figura 23 - Planilha eletrônica para inserção dos dados.

Sistema de Dimensionamento - DESMINERALIZAÇÃO - Resina PUROLITE

- Esse sistema de dimensionamento foi desenvolvido exclusivamente pela Puro-lite - líder mundial em tecnologia e produtor exclusivo de resinas de troca iônica - com o intuito de facilitar o dimensionamento de sistemas de desmineralização com vazões de até 10m³/h. Para vazões acima da indicada favor contatar a Puro-lite.

- Ao utilizar a planilha não deixe de ativar os macros para evitar desconfiguração dos cálculos.

- Atentar somente ao lançamento do dado Dureza Total, o mesmo sempre deverá ser em ppm de CaCO₃. Quando não informado a Dureza Total separadamente em Ions de Cálcio e Magnésio, sugere-se lançar 80% de Ions em Cálcio e 20% de Ions de Magnésio.

Como usar: Insira dados apenas nas células cinzas.
Células vermelhas indicam sistemas fora de especificação.
Células verdes indicam sistemas dentro da especificação.

Cliente:
Data: 11/9/2023

Item 1 - Análise Química da Água de Entrada

Origem da Água:

pH

Condutividade		µS/cm
Vazão do sistema		m ³ /h
Campanha desejada		horas
Total teórico de cátions	0	ppm CaCO ₃
Total teórico de ânions	0	ppm CaCO ₃

Fonte: PUROLITE, 2023.

Figura 24 - Planilha eletrônica para inserção dos dados.

Análise dos Dados	Concentração do Íon			
	mg/l	Unidade	meq/l	ppm CaCO3
Cálcio	0,00	Ca ²⁺	0,00	0,00
Magnésio	0,00	Mg ²⁺	0,00	0,00
Sódio	0,00	Na ⁺	0,00	0,00
Potássio	0,00	K ⁺	0,00	0,00
Ferro	0,00	Fe ²⁺	0,00	0,00
Cobre	0,00	Cu ²⁺	0,00	0,00
Alumínio	0,00	Al ³⁺	0	0,00
Total de cátions				0,00

Concentração de Ânions - carga negativa

Análise	Concentração do Íon			
	mg/l	Unidade	meq/l	ppm CaCO3
Alcalinidade	0,00	HCO ₃ ⁻	0,00	0,00
Cloretos	0,00	Cl ⁻	0,00	0,00
Sulfatos	0,00	SO ₄ ²⁻	0,00	0,00
Nitrato	0,00	NO ₃ ⁻	0,00	0,00
Sílica	0,00	SiO ₂ ⁻	0,00	0,00
CO ₂	0,00	CO ₂	0,00	0,00
Orgânico	0,00	TOC	0	0,00
Total de ânions				0,00

#DIV/0!

Fonte: PUROLITE, 2023.

Após a simulação, os dados foram confrontados com a coluna existente, constatando se o reuso era possível ou não. Em seguida, foi feita uma estimativa da característica da água de rejeito do processo de regeneração das resinas de modo a qualificar o efluente para destino correto no tratamento de efluentes. Assim, foi verificado se essa água poderia ser encaminhada à alguma parte do tratamento para o processo de reuso ser considerado viável ou não.

5 ANÁLISE DOS DADOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1 ANÁLISE DO USO DAS RESINAS IÔNICAS

Primeiramente, avaliou-se uma amostra da água de rejeito proveniente da caixa industrial em relação ao pH e condutividade, e a condutividade obtida foi de 1817 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Dessa forma, buscou-se dados na literatura de concentrado de osmose para essa faixa de condutividade, de forma a apresentar similaridade com a água da empresa. Optou-se por utilizar dados da literatura já que o processo de desmineralização da água utilizando osmose reversa como tratamento é muito utilizado nas indústrias, assim, de todos os valores encontrados, estimou-se um valor mediano entre duas referências. Os dados coletados foram especialmente em relação à íons, os valores estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Parâmetros da água de rejeito de osmose da literatura e o usado como estimativa.

Parâmetros	Literatura		Utilizado
	Referência ¹	Referência ²	
pH	7,1	7,5	7,3
Condutividade ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1800,0	1630,0	1715,0
Cálcio (ppm de CaCO_3)	40,0	120,0	64,0
Magnésio (ppm de CaCO_3)	-	-	16,0
Sódio (mg/L)	30,0	-	30,0
Ferro (mg/L)	-	0,1	0,1
Alcalinidade (ppm de CaCO_3)	81,0	51,0	66,0
Cloreto (mg/L)	15,0	0,4	7,7
Nitrato (mg/L)	1,0	-	1,0
Sílica (mg/L)	-	83,6	83,6

Fonte: Autor, 2023.

Notas: ¹ Mierzwa, 2002.

² Careta, 2017.

Após coleta dos dados, foi utilizada uma planilha eletrônica (Excel) do fabricante de resinas PUROLITE, de forma a averiguar se esta se encaixava nos dados estimados acima. As considerações de operação do processo foram

definidas para uma vazão de 10 m³/h e tempo de operação de 24h. Pela planilha, foi possível concluir que a resina suportava os parâmetros propostos e confirmou-se os dados dimensionais estimados com o engenheiro de utilidades da empresa, indicando assim a capacidade adequada das resinas para purificação da água de rejeito.

As resinas indicadas pela empresa PUROLITE foram a SSTC60H (resina catiônica fortemente ácida tipo II) e a PFA300 (resina aniônica fortemente básica), ambas tipo gel. Segundo a ficha técnica dessas resinas, seu processo de regeneração é feito por meio da utilização de soluções de HCl 5 a 10% para a resina catiônica e NaOH 4% para a aniônica. Dessa forma, estimou-se os parâmetros da água de lavagem utilizando como referência água potável na saída de água tratada do sistema de troca iônica. A Tabela 7 apresenta os valores permitidos dos parâmetros na água potável segundo a Portaria GM/MS N° 888 de 2021.

Tabela 7 - Parâmetros da água potável segundo PORTARIA GM/MS N°888/2021

Parâmetros	Valor máximo permitido
Sódio (mg/L)	200,0
Ferro (mg/L)	0,3
Cloreto (mg/L)	250,0
Nitrato (mg/L)	10,0
Dureza total (mg/L)	300,0
Sólidos dissolvidos totais (mg/L)	500,0
Sulfato (mg/L)	250,0

Fonte: BRASIL, 2021.

Assim, fazendo um balanço de entrada e saída utilizando os valores da Tabela 6 e 7, é possível obter como estimativa os parâmetros da água de limpeza das resinas apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Parâmetros estimados da água de limpeza das resinas.

Parâmetros	Utilizado
NaOH (mg/L)	40
HCl (mg/L)	100
Cálcio (ppm de CaCO ₃)	64,0
Magnésio (ppm de CaCO ₃)	16,0
Sódio (mg/L)	30,0
Ferro (mg/L)	0,1
Alcalinidade (ppm de CaCO ₃)	66,0
Cloreto (mg/L)	7,7
Nitrato (mg/L)	1,0
Sílica (mg/L)	83,6

Fonte: Autor, 2023.

Dessa forma, é possível fazer a destinação correta dessas águas de limpeza no tratamento de efluentes.

5.2 ESTUDO DO RESÍDUO DO TRATAMENTO PROPOSTO E SUA DESTINAÇÃO NO TRATAMENTO DE EFLUENTES DA EMPRESA

O tratamento de efluentes padrão, segundo a literatura, é dado pelas seguintes etapas: tratamento físico-químico por meio de peneiras, tanque de equalização, neutralização, coagulação e floculação, e decantação; tratamento biológico por meio de biorreator aeróbio e/ou lagoa de estabilização; e desinfecção. Se necessário, é feito um tratamento terciário, mas depende muito do tipo de indústria e do efluente gerado. Além disso, há as etapas de tratamento de lodo. Para a indústria trabalhada, os efluentes gerados possuem alta carga orgânica, assim é recomendado o tratamento biológico por aeração prolongada seguido de tratamento terciário com flotor. (LANGE, 2012; SANTOS, 2007; PASQUIM e SILVA, 2018)

O local mais indicado para o destino desse efluente é no tanque de equalização, uma vez que minimiza as cargas orgânicas, dilui substâncias inibidoras e estabiliza o pH, aumentando a eficiência do tratamento biológico e

químico. Além disso, também aumenta a eficiência do tratamento químico já que o efluente fica contínuo e homogêneo, reduzindo a quantidade de insumos químicos utilizados. Os resíduos possuem muitas cargas livres e devem ser neutralizados com adição de H_2SO_4 ou $NaOH$ a fim de obter um pH entre 6,0 e 9,0.

Também poderia ser adicionado na etapa de coagulação e floculação, uma vez que nela as partículas são precipitadas e sedimentadas por meio de adição de produtos químicos, como o sulfato de alumínio $Al_2(SO_4)_3$ ou cloreto férrico $FeCl_2$ e polímeros sintéticos, adequando o efluente para entrar no biorreator. A utilização de sulfato de alumínio é preferível por diminuir cloretos e cor, além do menor custo.

Verifica-se que essas etapas são indicadas para remoção de cor, turbidez, SST, SDI, bactérias e vírus.

O tratamento biológico depende de fatores físico-químicos do meio, sendo as seguintes faixas indicadas: temperatura de 20 a 30°C, pH de 6,0 a 8,0 e concentração de oxigênio dissolvido de 1 a 2 mg/L. Além de concentração ideal de macronutrientes (nitrogênio, fósforo, enxofre e potássio) e micronutrientes (níquel, cobalto, molibdênio, ferro e selênio), uma vez que são essenciais, porém em baixas concentrações já que valores elevados podem inibir o processo. O sulfato pode ser tóxico para as archaea metanogênicas por se reduzir a sulfeto. Concentrações de 5 mg/L de zinco e entre 1 e 3 mg/L de chumbo, cobre, níquel e cromo influenciam negativamente nos processos aeróbicos, assim como cloro em concentrações acima de 0,2 mg/L. A presença excessiva de sais, mesmo que inertes, como o cloreto de sódio, pode retardar ou inviabilizar os processos biológicos por efeito osmótico.

Pelos valores estimados do efluente, constata-se que o mesmo pode ser tratado, mas deveria ser feita uma análise dos parâmetros reais do efluente e um estudo de bancada utilizando esses tratamentos para verificar se não causaria nenhum dano ao processo biológico. Em resumo, é recomendado a inserção dos efluentes de regeneração de resinas nas etapas de equalização e de coagulação, uma vez que podem influenciar nos processos biológicos, nessas etapas eles podem ser tratados de forma a amenizar os riscos e até serem retirados do processo.

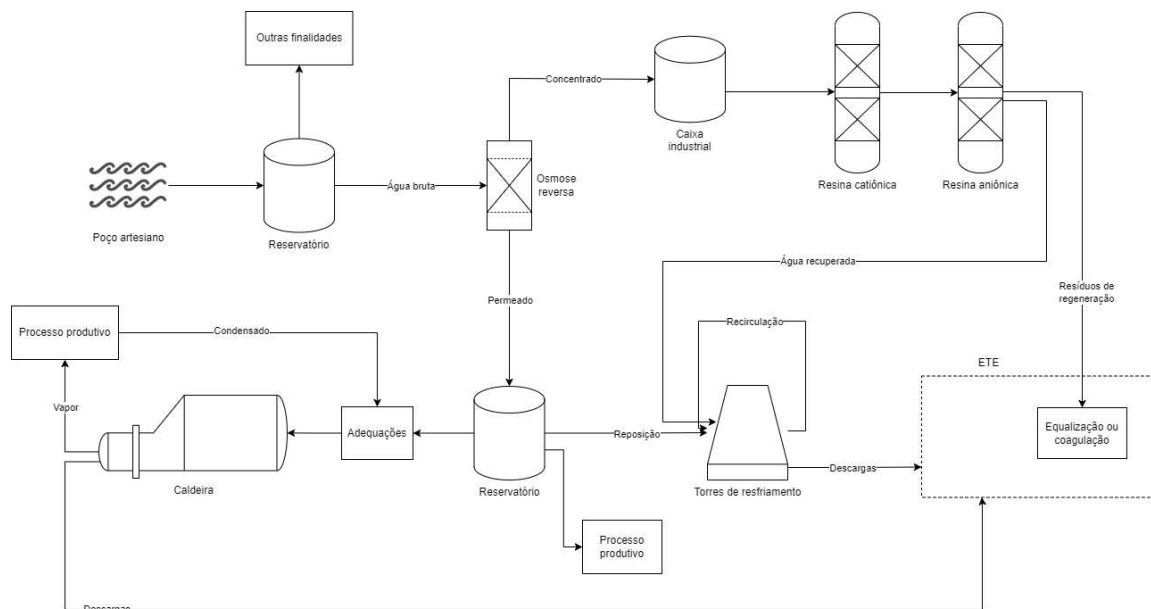
5.3 RESUMO DO MODELO PROPOSTO

Diante do exposto, é proposto o reuso da água residuária de osmose reversa nas torres de resfriamento por meio de tratamento com resinas catiônica e aniônica. Sendo que o efluente do processo de lavagem na regeneração das resinas deve ser destinado à etapa de equalização ou coagulação no tratamento de efluentes.

O processo de reuso acarreta na diminuição do inventário de água residuária em 10%, tratando-se 10 m³/h, desafogando o tanque da caixa industrial. Além disso, há a diminuição de captação de água uma vez que parte das torres de resfriamento será alimentada com a água de reuso, diminuindo a quantidade de água a ser tratada.

O modelo proposto é representado na Figura 25 (Apêndice B), de forma a recuperar a água da caixa industrial por meio do tratamento em resinas de troca iônica para poder ser reaproveitada na reposição das torres de resfriamento.

Figura 25 - Proposta de recuperação da água.



Fonte: Autor, 2023.

6 CONCLUSÃO

Em decorrência da crescente crise hídrica e da alta vazão de água utilizada no setor de utilidades das indústrias, propôs-se um sistema de reutilização do efluente para mitigar o consumo e captação do fluido, evitando desperdício de água. Foram analisados os parâmetros físico-químicos do efluente provindo do concentrado da osmose reversa.

Foi feito um estudo sobre a possibilidade de reuso de água de rejeito na área de utilidades, provindas das osmose reversas, por meio de tratamento em resinas de troca iônica para ser reutilizada nas torres de resfriamento. Ao verificar que a amostra da água de rejeito possui uma condutividade de cerca de 1817 $\mu\text{S}/\text{cm}$, buscou-se dados na literatura que se enquadrassem nessa característica para esse tipo de água. Esses dados foram inseridos numa planilha de cálculo de dimensionamento de sistema de desmineralização da empresa PUROLITE, de forma a averiguar se esta se encaixava nos dados estimados. As considerações de operação do processo foram definidas para uma vazão de 10 m^3/h e tempo de operação de 24h.

Pela planilha, foi possível concluir que a resina suportava os parâmetros propostos e confirmou-se os dados dimensionais estimados com o engenheiro de utilidades da empresa, indicando assim a capacidade adequada das resinas para purificação da água de rejeito.

De acordo com as resinas indicadas, identificou-se que o processo de regeneração é feito por meio da utilização de soluções de HCl 5 a 10% para a resina catiônica e NaOH 4% para a aniônica. Dessa forma, estimou-se os parâmetros da água de lavagem utilizando como referência água potável (segundo Portaria GM/MS Nº 888 de 2021) na saída de água tratada do sistema de troca iônica. Pelos valores estimados, constata-se que o mesmo pode ser tratado, mas deveria ser feita uma análise dos parâmetros reais do efluente e um estudo de bancada utilizando esses tratamentos para verificar se não causaria nenhum dano ao processo biológico.

Segundo o tratamento de efluentes padrão, indicado na literatura, pode-se concluir que o local mais indicado para o destino do efluente de regeneração é o tanque de equalização, uma vez que minimiza as cargas orgânicas, dilui substâncias inibidoras e estabiliza o pH, aumentando a eficiência do tratamento

biológico e químico. Além disso, também aumenta a eficiência do tratamento químico já que o efluente fica contínuo e homogêneo, reduzindo a quantidade de insumos químicos utilizados.

Também poderia ser adicionado na etapa de coagulação e floculação, uma vez que nela as partículas são precipitadas e sedimentadas por meio de adição de produtos químicos, como o sulfato de alumínio $Al_2(SO_4)_3$ ou cloreto férrico $FeCl_2$ e polímeros sintéticos, adequando o efluente para entrar no biorreator.

Em resumo, é recomendado a inserção dos efluentes de regeneração de resinas nas etapas de equalização e de coagulação, uma vez que podem influenciar nos processos biológicos, nessas etapas eles podem ser tratados de forma a amenizar os riscos e até serem retirados do processo.

Diante do exposto, o processo de reuso acarreta na diminuição do inventário de água residuária em 10%, tratando-se 10 m³/h, desafogando o tanque da caixa industrial. Além disso, há a diminuição de captação de água uma vez que parte das torres de resfriamento será alimentada com a água de reuso, diminuindo a quantidade de água a ser tratada.

Portanto, conclui-se que a proposta de implementação do reuso de água por tratamento em resinas iônicas é uma alternativa atraente, por reduzir o consumo de água e aumentar a capacidade da indústria, tornando-a mais circular e sustentável.

7 RECOMENDAÇÕES

Algumas outras propostas para o reuso da água de rejeito das osmoses podem ser consideradas em trabalhos futuros, como a utilização em linhas de incêndio, diluição para inserção na estação de tratamento de efluentes e inserção de outro tanque.

Também sugere-se que a água de lavagem das resinas possa ser incinerada ou inserir uma etapa de tratamento antes de ser encaminhada para ETE.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRÃO, A. **Operações de troca iônica**. [s.l.]: Ipen - Instituto De Pesquisas Energéticas E Nucleares - CNEN/SP, São Paulo, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 9.251**: Água – Determinação do pH – Método eletrométrico. 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 14.340**: Água – Determinação da condutividade e da resistividade elétrica. 1999.

ALVES, S. S. **Conservação e reuso de água em indústria de cosméticos**: estudo de caso da Natura Cosméticos. 2009. 130 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestre em Engenharia, Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009. Disponível em: [https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3147/tde-05082009-115605/publico/Dissertacao PHD Sebastiao Sampaio Alves 15JUN2009.pdf](https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3147/tde-05082009-115605/publico/Dissertacao%20PHD%20Sebastiao%20Sampaio%20Alves%2015JUN2009.pdf). Acesso em: 10 mar. 2023.

ANDRADE, B. de A. S. de. **Reuso de efluentes industriais gerados durante a produção de água purificada na Central de Tratamento de Água do Centro Tecnológico de Vacinas de BioManguinhos/FIOCRUZ**. 2014. 74 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Gestão, Pesquisa e Desenvolvimento na Indústria Farmacêutica, Instituto de Tecnologia em Fármacos (Farmanguinhos), Fundação Oswaldo Cruz (Fiocruz), Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <https://www.arca.fiocruz.br/handle/icict/11626>. Acesso em: 11 de mar. de 2023.

BARROS, M. A. **Remoção de íons Cr⁶⁺ e Fe³⁺ utilizando resinas de troca iônica**. 2016. 183 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Programa de Pós-graduação em Pesquisa e Desenvolvimento de Processos Químicos, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/21410/1/REMO%C3%87%C3>

[%83O%20DE%20%C3%8DONS%20Cr6%2B%20E%20Fe3%2B%20UTILIZANDO%20RESINAS%20DE%20TROCA%20I%C3%94NICA.pdf](#)>. Acesso em: 21 out. 2023.

BERNARDI, C. C. **Reuso de água para irrigação**. 2003. 52 f. Monografia (Especialização) - Pós-Graduação em nível de especialização *Lato Sensu*, modalidade MBA, em Gestão Sustentável da Agricultura Irrigada, Instituto Superior de Administração e Economia (ISAE), Fundação Getúlio Vargas, Brasília, 2003. Disponível em: <<https://docplayer.com.br/660947-Reuso-de-agua-para-irrigacao-cristina-costa-bernardi.html>>. Acesso em: 12 de mar. de 2023.

BRASIL. Agência Nacional de Águas (ANA). **GEO Brasil recursos hídricos**: componente da série de relatórios sobre o estado e perspectivas do meio ambiente no Brasil. 2 ed. Brasília: MMA, ANA, PNUMA, 2007. 264 p.

BRASIL. **Lei Federal N° 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. 1° da Lei 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei n° 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 09 janeiro 1997, p. 470.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria GM/MS N° 888, de 4 de maio de 2021**. Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS n° 5, de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Diário Oficial da União (DOU), Brasília, DF, 07 maio 2021.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA N° 20, de 18 de junho de 1986**. Classifica as águas doces, salobras e salinas do Território Nacional. Diário Oficial da União (DOU), Brasília, DF, 30 julho 1986.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Resolução CNRH N° 54, de 28 de novembro de 2005**. Estabelece modalidades, diretrizes e critérios gerais

para a prática de reúso direto não potável e dá outras providências. Diário Oficial da União (DOU), Brasília, DF, 09 março 2006.

BUNGE. Uso da tecnologia de filtração por osmose reversa para reúso de efluentes em indústria alimentícia: Unidade Bunge Jaguaré. In: 11ª Edição do Prêmio FIESP de Conservação e Reuso de Água, 2015, Jaguaré. Roteiro II para Média/Grande Empresa. **FIESP**. Jaguaré: Bunge, 2015.

CARETA, L. C. O. **Recuperação de água residual por osmose reversa para reposição em sistemas de trocadores de calor**. 2017. 82 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado Profissional em Engenharia Química, Universidade de Uberaba (UNIUBE). Uberaba, 2017. Disponível em: <<https://repositorio.uniube.br/handle/123456789/478>>. Acesso em: 12 de mar. de 2023.

CARETA, L. C. O. *et al.* Recuperação de água residual por osmose reversa para reposição em sistema de trocadores de calor. In: III Encontro de desenvolvimento de processos agroindustriais, 2019, Uberaba. **III EDEPA**. Uberaba, 2019. Disponível em: <<https://repositorio.uniube.br/handle/123456789/1130>>. Acesso em: 12 de mar. de 2023.

CASANI, S.; ROUHANY, M.; KNØCHEL, S. A discussion paper on challenges and limitations to water reuse and hygiene in the food industry. **Water Research**, [S.L.], v. 39, n. 6, p. 1134-1146, mar. 2005. Elsevier BV. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2004.12.015>>. Acesso em: 13 de mar. de 2023.

CISILOTTO, B. **Utilização de resina de troca iônica pré-fermentativa para elaborar vinhos base de espumantes**. 2017. 128 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Mestrado Profissionalizante em Biotecnologia e Gestão Vitivinícola, Programa de Pós-graduação em Biotecnologia e Gestão Vitivinícola, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2017. Disponível em: <<https://repositorio.ucs.br/xmlui/handle/11338/3023>>. Acesso em: 20 out. 2023.

CUNHA, O. A. A. da. Membranas de ultrafiltração, osmose reversa, resinas de troca iônica para tratamento de água de usos nas indústrias cosméticas e farmacêuticas. In: **Workshop RDC 48**, 2015. Disponível em: <https://www.crq4.org.br/sms/files/file/workshop_rdc_48_osmar_cunha_dow.pdf>. Acesso em: 19 out. 2023.

DBRUM, L. F. W.; SANTOS JÚNIOR, L. C. O.; BENEDETTI, S. Reaproveitamento de Água de Processo e Resíduos da Indústria de Laticínios. In: 2nd International Workshop: Advances In Cleaner Production, 2, 2009, São Paulo. **2nd IWACP**. São Paulo: UNIP, 2009. v. 1. p. 1-9. Disponível em: <<http://www.advancesincleanerproduction.net/second/files/sessoes/4a/5/L.%20F.%20W.%20Brum%20-%20Resumo%20Exp.pdf>>. Acesso em: 13 de mar. de 2023.

DYNA, L. S.; RODRIGUES, E. I. S; BARBOSA, A. S. Desenvolvimento de equipamento e técnica de separação e regeneração de resinas de troca iônica. In: **Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte e Nordeste de Educação Tecnológica** - CONNEPI, V, 2010. Disponível em: <<http://congressos.ifal.edu.br/index.php/connepi/CONNEPI2010/paper/viewFile/120/137>>. Acesso em: 19 out. 2023.

EPA – United States Environmental Protection Agency. **Guidelines for Water Reuse**. WASH Technical Report n° 81. Washington: U.S. Environmental Protection Agency, EPA/625/R-92/004, sep. 1992.

FAO. **The State of Food and Agriculture 2020**. Overcoming water challenges in agriculture. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2020. 210 p. Disponível em: <<https://doi.org/10.4060/cb1447en>>. Acesso em: 15 de mar. de 2023.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. AQUASTAT database. FAO, 2010.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. AQUASTAT database. FAO, 2018.

FARIA, P. G. S. de *et al.* Reaproveitamento do concentrado gerado por sistema de tratamento de água por osmose reversa em uma clínica de hemodiálise. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, [S.L.], v. 21, n. 2, p. 329-336, jun. 2016. FapUNIFESP (SciELO). Trimestral. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522016122029>>. Acesso em: 15 de mar. de 2023.

FLYNN, D. J. **The Nalco Water Handbook**. 3 ed. Nova York: McGraw Hill, 2009.

GIORDANO, G. **Tratamento e controle de efluentes industriais**. Mato Grosso: s. n., 2004. Disponível em: <<http://metalcleanaguas.com.br/pdf/tratamento-controle-efluentes-industriais.pdf>>. Acesso em: 24 out. 2023.

GONZALEZ, R. K. **Influência do processo de internacionalização na capacidade tecnológica**: o caso da Cia. Iguaçu de Café Solúvel. 2010. 214 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Administração, Setor de Ciências Sociais Aplicadas, Centro de Pesquisa e Pós-Graduação em Administração, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010. Disponível em: <http://tot.dti.ufv.br/bitstream/handle/123456789/8729/Dissertacao_Rafael%20Kuramoto%20Gonzalez.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 12 de mai. de 2023.

GUIMARÃES, D. **Tratamento de efluentes ricos em sulfato por adsorção em resinas de troca iônica**. 2010. 149 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia de Materiais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da REDEMAT, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010. Disponível em: <<https://repositorio.ucs.br/xmlui/handle/11338/3023>>. Acesso em: 21 out. 2023.

HESPANHOL, I. Potencial de Reuso de Água no Brasil Agricultura, Indústria, Municípios, Recarga de Aquíferos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [S.L.], v. 7, n. 4, p. 75-95, 2002. FapUNIFESP (SciELO). Trimestral. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v7n4.p75-95>>. Acesso em: 16 de mar. de 2023.

HESPANHOL, I.; GONÇALVES, O. M. **Conservação e Reúso de água**: Manual de Orientações para o Setor Industrial. [S.L.]: FIESP, ANA, v. 1, 2004. 93 p. Disponível em: <<http://www.fiesp.com.br/indices-pesquisas-e-publicacoes/conservacao-e-reuso-da-agua-2004>> Acesso em: 16 de mar. de 2023.

JUNIOR, D. A. A. **Tratamento de águas residuais de indústrias de bebidas utilizando tratamento convencional e processos de separação com membranas**. 2015. 80 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia de Alimentos, Departamento De Ciências Agrárias, Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, Erechim, 2015. Disponível em: <https://www.uricer.edu.br/cursos/arg_trabalhos_usuario/2704.pdf>. Acesso em: 22 out. 2023.

KARVAT, M. **Utilização de resinas de troca iônica para remoção de nitrato em águas para abastecimento público**. 2017. 155 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-Graduação em Meio Ambiente Urbano e Industrial, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017. Disponível em: <<https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/54833>>. Acesso em: 16 out. 2023.

KAUTZMANN, R. M. **Avaliação de resinas de troca iônica para emprego na hidrometalurgia de minérios auríferos**. 1999. 148 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais, Departamento de Metalurgia, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/122656>>. Acesso em: 16 out. 2023.

KUCERA, J. **Reverse Osmosis**: Design, Processes, and Applications for Engineers. 2. ed. Beverly, MA: Scrivener Publishing, 2015.

LANGE, C. R. **Sistemas de tratamento de efluentes líquidos**. Indaial: Uniasselvi, 2012. Disponível em: <<https://www.uniasselvi.com.br/extranet/layout/request/trilha/materiais/livro/livro.php?codigo=7157>>. Acesso em: 27 out. 2023.

LEVINDO, A. S.; SILVA, G. M. da; MARINHO, P. H. O. **Aplicação de resina de troca catiônica em um reator de leito fluidificado afim de remover dureza total de água de abastecimento**. 2016. 43 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal De Goiás, Goiânia, 2016. Disponível em: <https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/140/o/APLICA%C3%87%C3%83O_DE_RESINA_DE_TROCA_CATI%C3%94NICA_EM_UM_REATOR_DE_LEITO_FLUIDIFICADO_AFIM_DE_REMOVER_DUREZA_TOTAL_DE_%C3%81GUA_DE_ABASTECIMENTO.pdf>. Acesso em: 18 out. 2023.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de Qualidade e Tratamento de Água**. Campinas, SP: Editora Átomo, 2010.

LINCK, B. F. **Propostas de aprimoramento do projeto e operação do balão de vapor da caldeira aquatubular de uma cooperativa agroindustrial**. 2022. 68 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Londrina, 2022. Disponível em: <<https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/31099/1/balaovaporcaldeiraaquatubular.pdf>>. Acesso em: 25 de mai. de 2023.

MARQUES, A. F. **Pós-tratamento por membranas da água residuária do processo de tingimento de indústria têxtil com vistas ao reúso**. 2017. 143 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-07112017-104703/pt-br.php>>. Acesso em: 07 de jun. de 2023.

MERGULHÃO, A. D. Os fluxos, as relações e os agentes envolvidos na produção e comercialização do café produzido atualmente no Brasil. **Revista da ANPEGE**, [S. l.], v. 13, n. 22, p. 57–85, 2017. DOI: 10.5418/RA2017.1322.0003. Disponível em: <<https://ojs.ufgd.edu.br/index.php/anpege/article/view/6939>>. Acesso em: 8 de mai. de 2023.

METCALF & EDDY, Inc. **Wastewater Engineering**: Treatment and reuse. Boston: McGraw-Hill, 2003.

MORALES, E. V. **Influência do fator de extração do café torrado e granulado e injeção de gás na formação de espuma no café solúvel tipo spray drier**. 2014. 68 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Mestrado Profissionalizante em Tecnologia de Alimentos, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2014. Disponível em: <http://riut.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/1062/1/LD_PPGTAL_M_Morales%2c%20Eduardo%20Vicentin.pdf>. Acesso em: 11 de mai. de 2023.

MOTTA, M. B. **Estudo de caso do reuso de água como uma alternativa à escassez hídrica em uma indústria petroquímica**. 2021. 95 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Departamento de Engenharia Química e de Petróleo, Escola de Engenharia, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2021. Disponível em: <<https://app.uff.br/riuff/handle/1/24609>>. Acesso em: 06 de jun. de 2023.

NASCIMENTO, J. F. **Avaliação de membranas de osmose inversa no tratamento de águas de purga de torres de refrigeração de indústria petrolífera com finalidade de reuso**. 2004. 115 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Química, Instituto de Química, Centro de Estudos Gerais, Universidade Federal Fluminense. Niterói, 2004. Disponível em: <<https://www.livrosgratis.com.br/ler-livro-online-12828/avaliacao-de-membranas-de-osmose-inversa-no-tratamento-de-aguas-de-purga-de-torres-de-refrigeracao-de-industria-petrolifera-com-finalidade-de-reuso>>. Acesso em: 17 de mar. de 2023.

OENNING JUNIOR, A.; PAWLOWSKY, U. Avaliação de tecnologias avançadas para o reuso de água em indústria metal-mecânica. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, [S.L.], v. 12, n. 3, p. 305-316, set. 2007. FapUNIFESP (SciELO). Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522007000300010>>. Acesso em: 07 de jun. de 2023.

OLIVEIRA, B. de. **Proposta de implementação de sistema de manutenção centrada em confiabilidade em nova fábrica de café solúvel**.

2021. 45 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2021. Disponível em: <<http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/27157/1/propostaimplementacaoaosistemamanutencao.pdf>>. Acesso em: 13 de mai. de 2023.

ORDÓÑEZ, R. *et al.* Evaluation of MF and UF as pretreatments prior to RO applied to reclaim municipal wastewater for freshwater substitution in a paper mill: a practical experience. **Chemical Engineering Journal**, [S.L.], v. 166, n. 1, p. 88-98, jan. 2011. Elsevier BV. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2010.10.016>>. Acesso em: 08 de jun. de 2023.

PICCOLI, A. de S. *et al.* A Educação Ambiental como estratégia de mobilização social para o enfrentamento da escassez de água. **Ciência & Saúde Coletiva**, [S.L.], v. 21, n. 3, p. 797-808, mar. 2016. FapUNIFESP (SciELO). Mensal. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/1413-81232015213.26852015>>. Acesso em: 18 de mar. de 2023.

PORTO, E. R. *et al.* Aproveitamento dos rejeitos da dessalinização. In: Simpósio Sobre Captação De Água De Chuva No Semi-Árido Brasileiro, 1., 1997, Petrolina. **SBCMAC**. Petrolina: Embrapa-CPATSA/IRPAA/IRCSA, 1999. p. 51-57. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/196041/1/Aproveitamento-dos-Rejeitos-da-Dessalinizacao.pdf>>. Acesso em: 18 de mar. de 2023.

PUROLITE. Dimensionamento de desmineralizador. Documento interno. Planilha eletrônica. 2023.

RIANI, J. C. **Utilização de resinas de troca iônica em efluentes de galvanoplastia**. 2008. 121 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3133/tde-30092008-151250/publico/Josiane_Costa_Riani.pdf>. Acesso em: 20 out. 2023.

SAMPAIO, F. S. **Torre de resfriamento**: modelagem, simulação e testes experimentais para apoio ao ensino de engenharia mecânica. 2013. 157 f.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2013. Disponível em: <<https://bdm.unb.br/handle/10483/6042>>. Acesso em: 19 de mar. de 2023.

SANTOS, A. B. dos. **Avaliação Técnica De Sistemas De Tratamento De Esgotos**. Fortaleza: Banco do Nordeste do Brasil, 2007.

SANTOS, N. O. dos *et al.* Pré-tratamento de água de torre de resfriamento visando reúso. **Engenharia Ambiental e Sanitária: Interfaces do Conhecimento** 2, [S.L.], v. 2, n. 1, p. 105-117, out. 2019. Ponta Grossa: Atena Editora, 2019. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.22533/at.ed.9421909109>>. Acesso em: 06 de jun. de 2023.

SCAPINI, L. **Avaliação do desempenho da osmose reversa e da troca iônica para tratamento de efluente de curtume (Aimoré Couros LTDA - Encantado) visando a reutilização da água**. 2007. 76 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Programa de Pós-Graduação Sistemas e Processos Industriais, Área de Concentração em Instrumentação, Sistemas de Medição e Tratamento de Dados, Universidade de Santa Cruz do Sul, Santa Cruz do Sul, 2007. Disponível em: <<http://repositorio.unisc.br:8080/jspui/bitstream/11624/431/1/LucianaScapini.pdf>>. Acesso em: 24 out. 2023.

SCHNEIDER, R. P.; TSUTIYA, M. T. **Membranas Filtrantes para o Tratamento de Água, Esgoto e Água de Reúso**. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, São Paulo, 2001.

SEADER, J. D.; HENLEY, E. J.; ROPER, D. K. **Separation Process Principles: Chemical and Biochemical Operations**. 3 ed. Hoboken, Nj: John Wiley & Sons, Inc., 2010.

SILVA, A. M. M. *et al.* Revisão/atualização em diálise: água para hemodiálise. **Jornal Brasileiro de Nefrologia**, v. 18, n. 2, p. 180-188, 1996.

SILVA, J. F. do A.; PEREIRA, R. G. Panorama global da distribuição e uso de água doce. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, [S.L.],

v. 10, n. 3, p. 263-280, jul. 2019. Companhia Brasileira de Produção Científica. Mensal. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.6008/cbpc2179-6858.2019.003.0023>>. Acesso em: 19 de mar. de 2023.

SILVA, M. I. de A.; PASQUIM, T. B. S. **Acoffee**: indústria de café solúvel. 2018. 190 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Apucarana, 2018. Disponível em: <http://riut.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/5481/1/AP_COENQ_2018_2_02.pdf>. Acesso em: 11 de mai. de 2023.

SILVA, P. B. da; TEIXEIRA, E. P. Reuso da água do rejeito de um tratamento de osmose reversa de uma unidade de hemodiálise hospitalar: estudo de caso. **Revista Brasileira De Inovação Tecnológica Em Saúde**, [S.L.], v. 4, n. 4, p. 42–51, out. 2011. Disponível em: <<https://periodicos.ufrn.br/reb/article/view/1496>>. Acesso em: 20 de mar. de 2023.

TADINI, C. C. *et al.* **Operações Unitárias na Indústria de Alimentos - Vol. 2**. Grupo GEN, 2016.

TAVARES, J. M.; ARAÚJO, W. J. S. Consumo e escassez de água potável em Salvador-Bahia. **Brazilian Journal Of Development**, [S.L.], v. 6, n. 9, p. 70909-70925, set. 2020. Brazilian Journal of Development. Mensal. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.34117/bjdv6n9-513>>. Acesso em: 21 de mar. de 2023.

TAKANO, A. L. R. *et al.* Cadeia Produtiva e Mercado Cafeeiro no Brasil: desafios e potencialidades. **Revista Economia Ensaios**, [S.L.], v. 36, n. 1, p. 128-145, dez. 2020. EDUFU - Editora da Universidade Federal de Uberlândia. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.14393/ree-v36n1a2021-52819>>. Acesso em: 13 de mai. de 2023.

TROVATI, J. **Tratamento de água de resfriamento**. Curso On-line – Tratamento de Água (Sistemas de Resfriamento). Araraquara, SP: Tratamento de Água, 2004. Disponível em:

<https://www.snatural.com.br/PDF_arquivos/Torre-Caldeira-Tratamento-Agua.pdf>. Acesso em: 26 de mar. de 2023.

UNDESA. United Nations Department of Economic and Social Affairs, Population Division. **World Population Prospects: The 2017 Revision, Key Findings and Advanced Tables**. New York: UNDESA, 2017.

UNESCO. United Nations Educational Scientific And Cultural Organization. **The United Nations World Water Development Report 2023: partnerships and cooperation for water**. Paris: UNESCO, 2023. Disponível em: <<https://digitallibrary.un.org/record/4007797?ln=en>>. Acesso em: 25 de mar. de 2023.

VALENTE, J. P. S.; PADILHA, P. M.; SILVA, A. M. M. Oxigênio dissolvido (OD), demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e demanda química de oxigênio (DQO) como parâmetros de poluição no ribeirão Lavapés/Botucatu - SP. **Eclética Química**, [S.L.], v. 22, p. 49-66, jan. 1997. FapUNIFESP (SciELO). Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/s0100-46701997000100005>>. Acesso em: 29 de mar. de 2023.

VIANA, S. T. **Análise de viabilidade técnica para a recuperação de água em torre de resfriamento**. 2010. 113 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestre em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/94569/289241.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 22 de mar. de 2023.

VIEIRA, F. C. **Viabilidade Técnica e Econômica do Reaproveitamento de Efluentes de Torres de Resfriamento**. 2011. 47 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Escola De Engenharia, Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul, Porto Alegre, 2011. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/38411>>. Acesso em: 23 de mar. de 2023.

VON SPERLING, M. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias**: introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. v. 1. 4 ed. Editora UFMG, 2014, 472 p.

WANG, Z. *et al.* Study of integrated membrane systems for the treatment of wastewater from cooling towers. **Desalination**, [S.L.], v. 191, n. 1-3, p. 117-124, mai. 2006. Elsevier BV. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2005.04.125>>. Acesso em: 05 de jun. de 2023.

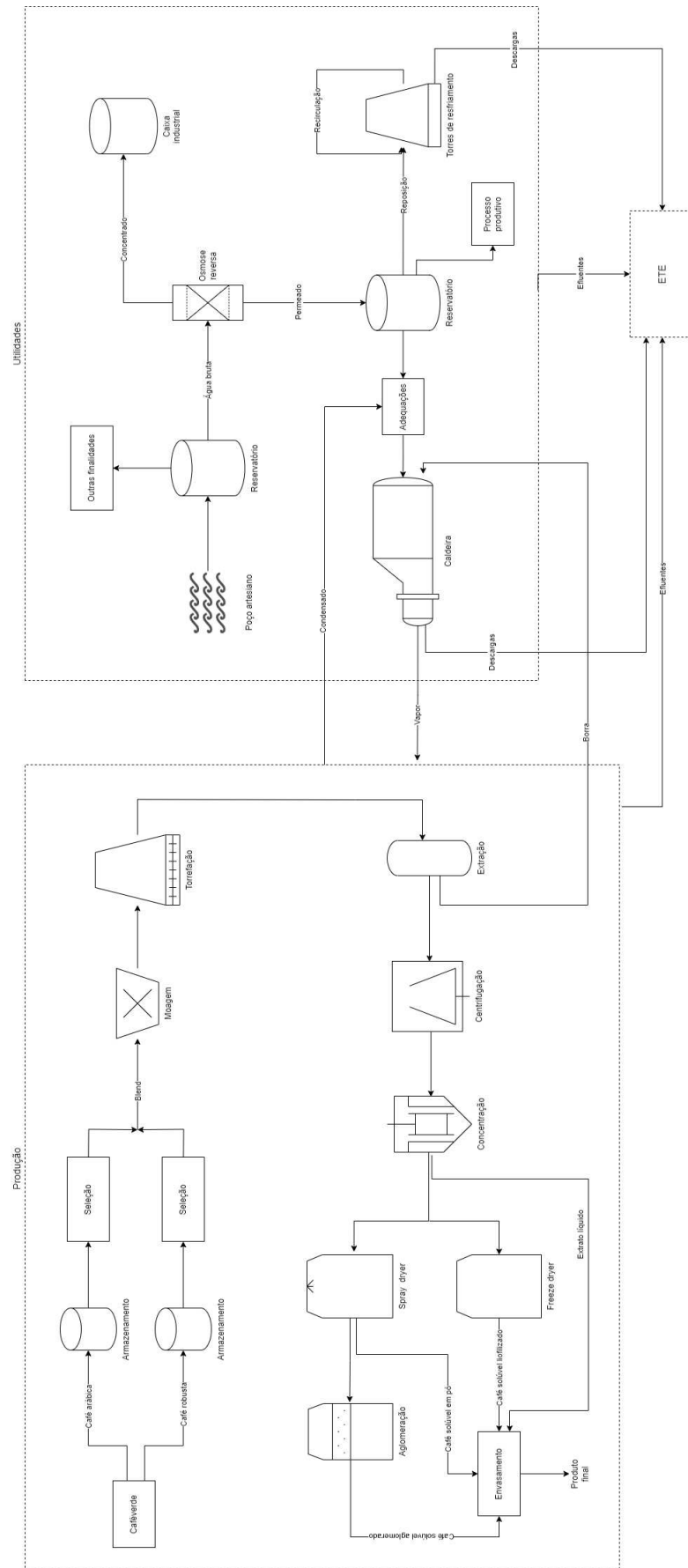
WHO - WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Reuse of effluents**: methods of wastewater treatment and health safeguards. Geneva: WHO, 1973 (Technical Report Series n° 517). Disponível em: <<https://apps.who.int/iris/handle/10665/41032>>. Acesso em: 23 de mar. de 2023.

WWAP. United Nations World Water Assessment Programme. **The United Nations World Water Development Report 4**: Managing Water under Uncertainty and Risk. v. 1. Paris: UNESCO, 2012.

WWAP. United Nations World Water Assessment Programme. **The United Nations World Water Development Report 2014**: Water and Energy. v. 1. Paris: UNESCO, 2014.

WWAP. United Nations World Water Assessment Programme. **The United Nations World Water Development Report 2015**: Water for a sustainable world. 122 p. Paris: UNESCO, 2015. Disponível em: <<http://unesdoc.unesco.org/images/0023/002318/231823E.pdf>>. Acesso em: 25 de mar. de 2023.

APÊNDICE A – FLUXOGRAMA DE PRODUÇÃO DA EMPRESA



APÊNDICE B – PROPOSTA DE RECUPERAÇÃO DE ÁGUA

