

# Gestão de Água

em Complexo de Geração  
Termelétrica

Desenvolvido por:



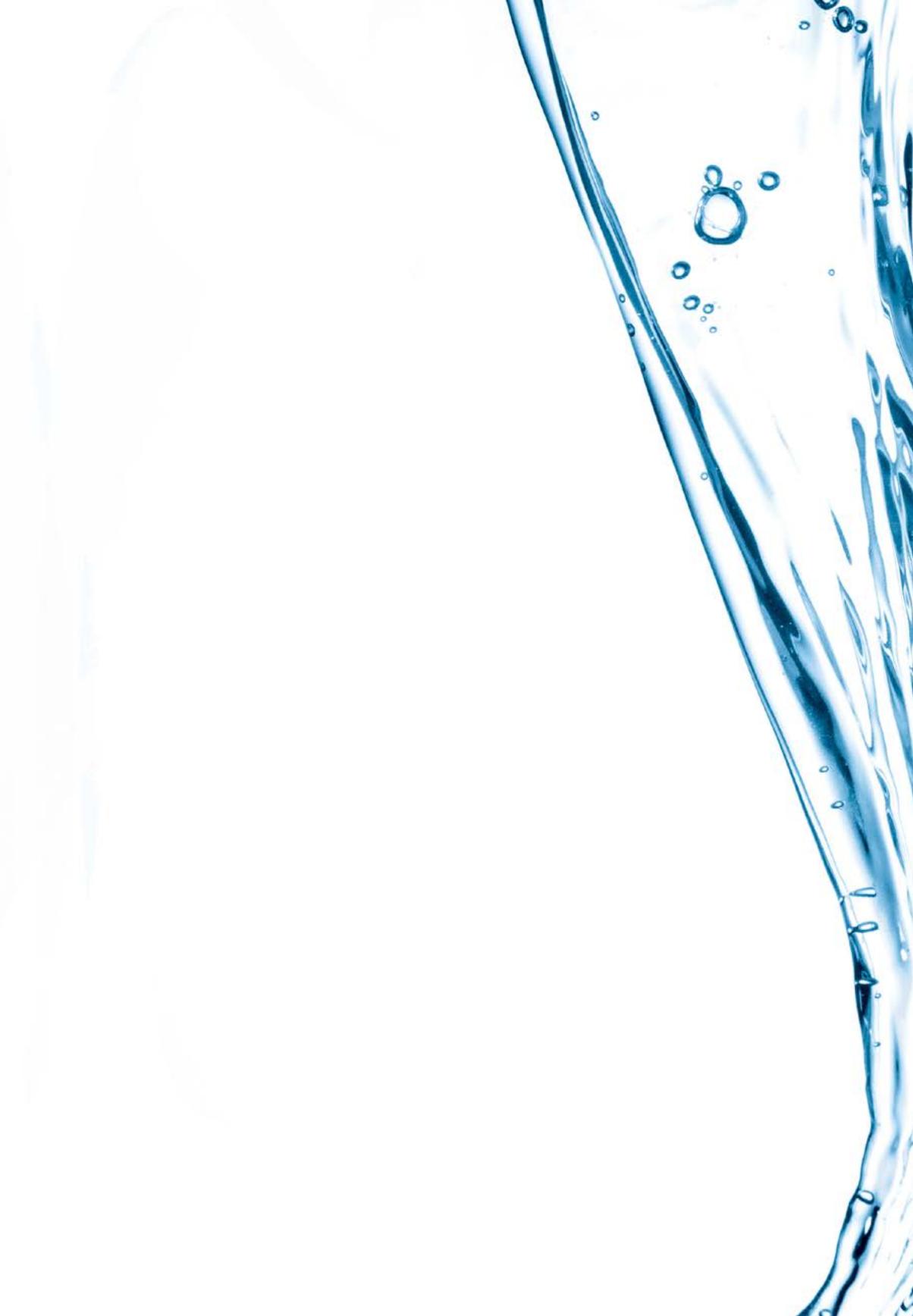


# Gestão de Água

em Complexo de Geração  
Termelétrica

Desenvolvido por





A large, dynamic splash of blue water on the left side of the cover, with droplets and ripples, creating a sense of movement and freshness.

# Gestão de Água

## em Complexo de Geração Termelétrica

### **Organizadores**

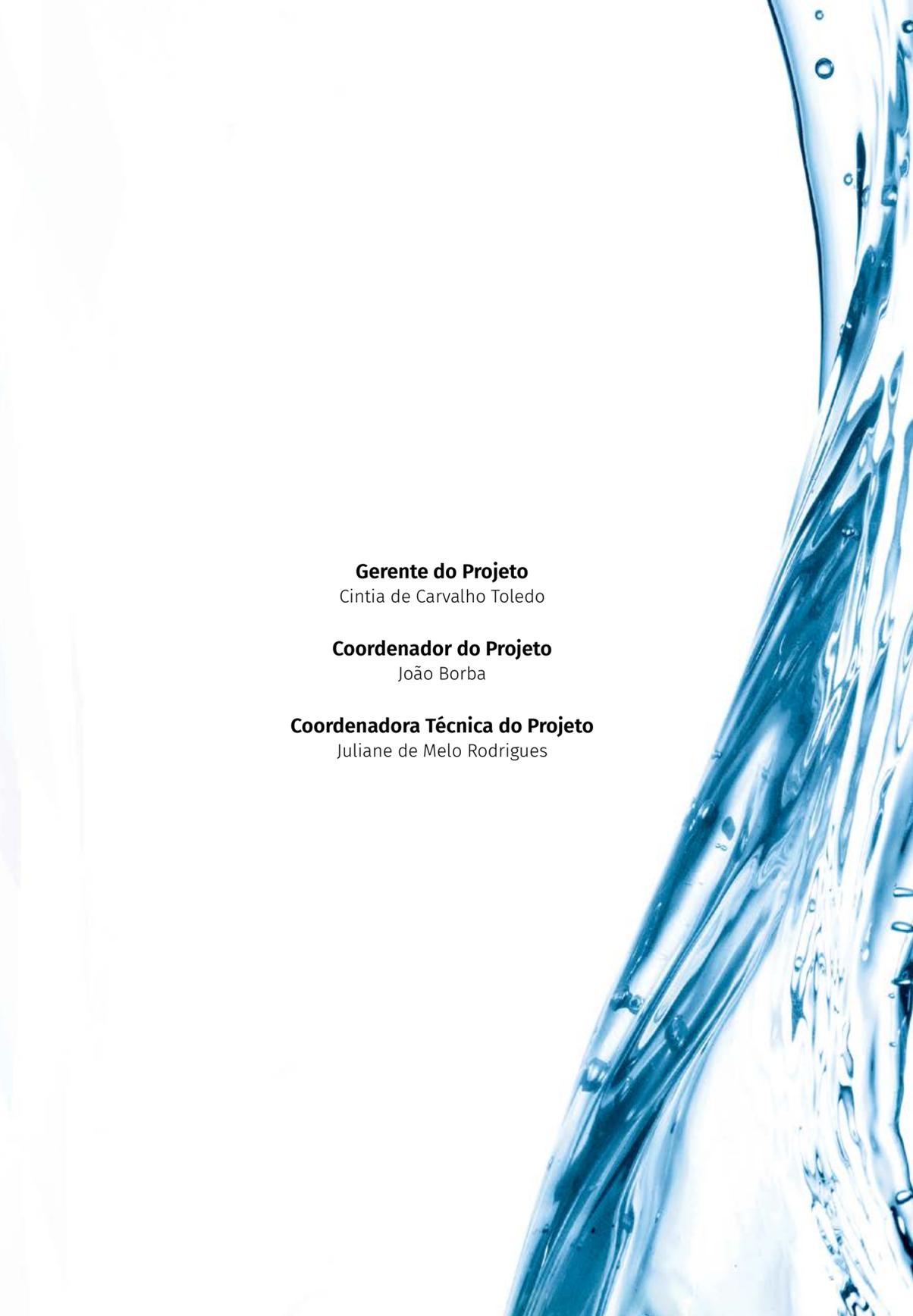
Juliane de Melo Rodrigues

João Borba

Cintia de Carvalho Toledo

1ª edição | Curitiba | 2020





**Gerente do Projeto**

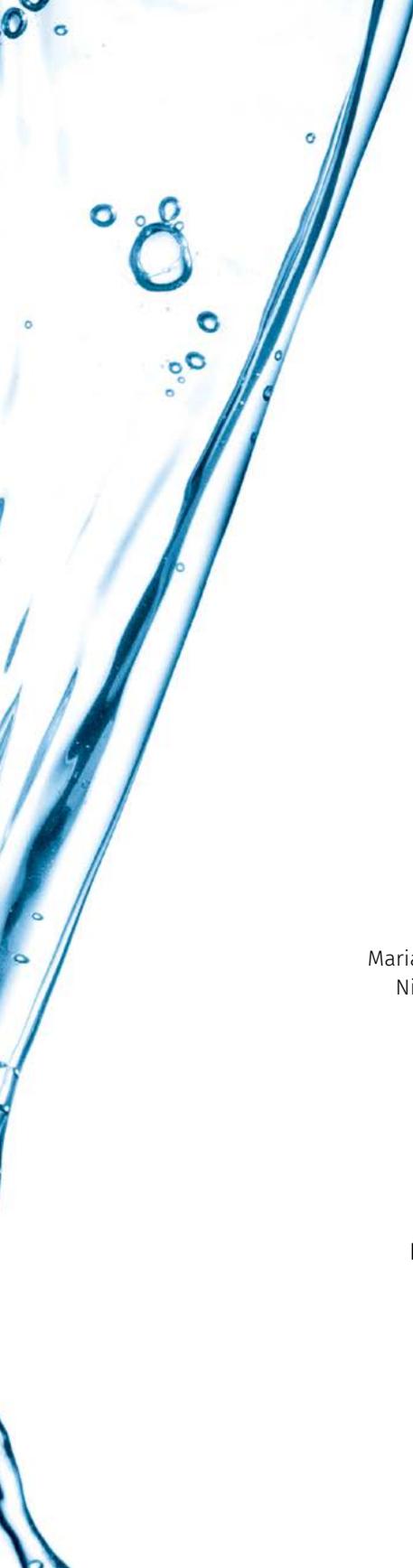
Cintia de Carvalho Toledo

**Coordenador do Projeto**

João Borba

**Coordenadora Técnica do Projeto**

Juliane de Melo Rodrigues



## **Pesquisadores Lactec**

Alcides Conte Neto  
Alika Solange Ferraro Pires  
Aline Souza Salum  
Alline da Silva Elias Batista  
Ana Carolina Canossa Becker  
Ana Carolina Wosiack  
Camila Marçal Gobi Pacher  
Camila Melo Pesqueira  
Carlos Giuseppe Filippin  
Daniel Henrique Marco Detzel  
Eduarda Bertoletti Duarte  
Eduardo Massashi Yamao  
Elisa Stefan  
Fabio Yukio Nara  
Fernando Gonçalves Opalinski  
Franciele Ines de Carvalho  
Gabriel Maidl  
Gheysa do Rocio Morais Pires  
Gleisy Kelly Negoseki  
Heloisa Nunes da Motta  
Henrique Reisdorfer Leite  
Jéssica Cristina Lozovei  
João Paulo Jankowski Saboia  
Juliane de Melo Rodrigues  
Juliano de Andrade  
Kassia dos Santos  
Kelen de Fatima de Souza  
Marianne Schaefer França Sieciechowicz  
Nicole Machuca Brassac de Arruda  
Patricio Rodolfo Impinnisi  
Robinson Gonzales Leal Junior  
Rodrigo Canestraro Quadros  
Rodrigo Soares Ferreira  
Rosana de Fátima Gibertoni  
Tânia Lúcia Graf de Miranda  
Thiago Carvalho de Mello

## **Participantes UEGA e COPEL**

Amilton Bizi  
Cesar Augusto da Silva  
Guilherme Clemente  
Luciane Faustino  
Marcos de Freitas  
Victor Manuel Lopes Santos

Parceria



**WEHRLE**

Apoio



Colaboração



Este livro foi elaborado no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), sendo um dos produtos do projeto PD 0539-0004-2015 “Gestão de Água em Complexo de Geração Termelétrica” executado pela Usina Elétrica a Gás de Araucária – UEGA e pelo Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – Lactec.

O conteúdo deste livro reflete a opinião e experiência de profissionais que atuam nas áreas de meio ambiente, materiais, sistemas mecânicos e elétricos, assim como o trabalho de pesquisa e desenvolvimento resultante desse projeto e de outros trabalhos na área.

Os direitos desta obra são reservados aos seus organizadores e autores. Seu conteúdo poderá ser reproduzido no todo ou em partes desde que sejam citados autores e organizadores.

### **Produção editorial**

Rodrigo Foggiatto de Andrade

### **Revisão**

Rita Spacki

### **Capa, Projeto gráfico e Editoração**

Grafo Estúdio

Copyright © UEGA – Usina Elétrica a Gás de Araucária  
Todos os direitos reservados

Proibida a reprodução total ou parcial, de qualquer forma e por qualquer meio mecânico ou eletrônico, inclusive por meio de fotocópias e de gravações sem a expressa permissão da Usina Elétrica a Gás de Araucária (UEGA). Todo o conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade da UEGA.

---

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**  
**(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)**

---

Gestão de água em complexo de geração termelétrica [livro eletrônico]  
/ [organização Juliane de Melo Rodrigues, João Borba, Cintia de  
Carvalho Toledo]. -- 1. ed. -- Curitiba : Grafo Estúdio, 2020.  
PDF

Vários colaboradores.

Bibliografia

ISBN 978-65-992068-5-6

1. Água 2. Água - Abastecimento 3. Água - Consumo 4. Água -  
Tratamento 5. Centrais termelétricas 6. Desenvolvimento de recursos  
hídricos - Aspectos ambientais 7. Termoeletricidade 8. Usinas elétricas  
- Projetos e construção 9. Usina Elétrica a Gás de Araucária - Paraná  
(PR) I. Rodrigues, Juliane de Melo. II. Borba, João. III. Toledo, Cintia de  
Carvalho.

20-48280

CDD-621.31243

---

**Índices para catálogo sistemático:**

1. Gestão de água em complexo de geração termelétrica : Engenharia 621.31243  
Maria Alice Ferreira - Bibliotecária - CRB-8/7964

# Sumário

## **Prefácio** 12

---

João Borba

## **1** **Introdução** 16

---

Juliane de Melo Rodrigues

## **2** **Os Setores Elétrico e Termelétrico** 22

---

Daniel Henrique Marco Detzel

## **3** **Disponibilidade Hídrica** 40

---

Nicole Machuca Brassac de Arruda  
Marianne Schaefer França Sieciechowicz  
Ana Carolina Canossa Becker



## **4** **Reúso de Água e Gestão Hídrica** **60**

---

Gheysa do Rocio Morais Pires  
Jéssica Cristina Lozovei  
Robinson Gonzales Leal Junior  
Gleisy Kelly Negoseki

## **5** **Legislação** **84**

---

Ana Carolina Wosiack  
Henrique Reisdorfer Leite

## **6** **Estudo de Caso: UEGA** **110**

---

Juliane de Melo Rodrigues  
Alika Solange Ferraro Pires  
Camila Melo Pesqueira  
Alcides Conte Neto  
Camila Marçal Gobi Pacher  
Heloisa Nunes da Motta  
João Paulo Jankowski Saboia  
Juliano de Andrade  
Rosana de Fátima Gibertoni



# Prefácio

João Borba





## A água como bem finito

O Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, MCTI, recomenda a utilização de Projetos estruturantes em sua estratégia 2012-2015. E a Agência Nacional de Energia Elétrica, ANEEL, requer a aplicação de recursos seguindo um plano estratégico de investimento em P&D. Ao serem analisados os temas para Investimento em P&D da ANEEL e levantados seus interesses específicos, a Usina Termelétrica de Araucária (UEGA) criou um programa dentro do subtema GT02 – Novas técnicas para eficiência e diminuição da emissão de poluentes para usinas termelétricas a gás.

Ao final de 2014 iniciaram-se dois projetos de pesquisa. Um abordava a dinâmica da combustão de uma turbina a gás natural. O outro estudava a Emissão Acústica como ferramenta de gestão de ativos no monitoramento dos balões de alta e média pressões das duas caldeiras de recuperação, onde o vapor é gerado pelo calor residual dos gases de exaustão das turbinas a gás natural.

O vapor saturado, após passar pela turbina a vapor, é direcionado a um trocador de calor para, em um circuito fechado, ser condensado, e, no estado líquido, ser bombeado de volta para a caldeira. Esse condensador é resfriado pela água que circula entre ele e um conjunto de torres de resfriamento. Parte dessa água evapora na torre de resfriamento e precisa ser reposta a uma razão de cerca de 0,9 m<sup>3</sup>/h/MW. A UEGA, com sua capacidade de 484 MW, consome então cerca de 430 m<sup>3</sup>/h de água, que é o segundo insumo mais importante em uma planta termelétrica depois do gás natural.

A importância da água para essa planta industrial foi evidenciada pela crise hídrica ocorrida em 2014 na Região Sudeste. A crise alertou a sociedade para o fato de que, apesar de o Brasil possuir um quinto da água doce disponível no Planeta, ela não é igualmente distribuída em nosso território e o futuro de sua abundância se tornara incerto. Isso mostra a importância de se reduzir o desperdício e de se aumentar o reúso da água.

O projeto de P&D procurou entender com mais detalhes as opções existentes no entorno da planta que pudessem afastá-la da concorrência com o consumo humano, com a agricultura e com outras empresas, diversificando suas fontes com a possibilidade de utilizar as águas de reúso (esgoto) e pluvial. O estudo buscou aprofundar o conhecimento das características da água industrial fornecida, considerando as dificuldades no atendimento de alguns parâmetros e seus efeitos sobre a integridade dos equipamentos, como corrosividade em relação aos materiais do trocador de calor e do sistema de resfriamento.

A utilização da osmose reversa (RO) criou uma rota alternativa para que a água industrial existente atenda à torre de resfriamento (maior consumo da planta) e a RO faça o polimento necessário para melhorar os parâmetros de fornecimento na água de entrada da unidade de desmineralização da água de caldeira, do condensador evaporativo e da água de incêndio, que compartilha o mesmo sistema.

João Borba  
Colaborador e Coordenador do Projeto



# 1

## Introdução

Juliane de Melo Rodrigues





A falta de equilíbrio entre a disponibilidade da água e a sua demanda é um problema atual e de ordem global. Desse modo, a necessidade da conservação, do tratamento e do reúso da água para uso industrial, como componentes da gestão de recursos hídricos, tornam-se essenciais. Os custos elevados da água industrial, associados às demandas crescentes, têm levado as indústrias a avaliarem possibilidades internas de reúso e a considerarem outras possíveis fontes externas para suprir a demanda por água do processo industrial.

As práticas de conservação e reúso da água consistem, principalmente, na utilização de fontes alternativas e na redução dos volumes captados (otimização de processos), bem como na busca de substitutos para as fontes de abastecimento convencionais.

O Brasil é um país privilegiado em termos de disponibilidade hídrica, detendo mais de 10% de toda a vazão mundial de água doce (AUGUSTO *et al.*, 2012; MEES, 2012). Entretanto, há regiões com abundância e outras com escassez de água, visto a desuniformidade na distribuição dos recursos no território nacional. São atualmente observados problemas relacionados à falta de água e sua qualidade em regiões fortemente urbanizadas, devido à grande demanda.

Entre 2012 e 2016, o Brasil enfrentou uma crise hídrica que, segundo a Agência Nacional de Águas (ANA, 2014), iniciou-se em decorrência de um conjunto de fatores, como o aumento da demanda por água, o comprometimento da qualidade dos recursos hídricos e a diminuição do nível das chuvas. Essa crise requereu medidas de emergência, como o racionamento da água nas áreas afetadas.

O estado do Paraná possui disponibilidade hídrica superficial total da ordem de 1,2 milhões de litros por segundo, sem considerar a contribuição dos rios Paraná e Paranapanema. Para atender aos atuais usos da água, no estado, são necessários cerca de 51 mil litros por segundo. A demanda hídrica atual para abastecimento público ultrapassa 40% desse total, seguida pela indústria e pela agropecuária (IAT, 2020).

Dentre as bacias paranaenses, a do Alto Iguaçu concentra o maior número de usuários e também a maior demanda do estado, sendo que cerca de 90% da vazão utilizada é advinda de mananciais superficiais. Como reflexo dessa demanda, a bacia é a maior geradora de efluentes do estado. Entre as principais causas da deterioração da qualidade da água na bacia se destacam os efluentes domésticos e industriais (PARANÁ, 2015).

Em 2020, foram registradas precipitações e vazões muito inferiores à média no Paraná, reduzindo significativamente os estoques de água acumulados nos reservatórios. Com o abastecimento de água comprometido, em função do agravamento da crise hídrica, também, em cumprimento do Decreto Estadual n. 4626/2020, que instituiu Situação de Emergência Hídrica em todo o Paraná, medidas de racionamento foram adotadas para equilibrar a distribuição de água. Esse contexto reforça, ainda mais, a necessidade da busca por novas fontes de água, da racionalização do uso e do desenvolvimento e aplicação de tecnologias que permitam o reúso seguro da água.

As usinas termelétricas são consumidoras de grandes volumes de água, representando altos custos de operação. A água é utilizada em unidades de processo, sistemas de geração de vapor, torres de resfriamento, sistemas de combate a incêndio e para fins potáveis.

Face aos desafios atuais em relação à gestão dos recursos hídricos (saneamento e abastecimento) para atendimento aos diversos usos

da água, o seu reúso surge como uma alternativa e uma oportunidade, no sentido de minimizar a demanda interna e reduzir a carga poluente lançada ao corpo receptor. Além disso, com a implementação dos mecanismos de outorga e cobrança pela utilização dos recursos hídricos no Brasil, instrumentos da Política Nacional de Recursos Hídricos – PNRH, Lei n. 9.433/1997, o reúso de efluentes nas indústrias passou a ser sinônimo de ganhos econômicos diretos, além de contribuir para a imagem das empresas. Ainda, essas ações vão ao encontro das metas do Plano de Bacias do Alto Iguaçu e Afluentes do Alto Ribeira, aprovado em 2013, que busca a promoção do uso racional dos recursos hídricos, com o desenvolvimento de projetos e ações que visem ao reúso da água.

Considerando uma eventual ampliação da Usina Elétrica a Gás de Araucária (UEGA), faz-se necessária uma otimização da gestão da água e do efluente industrial, face ao cenário de escassez hídrica.

Para estudar o tema, foi realizado o projeto de pesquisa e desenvolvimento P&D ANEEL “Gestão de Água em Complexo de Geração Termelétrica” (PD 0539-0004/2015), iniciado no ano de 2015 e com duração de 60 meses. Esse projeto foi executado pela Usina Elétrica a Gás de Araucária – UEGA e pelo Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – Lactec.

A gestão da oferta e da demanda de água para uso industrial consistiu na investigação de possíveis fontes alternativas de água, buscando a melhor tecnologia de tratamento como forma de garantir o pleno atendimento aos padrões de operação da usina e padrões ambientais pertinentes. A gestão da oferta de água externa à UEGA foi estudada com base na melhoria da eficiência de tratamento da ETA Industrial, no aproveitamento da água pluvial incidente na área da usina e na obtenção de água de reúso, proveniente de esgoto doméstico bruto da estação de tratamento pertencente à concessionária estadual.

Em termos industriais, a qualidade da água tem impacto importante na integridade dos equipamentos pelos quais ela circula, principalmente no que se refere à corrosão. Na UEGA, a água industrial, utilizada para troca térmica nos condensadores do vapor das caldeiras, recebe tratamento adicional dentro da usina e chega aos trocadores ainda com a presença de íons cloreto, sulfato e amônio. A influência isolada desses íons sobre

ligas metálicas, principalmente as mais comuns, já foi bastante estudada. Há, no entanto, um efeito sinérgico na ação desses íons no tocante à corrosão e, para o caso em questão, não foi encontrado um estudo similar na literatura (que leve em consideração as peculiaridades mecânicas do trocador de calor e a natureza da água de resfriamento). Para garantir a segurança operacional da usina foi estudado o comportamento eletroquímico desse sistema, para permitir uma estimativa da vida útil dos equipamentos e a elaboração de planos de manutenção eficazes.

Juliane de Melo Rodrigues  
Colaboradora e Coordenadora Técnica do Projeto

## 1.1 Referências

- ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. *Encarte Especial sobre a Crise Hídrica, 2014*. Disponível em: <<http://conjuntura.ana.gov.br/docs/crisehidrica.pdf>>. Acesso em 20 abr. 2020.
- AUGUSTO, L. G. S.; GURGEL, I. G. D.; CÂMARA-NETO, H. F. C.; MELO, C. H.; COSTA, A. M. O contexto global e nacional frente aos desafios do acesso adequado à água para consumo humano. *Ciência & Saúde Coletiva*, v. 17, n. 6, p. 1511-1522, 2012.
- IAT – INSTITUTO ÁGUA E TERRA. *Relatório de conjuntura dos recursos hídricos do Estado do Paraná, Ano 2020*. Curitiba: IAT, 2020.
- MEES, A. *Qualidade de Água em Reservatórios: Unidade 1. Reservatórios*. Brasília: ANA/UNESP. 57 p. Disponível em: <[https://capacitacao.ana.gov.br/conhecerh/bitstream/ana/74/2/Unidade\\_1.pdf](https://capacitacao.ana.gov.br/conhecerh/bitstream/ana/74/2/Unidade_1.pdf)>. Acesso em: 27 abr. 2020.
- PARANÁ. *Relatório de Avaliação Ambiental – RAA: Programa integrado de inclusão social e requalificação urbana família paranaense*. Volume II – Anexos. Curitiba: SEPL/SEDS/COHAPAR, 2015. 169 p. Disponível em: <[http://www.justica.pr.gov.br/sites/default/arquivos\\_restritos/files/migrados/File/familia\\_paranaense/materias/raa\\_vol2.pdf](http://www.justica.pr.gov.br/sites/default/arquivos_restritos/files/migrados/File/familia_paranaense/materias/raa_vol2.pdf)>. Acesso em 29 abr. 2020.



# 2

## Os Setores Elétrico e Termelétrico

Daniel Henrique Marco Detzel





## 2.1 Introdução

O total de energia consumida para o desenvolvimento das atividades humanas é tipicamente agregado em quatro grandes fontes: petróleo, gás natural, carvão, biocombustíveis e eletricidade. A Agência Internacional de Energia monitora a evolução da participação dessas fontes no consumo energético mundial desde o início da década de 1970 e mostra que a eletricidade subiu da quarta posição em 1973 para a segunda em 2017, quando passou a ser responsável por 18,9% do consumo energético no mundo (IEA, 2019a). Na data, estava ainda atrás do petróleo (41,0%), contudo o mesmo órgão projeta que o ritmo de crescimento do consumo de eletricidade seja mais de duas vezes maior do que o das demais fontes energéticas. Isso elevará a eletricidade ao posto de fonte energética mais consumida no mundo em 2040 (IEA, 2019b).

Considerando que o setor elétrico é o maior responsável pela emissão de gases de efeito estufa na atmosfera (BRUCKNER *et al.*, 2014), seu crescimento está acompanhado por desafios complexos. A matriz de geração, majoritariamente composta por fontes de geração alimentadas por combustíveis fósseis (óleo, carvão e gás natural), tem observado grande penetração de fontes de energia renovável como a eólica e a solar. Entretanto, essas renováveis têm a severa limitação de não serem despacháveis, ou seja, não conseguem armazenar energia de forma a modular sua produção. Isso causa problemas de estabilidade na rede elétrica, que requer sistemas de apoio para suprir as necessidades energéticas em momentos de pico de consumo ou quando a disponibilidade de vento e radiação solar está baixa.

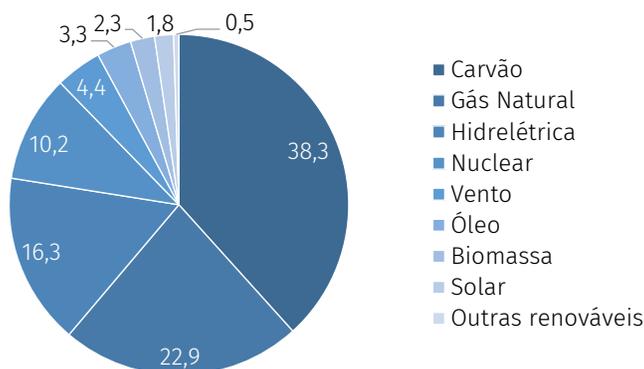
O suporte às fontes eólica e solar pode ser fornecido por algumas opções: usinas hidrelétricas com reservatórios de regularização, usinas hidrelétricas reversíveis, baterias e usinas termelétricas. As primeiras duas são viáveis, entretanto suas disponibilidades estão restritas a poucos países (a situação brasileira é discutida na seção 2.3). Sistemas de armazenamento por baterias de grande porte ainda estão em fase de estudo, de modo que sua viabilidade depende de um significativo avanço científico (IEA, 2019b). Portanto, as fontes térmicas figuram como opções reais, principalmente as que são equipadas por tecnologias flexíveis e que, portanto, podem ajustar a sua produção às flutuações de demanda (GONZALEZ-SALAZAR; KIRSTEN; PRCHLIK, 2018). Nesse contexto, as usinas termelétricas a gás natural de ciclo combinado continuarão a ter posição de destaque por sua flexibilidade e também por possuírem reduzida taxa de emissão de gases de efeito estufa em relação a outras fontes de base térmica (IEA, 2018; EC, 2011).

Assim sendo, os dois próximos subitens deste capítulo têm por objetivo traçar os panoramas mundial e nacional dos setores elétricos e termelétricos, com foco em usinas movidas a gás natural.

## 2.2 Panorama mundial

Apesar dos apelos pela redução da emissão de gases de efeito estufa na atmosfera, os quais foram firmados pelo Protocolo de Kyoto em 1997

e pelo subsequente Acordo de Paris em 2015, o setor elétrico mundial ainda está fortemente baseado em geração termelétrica. Os dados consolidados mais recentes disponíveis datam de 2017 e mostram que 64,5% da produção de energia elétrica no mundo advém de térmicas alimentadas por carvão, gás natural e óleo combustível (IEA, 2019c). A divisão completa por fonte é mostrada na Figura 2.1.

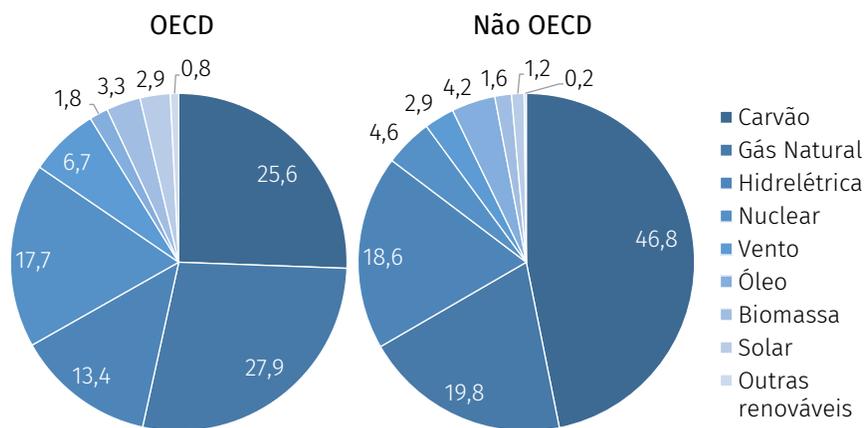


**Figura 2.1:** Geração de energia elétrica por fonte no mundo em 2017.  
Fonte: Adaptado de IEA (2019c).

Das fontes consideradas, a maior participação é a do carvão (38,3%), que, apesar de ser relativamente barato, é muito poluente e tem baixa eficiência na produção de eletricidade (GONZALEZ-SALAZAR; KIRSTEN; PRCHLIK, 2018). Usinas com tecnologia a gás natural são as segundas mais utilizadas (22,9%), enquanto as alimentadas por óleo combustível têm baixa participação (3,3%). Interessante notar que essas últimas contribuem menos do que hidrelétricas (16,3%) e eólicas (4,4%), duas fontes renováveis. Ainda assim, considerando somente as usinas térmicas, o percentual de participação de usinas a carvão é de 59,4%, contra 35,5% de gás natural e 5,1% de óleo combustível. Ressalta-se que usinas nucleares e de biomassa são também térmicas, contudo, as primeiras não emitem gases de efeito estufa e as segundas entram para a classe das energias renováveis.

Deve-se considerar, no entanto, que a análise em nível global não permite visualizar as fortes heterogeneidades presentes nas matrizes

de geração de energia elétrica dos países. Uma das maneiras de abordá-la é utilizando a subdivisão entre as nações que compõem a Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OECD, na sigla em inglês) e as demais. A Agência Internacional de Energia trabalha com essa classificação, sendo que nesse caso a divisão da geração de energia por fonte resulta nos gráficos mostrados pela Figura 2.2.



**Figura 2.2:** Geração de energia elétrica por fonte nos países participantes e não participantes da OECD em 2017. Fonte: Adaptado de IEA (2019c).

Como se percebe, nos dois grupos de países a geração térmica ainda é predominante, porém há uma significativa diferença nos percentuais. Enquanto nos países da OECD as térmicas totalizam 55,3%, nos demais a fatia chega a 70,8%. As tecnologias predominantes das usinas térmicas desses grupos também são distintas. Em países da OECD a maioria das usinas são movidas a gás natural (50,5%), contudo, nas nações que não integram o grupo, o carvão é ainda o combustível mais utilizado (66,1%).

De menção relevante, 2011 foi o primeiro ano desde a década de 1970 em que os países não participantes da OECD geraram mais eletricidade do que os que integram a OECD. Desde então, a diferença de geração

entre os dois grupos de países tem aumentado, chegando em 2017 à proporção de 57,0% contra 43,0%, respectivamente (IEA, 2019c). Ainda em 2017, dos dez países que mais produziram energia elétrica no mundo, quatro não fazem parte da OECD (China, Índia, Rússia e Brasil). Juntos, eles produziram 38,4% da energia elétrica mundial. A fim de explorar em mais detalhes esses números, elaborou-se a Tabela 2.1 com o perfil de geração desses e dos outros seis países que mais produziram eletricidade em 2017.

**Tabela 2.1:** Perfil de geração de eletricidade dos dez países que mais produziram em 2017. Fontes: IEA (2019c) e World Bank (2020).

País	% de geração	% de participação das fontes					
		C	GN	O	N	H	DR
<b>China</b>	25,8	70,3	2,5	0,2	3,0	19,1	4,9
<b>Estados Unidos</b>	16,7	34,2	31,9	0,9	19,8	5,8	7,4
<b>Índia</b>	6,0	75,3	4,9	1,7	2,7	10,0	5,4
<b>Rússia</b>	4,3	14,8	49,7	0,9	18,8	15,7	0,1
<b>Japão</b>	4,1	33,2	39,6	7,5	3,7	8,2	7,8
<b>Canadá</b>	2,6	9,8	10,0	1,2	16,0	56,7	6,3
<b>Alemanha</b>	2,5	44,3	9,8	1,0	15,6	3,0	26,3
<b>Brasil</b>	2,3	4,7	13,7	5,0	2,7	61,8	12,1
<b>Coreia do Sul</b>	2,2	43,1	22,4	2,3	30,3	0,4	1,5
<b>França</b>	2,2	2,2	3,5	0,4	78,0	9,7	6,2

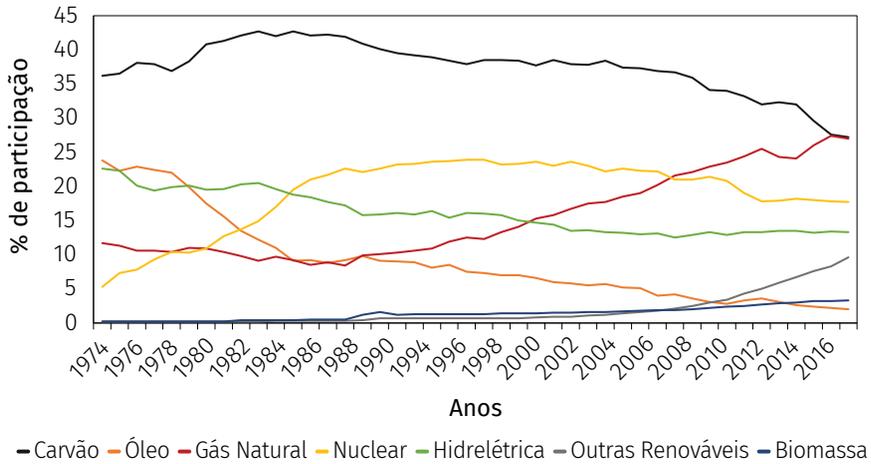
Siglas: C – Carvão; GN – Gás Natural; O – Óleo; N – Nuclear; H – Hidrelétrica; DR – Demais renováveis.

Nota: Os percentuais de geração estão expressos em referência à geração de eletricidade no mundo em 2017. Portanto, para totalizar 100% há necessidade de considerar os 31,3% de geração de eletricidade nos demais países que não constam na tabela.

Os números mostram que China e Estados Unidos produziram pouco menos do que o dobro de energia dos outros países somados (42,5% contra 26,2%). Além disso, possuem uma participação de usinas térmicas similar, sendo que, do total de eletricidade gerada, 73,0% veio de fontes térmicas da China e 67,0% dos Estados Unidos. Entretanto, o perfil de geração das duas nações é notoriamente distinto: enquanto a China concentrou a grande fatia de sua produção em térmicas a carvão (70,3%), os Estados Unidos dividiram de forma similar sua produção em térmicas a carvão (34,2%) e a gás natural (31,9%). Os quase 20% restantes em cada país foram gerados por fontes hidrelétricas e nucleares na China e nos Estados Unidos, respectivamente.

A Tabela 2.1, mesmo trazendo informações de apenas dez nações, evidencia a heterogeneidade dos perfis de geração dos países. Além dos dois mencionados no parágrafo anterior, outros destaques podem ser apontados. A Índia concentrou a maior fatia relativa de geração térmica a carvão (75,3%); na França, há grande participação da fonte nuclear (78,0%); na Alemanha, demais renováveis atingem percentual expressivo (26,3%), impulsionado pela presença massiva de energia eólica em sua matriz; no Canadá, observa-se significativa participação de hidrelétricas (56,7%), ainda que com bom respaldo de usinas nucleares (16,0%); no Brasil, a soma das gerações por fontes hidrelétricas e demais renováveis (73,9%) o coloca como país com maior percentual de fontes renováveis no *ranking* considerado.

Ainda analisando a Tabela 2.1, é notável a relevante participação de térmicas a gás natural nas matrizes de países como Estados Unidos, Japão, Coreia do Sul e Rússia. De fato, a participação do gás natural como fonte de geração de energia elétrica vem aumentando nesses e em outros diversos países do mundo. Em uma análise histórica, a Figura 2.3 mostra que a fonte cresceu a partir do início da década de 1990, em contraponto à queda do carvão. As estimativas da Agência Internacional de Energia são de que no ano de 2018 essas duas fontes tenham atingido praticamente a mesma proporção na matriz de geração de eletricidade. O gráfico mostra isso no último registro, muito embora ressalva deva ser feita por esses dados ainda não estarem consolidados até a data de escrita deste texto.

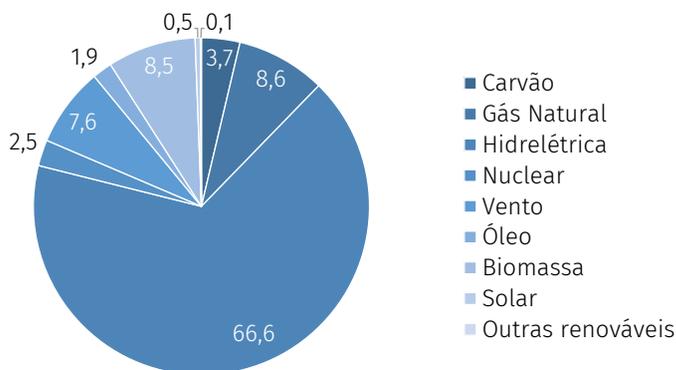


**Figura 2.3:** Evolução histórica da participação das principais fontes de geração de energia elétrica. Fonte: Adaptado de IEA (2019c).

Outro ponto interessante exibido pela Figura 2.3 é que, a partir da segunda metade da década de 2000, o crescimento das térmicas a gás natural é muito similar ao das outras renováveis (excluindo-se hidrelétricas), as quais são lideradas pelas eólicas e solar fotovoltaicas. Portanto, o conceito comentado no início deste capítulo sobre a utilização conjunta de fontes não despacháveis com uma fonte flexível e menos poluidora como o gás natural tem se mostrado viável e em concordância com a evolução futura projetada por órgãos internacionais.

## 2.3 Panorama do Brasil

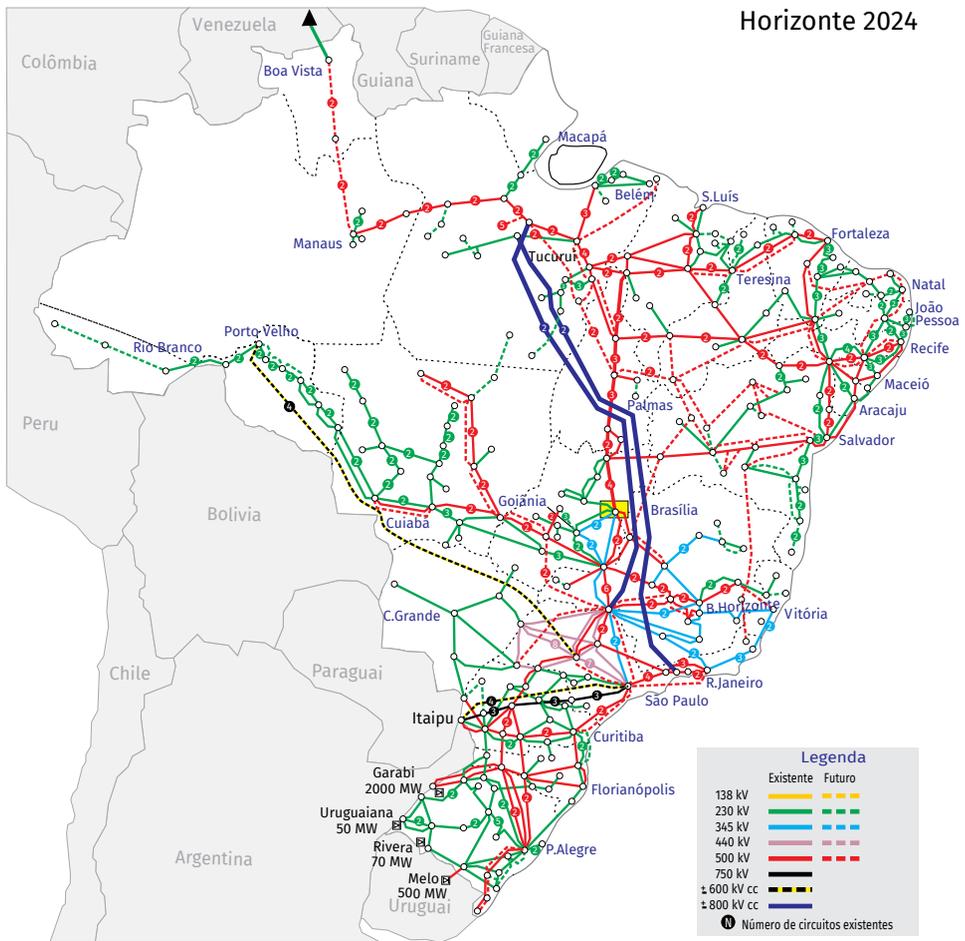
Para entender o panorama do setor elétrico brasileiro e como isso se reflete na geração térmica nacional, é preciso primeiramente dar ênfase na diferença do perfil de geração de energia elétrica do Brasil em relação ao restante do mundo. Dada a singular abundância de recursos hídricos aqui existente (ver seção 3.3), o setor elétrico brasileiro historicamente se desenvolveu em base essencialmente hidrelétrica. Como forma de ilustração, a Figura 2.4 exibe a participação atual de cada fonte em termos de potência instalada.



**Figura 2.4:** Disponibilidade de energia elétrica por fonte no Brasil em 2018.  
Fonte: Adaptado de EPE (2019).

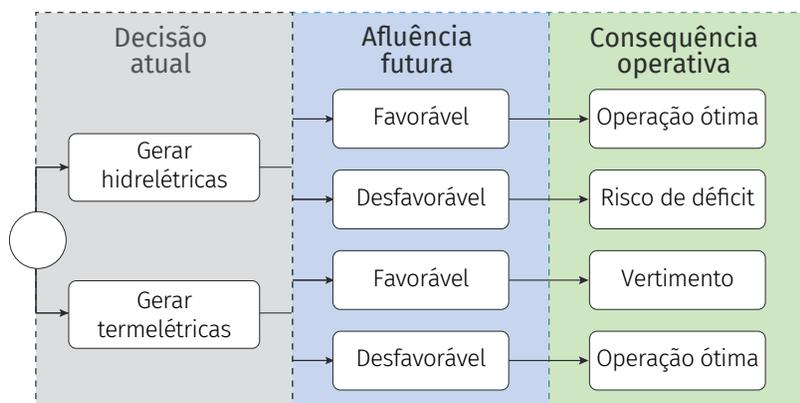
Quando comparada ao panorama mundial mostrado na Figura 2.1, fica evidente a diferença entre os perfis de geração de energia elétrica. No Brasil, a participação de usinas térmicas totaliza 14,2% (contra 64,5% no mundo) e de usinas hidrelétricas soma 66,6% (contra 16,3% no mundo). Se forem agregadas as fontes eólica, solar e biomassa, o percentual de participação de fontes renováveis resulta em 83,3%, certamente uma das maiores do mundo. Ainda assim, essa comparação deve ser feita com ressalvas, pois a Figura 2.1 mostra o percentual de energia produzida em 2017 no mundo, enquanto a Figura 2.4 exibe o percentual da potência instalada em 2018 no Brasil. Em tendo base hídrica, a energia efetivamente entregue ao sistema depende fortemente da hidrologia nas diversas bacias hidrográficas, de modo que a contribuição somente de hidrelétricas pode chegar a patamares superiores a 80,0% em períodos favoráveis (ONS, 2020a).

Outro aspecto singular encontrado no Brasil é a dimensão de seu sistema elétrico. Diferentemente de outros países, 99% do sistema brasileiro é interconectado, compondo o chamado Sistema Interligado Nacional – SIN (Figura 2.5). Isso permite que blocos de energia gerados em uma região possam ser transmitidos para outras regiões, situação essa que é muito bem aproveitada, dada a diversidade hidrológica brasileira. Em outras palavras, períodos de hidrologia favorável em uma região podem compensar estiagens em regiões distintas, mantendo a base de geração elétrica essencialmente hídrica. A demanda adicional é complementada principalmente por energia térmica e eólica.



**Figura 2.5:** O Sistema Interligado Nacional – Horizonte 2024.  
Fonte: ONS (2020b).

O Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) é o agente responsável por coordenar a operação do SIN. Essencialmente, é ele quem toma as decisões sobre quais usinas deverão gerar energia de modo a atender à demanda. Sob esse ponto de vista, ter um país com base de geração hidrelétrica torna a tarefa da operação extremamente complexa, pois a incerteza futura das vazões afluentes passa a ser relevante. Esse processo de decisão é conhecido por “dilema do operador” e está representado pela Figura 2.6.



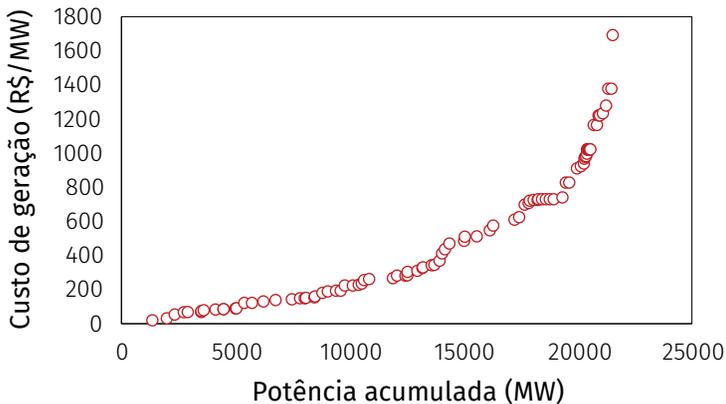
**Figura 2.6:** O dilema do operador.

A decisão que o ONS precisa tomar é, basicamente, gerar energia por meio de hidrelétricas ou termelétricas. É importante lembrar-se de que usinas eólicas não são despacháveis, portanto, não entram no processo de decisão<sup>1</sup>. Essa opção está condicionada à afluência futura: caso se opte em utilizar hidrelétricas e a afluência for favorável, a decisão é tida como ótima, pois os níveis dos reservatórios serão reestabelecidos ao final do horizonte. Por outro lado, se as afluências não forem favoráveis, o sistema corre risco de déficit energético. Em outra esfera, caso a decisão seja gerar termelétricas e a afluência futura for desfavorável, a decisão é tida como ótima, pois os níveis dos reservatórios estarão elevados para suprir a demanda. Entretanto, se as vazões forem favoráveis, as usinas sofrerão com vertimento e, portanto, desperdício energético.

O ONS faz decisões dessa natureza semanalmente para um horizonte temporal de até 60 meses à frente. Além das metas energéticas por usina, dessas decisões saem os custos de operação do sistema, os quais devem ser os mínimos necessários para atender com segurança à demanda energética. É nesse ponto que os despachos termelétricos se tornam muito relevantes, pois os custos com combustível são determinantes para a composição dos custos da operação do SIN como um todo.

<sup>1</sup> No SIN a contribuição de usinas eólicas, solares e pequenas centrais hidrelétricas é contabilizada por meio de um abatimento da demanda total a ser atendida (ANEEL, 2011).

No momento em que as usinas hidrelétricas sozinhas não conseguem atender à demanda, a decisão sobre qual usina térmica deverá ser despachada é tomada com base na chamada curva de ordem de mérito. Em essência, essa curva é gerada a partir da ordenação das usinas térmicas com base em seus custos. Para o mês de março de 2020, a curva de ordem de mérito do parque termelétrico do SIN é mostrada na Figura 2.7.



**Figura 2.7:** Curva de ordem de mérito da geração termelétrica do SIN (ref.: março de 2020). Elaborada a partir de dados coletados em CCEE (2020).

Na curva, a potência é acumulada porque a ordem de despacho de uma determinada usina térmica considera que outras térmicas mais baratas já estejam injetando energia na rede. Assim sendo, a ordem de despacho percorre a curva da esquerda para a direita sempre que mais energia térmica seja necessária para suprir a demanda do sistema<sup>2</sup>.

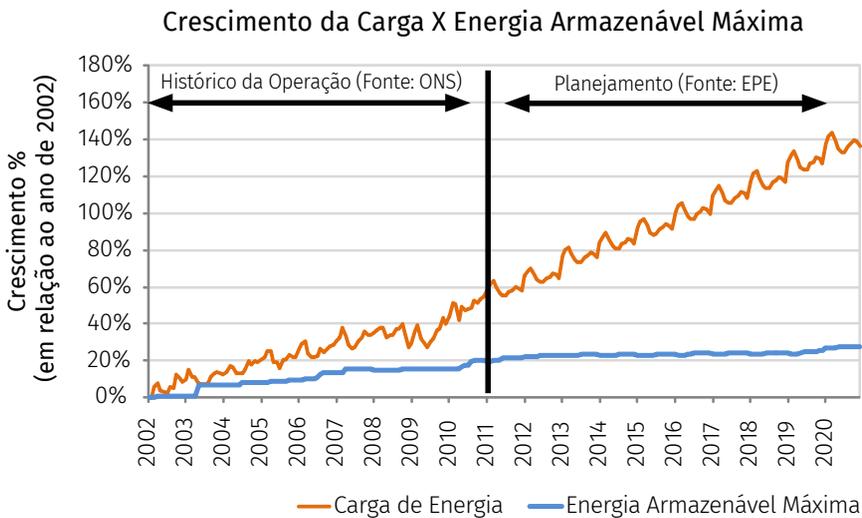
A principal condição de contorno utilizada pelo ONS para resolver o problema do despacho hidrotérmico é o estado atual de armazenamento de água nos reservatórios de regularização. Analisando novamente o dilema do operador (Figura 2.6), ter ou não água armazenada disponível é

---

2 Há exceções a essa regra, as quais são denominadas despachos fora da ordem de mérito. As razões para essas ocorrências são diversas e podem estar relacionadas desde a disponibilidade de equipamentos até uma eventual falta de combustível.

determinante para tomar a decisão de utilizar hidrelétricas ou térmicas na primeira etapa do problema. Caso haja reservas suficientes, a exigência de térmicas tende a ser menor ao longo do horizonte de planejamento.

Até o início da década de 2000, o Brasil contava com boa capacidade de regularização. Em conjunto, os reservatórios de acumulação permitiam a regularização de vazões em escalas plurianuais, o que amenizava a preocupação com as incertezas das afluências futuras. A partir daquela data, entretanto, as decisões de expansão do parque hidrelétrico passaram a priorizar usinas a fio d'água (BERTONE *et al.*, 2019). Desde então, observou-se um descolamento dos crescimentos da demanda em relação à capacidade de regularização, o que passou a exigir mais participação de usinas térmicas no sistema. Isso foi mostrado por MME/EPE (2011), que na época ainda projetou um aumento desse descolamento para os anos subsequentes (Figura 2.8).



**Figura 2.8:** Comparação entre os crescimentos da demanda energética e da capacidade de armazenamento do SIN. Fonte: MME/EPE (2011).

Em paralelo a esses acontecimentos, o Brasil observou aumento significativo da participação de fontes eólicas em sua matriz. Mais recentemente, a fonte solar também vem aumentando sua participação em ritmo acelerado. Os dados mais recentes mostram que essas duas

fontes em conjunto já representam 10,6% da potência instalada do SIN (ANEEL, 2020). Adicionalmente, projeções futuras indicam que esse percentual poderá chegar em 21,5% no ano de 2029<sup>3</sup> (MME/EPE, 2020). Em outra perspectiva, isso quer dizer que o SIN observará um aumento importante na participação de fontes de energia elétrica não despacháveis, o que fará com que a realidade energética do Brasil se assemelhe com a de outros países. A reduzida capacidade de armazenamento, aliada à forte presença de fontes não despacháveis na matriz de geração, exigirá mais participação de usinas térmicas no sistema.

Essa conclusão está em acordo com o planejamento de longo prazo feito para o sistema elétrico brasileiro. O Plano Nacional de Energia 2050 (EPE, 2018) menciona explicitamente que as térmicas a gás natural figuram como fontes-base para a expansão da geração termelétrica. Da mesma forma, o Plano Decenal de Expansão de Energia 2029 (MME/EPE, 2020) trabalha com alternativas que buscam viabilizar o aumento da participação de térmicas especificamente alimentadas a gás natural, citando que esse é o principal combustível a ser utilizado na próxima década.

Uma motivação importante é que essa fonte é menos poluente quando comparada a outros combustíveis fósseis. ANEEL (2008) aponta que a taxa de emissão de gás carbônico na atmosfera de térmicas a gás natural pode ser até 23% e 50% inferior em relação a usinas movidas a óleo combustível e a carvão, respectivamente. Tecnologias recentes, como uso de células combustíveis, estão sendo desenvolvidas para que as emissões reduzam ainda mais (MAC KINNON *et al.*, 2018). Além disso, é uma fonte cujo transporte do combustível é feito via gasodutos, os quais dispensam transportes terrestres e contribuem indiretamente para uma menor taxa de emissões.

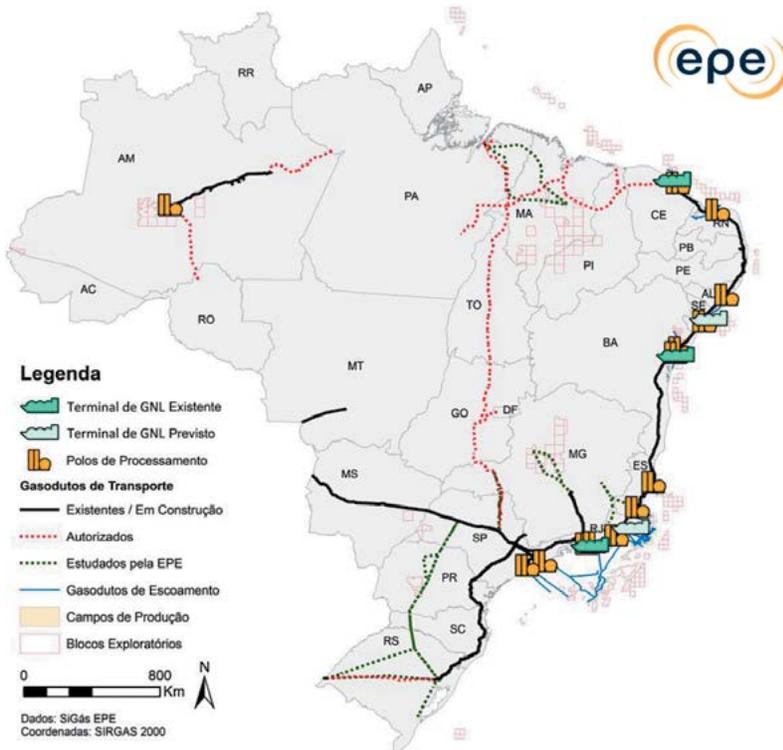
Outra característica importante das térmicas a gás natural é que elas são plantas cuja estrutura é compacta o suficiente para que sejam montadas próximas aos centros consumidores. Essa é uma clara vantagem em relação a fontes de energia que dependem de fenômenos naturais, como chuva, vento e radiação solar. Para essas últimas, os locais disponíveis para a construção de novas usinas estão limitados às regiões de maior potencial, o que em geral ocorre em localidades afastadas dos centros de

---

3 Considerando o cenário de referência proposto em MME/EPE (2020).

consumo. Portanto, sua construção está atrelada a uma infraestrutura de transmissão com porte significativo.

Ainda em relação à distância para os centros consumidores, há de se argumentar que térmicas a gás natural dependem da construção de gasodutos. Esse foi um ponto importante levantado no Plano Nacional de Energia 2030 (MME/EPE, 2007), que apontava a infraestrutura de gasodutos nacional ainda incipiente. Entretanto, a malha de transporte de gás natural no Brasil cresceu substancialmente desde sua publicação, superando a marca dos 9.400 km de extensão em 2018 (Figura 2.9). Grande parte dessa malha é interligada, principalmente na região litorânea do país. Não obstante, a mesma região litorânea será grandemente beneficiada pelo gás proveniente das reservas do pré e pós-sal, que irão aumentar a oferta interna de gás natural.



**Figura 2.9:** Infraestrutura de transporte de gás natural no Brasil.  
Fonte: MME/EPE (2020).

Coincidentemente, o litoral brasileiro é a região que acumula os maiores centros de consumo. Portanto, a união da oferta e da demanda em uma mesma localidade contribui para que a fonte térmica a gás natural tenha um crescimento importante nos próximos anos. Em um cenário de referência, a fonte saltará dos atuais 8,7% (ANEEL, 2020) para 15,5% da geração de energia elétrica em 2029 (MME/EPE, 2020). Essa fração pode ser ainda maior, caso seja possível viabilizar a redução dos custos envolvidos com essa tecnologia. Dentre eles, a própria localização de térmicas na região litorânea permite com que a água do mar seja utilizada nos processos de resfriamento das plantas. Isso acarreta uma redução nos impactos ambientais da fonte, o que está diretamente relacionado com os assuntos tratados nos próximos capítulos deste livro.

## 2.4 Referências

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *Resolução normativa n. 440*, de 5 de julho de 2011. [Estabelece os critérios para a consideração de usinas não simuladas individualmente nos modelos computacionais de planejamento da operação e formação de preço]. Brasília, DF: ANEEL, 2011.

\_\_\_\_\_. *Atlas de Energia Elétrica do Brasil*. 3. ed. Brasília, DF: ANEEL, 2008.

BERTONE, A. C.; BUENO, M. L.; TOMASI, R. de P. K.; DETZEL, D. H. M. Accumulation and run-of-the-river hydropower plants: a case study of the Brazilian hydroenergetic system. *In: IAHR WORLD CONGRESS*, 38, 2019, Panama City. *Proceedings* [...]. Panama City: International Association for Hydro-Environment Engineering and Research, 2019. p. 2013-2019.

BRUCKNER T. *et al.* Energy Systems. *In: Edenhofer, O. et al. (org.). Climate Change 2014: mitigation of climate change. Contribution of working group III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge e Nova York: Cambridge University Press, 2014, cap. 7. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3/>>. Acesso em: 27 abr. 2020.

CCEE – CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. *Deck de preços do modelo NEWAVE*, março de 2020. Disponível em: <<https://www.ccee.org.br/ccee/documentos/NW202003>>. Acesso em: 28 abr. 2020.

EC – EUROPEAN COMMISSION. *Energy Roadmap 2050: impact assessment and scenario analysis*. 2011. Disponível em: <[https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/roadmap2050\\_ia\\_20120430\\_en\\_0.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/roadmap2050_ia_20120430_en_0.pdf)>. Acesso em: 27 abr. 2020.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Balanco Energético nacional 2019: ano base 2018*. Rio de Janeiro: EPE, 2019. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2019>>. Acesso em: 28 abr. 2020.

\_\_\_\_\_. *Mudanças climáticas e desdobramentos sobre os estudos de planejamento energético: considerações iniciais*. Documento de apoio ao PNE 2050. Rio de Janeiro: EPE, 2018. Disponível em: <<https://bit.ly/3088WtC>>. Acesso em: 28 jul. 2020.

GONZALEZ-SALAZAR, M. A.; KIRSTEN, T.; PRCHLIK, L. Review of the operational flexibility and emissions of gas- and coal-fired power plants in a future with growing renewables. *Renew. Sust. Energ. Ver.*, v. 82, p. 1497-1513, 2018.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *World Energy Outlook 2018: executive summary*. 2018. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2018>>. Acesso em: 27 abr. 2020.

\_\_\_\_\_. *Key World Energy Statistics*. 2019a. Disponível em: <<https://webstore.iea.org/key-world-energy-statistics-2019>>. Acesso em: 27 abr. 2020.

\_\_\_\_\_. *World Energy Outlook 2019: executive summary*. 2019b. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019>>. Acesso em: 27 abr. 2020.

\_\_\_\_\_. *Electricity Information: overview*. 2019c. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/electricity-information-2019>>. Acesso em: 27 abr. 2020.

MAC KINNON, M. A.; BROUWER, J.; SAMUELSEN, S. The role of natural gas and its infrastructure in mitigating greenhouse gas emissions, improving regional air quality, and renewable resource integration. *Prog. Energ. Combust.*, v. 64, p. 62-92, 2018.

MME/EPE – MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Plano Decenal de Expansão de Energia 2029*. Brasília: MME/EPE, 2020. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-pde>>. Acesso em: 30 abr. 2020.

\_\_\_\_\_. *Plano Decenal de Expansão de Energia 2020*. Brasília: MME/EPE, 2011. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-pde>>. Acesso em: 30 abr. 2020.

\_\_\_\_\_. *Plano Nacional de Energia 2030*. Brasília: MME/EPE, 2007. Disponível em: <<https://bit.ly/2XlQgVx>>. Acesso em: 28 jul. 2020.

ONS – OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. *Energia agora: carga de geração*. 2020a. Disponível em: <<http://ons.org.br/paginas/energia-agora/carga-e-geracao>>. Acesso em: 28 abr. 2020.

\_\_\_\_\_. *Mapa do Sistema de Transmissão: horizonte 2024*. 2020b. Disponível em: <<http://ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/mapas>>. Acesso em: 28 abr. 2020.

# 3

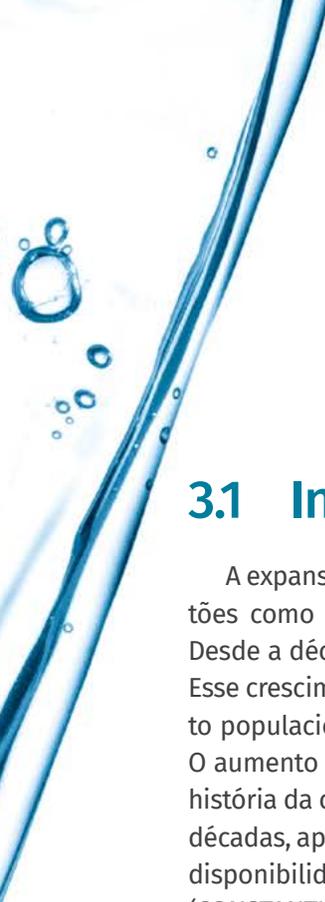
## Disponibilidade Hídrica

Nicole Machuca Brassac de Arruda

Marianne Schaefer França Sieciechowicz

Ana Carolina Canossa Becker





## 3.1 Introdução

A expansão das atividades da sociedade acabou por impactar em questões como acesso, conservação e consumo de água doce (MMA, 2006). Desde a década de 80, a demanda por água cresce, em média, 1% ao ano. Esse crescimento advém de uma combinação complexa entre o crescimento populacional e as mudanças nos padrões de consumo (UNESCO, 2019). O aumento da pressão sobre os rios e lagos é um fator que acompanha a história da civilização. A título de comparação, observa-se que a cada duas décadas, aproximadamente, a demanda por água duplica. Por outro lado, a disponibilidade de água, nos últimos 50 anos, foi reduzida em mais de 60% (CONSTANTINOV, 2010<sup>1</sup> *apud* BRITO; LOPES; ANJOS-NETA, 2019).

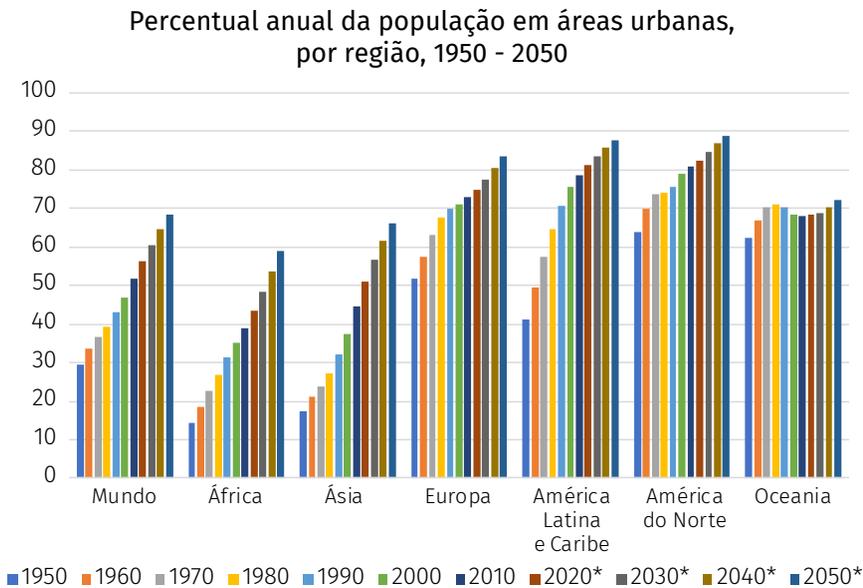
Além do aumento da população humana, em números, a migração de populações anteriormente instaladas em ambientes rurais e campos para as grandes cidades elevou a necessidade por água doce ao longo dos anos. Segundo estimativas da ONU, em 2014, a população urbana mundial era de 3,4 bilhões e passará para 6,3 bilhões até 2050 (SENADO FEDERAL, 2014).

---

1 CONSTANTINOV, G. Novos paradigmas dos créditos ambientais. In: FARIAS, T.; COUTINHO, F. S. N. (Coord.). *Direito Ambiental: o meio ambiente na contemporaneidade*. Belo Horizonte: Fórum, 2010.

A Figura 3.1 ilustra o crescimento da população urbana em termos mundiais e por região. Os valores são apresentados em percentuais a cada 10 anos, desde 1950, com estimativas de crescimento para 2020, 2030, 2040 e 2050. O que se observa é um constante crescimento da população que vive nas cidades.

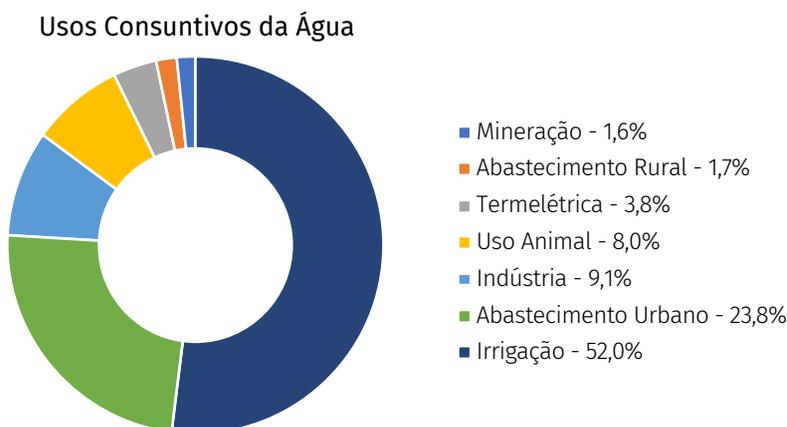
Com aumento da densidade populacional, houve consequente aumento na demanda de alimentos, energia e água potável, e em especial em áreas urbanas, também por água para consumo industrial (SANTANA *et al.*, 2001) e lançamento de efluentes.



**Figura 3.1:** Percentual de população vivendo em áreas urbanas. Valores médios mundiais e por região. Períodos com \* são estimativas. Fonte: Adaptado de ONU (2018).

A produção de alimentos faz uso de água tanto em processos industriais quanto para a irrigação. Dentre as atividades de uso consuntivo da água (em que as águas são retiradas das coleções hídricas), a irrigação destaca-se com mais de 50% das demandas do uso da água no Brasil (ANA, 2019a), conforme observa-se na Figura 3.2. Em 2018, quase

90% das outorgas em rios federais eram correspondentes à irrigação, abastecimento urbano e rural e uso industrial (ANA, 2019b).



**Figura 3.2:** Demanda de usos consuntivos de água no Brasil, por setor, em valores percentuais. Fonte: Adaptado de ANA (2019b).

Em comparação com países europeus, o gasto de água na agricultura brasileira, em termos proporcionais da vazão disponível, é muito maior. Por exemplo, na Grã-Bretanha, a atividade agrícola utiliza somente 3% da vazão do país. Outros países, como Estados Unidos, já apresentam valores mais próximos à realidade brasileira, com 41% de toda a água consumida pela agricultura, especialmente na irrigação. Em países como China e Índia, os valores estão próximos de 70% (AUGUSTO *et al.*, 2012).

No tocante às hidrelétricas, observa-se que existem mais de 800 empreendimentos desse caráter espalhados pelo território nacional, que visam suprir a demanda por eletricidade (SANTANA *et al.*, 2001; ANA, 2019b). Apesar de se tratar de um uso não consuntivo (que não retira água das coleções hídricas), assim como a diluição de efluentes, também pode afetar a qualidade na qual a água é devolvida ao corpo receptor.

Acredita-se que, com a intensificação dos efeitos das mudanças climáticas, os níveis de estresse sobre os recursos hídricos continuam aumentando, à medida que a demanda por água cresce (UNESCO, 2019). Segundo Wada e Bierkens (2014), o uso racional dos recursos hídricos é a

chave para o desenvolvimento sustentável, desenvolvimento econômico e produção de alimentos.

Dessa forma, observa-se a necessidade de gestão dos recursos hídricos, visando a sua manutenção para a sustentabilidade dos setores produtivos, das atividades domésticas, bem como e, principalmente, para a preservação de um ecossistema equilibrado.

## 3.2 Panorama mundial

A água é essencial para a vida no Planeta e se apresenta de forma abundante na superfície terrestre. Estima-se que 2/3 da superfície do globo sejam cobertos por água, perfazendo um potencial hídrico estimado em 1,4 bilhões de m<sup>3</sup> (ANDREOLI *et al.*, 2003).

Entretanto, menos de 3% desse total é de água doce. Também se deve observar que, mesmo se tratando de água doce, uma parcela significativa desses 3% (quase 70%) se encontra em situação que não permite acesso, seja por questões logísticas, seja pelo custo de exploração. Considerando-se, então, a água livremente disponível, obtém-se um percentual inferior a 1% do total da água doce, que se refere a rios, lagos, água disponível no solo e nos lençóis superficiais (ANA, 2020a; ANDREOLI *et al.*, 2003; ESTEVES, 1998).

A Figura 3.3 ilustra os percentuais de água doce e demais tipos no mundo. A Figura 3.3a demonstra toda a água disponível no Planeta, em que a água salgada representa mais de 95%. Desse total, apenas 2,5% representam água doce (percentual destacado no gráfico). Na Figura 3.3b, o total de água doce existente no globo (2,5% do gráfico anterior) é apresentado em categorias de acesso, sendo que a maior parte (mais de 65%) encontra-se em formas congeladas e de difícil acesso, como calotas polares e glaciares ou ainda na forma de água subterrânea (mais de 30% do total). Água doce de mais fácil acesso restringe-se a 1,2% disposto no gráfico. A Figura 3.3c foca somente na água doce de superfície (1,2% do gráfico anterior), em que rios e lagos perfazem um total de, aproximadamente, 21% (SHIKLOMANOV, 1998).

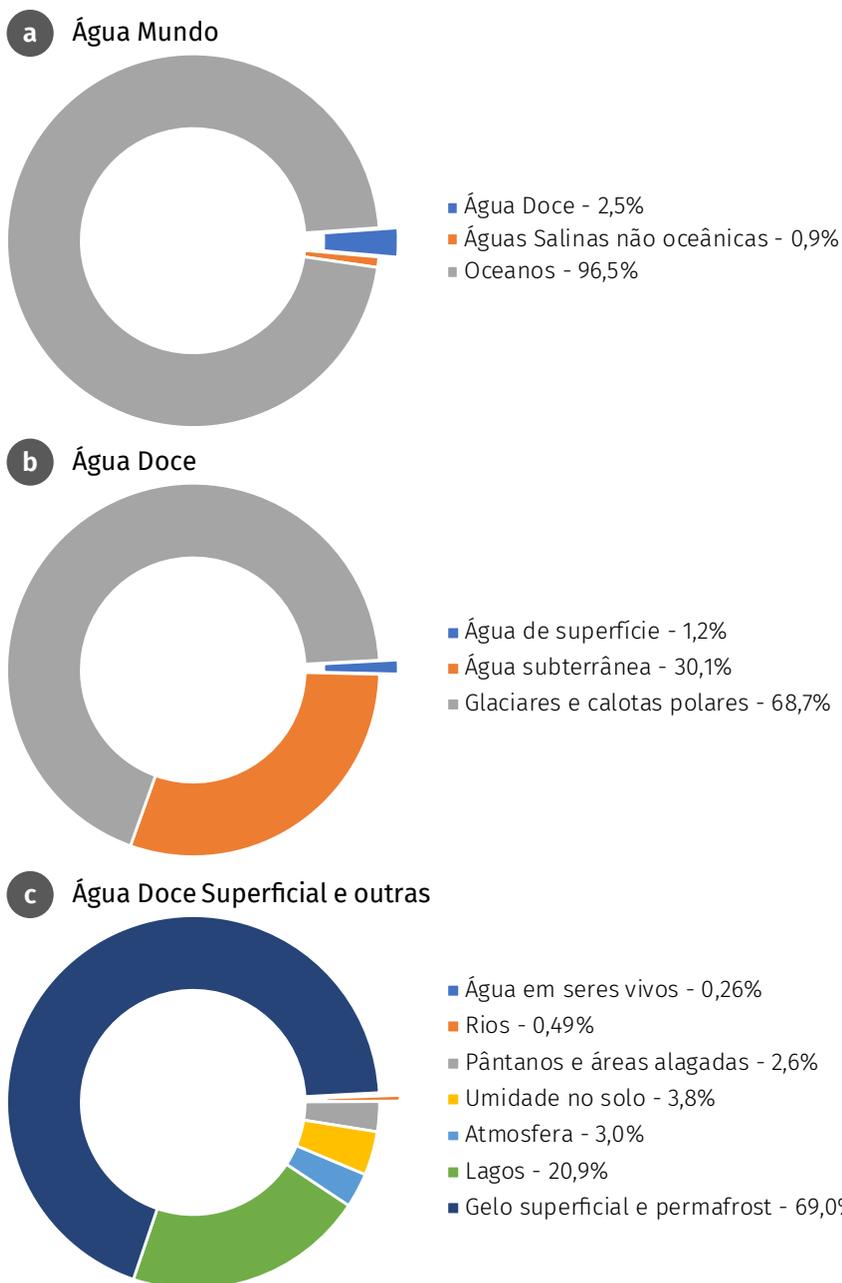
Ainda assim, quando se consideram valores absolutos de água doce, verifica-se que a água doce disponível, especialmente em rios, que

constituem a maior fonte de água doce para ambientes urbanos, é um percentual ínfimo, próximo de 0,0002% do total de água no Planeta (SHIKLOMANOV, 1998). A Tabela 3.1 ilustra estes valores percentuais absolutos, em termos aproximados.

**Tabela 3.1:** Tipos de água em valores percentuais absolutos no Planeta.  
Fonte: Adaptado de Shiklomanov (1998).

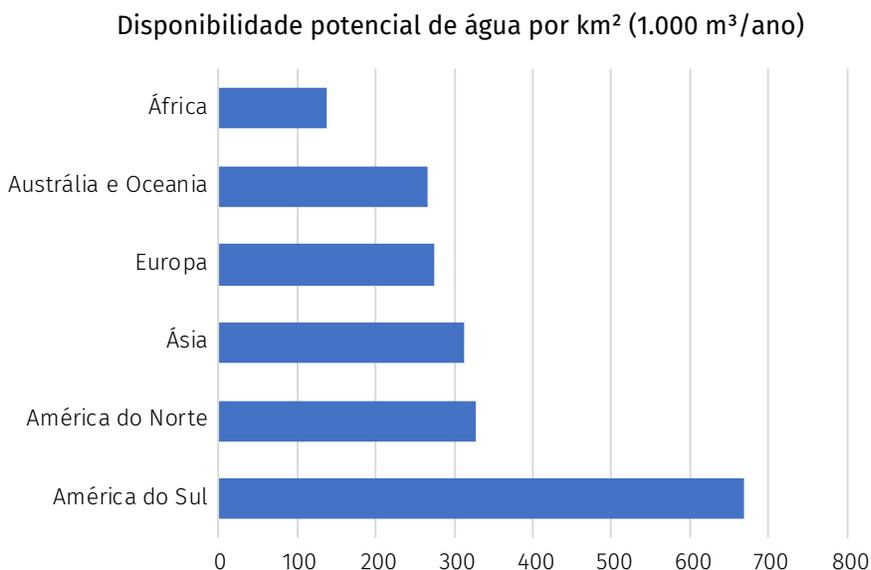
Água no Mundo	Percentual, em valores absolutos
Oceanos, mares e baías	96,54
Calotas polares, glaciares, gelo permanente	1,74
Água subterrânea	1,69
→ <i>Água doce</i>	0,76
→ <i>Salina</i>	0,93
Umidade do solo	0,001
Regiões congeladas (terrestres) e Permafrost	0,022
Lagos	0,013
→ <i>Água doce</i>	0,007
→ <i>Salina</i>	0,006
Atmosfera	0,001
Pântanos	0,0008
Rios	0,0002
Água em seres vivos	0,0001

Dentro desse contexto, é possível reconhecer a água como recurso natural finito, uma vez que o uso acima da capacidade de regeneração do recurso está dificultando a disponibilidade de água de qualidade para possíveis usos e tratamentos.



**Figura 3.3:** Valores percentuais da água no mundo. Os percentuais destacados do gráfico se transformam em 100% no gráfico seguinte.  
 Fonte: Adaptado Shiklomanov (1998).

Não obstante, esse recurso é distribuído de maneira heterogênea entre as regiões da Terra, o que pode se tornar um fator limitante para a manutenção da vida em várias áreas do Planeta. A Figura 3.4 demonstra a característica desigual da disponibilidade hídrica entre os continentes. Na América do Sul, observa-se a maior disponibilidade potencial de água por km<sup>2</sup>, chegando a 672.000 m<sup>3</sup>/ano, enquanto na África o valor é próximo de 134.000 m<sup>3</sup>/ano (ESTEVES, 1998).



**Figura 3.4:** Disponibilidade potencial de água por km<sup>2</sup> em cada continente.  
Fonte: Adaptado de Andreoli *et al.* (2003).

Sabe-se que mais de 2 bilhões de pessoas vivem em países com alto estresse hídrico e cerca de 4 bilhões de pessoas sofrem escassez severa de água durante, pelo menos, um mês do ano (UNESCO, 2019). A Tabela 3.2 ilustra a disponibilidade hídrica mundial, e o percentual populacional em relação à população mundial, de acordo com os continentes. De acordo com Augusto *et al.* (2012), o percentual de pessoas que sofrem cronicamente com a escassez de água era de 8% na virada do século. No entanto, esse valor deve subir para 45% até 2050.

**Tabela 3.2:** Disponibilidade hídrica e percentual de habitantes, em termos mundiais. Fonte: Augusto *et al.* (2012).

Região	Disponibilidade Hídrica	População local
África	15,0%	10,0%
Américas	13,6%	41,0%
Ásia	59,8%	31,6%
Europa	10,9%	7,0%
Oceania / Antártida	0,5%	10,3%

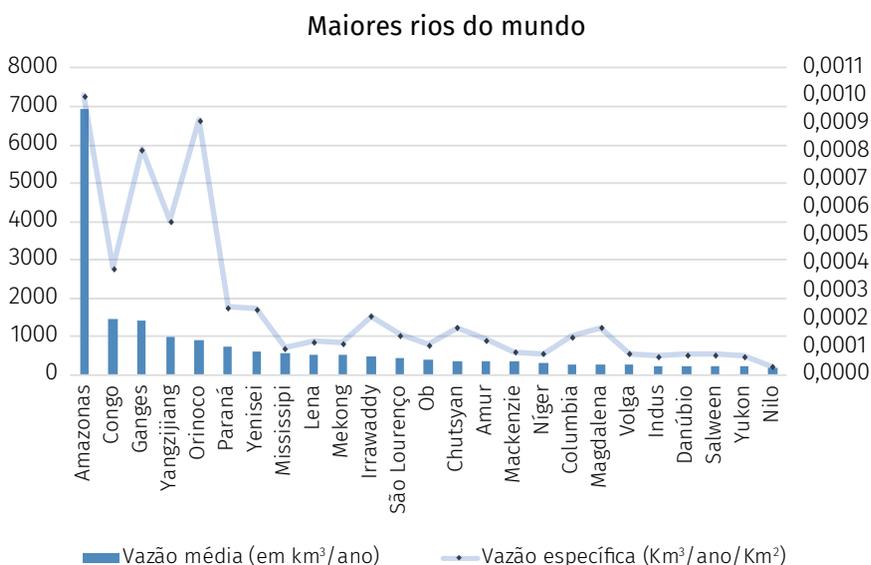
Ainda assim, deve-se considerar que a quantidade de água disponível não representa exatamente aquela que pode ser utilizada para as atividades humanas ou ainda para a manutenção da biota. Nesse quesito, deve-se observar também a qualidade da água (ANDREOLI *et al.*, 2003). De acordo com o uso desejado, uma determinada qualidade é exigida, sendo necessário suprir os requisitos mínimos para a manutenção desses múltiplos usos. Dentre os usos antrópicos, podem ser citados o abastecimento doméstico e industrial, irrigação, geração de energia elétrica, navegação, pesca e recreação.

Os diferentes usos da água podem levar a conflitos de interesse, especialmente se esse recurso ocorre em quantidade limitada e/ou qualidade insuficiente. De acordo com Oliveira e Fiorenze (2011), eventos climáticos extremos (temperatura, seca, enchentes) poderão afetar direta e indiretamente a disponibilidade hídrica. Segundo tais autores, a magnitude e a frequência de vazões máximas tendem a aumentar na maior parte do Planeta. Também comentam que as vazões mínimas serão cada vez menores em muitas regiões do globo, incorrendo em conflitos entre a oferta e a demanda de água.

Nesse âmbito, verifica-se que o panorama mundial de recursos hídricos aponta, cada vez mais, para a “crise da água”. Como alternativa a essa tendência, a gestão racional dos recursos hídricos se mostra como uma solução.

### 3.3 Panorama do Brasil

A Figura 3.5 ilustra os rios com as maiores vazões médias anuais no Planeta. Avaliando a imagem, observa-se que o rio Amazonas é o que apresenta maior vazão média anual, bem como a maior vazão específica. Esse rio nasce na Cordilheira dos Andes, no Peru, no entanto, mais de 60% de sua bacia encontra-se em território brasileiro. Segundo ANA (2020b), o rio apresenta 6.900 km de extensão e lança, em média, 210.000 m<sup>3</sup>/s de água no Oceano Atlântico.



**Figura 3.5:** Maiores rios do mundo em vazão média (km<sup>3</sup>/ano) e suas respectivas vazões específicas (em km<sup>3</sup>/ano/km<sup>2</sup>).  
Fonte: Adaptado de Shiklomanov (1998).

Estima-se que, aproximadamente, 12% da vazão mundial de água doce seja brasileira. Conforme observado anteriormente, a maior parte é relativa ao rio Amazonas (cerca de 70%) (AUGUSTO *et al.*, 2012; MEES, 2012). Isso demonstra a posição confortável do Brasil em termos de vazões mundiais. Considerando que quase um terço da água doce disponível na Terra encontra-se na forma de aquíferos, o Brasil também se encontra bem ser-

vido, uma vez que o país possui dois dos maiores aquíferos do mundo: o Guarani, na Região Sul, e o de Alter do Chão, na Região Norte (SENADO FEDERAL, 2014).

No entanto, a distribuição dos recursos hídricos no país é heterogênea. Tanto em disponibilidade quanto em demanda. A Região Norte do país concentra apenas 5% da população brasileira, entretanto, conta com aproximadamente 80% da disponibilidade hídrica nacional. O inverso ocorre com as regiões litorâneas do país, que concentram mais de 45% da população da federação e detêm apenas 3% dos recursos hídricos (AUGUSTO *et al.*, 2012; ANA, 2020c). Nas Regiões Sul e Sudeste, a disponibilidade hídrica é de 12,5% do total brasileiro, sendo que vivem ali 60% da população. Quanto à disponibilidade hídrica *per capita*, também se observa essa disparidade. Como exemplos, observa-se que a disponibilidade hídrica *per capita* é de 1.835 m<sup>3</sup>/hab./ano, na bacia hidrográfica do Atlântico Leste, e de 628.938 m<sup>3</sup>/hab./ano, na bacia Amazônica (AUGUSTO *et al.*, 2012; MEES, 2020). A Tabela 3.3 ilustra a disponibilidade hídrica brasileira e o percentual de população, por região.

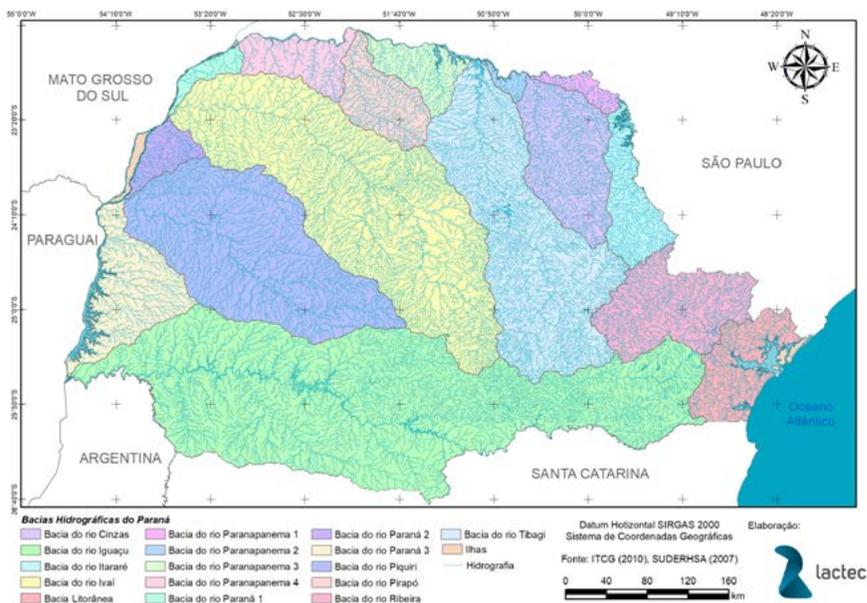
**Tabela 3.3:** Disponibilidade hídrica e percentual de habitantes por região do país. Fonte: Augusto *et al.* (2012).

Região	Disponibilidade Hídrica	População local
Norte	68,5%	6,8%
Nordeste	3,3%	28,9%
Sudeste	6,0%	42,7%
Sul	6,5%	15,1%
Centro-Oeste	15,7%	6,4%

Segundo Oliveira e Fiorenze (2011), mesmo com a implantação de instrumentos de gestão de recursos hídricos no Brasil, conflitos entre os diferentes setores de usuários são constantes. Esse fato decorreria do crescimento da população e também da intensificação das atividades industriais e do agronegócio, aliados à urbanização.

De acordo com ANA (2019a), no ano de 2015, 69,3% dos corpos hídricos do Brasil apresentaram boa qualidade. Apesar da individualidade de cada unidade da federação, a gestão da água não pode ser realizada a partir de divisas políticas, mas sim de marcos geográficos. Bacias hidrográficas são áreas de drenagem de todos os rios (independente do porte) que convergem para um rio principal em uma dada região. Todas as atividades antrópicas realizadas em uma bacia hidrográfica refletem, de alguma forma, na qualidade e na quantidade das águas ali disponíveis, numa relação de causa e efeito (PARANÁ, 2010). No Brasil, a legislação federal de recursos hídricos, Lei n. 9.433/97, determina a gestão das águas de forma participativa e descentralizada, sendo esta realizada por bacias hidrográficas, a partir de seus comitês (BRASIL, 1997).

O território do estado do Paraná encontra-se dividido em 16 bacias hidrográficas, a saber: Bacia do rio das Cinzas, Itararé, Ivaí, Litorânea, Paranapanema 1, Paranapanema 2, Paranapanema 3, Paranapanema 4, Paraná 1, Paraná 2, Paraná 3, Piquiri, Pirapó, Ribeira, Tibagi e Iguaçu, conforme a Figura 3.6 (SUDERHSA, 2007).



**Figura 3.6:** Bacias hidrográficas paranaenses.

A bacia hidrográfica do rio Iguaçu é a maior do estado do Paraná, com área total de 70.800 km<sup>2</sup>. Mais de 80% desse total é paranaense, sendo que 16,5% encontram-se no estado de Santa Catarina e 3% na Argentina. As nascentes do rio localizam-se na confluência do rio Atuba e Iraí, com desnível de 830 m percorridos em 1.060 km, da sua origem até a desembocadura, no rio Paraná (BAUMGARTNER *et al.*, 2012; PARANÁ, 2015).

Os rios da bacia hidrográfica do rio Iguaçu foram enquadrados pela Portaria Surehma 020/92 (SUREHMA, 1992), na qual a maior parte dos cursos de água está enquadrada na Classe 2 (BRASIL, 2005). Recentemente, em 2013, o Comitê de Bacias do Alto Iguaçu e Afluentes do Ribeira (COLIAR) aprovou novo enquadramento para os rios desta sub-bacia, conforme Tabela 3.4. A meta de qualidade estabelecida por esse enquadramento, em função dos usos preponderantes mais restritivos dos recursos hídricos, tanto os atuais quanto os pretendidos, deve ser atendida até 2039 (IAP, 2018).

**Tabela 3.4:** Enquadramento resumido dos corpos de água da Bacia do Alto Iguaçu. Fonte: IAP (2018).

Rio	Classe (2013)
Pequeno, Piraquara	1, 2 ou 3*
Cotia, Faxinal, Miringuava Mirim, Curral das Éguas, Arroio Biazes	2
Palmital, Miringuava, Maurício, Despique, Passaúna, Verde, Izabel Alvez	2 ou 3*
Iraí, Canal Sanepar Iguaçu, Arroio Prensa, Arroio Espigão, do Moinho	3
Barigui	2, 3 ou 4 *
Belém, Iguaçu, Itaquí	3 ou 4*
Atuba, Ribeirão Padilha, Ressaca, Arroio Mascate, Ribeirão Divisa, Avariú, Alto Boqueirão, Ribeirão Ponta Grossa, dos Patos, Cambuí, da Cachoeira.	4

\* Nota: Enquadramento variando por trechos do mesmo rio.

Mais de 80% da demanda hídrica da bacia do rio Iguaçu é de mananciais superficiais. Quanto aos usuários, mais de 62% dessa demanda é

para o abastecimento público. Os usos dos setores industrial e agrícola compõem 18% e 10%, respectivamente. Os demais percentuais são para a pecuária (9%) e o setor minerário (menos de 1%). Dentre as sub-bacias do Iguaçu, a do Alto Iguaçu é responsável pelo atendimento de 78% da demanda de abastecimento público da bacia do Iguaçu (PARANÁ, 2010).

## 3.4 Panorama do Alto Iguaçu

A bacia hidrográfica do rio Iguaçu é dividida em três sub-bacias, o Alto Iguaçu, o Médio Iguaçu e o Baixo Iguaçu. A sub-bacia do Alto Iguaçu, na qual está localizado o estudo de caso a ser apresentado no capítulo 6, compreende a região das nascentes do rio e está em região de grande adensamento populacional e atividades comerciais e industriais, na região metropolitana de Curitiba. Já nas sub-bacias do Médio Iguaçu e do Baixo Iguaçu predominam a agropecuária, com destaque para o cultivo da soja e do trigo (BAUMGARTNER *et al.*, 2012).

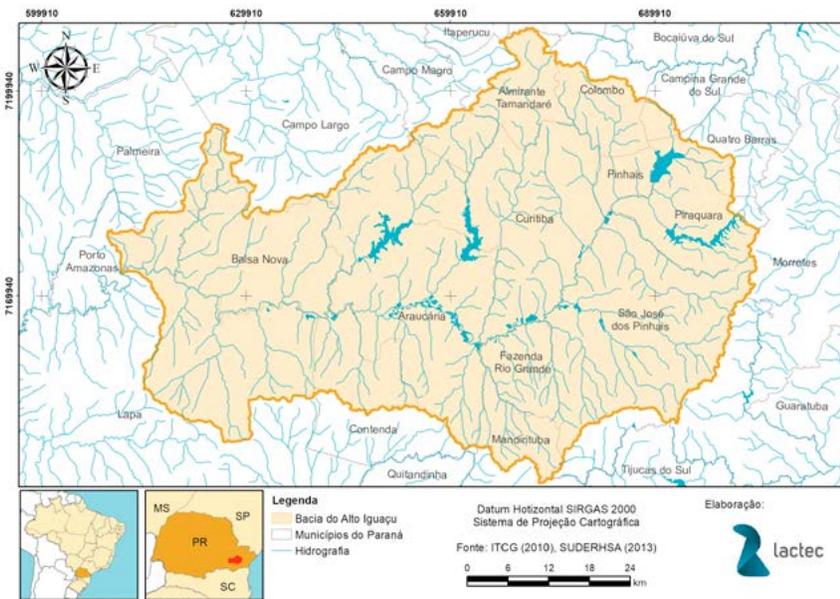
A definição da área da sub-bacia do Alto Iguaçu é motivo de dissonância entre os pesquisadores. No presente documento, o limite da bacia do Alto Iguaçu foi traçado com base no *software* “Regionaliza 2014”<sup>2</sup>, em que são feitas as regionalizações de parâmetros hidrológicos a partir das coordenadas preestabelecidas, sendo usadas as Ottobacias já delimitadas tanto pela Agência Nacional de Águas quanto do Águas Paraná. De acordo com Baumgartner *et al.* (2012), a sub-bacia do Alto Iguaçu inicia-se nas cabeceiras do rio e estende-se até as corredeiras situadas no município de Porto Amazonas. Na atualização do Plano de Bacias do Alto Iguaçu e Afluentes do Alto Ribeira, aprovado em 2013, a área de estudo é delimitada a montante da bacia do Iguaçu, cruzando os municípios de Colombo, Campina Grande do Sul, Piraquara, Morretes e São José dos Pinhais. A jusante, cruza os municípios de Palmeira, Lapa e Porto Amazonas, chegando no ponto de monitoramento de

---

2 Software de regionalização de parâmetros hidrológicos desenvolvido para a empresa Sanepar entre os anos de 2012 e 2014, dentro do projeto intitulado “Atualização do Programa de Regionalização de Vazões em Pequenas Bacias Hidrográficas” (LACTEC, 2014).

qualidade da água código 65035000 (Coordenadas em UTM: X= 612183,56 m; UTM Y: 7173677,72 m), possuindo área total de 3.624,21 km<sup>2</sup>.

Essa região destaca-se pela ocorrência de diversos ambientes preservados em seu território, com aproximadamente 15% dos remanescentes florestais do Estado. Na Serra do Mar, ao leste, ocorrem as nascentes dos tributários do Iguaçu. Parte dessas nascentes é protegida pela Floresta Atlântica. A bacia é gerida pelo Comitê de Bacias do Alto Iguaçu e Afluentes do Alto Ribeira, estabelecido pelo Decreto n. 5.878/05 (PARANÁ, 2015).



**Figura 3.7:** Delimitação geográfica da bacia do Alto Iguaçu.

Localizada entre o primeiro e o segundo planaltos paranaenses, a sub-bacia do Alto Iguaçu tem sido exaustivamente estudada, visto a relevância em termos de preservação e abastecimento urbano de Curitiba e região metropolitana. Porto *et al.* (2007) constataram que parte majoritária dos rios da bacia tem qualidade ruim, comparativamente inferiores

às pretendidas para as Classes 3 e 4 (BRASIL, 2005). Dados mais recentes, de 2010 a 2018, demonstram que o corpo principal da bacia, o rio Iguaçu, apresenta qualidade “poluída a muito poluída, de Curitiba (montante) a Porto Amazonas (jusante)” (IAP, 2018).

O crescente aumento da população que vive na bacia do Alto Iguaçu tem elevado a pressão sobre os mananciais. A bacia apresenta alta densidade de habitantes, cerca de cinco vezes superior à média do Estado (251,68 hab./km<sup>2</sup>). Além da rápida expansão urbana, que traz problemas como impermeabilização do solo e aumento de cargas poluentes advindas do saneamento urbano, existem também as fragilidades ambientais relativas à baixa declividade do rio Iguaçu (e propensão a enchentes); à ocupações irregulares das várzeas dos rios e à insuficiência de vazões para diluição de efluentes lançados (MARIN *et al.*, 2007; PARANÁ, 2015).

Entre as principais causas da deterioração da qualidade da água na bacia, destacam-se os efluentes domésticos e industriais. Dentre as bacias paranaenses, a do Alto Iguaçu concentra o maior número de usuários e também a maior demanda do Estado, cerca de 23%. Desse total, 90% é advinda de ambientes límnicos superficiais. Como reflexo dessa demanda, a bacia é a maior geradora de efluentes do Estado, com cerca de 75% de efluentes tratados (PARANÁ, 2015).

No tocante ao uso industrial, a condição ruim da qualidade da água dos mananciais, em especial, no corpo hídrico principal, é influenciada, principalmente, pelos afluentes da margem direita, em especial os rios Belém, Ivo, Atuba, Bacacheri, Barigui, Água Verde, Fanny, Parolin e ribeirão Padilha, que permeiam a capital do Estado. Tais corpos de água foram caracterizados como “Poluídos e Extremamente Poluídos”, com altos teores de coliformes fecais e matéria orgânica e baixa concentração de oxigênio dissolvido, características totalmente inadequadas à manutenção da vida aquática (PARANÁ, 2010).

Dessa forma, percebe-se que o aumento populacional, bem como a grande geração de poluição na Região Metropolitana de Curitiba impacta negativamente a disponibilidade hídrica na região.

## 3.5 Referências

- ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. *Água no mundo*. Disponível em: <<https://www.ana.gov.br/panorama-das-aguas/agua-no-mundo#>>. Acesso em: 17 fev. 2020a.
- \_\_\_\_\_. *Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2019: Informe anual*. Brasília: ANA, 2019b. 100 p.
- \_\_\_\_\_. *Manual de usos consuntivos da água no Brasil*. Brasília: ANA, 2019a. 75 p.
- \_\_\_\_\_. *Quantidade de água*. Disponível em: <<https://www.ana.gov.br/panorama-das-aguas/quantidade-da-agua>>. Acesso em: 17 fev. 2020c.
- \_\_\_\_\_. *Rio Amazonas*. Disponível em: <<https://www.ana.gov.br/panorama-das-aguas/divisooes-hidrograficas/rios-do-brasil/rio-amazonas>>. Acesso em: 17 fev. 2020b.
- ANDREOLI, C. V.; HOPPEN, C.; PEGORINI, E. S.; DALARMI, O. A crise da água e os mananciais de abastecimento. In: ANDREOLI, C. V. (org.). *Mananciais de abastecimento: planejamento e gestão – estudo de caso do Altíssimo Iguaçu*. Curitiba: Sanepar, Finep, 2003. p. 35-89.
- AUGUSTO, L. G. S.; GURGEL, I. G. D.; CÂMARA-NETO, H. F. C.; MELO, C. H.; COSTA, A. M. O contexto global e nacional frente aos desafios do acesso adequado à água para consumo humano. *Ciência & Saúde Coletiva*, v. 17, n. 6, p. 1511-1522, 2012.
- BAUMGARTNER, G.; PAVANELLI, C. S.; BAUMGARTNER, D.; BIFI, A. G.; DEBONA, T.; FRANA, V. A. *Peixes do baixo rio Iguaçu*. Maringá: Eduem, 2012. 203 p.
- BRASIL. Lei n. 9.433 de 08 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei n. 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei n. 7.990, de 28 de dezembro de 1989. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 09 de janeiro de 1997.

- \_\_\_\_\_. CONAMA - Conselho Nacional de Meio Ambiente. Resolução CONAMA n. 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 18 de março de 2005.
- BRITO, A. D.; LOPES, J. C.; ANJOS-NETA, M. M. S. Governança hídrica: novos caminhos para a gestão das águas. In: JORGE, W. J. (org.) *Meio ambiente e sustentabilidade: conceitos e aplicações*. Maringá: Uniedsul, 2019. p. 5-15.
- ESTEVES, F. A. *Fundamentos de limnologia*. São Paulo: Interciência, 1998.
- IAP – INSTITUTO AMBIENTAL DO PARANÁ. *Qualidade das águas: rios da Bacia do Alto Iguaçu, na região metropolitana de Curitiba, 2010 a 2018*. Curitiba: IAP, 2018. 76 p. Disponível em: <[http://www.iap.pr.gov.br/arquivos/File/Qualidade\\_das\\_aguas/Relatorio\\_Alto\\_Iguacu\\_2018.pdf](http://www.iap.pr.gov.br/arquivos/File/Qualidade_das_aguas/Relatorio_Alto_Iguacu_2018.pdf)>. Acesso em: 20 abr. 2020.
- LACTEC. *Atualização do Programa de Regionalização de Vazões em Pequenas Bacias Hidrográficas*. Relatório n. 4. Curitiba: LACTEC. 2014.
- MARIN, M. C. F. C.; SCUISSIATO, C., FERNANDES, C. S.; PORTO, M. F. A. Proposta preliminar de reenquadramento de corpos de água em classes e avaliação de seu risco de não atendimento: estudo de caso da bacia do Alto Iguaçu. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 17, São Paulo, 2007. *Anais [...]*. São Paulo: ABRH, 2007. p. 1 – 18.
- MEES, A. *Qualidade de água em reservatórios: Unidade 1. Reservatórios*. Brasília: ANA/UNESP. 57 p. Disponível em: <[https://capacitacao.ana.gov.br/conhecerh/bitstream/ana/74/2/Unidade\\_1.pdf](https://capacitacao.ana.gov.br/conhecerh/bitstream/ana/74/2/Unidade_1.pdf)>. Acesso em: 27 abr. 2020.
- MMA – MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. *Plano Nacional de Recursos Hídricos. Águas para o futuro: cenários para 2020: Volume 2*. Brasília: MMA, 2006. Disponível em: <[https://www.mma.gov.br/estruturas/161/\\_publicacao/161\\_publicacao03032011025235.pdf](https://www.mma.gov.br/estruturas/161/_publicacao/161_publicacao03032011025235.pdf)>. Acesso em: 06 abr. 2020.

- OLIVEIRA, L. F. C.; FIOREZE, A. P. Estimativas de vazões mínimas mediante dados pluviométricos na Bacia Hidrográfica do Ribeirão Santa Bárbara, Goiás. *Rev. bras. eng. agríc. ambient.*, v. 15, n. 1, p. 9-15, 2011.
- ONU – Organização das Nações Unidas. *2018 Revision of World Urbanization Prospects*. Disponível em: <<https://population.un.org/wup/>>. Acesso em: 15 abr. 2020.
- PARANÁ. *Bacias hidrográficas do Paraná: Séries Históricas*. Curitiba: ANA/SEMA, 2010. 140 p. Disponível em: <[http://pdsitoral.com/wp-content/uploads/2018/01/Revista\\_Bacias\\_Hidrograficas\\_do\\_Parana.pdf](http://pdsitoral.com/wp-content/uploads/2018/01/Revista_Bacias_Hidrograficas_do_Parana.pdf)>. Acesso em: 29 abr. 2020.
- \_\_\_\_\_. *Relatório de Avaliação Ambiental – RAA: Programa integrado de inclusão social e requalificação urbana família paranaense. Volume II – Anexos*. Curitiba: SEPL/SEDS/COHAPAR, 2015. 169 p. Disponível em: <[http://www.justica.pr.gov.br/sites/default/arquivos\\_restritos/files/migrados/File/familia\\_paranaense/materias/raa\\_vol2.pdf](http://www.justica.pr.gov.br/sites/default/arquivos_restritos/files/migrados/File/familia_paranaense/materias/raa_vol2.pdf)>. Acesso em: 29 abr. 2020.
- PORTO, M. F. A et al. Relatório parcial n. 12. Bacias Críticas: bases técnicas para a definição de metas progressivas para seu enquadramento e a integração com os demais instrumentos de gestão. FINEP, Curitiba, 2007.
- SANTANA, D. P.; BAHIA-FILHO, A. F. C.; COUTO, L.; BRITO, R. A. L. *Água: recurso natural, finito e estratégico*. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2001.
- SENADO FEDERAL. Escassez de água. *Em Discussão!* n. 23, p. 6-23. 2014. Disponível em: <[https://www12.senado.leg.br/emdiscussao/edicoes/escassez-de-agua/@@images/arquivo\\_pdf/](https://www12.senado.leg.br/emdiscussao/edicoes/escassez-de-agua/@@images/arquivo_pdf/)>. Acesso em: 14 abr. 2020.
- SHIKLOMANOV, I. World freshwater resources. In: GLEICK, P. H. (ed.) *Water in Crisis: A guide to the world's Fresh Water Resources*. New York: Oxford University Press, 1993. p. 13 – 24.

SUDERHSA - Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. *Bacias hidrográficas do Paraná*. Disponível em: <<http://www.aguasparana.pr.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=80>>. Acesso em: 22 abr. 2020.

SUREHMA – Superintendência dos Recursos Hídricos e Meio Ambiente. *Portaria Surhema n. 20/92 de 12 de maio de 1992*. Disponível em: <[http://www.aguasparana.pr.gov.br/arquivos/File/portarias/enquadramento\\_b\\_iguacu.pdf](http://www.aguasparana.pr.gov.br/arquivos/File/portarias/enquadramento_b_iguacu.pdf)>. Acesso em: 22 abr. 2020.

UNESCO – Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura. *World Water Development Report 2019*. Paris: UNESCO, 2019. 186 p.

WADA, Y.; BIERKENS, M. F. P. Sustainability of global water use: past reconstruction and future projections. *Environ. Res. Lett.*, v. 9, p. 1-17, 2014.

# 4

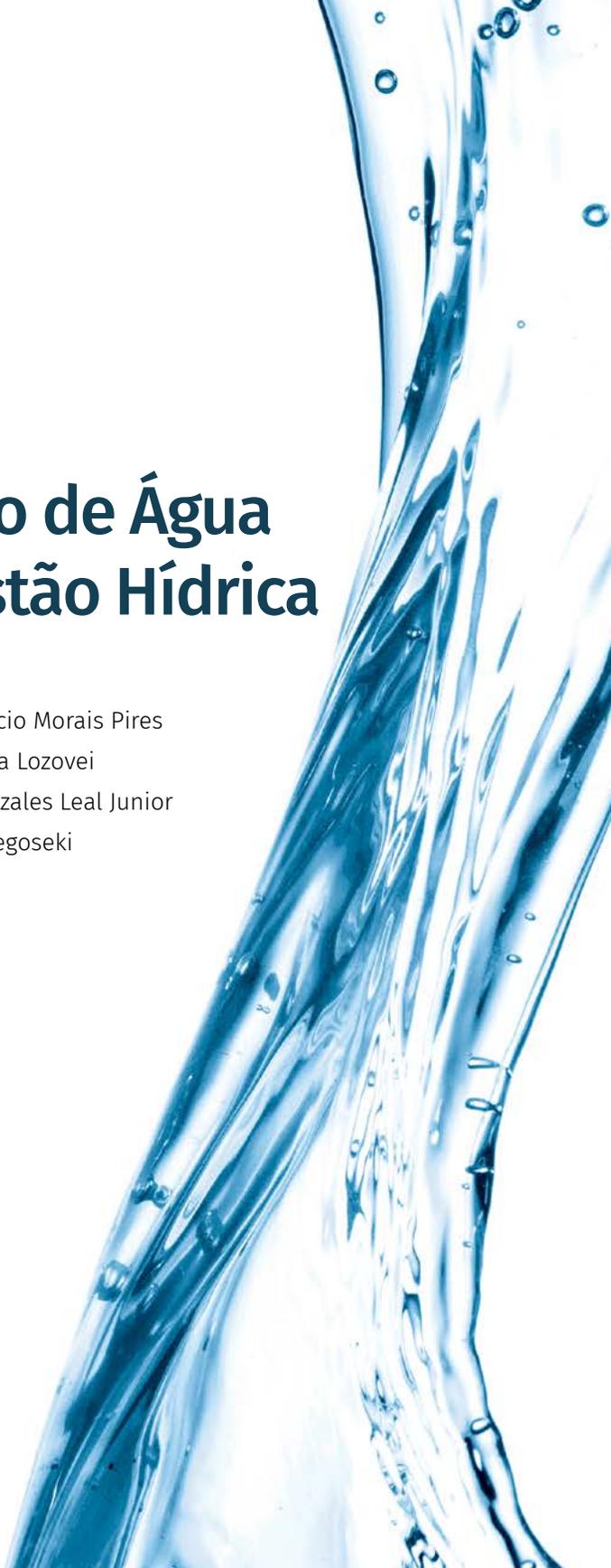
## Reúso de Água e Gestão Hídrica

Gheysa do Rocio Morais Pires

Jéssica Cristina Lozovei

Robinson Gonzales Leal Junior

Gleisy Kelly Negoseki





## 4.1 Introdução

A água é um recurso limitado e que necessita de políticas e práticas para a sua conservação e melhor aproveitamento, sendo a gestão hídrica essencial nesse processo. Segundo a diretriz adotada pelo Conselho Econômico e Social da Organização das Nações Unidas (ONU), “a não ser que haja grande disponibilidade, nenhuma água de boa qualidade deverá ser utilizada em atividades que tolerem águas de qualidade inferior” CNRH (2014). Nesse contexto, o reúso da água vem sendo empregado em diversas indústrias e projetos, visando à redução de custos associados à poluição e contribuindo para a proteção do meio ambiente, tanto em uma escala nacional quanto global. O reaproveitamento ou reúso da água é o processo pelo qual a água, tratada ou não, é reutilizada para o mesmo ou outros fins menos nobres, tais como lavagem de vias e pátios industriais, irrigação de jardins e pomares, nas descargas dos banheiros, etc. (ABNT, 1997). Outros exemplos são a recirculação da água em processos ou mesmo a utilização do efluente de uma indústria por outra.

A primeira regulamentação que tratou de reúso de água no Brasil foi a norma técnica NBR-13.969, de setembro de 1997 (ABNT, 1997), que apresentou alternativas de procedimentos técnicos para o projeto, construção e operação de tanques sépticos. A norma sugere quatro classes de reúso para os de esgoto de origem essencialmente doméstica ou com características similares, de acordo com as aplicações e padrões de qualidade, conforme apresentado na Tabela 4.1.

**Tabela 4.1:** Classes de água de reúso pela NBR 13.969, suas aplicações e respectivos padrões de qualidade. Fonte: Adaptado de NBR 13.969 (1997).

Água de Reúso	Aplicações	Padrões de Qualidade
Classe 1	Lavagem de carros e outros usos que requerem o contato direto do usuário com a água, com possível aspiração de aerossóis pelo operador	Turbidez < 5 uT Coliformes fecais < 200 NMP/100 mL Sólidos dissolvidos totais < 200 mg/L pH entre 6 e 8 Cloro residual entre 0,5 mg/L a 1,5 mg/L
Classe 2	Lavagem de pisos, calçadas e irrigação de jardins, manutenção de lagos e canais paisagísticos, exceto chafarizes.	Turbidez < 5 uT Coliformes fecais < 500 NMP/100 mL Cloro residual superior a 0,5 mg/L
Classe 3	Descargas em vasos sanitários.	Turbidez < 10 uT Coliformes fecais < 500 NMP/100 mL
Classe 4	Irrigação de pomares, cereais, forragens, pastagens para gado e outros cultivos através de escoamento superficial ou por sistema de irrigação pontual.	Coliformes fecais < 5000 NMP/100 mL Oxigênio dissolvido > 2,0 mg/L

Em 2005 o Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) publicou a Resolução n. 54 e em 2010 a Resolução n. 121, que estabelecem os critérios gerais para a prática de reúso direto não potável de água.

Nessas resoluções, são definidas as cinco modalidades de reúso de água:

- Reúso para fins urbanos;
- Reúso para fins agrícolas e florestais;
- Reúso para fins ambientais;
- Reúso para fins industriais;
- Reúso na aquicultura.

Entre as modalidades de reúso existentes, destacam-se a importância da ferramenta para preservação de mananciais, conservação de recursos hídricos para abastecimento público e o que envolve a preservação do meio ambiente e da saúde pública (CNRH, 2014).

O capítulo 5 deste livro reúne a legislação nacional e internacional sobre o reúso da água.

O reúso da água no Brasil também segue princípios de acordos internacionais, como os contidos na Agenda 21, resultado da Conferência Eco-92, realizada em 1992 no Rio de Janeiro. Esse acordo demonstra a importância do reúso da água como “[...] prática de racionalização e de conservação de recursos hídricos” (CNRH, 2014), podendo auxiliar na regulamentação da oferta e de sua demanda.

## 4.2 A importância do reúso da água na gestão hídrica

No Brasil, apesar da grande disponibilidade hídrica existente, há uma distribuição desigual da água em todo o território, tanto para a população quanto geograficamente. De acordo com o Manual de Usos Consuntivos da Água no Brasil (ANA, 2019), até 2030, o uso da água deve superar 2,5 milhões de litros por segundo, tendo um crescimento de 24% no país. Ainda de acordo com o órgão, os principais usos da próxima década serão: irrigação (1.313 m<sup>3</sup>/s), urbano (553 m<sup>3</sup>/s), industrial (305 m<sup>3</sup>/s), termelétricas (94 m<sup>3</sup>/s), uso animal (219 m<sup>3</sup>/s), rural (32 m<sup>3</sup>/s) e mineração (56 m<sup>3</sup>/s). Dessa forma compreende-se

que o reúso da água pode ser uma essencial ferramenta para a gestão dos recursos hídricos, seja para a conservação do meio ambiente, preservação de mananciais, melhor utilização da água e também como forma de atenuar os custos de cobrança pelo uso da água, em especial no setor industrial.

Nas regiões mais áridas, o reúso é de extrema importância para a agricultura, por exemplo, pois assim não se destinam águas de qualidade superior para a irrigação e, de acordo com Leite (2003), aplicar esgoto no solo pode ser uma excelente forma de controlar a poluição e também aumentar a disponibilidade hídrica nessas regiões. Um exemplo aplicado de recuperação econômica a partir do reúso da água aconteceu no Vale do Mesquital, no México, em que o uso do esgoto para irrigação fez aumentar a renda de quase zero para 4 bilhões de dólares por hectare, no ano de 1990 (CNA, 1993).

Na agricultura há diversos benefícios em se utilizar água de reúso, principalmente no que tange à questão econômica, já que esse setor é o que utiliza mais quantidade de  $m^3/s$  no Brasil. De acordo com Lavrador (1987), é importante também se atentar aos riscos do reúso, pois é possível haver contaminação de alimentos, de trabalhadores diretos e até mesmo de animais, caso haja dessedentação em lagoas contaminadas ou mesmo com a ingestão de pastagens. Destaca-se que a quantidade de nutrientes que águas residuais possuem é muito importante para as plantas, como as altas concentrações de nitrogênio e outros micronutrientes (HESPANHOL, 2002). Destaca-se que, como as altas quantidades de uso da água doce estão relacionadas diretamente à agricultura, é importante encontrar alternativas viáveis, para que o sistema não chegue a um colapso.

Segundo Mancuso e Santos (2003), para fazer uma boa gestão dos recursos hídricos são necessários dados em relação à viabilidade econômica e às políticas públicas. Quando estabelecidos os devidos direcionamentos sobre a finalidade do reúso, a qualidade da água, então, passa a ser um fator decisivo para o tratamento adequado. Desse modo, a tecnologia implantada também estará de acordo com o tipo de reúso da água segundo as demandas da região, seguindo todos esses fatores de políticas públicas previamente estabelecidas. No Brasil as águas

residuais sempre devem seguir os padrões estabelecidos pela Resolução CONAMA n. 357/2005 (BRASIL, 2005), assim como a sua gestão está descrita na Resolução CNRH n. 54/2005 (BRASIL, 2006), estando integrada à gestão de recursos hídricos nacional.

Nas áreas urbanas a implantação de um sistema de reúso da água necessita de uma ampla análise sobre a qualidade da água que será utilizada no sistema de seu reúso, principalmente devido à água oriunda de tratamento de esgoto. De acordo com Hespanhol (2002), o uso de efluentes urbanos para consumo humano é pouco adequado, devido à quantidade de organismos patogênicos e sintéticos presentes. Além disso, o custo-benefício do tratamento para elevar essa qualidade para esse fim não é vantajoso. Dentro das residências, o reúso da água pode se dar em escalas menores a partir de cisternas de captação de água da chuva, reutilização de água de lavadoras para usar em calçadas e até mesmo o reúso de água de chuveiros.

Em linhas gerais, o reúso pode se tornar uma importante ferramenta que contribua para a gestão de recursos hídricos de forma a atender às demandas por água em regiões menos abastecidas, dar novo uso às águas que seriam descartadas ou precisariam de grandes quantidades de produtos para o seu tratamento, sendo alternativa para elevados gastos econômicos e também para o meio ambiente.

## 4.3 Tecnologias de reúso

De acordo com Moruzzi (2008), é possível fazer o reúso indireto das águas, que são aquelas vindas de indústrias e residências; o reúso direto, que usa esgoto para irrigação; a reciclagem interna, onde se utilizam águas industriais internamente nas instalações; e o reúso potável direto ou indireto, em que a água tratada é usada diretamente para abastecimento público.

Uma das maiores limitações para o reúso da água é a qualidade adequada para o uso pretendido. Muitas vezes, não existe informação sobre o nível mínimo de qualidade de água para uma atividade industrial, o que pode dificultar a identificação de oportunidades de reúso. É necessário, portanto, um estudo mais detalhado do processo industrial para a

caracterização da qualidade da água. Simultaneamente, é preciso realizar um estudo de tratabilidade do efluente, para que seja estabelecido um sistema de tratamento que produza água com qualidade compatível com o processo industrial considerado. Em cada país há uma determinação diferente para os padrões de qualidade dessa água, que levam em conta fatores como DBO, pH, óleos e graxas, cloro residual, turbidez, cor, entre outros, sendo essa reutilização direta ou indireta, decorrente de ações planejadas ou não.

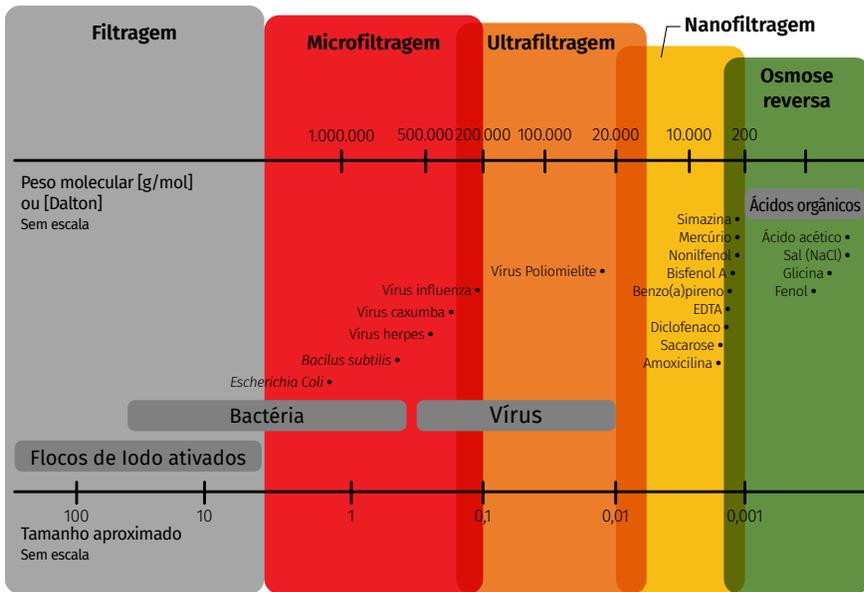
Em alguns casos, a qualidade da água de reúso pode ser definida com base nos requisitos exigidos por processos industriais já bem difundidos, em que a qualidade mínima necessária é conhecida, devido à ampla utilização em atividades industriais.

Com base nessa exigência da qualidade da água para o uso pretendido, podem ser definidas as tecnologias de reúso a serem utilizadas. Ganham destaque os Processos de Separação com Membranas – PSM e os processos de MBR – *Membrane Bio Reactor* ou Reator Biológico de Membrana. Além dessas, outras tecnologias, como a troca iônica e o lodo ativado, também podem ser utilizadas.

### 4.3.1 PSM – Processo de Separação com Membranas

Uma tecnologia bastante empregada para o tratamento de água para reúso é o PSM – Processos de Separação com Membranas. Uma membrana deve geralmente ser entendida como uma estrutura plana que separa duas fases. A força motriz dessa separação pode resultar de uma diferença de pressão, concentração, temperatura ou potencial de elétrons (NORTHEIN, 2006). Os processos de membrana são processos de separação puramente físicos e têm a vantagem de que os componentes a serem separados não são alterados quimicamente, termicamente ou biologicamente. Para a área de tratamento de efluentes, foram desenvolvidas diferentes tecnologias de filtração por membrana. Essas tecnologias são eficazes para a separação de biomassa e/ou para a eliminação de sólidos, assim como a redução de micro-organismos (PIRES, 2009). Essas técnicas podem ser classificadas em microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração e osmose reversa. A Figura 4.1 apresenta o peso molecular

e o tamanho de partícula que podem ser removidos de acordo com cada técnica de filtração.



**Figura 4.1:** Peso molecular e tamanho de partícula que podem ser removidos de acordo com cada técnica de filtração. Fonte: Adaptado de Pinnekamp (2006).

A microfiltração é um processo de membranas vastamente utilizado para várias aplicações, como tratamento de águas residuais, clarificação de sucos, separação de proteínas e separação de bactérias (SINGH; PURKAIT, 2019). O concentrado gerado por meio do processo de microfiltração representa menos de 5% do volume alimentado ao sistema, mas em contrapartida a concentração de sólidos pode chegar a 70% (IDAHO *apud* MIERZWA; HESPANHOL, 2005).

No processo de microfiltração as principais vantagens apontadas são a remoção seletiva dos metais, a facilidade de integração a outro processo de tratamento, o baixo consumo de energia e o custo de investimento, que é relativamente baixo (MIERZWA; HESPANHOL, 2005).

Já as desvantagens apresentadas por esse método são as seguintes: o efluente deve apresentar baixa carga de sólidos, várias membranas

estão sujeitas ao ataque químico, a corrente de concentrado pode apresentar problemas para a disposição final, substâncias iônicas e gases dissolvidos não são afetados (MIERZWA; HESPANHOL, 2005).

As membranas de microfiltração são fabricadas com materiais poliméricos, metais ou cerâmicas, o diâmetro dos poros varia entre 0,02  $\mu\text{m}$  a 4  $\mu\text{m}$  e a pressão que promove a separação dos contaminantes é inferior a 2,0 bar (WAGNER, 2001 *apud* MIERZWA; HESPANHOL, 2005). Com esse processo é possível remover coloides e metais dissolvidos de soluções diluídas por meio de agentes complexantes de alto peso molecular (BUCKLEY *et al.*, 1990 *apud* MIERZWA; HESPANHOL, 2005).

A ultrafiltração é um processo intermediário referente ao tamanho dos poros, que retém tipicamente moléculas com massa molar entre 500 Daltons a 500.000 g/mol ou Daltons ou partículas de 0,1 a 0,001  $\mu\text{m}$ . Incluem-se nessa faixa gorduras, emulsões, proteínas, polímeros, biomoléculas e coloides (PEPPIN e ELLIOT, 2001 *apud* BRIÃO e TAVARES, 2007).

Os sistemas de nanofiltração podem remover compostos orgânicos de massa molecular variando entre 250 e 1.000 g/mol e alguns sais, geralmente bivalentes. Operam com uma pressão variando de 5 a 35 bar. (WAGNER, 2001 *apud* MIERZWA; HESPANHOL, 2005).

Esse processo funciona sem causar os problemas de poluição associados aos processos convencionais, com a vantagem da possibilidade de remoção dos compostos orgânicos (OSMOICS, 1997 *apud* MIERZWA; HESPANHOL, 2005).

Entre todas as possíveis soluções para a crise dos recursos hídricos, a nanofiltração de baixo custo e alta eficiência pode ser a mais promissora. A tecnologia de nanofiltração é amplamente utilizada para a obtenção de água potável e para o tratamento de efluentes devido ao seu baixo custo energético e processo operacional simples, no qual as propriedades das membranas são de vital importância. Geralmente, a maioria das membranas poliméricas tem vantagens de flexibilidade, processo de preparação simples e custo relativamente baixo, mas também enfrentam alguns problemas como baixa resistência química, vida útil limitada e incrustação de membrana. Ao contrário, os processos que utilizam cerâmica inorgânica possuem os méritos de estabilidade térmica, certa resistência a solvente, alta resistência e longa vida útil, enquanto

apresentam desvantagens no processo de fabricação complexo, alto custo e fragilidade (HAN; XU; GAO, 2013).

A osmose reversa se baseia no fenômeno natural da osmose, que consiste na passagem de água pura através de uma membrana semi-permeável de uma solução salina diluída para uma mais concentrada, até que se atinja o equilíbrio. Como resultado há a elevação do nível de líquido da solução mais concentrada, sendo essa diferença de nível entre as duas soluções conhecida como pressão osmótica de equilíbrio. Se aplicarmos uma pressão hidráulica superior à pressão osmótica do lado da solução mais concentrada, a água passa a fluir no sentido da solução mais concentrada para a mais diluída, sendo esse fenômeno denominado osmose reversa (PAREKH, 1998 *apud* MIERZWA; HESPANHOL, 2005; COLLON, 1990 *apud* MIERZWA; HESPANHOL, 2005).

O processo é adequado para tratar águas cuja concentração de sais dissolvidos varia entre 5,0 mg/L até 34.000 mg/L (KIANG; METRY, 1982 *apud* MIERZWA; HESPANHOL, 2005), com uma recuperação superior a 90% em relação ao volume alimentado ao sistema (MIERZWA, 1996 *apud* MIERZWA; HESPANHOL, 2005). Porém, a recuperação de água por passagem no sistema chega ao máximo a 75% e a pressão de operação do sistema pode variar de 3,4 a 150 bar (WAGNER, 2001 *apud* MIERZWA; HESPANHOL, 2005).

Deve-se levar em consideração a grande demanda de energia necessária para a operação de uma usina de osmose reversa. De acordo com Telles *et al.* (2010), uma usina moderna típica de osmose reversa consome 6 quilowatts/hora de eletricidade para cada metro cúbico de água tratada.

Como desvantagens esse processo apresenta: não ser adequado para tratamento de efluentes com material em suspensão; a membrana pode sofrer ataque químico por alguns materiais presentes na solução a ser tratada; as substâncias com baixa solubilidade podem se precipitar na superfície das membranas; alguns compostos orgânicos, principalmente os de baixo peso molecular e gases dissolvidos, não são removidos e o concentrado gerado pode trazer problemas ao seu destino final (MIERZWA; HESPANHOL, 2005).

Esses processos de separação com membranas normalmente estão acoplados a outras técnicas. O acoplamento dos processos com membranas a processos físico-químicos convencionais e/ou processos oxidativos e biológicos pode ser utilizado aproveitando as principais vantagens de cada processo. A combinação de processos permite o desenvolvimento de rotas de tratamento para atingir a qualidade necessária para a corrente aquosa, segundo a aplicação desejada no processo industrial. Um exemplo dessa combinação são os Biorreatores de Membranas, descrito a seguir.

### 4.3.2 MBR – Biorreatores de Membranas

O sistema de biorreator de membranas ou MBR consiste, basicamente, em um sistema de tratamento de efluentes que integra um processo biológico de remoção da carga orgânica com uma membrana permeável seletiva. Essa tecnologia é, em muitos aspectos, uma extensão dos processos de lodo ativado convencionais (JUDD, 2006).

Sistemas convencionais de lodo ativado possuem algumas limitações como a utilização de tanques de decantação para separar o lodo do efluente tratado e a necessidade de operar com baixos valores de MLSS (*mixed liquor suspended solids*), que é equivalente à concentração dos sólidos em suspensão (entre 4 g/L e 7 g/L). A principal diferença do MBR é que o tanque de decantação é substituído por um sistema de membranas, que permitem altos valores de MLSS (chegando a 35 g/L) e reduzem drasticamente a área ocupada pelo equipamento (GRAY, 2010).

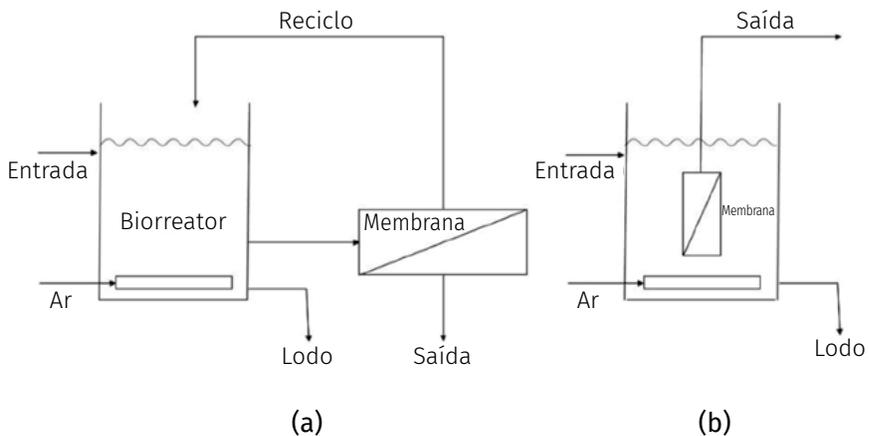
A utilização de equipamentos de pré-tratamento do efluente se faz necessária para que seja feita a retirada de sólidos, como fibras e cabelos que podem bloquear a superfície das membranas e interromper a operação do sistema.

Assim como em outros biorreatores aeróbicos, o oxigênio requerido pelo lodo geralmente é fornecido na forma de ar atmosférico. Os tanques de aeração de um sistema MBR são consideravelmente menores do que os utilizados em outros processos que utilizam a tecnologia de lodo ativado, entretanto a quantidade de oxigênio requerido pelo processo permanece a mesma.

O ponto mais significativo à implementação da tecnologia MBR em sistemas de tratamento convencionais é o custo operacional, em função das altas taxas de aeração necessárias e alto grau de automação. Por outro lado, a formulação de políticas ambientais mais restritivas e o incentivo governamental em determinadas regiões do globo tornam cada vez mais interessante a utilização desse tipo de sistema de tratamento.

Atualmente diversas são as configurações de sistemas MBR disponíveis no mercado, no entanto, dentre essas opções, duas são as mais comuns:

- MBR com membranas submersas, que utiliza membranas na forma de fibras ocas inseridas no tanque de biologia.
- MBR com membranas de fluxo cruzado, em que os módulos de membranas são instalados sem série após o tanque de biologia e o lodo separado é recirculado para o biorreator (JUDD, 2006).



**Figura 4.2:** Configurações de sistemas MBR: (a) fluxo cruzado e (b) membrana submersa. Fonte: Adaptado de Judd (2006).

Ambas as configurações apresentam vantagens e desvantagens, tendo sua aplicabilidade para diferentes processos e situações. Constam na Tabela 4.2 as características mais importantes que diferem entre os dois sistemas de tratamento MBR.

**Tabela 4.2:** Comparação das configurações de MBR submerso e fluxo cruzado.  
 Fonte: Adaptado de Gray (2010).

PARÂMETROS	MBR SUBMERSO	MBR FLUXO CRUZADO
Custo capital	Alto	Baixo
Custo de aeração	Alto	Baixo
Custo operacional	Baixo	Alto
Frequência de limpeza	Alto	Baixo
Área ocupada	Alto	Baixo
Fluxo permitido	Baixo	Alto
Custo de bombeamento	Baixo	Alto

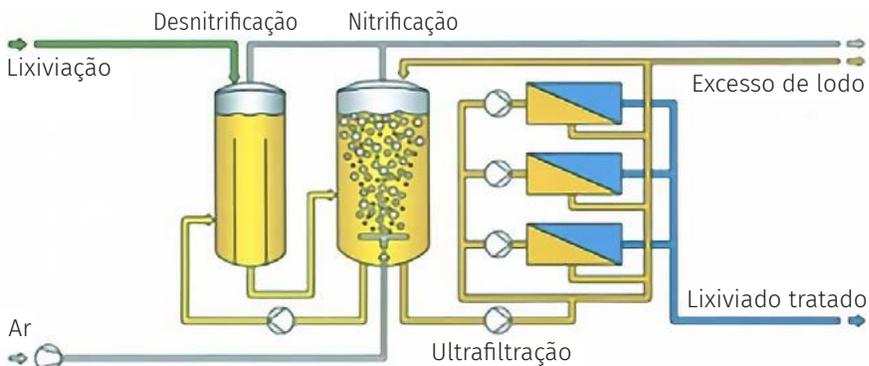
Um sistema de alta performance muito importante a ser citado é o processo BIOMEMBRAT®, desenvolvido pela WEHRLE Umwelt. Trata-se de um sistema MBR de fluxo cruzado, equipado com membranas de ultrafiltração com alta otimização no que diz respeito à distribuição de oxigênio e recirculação de concentrado produzido nas membranas. Essa configuração dá robustez e confiabilidade ao processo de tratamento, mesmo com altas cargas de efluente.

O projeto do sistema MBR envolve a utilização de membranas de ultrafiltração, geralmente com diâmetro de 8 polegadas, capazes de operar com MLSS alto e moderado, atingindo um valor máximo de 25 g/L, minimizando o volume do biorreator.

Por apresentar um tamanho reduzido, o tanque de aeração atinge maiores temperaturas (entre 30 e 35 °C) devido à energia gerada através de processos biológico-exotérmicos, aeração e bombeamento. Esse incremento de temperatura contribui para a alta eficiência do processo, uma vez que promove aumento da atividade celular responsável pela degradação da matéria orgânica e redução da viscosidade do permeado.

Outro grande diferencial desse equipamento da WEHRLE é o alto nível de automação das plantas. Demais vantagens observadas são:

- Pouca necessidade de espaço: o MBR BIOMEMBRAT® é um dos menores sistemas de tratamento de efluentes do mercado;
- Baixo consumo energético: a otimização de absorção de oxigênio utiliza ao máximo a potência dos aeradores;
- Sustentabilidade: a possibilidade de expansão modular do sistema confere alta adaptabilidade ao tratamento;
- Confiabilidade: Mesmo com altas variações de carga poluidora e de vazão, o efluente mantém alta qualidade – livre de germes e sólidos – possibilitando até mesmo o reúso;
- Alta performance devido ao desenvolvimento e à engenharia sofisticada e consistente: o BIOMEMBRAT® é capaz de tratar efluentes que outros sistemas dificilmente conseguem.



**Figura 4.3:** Processo BIOMEMBRAT® desenvolvido pela WEHRLE.  
Fonte: WEHRLE (2018).

O biorreator pode operar sob condição atmosférica ou pressurizado, sendo a segunda configuração preferível em casos nos quais o efluente apresenta grande quantidade de material recalcitrante (alta razão DQO/DBO).

A utilização de biorreatores pressurizados agrega ainda mais controle da formação de espuma no lodo, maior quantidade de oxigênio dissolvido e redução do risco de esgotamento de matéria orgânica volátil. Por outro lado, a pressurização do tanque de biologia aumenta o custo de operação do sistema de tratamento.

Esse sistema de tratamento permite ainda a operação separada da nitrificação e desnitrificação, adicionando ou removendo a injeção de ar em um dos tanques de biologia. Em alguns casos, como o sistema containerizado, por exemplo, a existência dos dois tanques é substituída por um único tanque com uma parede de separação interna, de forma que a desnitrificação pode ser promovida pelo fechamento de válvulas instaladas na linha de ar.

### 4.3.3 Outras Tecnologias

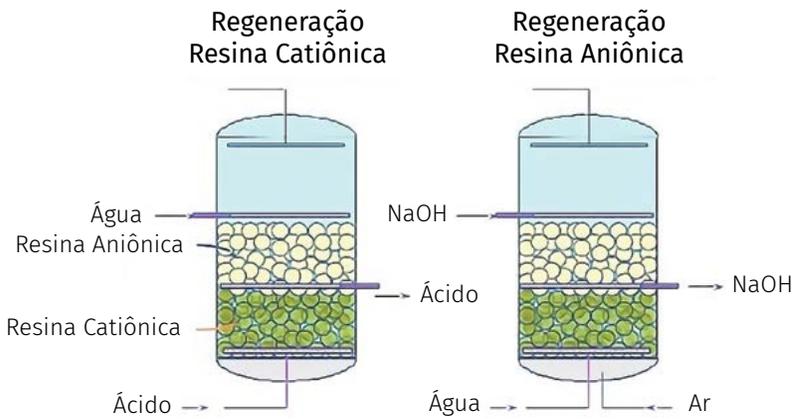
#### Troca Iônica

O processo de troca iônica (TI) tem como objetivo remover da água certas substâncias dissolvidas, principalmente os compostos iônicos que são transferidos para uma fase sólida insolúvel denominada resina de troca iônica. Ao reter os íons indesejados presentes na água, a resina libera uma quantidade equivalente de outras espécies iônicas armazenadas em sua estrutura e inofensivas à qualidade da água tratada (NILCO, 1988 *apud* MIERZWA; HESPANHOL, 2005).

A capacidade da resina da troca iônica de reter íons em sua estrutura é chamada de capacidade de troca. Graças à limitação dessa capacidade, a resina acaba sendo saturada com os íons inicialmente presentes na água em processo. Nessas condições deve-se interromper o processo de tratamento para que seja realizada a regeneração das resinas com uma solução contendo os íons que estavam inicialmente causando a saturação (MIERZWA; HESPANHOL, 2005).

Existem resinas próprias para cada espécie de íon: catiônicas, com capacidade de retenção de cátions (íons positivos), e aniônicas, específicas para a retenção de ânions (íons negativos) (MIERZWA; HESPANHOL, 2005).

O sistema de desmineralização por troca iônica é composto por leitos com resinas catiônicas e aniônicas responsáveis pela troca iônica com os sais e moléculas orgânicas e inorgânicas dissolvidas em um solvente, geralmente na água. A Figura 4.4 ilustra dois tipos de troca iônica, um com regeneração da resina catiônica e outro com regeneração de resina aniônica.



**Figura 4.4:** Esquema de regeneração de resina catiônica e resina aniônica.  
 Fonte: Ianalítica Consultoria e Treinamento (2020).

A Figura 4.5 apresenta um sistema industrial de desmineralização por troca iônica da empresa ALPHENZ.



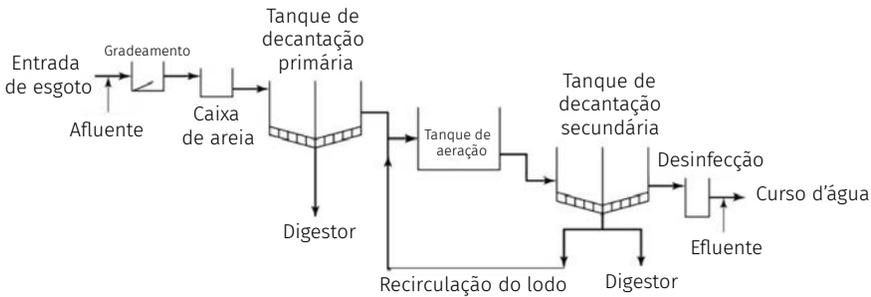
**Figura 4.5:** Sistema de desmineralização por troca iônica.  
 Fonte: ALPHENZ (2016).

## Tecnologia de Lodo Ativado

O processo de tratamento por lodo ativado é uma técnica de tratamento biológico do efluente bruto, em que uma mistura de esgoto e lodo composto por microrganismos é agitada e aerada. No Brasil, é uma técnica muito utilizada em Estações de Tratamento de Esgotos – ETE.

Após o reator, onde esse processo é realizado, a mistura de lodo e efluente tratado deve ser separada. Em processos de tratamento convencionais são utilizados decantadores, já em processos como o MBR a separação é realizada por membranas semipermeáveis.

Parte dos sólidos presentes na mistura são retornados para manter a população de organismos consumidores da matéria orgânica constante, enquanto parte segue para seu devido tratamento e destino, como representa a Figura 4.6.



**Figura 4.6:** Processo convencional de tratamento por lodo ativado.

Fonte: Adaptado de Davis; Cornwell (2012).

Durante o crescimento e mistura por agitação, os organismos individuais passam a se agregar na forma de flocos e constituir uma massa de micróbios denominada de lodo ativado. Além da agitação da mistura, a injeção de ar no reator tem a função de fornecer o oxigênio necessário ao metabolismo dos organismos presentes no lodo (DAVIS; CORNWELL, 2012).

O projeto de um sistema de tratamento por lodo ativado depende da estimativa do crescimento do lodo produzido no tanque de aeração, que, por sua vez, depende dos parâmetros operacionais (oxigênio

requerido e tempo de retenção de sólidos) e do efluente alimentado ao sistema (características físico-químicas).

Além do carbono disponibilizado para o lodo na forma de matéria orgânica, outros nutrientes são necessários para promover a reprodução microbiana, sendo os principais deles nitrogênio e fósforo. A relação entre DQO, nitrogênio e fósforo consumido pelos microrganismos presentes no esgoto urbano é de 350:7:1, aproximadamente (METCALF; EDDY, 2003).

O oxigênio requerido para a realização de um processo de tratamento por lodo ativado envolve a quantidade necessária para respiração celular, oxidação da matéria orgânica carbonácea, nitrificação e, em alguns casos, desnitrificação. O oxigênio alimentado ao sistema na forma de ar atmosférico deve ainda ser suficiente para promover a mistura de lodo e esgoto.

Comumente vemos a utilização de tecnologias de lodo ativado que realizam processos de desnitrificação e/ou remoção biológica de fósforo e outros poluentes através da incorporação de múltiplos reatores em série, operando sob condição aeróbica e anaeróbica, reatores semibatelada e sistemas de membranas (METCALF; EDDY, 2003).

## 4.4 Oportunidades no Brasil

A governança da água no Brasil tem evoluído significativamente nos últimos anos. Motivados pela redução de custos, para as indústrias, o foco está no aumento da eficiência, na redução das emissões hídricas, pela garantia da licença de operação e pela prevenção dos riscos associados. No entanto, uma boa gestão dos recursos hídricos ainda é um desafio no setor industrial por falta de investimentos (LIMA, 2018).

Um impulsionador do reúso da água no Brasil foi a criação da Lei n. 9.433 em 1997, que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) e criou o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. A necessidade de outorga e a cobrança correspondente pelo uso da água foram decisivas para muitas indústrias investirem em sistemas de reúso.

A problemática da poluição dos recursos hídricos disponíveis agrava tal situação, seja por indústrias, pela própria população ou ainda pela falta de investimentos dos poderes públicos competentes para a infraestrutura de tratamento de água. De acordo com Mancuso *et al.* (2003), os principais usos da água na indústria são para torres de resfriamento, lavagem de peças e equipamentos, irrigação, lavagem de pisos e veículos, uso sanitário e parte do processo industrial para a produção de papéis, construção civil e petroquímica.

O problema da escassez da água no Brasil não se dá somente pelos fatores climáticos e geográficos, mas também pelo uso intenso, como ocorre no estado de São Paulo, principalmente na Região Metropolitana. Nesse caso, como aponta Hespanhol (2002), o reúso da água, em especial de esgoto tratado, é uma opção, porém demanda um grande investimento para que possa ser utilizado em diversos âmbitos na sociedade e economia.

Os potenciais benefícios da implantação do reúso da água ligados à gestão hídrica urbana impactam diretamente na redução de lançamentos de efluentes nos corpos hídricos, bem como na redução de captação de água. Há casos de uso de água para a prática de floricultura, demonstrando bons indicadores de crescimento de gérbera, por exemplo, que evidencia o quanto esse tipo de água pode potencializar a produção (MEDEIROS *et al.*, 2007). A aplicação do sistema de reúso de água implicaria ainda em uma melhor gestão para evitar a falta de água em épocas de estiagem. Outro exemplo bastante efetivo é o da Petrobras, que em 2019 utilizou 89 milhões de m<sup>3</sup> de reúso, o equivalente a 34% da demanda total de água doce usada pela Companhia (PETROBRAS, 2019).

Em 15 de julho de 2020 foi publicada a Lei 14.026, que atualiza o marco legal do saneamento básico no Brasil. Este novo marco atribui à ANA - Agência Nacional de Águas a competência para editar normas de referência sobre o serviço de saneamento e prevê a universalização dos serviços de água e esgoto até 2033 e viabiliza a injeção de mais investimentos privados nos serviços de saneamento (VERDELIO, 2020). Com estas novas oportunidades, espera-se fortalecer os projetos que vislumbrem a otimização do uso da água.

## 4.5 Referências

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 13.969: Tanques sépticos – Unidades de tratamento complementares e disposição final dos efluentes líquidos – Projeto, construção e operação*. Rio de Janeiro, 1997.

ALPHENZ. *Produtos de Filtração e Desmineralização*. Troca Iônica. Disponível em: <<https://www.alphenz.com.br/produtos/filtracao-e-desmineralizacao/filtracao-e-desmineralizacao-troca-ionica/>>. Acesso em: 23 jun. 2020.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. *Atlas Brasil: abastecimento urbano de água – panorama nacional*. Brasília, 2010.

\_\_\_\_\_. *Manual de usos consuntivos da água no Brasil*. Brasília: ANA, 2019. 75 p.

BRASIL. CNRH - Conselho Nacional de Recursos Hídricos. *Resolução n. 54, de 28 de novembro de 2005*. Estabelece modalidades, diretrizes e critérios gerais para a prática de reúso direto não potável de água, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 09 de março de 2006.

\_\_\_\_\_. CNRH - Conselho Nacional de Recursos Hídricos. *Resolução n. 121, de 16 de dezembro de 2010*. Estabelece diretrizes e critérios para a prática de reúso direto não potável de água na modalidade agrícola e florestal, definida na Resolução CNRH n. 54, de 28 de novembro de 2005. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 16 de março de 2011.

\_\_\_\_\_. CONAMA - Conselho Nacional de Meio Ambiente. *Resolução n. 357, de 17 de março de 2005*. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 18 de março de 2005.

BRIÃO, V. B.; TAVARES, C. R. G. Ultrafiltração como processo para o reúso de efluentes de laticínios. Nota Técnica. *Engenharia Sanitária e Ambiental*. V. 12, n. 2, p. 134-138, 2007.

- CNA. Información General de los Districtos de Riego 03 e 100: Gerencia Estatal, Pajuca, Hidalgo, México. *Comisión Nacional de Águas*. Ciudad de México, 1993.
- CNRH - CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS. *Conjunto de Normas Legais: recursos hídricos*. 8. ed. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2014.
- DAVIS, M.; CORNWELL, D. *Introduction to Environmental Engineering*. Nova York: Science Engineering & Math, 2012.
- GRAY, N. F. *Water Technology: An Introduction for Environmental Scientists and Engineers*. Dublin: Butterworth-Heinemann, 2010.
- HAN, Y.; XU, Z.; GAO, C. Ultrathin Graphene Nanofiltration Membrane for Water Purification. *Advance Funtional Materials*, Hangzhou, v. 23, n. 29, p. 3693-3700, 26 fev. 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/adfm.201202601>>. Acesso em: 05 abr. 2019.
- HESPANHOL, I. Potencial de Reúso de Água no Brasil - Agricultura, Indústria, Municípios, Recarga de Aquíferos. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 7, n. 4. Out./dez. de 2002, p. 75-95.
- IANALÍTICA CONSULTORIA E TREINAMENTO. *Métodos Eletroquímicos para Remover os Poluentes da Água*. Eletroquímica e Despoluição. Disponível em: <<https://ianalitica.com.br/eletroquimica-e-despoluicao/>>. Acesso em: 23 jun. 2020.
- JUDD, S. The MBR Book. *Burlington*: Butterworth-Heinemann, 2006.
- LAVRADOR, J. *Contribuição para o Entendimento do Reúso Planejado de Água e Algumas Considerações sobre suas Possibilidades no Brasil*. São Paulo, 1987. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- LEITE, A. M. F. *Reúso de Água na Gestão Integrada de Recursos Hídricos*. 2003. 120 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Planejamento e Gestão Ambiental, Universidade Católica de Brasília, Brasília, 2003. Disponível em: <<https://btdtd.ucb.br:8443/jspui/bitstream/123456789/1738/1/DissertAnaMaria.pdf>>. Acesso em: 02 maio 2020.

- LIMA, E. P. C. *Água e Indústria: experiências e desafios*. 1. ed. Infinita Imagem, 2018. 119 p.
- MANCUSO, P. C. S.; SANTOS, H. F. dos (Editores). *Reúso de Água*. 1. ed. São Paulo: Manole Ltda, 2003.
- MEDEIROS, S. S.; SOARES, F. A. L.; GHEYI, H. R.; FERNANDES, P. D. Uso de água residuária de origem urbana no cultivo de gérbera: efeito nos componentes de produção. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola*. Jaboticabal, v. 27, n. 2, p. 569-578, 2007.
- METCALF, E. *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*. Nova York: McGraw-Hill, 2003.
- MIERZWA, J. C.; HESPANHOL, I. *Água na Indústria: uso racional e reúso*. São Paulo: Oficina de Textos, 2005.
- MORUZZI, R. B. *Reúso de Água no Contexto da Gestão de Recursos Hídricos: Impacto, Tecnologias e Desafios*. OLAM – Ciência & Tecnologia, Rio Claro, ano VIII, v. 8, n. 3, p. 271-294, jul./dez. 2008.
- NAGY, E. *Basic Equations of Mass Transport Through a Membrane Layer*. Amsterdã: Elsevier, 2019. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128137222000157>>. Acesso em: 03 maio 2020.
- NORTHEIN, B. F. *Entwicklung eines anaeroben Membran-Bio-Reaktors zur Reinigung schwach belasteter Abwässer*. Dissertation zur Erlangung des Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften. Technische Universität Clausthal, 2006.
- PETROBRAS. *Petrobras economiza R\$ 35,8 milhões com reúso de água em 2019*. Fatos e Dados. 20 de março de 2020. Disponível em: <<https://petrobras.com.br/fatos-e-dados/petrobras-economiza-r-35-8-milhoes-com-reuso-de-agua-em-2019.htm>> Acesso em: 16 maio 2020.
- PINNEKAMP, J.; FRIEDRICH, H. *Membrane Technology for Waste Water Treatment*. Municipal Water and Waste Management, v. 2, FiW-Verlag, 2006

- PIRES, G. Einsatz von Membranfiltrationsverfahren in der kommunalen Abwasserbehandlung. Projektarbeit im Rahmen des Masterstudiengangs ProWater.® Nachhaltiges Management und Schutz von Gew" ssern. Braunschweig, 2009.
- RODRIGUES, R. S. *As Dimensões Legais e Institucionais de Reúso de Água no Brasil*: Proposta de Regulamentação do Reúso no Brasil. 2005. 192f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Sanitária) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo (SP), 2005. Disponível em: <[https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3147/tde-03112005-121928/publico/dissertacao\\_raquelrodrigues\\_regulamentacaoreuso.pdf](https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3147/tde-03112005-121928/publico/dissertacao_raquelrodrigues_regulamentacaoreuso.pdf)>. Acesso em: 10 maio 2020.
- SINGH, R.; PURKAIT, M. K. Membrane Separation Principles and Applications. *Handbooks in Separation Science*. Amsterdã: Elsevier, p. 111-146, 2019. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128128152000041>>. Acesso em: 03 maio 2020.
- TELLES, D. D., COSTA, R. H. P. G. *Reúso da Água: Conceitos, Teorias e Práticas*. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2010.
- VERDELIO, A. Agência Brasil. Disponível em: <<https://agenciabrasil.ebc.com.br/saude/noticia/2020-07/veja-principais-mudancas-novo-marco-legal-do-saneamento>>. Acesso em: 25 ago. 2020.
- WEHRLE DO BRASIL. *Planta piloto BW2 para tratamento de água para termoelétricas*. Curitiba: 2018.

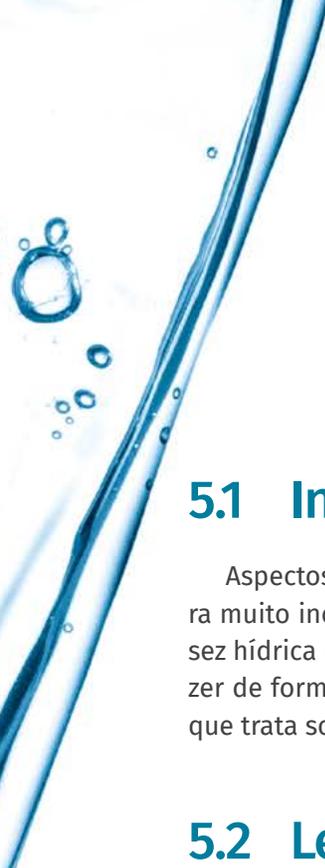


# 5

## Legislação

Ana Carolina Wosiack  
Henrique Reisdorfer Leite





## 5.1 Introdução

Aspectos legislativos sobre o reúso da água ainda ocorrem de maneira muito incipiente no mundo, principalmente em países onde a escassez hídrica não é uma realidade. Nesse contexto, este capítulo tenta trazer de forma resumida e organizada o panorama mundial da legislação que trata sobre as diferentes formas de reúso de água.

## 5.2 Legislação no mundo

Dentro da esfera de legislação de reúso da água aplicada nos diversos países, existem alguns manuais ou guias que foram desenvolvidos por agências de renome internacional e são utilizados como base para o desenvolvimento/estabelecimento de leis e práticas nacionais e regionais ao redor do mundo. Sendo assim esses guias merecem destaque especial e são apresentados na Tabela 5.1. Vale ressaltar que a seguir serão abordados os aspectos legais sobre a água de reúso, procurando dar ênfase ao uso industrial, em escala global, regional e local.

**Tabela 5.1:** Guias de água de reúso desenvolvidos por organismos internacionais. Fonte: Adaptado de Sanz e Gawlik (2014).

Organização	Guia	Comentários
World Health Organization (WHO)	"Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater" (2006)	Dividido em quatro volumes: Volume 1: Política e aspectos regulatórios. Volume 2: Água de reúso: uso de águas residuárias na agricultura. Volume 3: Água de reúso e efluente sanitário na aquicultura. Volume 4: Efluente sanitário e água cinza na agricultura.
United Nations Environment Programme (UNEP)	"Guidelines for municipal wastewater reuse in the Mediterranean region" (2005) "Development of performance indicators for the operation and maintenance of wastewater treatment plants and wastewater reuse" (2011)	
United Nations Water Decade Programme on Capacity Development (UNW-DPC)	Proceedings on the UN Water project "Safe use of wastewater in agriculture" (2013)	
International Organization for Standardization (ISO)	ISO/TC282 Water reuse (2013)	Padroniza a reutilização de água de qualquer tipo e para qualquer finalidade. Abrange reutilização tanto centralizada e descentralizada ou no local de água, reutilização direta e indireta, assim como reúso intencional e não intencional. O escopo da ISO/PC 253 (Reutilização de águas residuais tratadas para irrigação) está incorporado ao novo comitê proposto. Excluído: o limite da qualidade da água permitida no reúso de água, que deve ser determinado pelos governos, a OMS e outras organizações competentes.
United States Environmental Protection Agency (US EPA)	2012 Guidelines for Water Reuse	Diretriz que orienta e estabelece padrões de reúso de água no setor urbano, industrial, no meio ambiente, para recarga de aquíferos e corpos d'água, produção de neve artificial, entre outros.

Para melhor compreendermos o panorama mundial das leis vigentes, a seguir são apresentados os tópicos em nível de continente e/ou suas sub-regiões. Vale destacar que neste capítulo serão apresentados somente países onde foi possível localizar informações sobre as políticas públicas legisladas que incentivam ou regulamentam as formas de reúso citadas anteriormente.

## 5.2.1 Oceania

### Austrália

A Austrália, devido as suas características climáticas, possui vários guias publicados, tanto em nível nacional, quanto em nível local (SANZ; GAWLIK, 2014), que incentivam sistemas de reúso de água. Nesse contexto um conjunto de diretrizes australianas para ao reúso de água em nível nacional foi publicado como parte da Estratégia Nacional de Gestão de Qualidade da Água, em 2000 (JIMENEZ; ASANO, 2008).

Conforme Jimenez e Asano (2008), novas diretrizes de reúso de água para a Austrália foram distribuídas para discussão em novembro de 2005 e adotadas pelos Conselhos Ministeriais Federal e Estaduais em novembro de 2006. A fase dois das orientações, cobrindo a reutilização de águas pluviais, recarga de aquíferos e gestão de água reciclada para suplementar fontes de água potável, foi lançada como um projeto para discussão em junho de 2007. Uma característica das diretrizes de água reciclada é o uso da abordagem de Análise de Perigos e Pontos Críticos de Controle (APPCC) à gestão de riscos para garantir a entrega confiável de água reciclada segura. Também de interesse na evolução da reutilização de água na Austrália são as Diretrizes NSW para Uso Urbano e Residencial de Água Reciclada. Essas diretrizes introduziram a classe A+ de água reciclada e tornaram possível o uso em projetos residenciais de reutilização de água em Rouse Hill e no Parque Olímpico de Sydney, em Sydney. Tem sido prática na maioria dos estados exigir estudos de irrigação e de avaliação ambiental para avaliar a sustentabilidade a longo prazo de projetos de reutilização de água. Os fatores que são considerados incluem sais e metais pesados presentes na água reciclada, profundidades dos lençóis freáticos na área irrigada e a acumulação de sais, nutrientes e metais pesados no ambiente.

## Nova Zelândia

Os regulamentos sobre a reutilização de águas residuais tratadas na Nova Zelândia dependem da finalidade para a qual ela é reutilizada. Reutilizar em habitações e na indústria está coberto pela Lei da Saúde 1956 e Lei da Construção Civil de 2004, respectivamente. Para a descarga para o meio ambiente natural, ou seja, reúso para irrigação agrícola pela percolação e/ou tratamento da terra, a legislação apropriada é a Lei da Gestão de Recursos (1991), que exige autorização para a descarga de águas residuais tratadas. Diretrizes para a reutilização de águas residuais tratadas são estabelecidas pelo Ministério da Saúde da Nova Zelândia (1991), intituladas “Diretrizes de Saúde Pública para o Uso Seguro de água de esgoto e lamas de depuração na terra”. As diretrizes de saúde pública referidas prevalecem sobre as diretrizes para água recuperada de efluentes de esgoto que foram preparadas em 2000 pelo Conselho de Agricultura e Gestão de Recursos da Austrália e Nova Zelândia, Conselho de Conservação e Meio Ambiente da Austrália e Nova Zelândia e Conselho de Pesquisa Médica (JIMENEZ, ASANO, 2008).

### 5.2.2 Oriente Médio

O Oriente Médio é marcado por seu clima árido a semiárido. Entretanto, alguns países analisados nessa região apresentam iniciativas muito incipientes sobre reúso, ou iniciativas não formais, sem fins industriais, mas que são relevantes e merecem ser comentadas. Sendo assim, esses países serão comentados de maneira conjunta.

Esse é o caso do Iraque, que apresenta uma baixa porcentagem de esgoto tratado, mas o que é tratado é utilizado na agricultura (WHO-CEHA, 2005).

Para a região do Líbano, conforme Jimenez e Asano (2008), não existem diretrizes ou regulamentos para a reutilização da água. Contudo, os regulamentos libaneses proíbem a reutilização de efluente tratado para irrigação de frutas e legumes. Existem normas ambientais nacionais para a descarga de efluentes tratados em águas de superfície e no mar.

Síria e Turquia também utilizam águas residuais para fins de irrigação (WHO-CEHA, 2005). Mas na Síria esse uso é restrito à forragem e a culturas industriais e árvores frutíferas em áreas pequenas (JIMENEZ E ASANO, 2008).

Países como os Emirados Árabes Unidos, Palestina e Qatar possuem leis ou projetos de lei que preveem padrões de lançamento de águas residuais, entretanto ainda sem pensar em normativas de reúso. E países como o Iêmen, que possui projetos de normas nacionais para reutilização de água, propondo um padrão uniforme para utilização dessas águas para irrigação de todas as culturas (JIMENEZ, ASANO, 2008).

Abaixo alguns países que têm se destacado nessa região.

## **Arábia Saudita**

Esse é o segundo maior país árabe do mundo com uma das maiores reservas de petróleo. Nesse país há regulamentação para que 15% do esgoto tratado seja reutilizado para fins industriais pela Organização Geral de Petróleo e Minerais. O restante é destinado para fins agrícolas. A plena utilização das águas residuais recuperada para usos não potáveis é levada a sério e considerada parte da política da água na Arábia Saudita (WHO-CEHA, 2005).

A Lei Real n. M/34 promulgada em 1980 constitui o quadro legislativo para a proteção dos recursos hídricos e inclui águas residuais. Normas nacionais de qualidade de águas residuais já foram aprovadas. Tratamento de águas residuais avançado é exigido para a prática da irrigação irrestrita e, nesse caso, as concentrações no efluente não devem exceder a contagem de 2,2/100 mL para coliformes totais, 10 mg/L para DBO e SST, e 1 UNT para turbidez. É proibida a irrigação de qualquer tipo de vegetal (JIMENEZ, ASANO, 2008).

## **Barein**

Esse pequeno país insular é o terceiro menor país da Ásia, sendo que a água de reúso é utilizada basicamente na agricultura e o guia

implementado para esse fim é o da Organização Mundial da Saúde (WHO-CEHA, 2005).

Para irrigação agrícola irrestrita e irrigação paisagística: é necessário tratamento terciário, além de desinfecção. Os critérios microbiológicos são os seguintes: menos de 2,2 coliformes/100 mL, menor ou igual a 1 ovo de helminto/L e testes de controle de qualidade periódicos devem ser realizados (JIMENEZ, ASANO, 2008).

## Jordânia

Esse país semiárido, quase sem litoral, é relativamente pequeno e possui uma base técnica datada de 1995, com revisões datadas de 2003 e 2006, para utilização de efluentes tratados com o propósito de irrigação, recarga artificial de aquífero e usos não potáveis. Existem normas rigorosas que proíbem o uso de efluente bruto para irrigação. O país está comprometido com uma política de reutilização completa de efluentes de águas residuais tratadas (EUWI, 2007).

Recarga de água subterrânea não é admitida quando aquíferos são utilizados para fins de consumo. Apesar das mudanças o critério para ovos de helminto foi mantido para todas as utilizações (JIMENEZ, ASANO, 2008).

## Irã

Conhecido oficialmente como República Islâmica do Irã, esse país localiza-se na região da antiga Pérsia, na Ásia Ocidental. O “Padrão de descarga de efluentes” desenvolvido pelo Departamento de Meio Ambiente em 1994 é o único código de águas residuais existente que define limites de descarga de efluentes para águas superficiais, fossas e irrigação agrícola. Essa norma não define quaisquer critérios para usar efluente tratado para uso industrial, pesca e atividades recreativas. Diretrizes internacionais desenvolvidas pela OMS e pela US EPA são atualmente utilizadas para regular a reutilização da água (JIMENEZ, ASANO, 2008).

## Israel

Parte do sucesso da prática de reutilização de águas residuais em Israel é devido à capacidade de os agricultores serem organizados e informados para se adaptar rapidamente à mudança da água convencional para águas residuais tratadas. Os primeiros regulamentos adotaram uma abordagem de “qualidades diferentes para diferentes culturas”, com um nível de proteção do meio ambiente fraco. Novos regulamentos (2005) mudaram um único padrão rigoroso para “irrigação irrestrita” e contemplam a proteção ambiental sustentável. Salinização é um dos problemas relacionados com a sustentabilidade da enorme reutilização de água a longo prazo. O país tem implementadas diversas medidas para reduzir a concentração de sais e boro na água de esgoto municipal (JIMENEZ, ASANO, 2008).

## Kuwait

Kuwait é o único país no mundo que não possui lagos ou rios. Por estar numa região extremamente quente, o consumo *per capita* de água é um dos mais elevados do mundo, tornando o reúso de água algo indispensável. Além disso, a indústria petrolífera do Kuwait demanda grandes quantidades de água, a qual é insuficientemente suprida por água subterrânea e dessalinização da água do Golfo Pérsico. Possui uma lista com padrões de água tratada utilizada para fins de irrigação (KARAM, 2013).

O padrão de qualidade dos efluentes para reúso de água requer nível avançado de tratamento, com o número de coliformes totais dos efluentes não superior a 100/100 mL e DBO e SST menos de 10 mg/L (JIMENEZ, ASANO, 2008).

## Omã

Nesse país existe a “Lei Geral Real para Recursos Hídricos n. 83/88”. O tratamento é necessário e duas regras principais regulam a reutilização

da água: (1) a reutilização da água, descarga e eliminação das lamas que incluem parâmetros físico-químicos, e (2) os padrões de águas residuais relacionadas com características biológicas. Duas categorias de reutilização de água destacam-se: para a categoria A (que inclui irrigação de hortaliças e frutas a serem consumidas cruas, áreas paisagísticas com acesso de público, recarga do aquífero controlada e irrigação por aspersão), qualidade do efluente deve ser tal que os valores para coliformes fecais sejam menores do que 200/100 mL e ovos de helmintos menor que 1/L. Para a Categoria B (que inclui irrigação de legumes a serem comidos cozidos, forragem, cereais e áreas sem acesso do público), o padrão é menor que 1.000 coliformes fecais/100 mL e menos de 1 ovo de helminto/L (JIMENEZ, ASANO, 2008).

### 5.2.3 Europa

Na Europa, em alguns países, como a Áustria, Bulgária, Dinamarca, Estônia, Finlândia, Hungria, Holanda, Polônia, Suécia, Reino Unido, não foi possível identificar práticas legisladas vigentes sobre reúso. Entretanto, iniciativas desse tipo de recurso são evidentes e muito utilizadas para fins industriais, dentre outros, em que os altos preços da água encorajam as empresas a reciclar água de processo e de sistemas de resfriamento, por exemplo (RASO, 2013).

A Bélgica e Alemanha possuem guias para utilização desse recurso na agricultura, consumo humano, reúso indireto não planejado, recarga de aquíferos e uso industrial (RASO, 2013).

Grécia, Itália, Portugal e Espanha possuem regulamentação definida para a utilização de água de reúso para fins agrícolas, industriais e para dessalinização, dentre outros (RASO, 2013). A reutilização não planejada costumava ser uma solução clássica para as zonas áridas e semiáridas em todo o litoral mediterrâneo espanhol (JIMENEZ, ASANO, 2008).

### Chipre

O Chipre é a terceira maior e mais populosa ilha do Mediterrâneo. Possui regulamentação definida que contempla usos agrícolas, municipais,

recarga de aquífero, industriais, ambientais e para dessalinização (RASO, 2013).

As regulamentações do Chipre em relação à qualidade da água de reúso para irrigação seguem a escola da Califórnia, embora com algumas pequenas diferenças. De fato, a maioria das estações de tratamento de esgoto – ETEs – estão usando processos intensivos com tratamento terciário (JIMENEZ, ASANO, 2008).

## **França**

A França possui regulamentação definida que contempla: usos agrícolas, municipais, industriais e para consumo humano, reúso indireto não planejado, recarga de aquífero e dessalinização (RASO, 2013).

O quadro regulamentar do país (Circular n. 51, de 22 de julho de 1991, do Ministério da Saúde) é baseado nas diretrizes da OMS (1989), mas apresenta exigências adicionais relativas à irrigação, a tempo, distância e outras medidas para prevenir riscos para a saúde relacionados com a exposição humana e os impactos ambientais negativos. O documento requer também a garantia de que o aquífero não será contaminado; o conhecimento da qualidade dos efluentes tratados e capacidade de fertilização, bem como profissionais de operação e controle devidamente treinados. Um decreto governamental de 1994 prevê a base para as regras de reutilização de água na França. Nele há clara indicação de que os efluentes tratados podem ser utilizados para fins agrícolas desde que não ofereçam quaisquer riscos para o meio ambiente ou à sociedade. Para irrigação, os requisitos de tratamento de águas residuais e programas de monitorização devem ser definidos de acordo com as recomendações do Conselho Superior de Higiene Pública da França (CSHPF) e do Programa Interministerial Missão da Água. A aprovação de um projeto de reutilização de água ainda depende da aprovação do representante local do Ministério da Saúde. Essas regras e regulamentos permitem que os projetos de reutilização de águas residuais sejam parte da política francesa de gestão dos recursos hídricos. No entanto, as autoridades sanitárias francesas locais impõem controles muito rígidos em projetos de reutilização de água. A qualidade da água necessária para esses projetos

é muitas vezes mais rigorosa do que a exigida pelas regras aprovadas pelo CSHPF e ainda mais rigorosas do que as normas da Califórnia, no caso de algumas aplicações urbanas. Novas diretrizes de reutilização de água estão em preparação. Elas podem introduzir alguns novos parâmetros para irrigação irrestrita como *Salmonella*, ovos de *Taenia* e vírus (JIMENEZ, ASANO, 2008).

## Malta

Em Malta, o reúso de efluentes para fins de irrigação é adotado desde 1884, com o objetivo de priorizar o uso da água natural para fins domésticos. Desde 1986, a possibilidade de reúso a partir de efluentes industriais passou a ser considerada. Há dois grandes consumidores de água industrial em Malta: a usina termelétrica Enemalta e o estaleiro Malta Drydocks. O uso de água reciclada para fins industriais depende primeiramente das circunstâncias econômicas, principalmente quando comparados os custos dessas com os custos de outras fontes como, por exemplo, água dessalinizada. Atualmente, a água reciclada é usada exclusivamente em lavanderias industriais (RASO, 2013).

## 5.2.4 África

Nesse continente as poucas iniciativas que existem estão basicamente vinculadas à utilização de água de reúso para fins de irrigação, como o caso do Marrocos, onde os padrões seguem os recomendados pela Organização Mundial da Saúde – OMS (JIMENEZ, ASANO, 2008) e Egito.

## Tunísia

Possui leis com padrões para a utilização da água de reúso na agricultura (WHO-CEHA, 2005).

O reúso de água é regulamentado pela lei da água (1975), pelo Decreto n. 89-1047 (1989) e outras normas para padrões de qualidade da água recuperada para reutilização, normas de eliminação de águas residuais

e pelo código para seleção de culturas e práticas agrícolas. Critérios de qualidade da água recuperada para reutilização agrícola foram desenvolvidos usando as diretrizes da FAO (1985) e da OMS (1989) para irrigação restrita (menos de 1 ovo de nematoide/L) e outros padrões tunisianos relacionados com a irrigação ou o abastecimento de água (JIMENEZ, ASANO, 2008).

## Argélia

A Lei da Água na Argélia proíbe o uso de efluente bruto e tratado para a irrigação de vegetais que são consumidos crus, mas permite o uso para a produção de plantas forrageiras, pastagens e árvores. É necessária autorização para a reutilização de águas não convencionais. Não existem padrões de reutilização (JIMENEZ, ASANO, 2008).

## 5.2.5 Ásia

### China

Na China, existe uma lei especificamente elaborada para gerir os recursos hídricos do país. É “A lei de água da República Popular da China”, que foi revista em 2002. No item 52 dessa lei, a recuperação de águas residuais e reutilização são incentivadas. Além disso, o reúso é estimulado em nível local.

A norma GB/T 18919-2002 classifica a reutilização de água de reúso urbano em cinco categorias: (i) consumo de água na agricultura, silvicultura, pecuária e piscicultura; (ii) consumo de água urbano; (iii) consumo de água pela indústria; (iv) água para uso ambiental; (v) recarga de fontes de água (JIMENEZ, ASANO, 2008).

### Singapura

Em 2002, o “Plano Verde Singapura 2012” foi formulado estabelecendo metas para os próximos dez anos. O plano tinha como meta

atender a 25% da demanda de água no ano de 2012 através de fontes não convencionais, como a dessalinização e o reúso. Para atingir essas metas, vários programas e medidas de incentivo foram implementados, não tendo sido encontradas referências sobre a sua situação atual (MINISTRY OF THE ENVIRONMENT AND WATER RESOURCES OF SINGAPORE, 2006).

## 5.2.6 América do Norte e Central

### Canadá

Os primeiros registros da utilização da água de reúso no Canadá foram na década de 80, sendo muito utilizada na irrigação de campos de golfe. Na indústria, cerca de 40% da água é reutilizada.

Apesar de não ter um guia nacional, há guias regulatórios em nível de província.

Diretrizes de qualidade da água em províncias canadenses envolvidas na reutilização da água incluem tipicamente patógenos e parâmetros físico-químicos, tais como produtos orgânicos, nutrientes, metais, sólidos em suspensão e cloro residual (JIMENEZ, ASANO, 2008).

### Costa Rica

Há todo um conjunto de leis e instituições relacionadas diretamente ou indiretamente à reutilização de águas residuais, tornando regulamentações adicionais difíceis de serem implementadas.

No capítulo VI do artigo 32 do regulamento de descarga de água são estabelecidas condições para oito tipos de reutilização, incluindo a agricultura. A reutilização de águas residuais para irrigação agrícola é permitida, desde que a qualidade do solo e das águas subterrâneas não seja afetada. Culturas que podem ser regadas com água reciclada são limitadas àquelas que sofrem algum tipo de processo industrial,

bem como produtos que não sejam para consumo humano, tais como pastagem, forragem, fibras e cultura de sementes. Coliformes fecais é o único parâmetro considerado para reutilização agrícola com um limite de <100 NMP/100 mL. A reutilização municipal é permitida em cinturões verdes, lavagem de carros, combate a incêndios, silvicultura, atividades recreativas e para a construção (JIMENEZ, ASANO, 2008).

## Estados Unidos

Possui o guia da US EPA 2012 (Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos), que serve como base para a regulamentação estadual. Esse guia é extremamente amplo, com diretrizes que cobrem o reúso de água para irrigação em plantações alimentares para consumo humano e de animais, irrigação de campos de golfe e parques, recarga de aquíferos e corpos d'água, produção de neve artificial e o reúso industrial, que é o foco deste trabalho. A Tabela 5.2 mostra o número de estados e territórios americanos que possuem diretrizes abordando o aspecto do reúso nessas diversas categorias.

De acordo com a EPA (2012), dos 51 estados e territórios que fazem parte dos EUA, 25 têm leis, regulamentações e diretrizes que fiscalizam o reúso de água industrial e seis têm leis, regulamentações e diretrizes que fiscalizam o descarte da água tratada nas plantas industriais, sendo o reúso considerado em casos isolados. No “ANEXO 2 – Estados e Territórios Americanos e as regulamentações, leis e diretrizes por categoria” se encontra uma lista completa com os estados e territórios que possuem leis, regulamentações e diretrizes cobrindo o reúso em diversas categorias.

De maneira geral destaca-se o estado da Califórnia, que foi o primeiro estado americano a regulamentar a água de reúso nos EUA. Possui uma legislação completa e detalhada, que é utilizada por outros países do mundo como guia (PURPLE BOOK - DEPARTMENT OF HEALTH SERVICE, 2001). Também o estado da Flórida, onde, apesar da grande disponibilidade hídrica, a água de reúso é amplamente utilizada e a legislação que estabelece padrões é avançada.

**Tabela 5.2:** Categorias de reúso de água e leis, regulamentos e diretrizes para estados e territórios dos EUA. Fonte: Adaptado de 2012 Guidelines for Water Reuse EPA (2012).

Categoria de reúso		Descrição	Estados ou territórios com regras, regulamentos ou diretrizes que abordam o reúso de água
Reúso urbano	Irrestrito	Uso de água recuperada para aplicações não potáveis em ambientes municipais onde o acesso público não é restrito.	32
	Restrito	Uso de água recuperada para aplicações não potáveis em ambientes municipais onde o acesso do público é controlado ou restringido por barreiras físicas ou institucionais, tais como cercas, sinalização de advertência ou restrição de acesso sazonal.	40
Reúso na agricultura	Produção de alimentos	Uso de água recuperada para irrigar culturas alimentares que são destinadas ao consumo humano.	27
	Produção de alimentos industrializados e culturas não alimentares	Uso de água recuperada para irrigar culturas que sejam tratadas antes do consumo humano ou não consumidas por seres humanos.	43
Represamentos	Irrestrito	Uso de água recuperada em um represamento em que não sejam impostos limites sobre as atividades de recreação aquática em que há contato direto (alguns estados classificam neve artificial nessa categoria).	13

Categoria de reúso		Descrição	Estados ou territórios com regras, regulamentos ou diretrizes que abordam o reúso de água
Representamentos	Restrito		
Reúso ambiental		Uso de água recuperada em um represamento onde o contato direto é restrito (alguns estados incluem a pesca e navegação nessa categoria).	17
Reúso industrial		Utilização de água recuperada para criar, melhorar, manter ou aumentar corpos de água, incluindo pântanos, habitats aquáticos ou a corrente fluvial.	17
Recarga de aquíferos - Reúso não potável		Uso de água recuperada em instalações e aplicações industriais, produção de energia e extração de combustíveis fósseis.	31
		Uso de água recuperada para recarregar aquíferos que não são usados como fonte de água potável.	16
	Reúso potável indireto	Aumento de uma fonte de água potável (de superfície ou subterrânea) com água recuperada, seguido por um "tampão ambiental" que precede o tratamento da água potável normal.	9
Reúso potável	Reúso potável direto	A introdução de água recuperada (com ou sem retenção em um sistema de armazenamento "pulmão") diretamente em uma estação de tratamento de água, quer ao lado ou afastada do sistema avançado de tratamento de águas residuais.	0

## Guatemala

É proibida a utilização de esgoto bruto para irrigação agrícola. O Acordo Governamental n. 236 de 2006 considera três tipos de reutilização: a irrigação agrícola, aquicultura e atividades recreativas. Padrões de qualidade da água são definidos para cada caso. Para irrigação agrícola, a ênfase está na recuperação de nutrientes. Os limites biológicos apenas consideram a quantidade de coliformes fecais (JIMENEZ, ASANO, 2008).

## México

Desde 1982, o reúso de água tem sido considerado parte da política nacional e foi regulamentado como parte dos critérios de descarga de águas residuais. O reúso de águas residuais é controlado através de duas regulamentações. Na primeira, ele é considerado parte da descarga de águas residuais pelas regulamentações nacionais de águas superficiais e subterrâneas. A reutilização agrícola é considerada como um caso especial de eliminação no solo. Para esse reúso, não há limites para a DBO ou o conteúdo de SST, mas há para metais e poluentes biológicos. Para as culturas que são usadas depois de industrializadas ou culturas que são consumidas após cozidas, até 5 ovos de helmintos/L e 1.000 coliformes fecais/100 mL são permitidos. O valor mais elevado de ovos de helmintos em comparação ao recomendado pelas diretrizes da OMS foi adotado considerando que a tecnologia convencional não é capaz de tratar a água para atingir menos de 1 ovo/L a partir da alta quantidade de ovos de helmintos normalmente encontrados em águas residuais. Para as culturas consumidas cruas, a regulamentação estabelece que as águas residuais tratadas devem conter menos de 1 ovo de helminto/L e menos de 1.000 coliformes fecais/100 mL. A matéria orgânica e os sólidos não são considerados nos critérios de irrigação, sendo que a matéria orgânica é considerada benéfica para o solo, enquanto o último tem de ser removido de qualquer forma, a fim de satisfazer os valores estipulados para ovos de helmintos. A segunda regulamentação de reutilização controla o reúso em obras públicas; os principais parâmetros são os biológicos,

deixando a definição dos outros parâmetros como responsabilidade dos usuários (JIMENEZ, ASANO, 2008).

## **República Dominicana**

A NORDOM 634 regulamenta a qualidade da água residual descartada em corpos d'água e considera o reúso como uma opção. No caso dos legumes, águas residuais com mais de 5.000 coliformes fecais e NMP/100 mL não devem ser utilizadas; a quantidade de ovos de helmintos não é limitada, a DBO<sub>5</sub> deve ser menor que 5 mg/L, SST menor que 1.000 mg/L e sólidos flutuantes devem estar ausentes (JIMENEZ, ASANO, 2008).

## **5.2.7 América do Sul**

### **Argentina**

O reúso é considerado como um objetivo geral. Em 1996, a província de Mendoza promulgou a Resolução 778/96 que define parâmetros para a reutilização de águas residuais para a agricultura e a indústria. Esse regulamento define as ACRES (áreas de cultivo restritas) como áreas onde apenas certos tipos de cultura podem ser cultivados quando a água recuperada é usada na irrigação. Normas para a água de reúso seguem os critérios da OMS. A implementação do regulamento depende do Departamento Geral de Irrigação (JIMENEZ, ASANO, 2008).

### **Chile**

A Resolução 207 do Departamento Geral de Águas estabelece condições para o uso de águas superficiais e subterrâneas, bem como para o reúso da água. A Lei NCh 1.333 proíbe a irrigação de culturas a serem consumidas cruas com águas residuais. Para o reúso de águas residuais tratadas, há um limite para coliformes fecais de 1.000 NMP/100 mL

para a irrigação de frutas e legumes que crescem no nível do solo e são normalmente consumidos crus. Não há limites para a quantidade de ovos de helmintos (JIMENEZ, ASANO, 2008).

## Colômbia

Possui leis que estabelecem padrões de água de reúso apenas para fins agrícolas.

A Lei 373 de 1997 estabelece um programa para o uso eficiente e economia de água. A legislação sobre “Água e Uso de Descargas Residuais” estipula que a água utilizada para a irrigação de frutas com casca para consumo humano, bem como vegetais de caules curtos, não deve conter mais de 5.000 coliformes totais/100 mL e 1.000 coliformes fecais/100 mL. Não há outros regulamentos específicos para reutilização da água (JIMENEZ, ASANO, 2008).

## Equador

O Artigo 20 do Capítulo III do Regulamento para prevenir e controlar a Poluição da Água, publicado em 1989, estabelece os critérios de qualidade para a reutilização de águas residuais destinadas à agricultura. Isso leva em conta metais, menos de 1.000 coliformes fecais/100 mL, a ausência de ovos de helmintos, pH e limite de gorduras e óleos. A regulamentação foi concluída em 1992 e define a qualidade da água em termos do processo de tratamento de águas residuais a ser utilizado (JIMENEZ, ASANO, 2008).

## Peru

Normas para controlar as descargas de águas residuais e reúso são encontradas em diferentes regulamentos e leis. A Lei 17.752 (1969), modificada em 1983, estabelece que as águas residuais a serem utilizadas para a irrigação agrícola devem ter menos de 1 ovo de nematoide/L.

A regulamentação também inclui limites para nitratos, metais, matéria orgânica, pH e alguns compostos tóxicos, exigindo um tratamento de nível terciário (JIMENEZ, ASANO, 2008).

## Venezuela

É proibida a irrigação com águas residuais não tratadas. O reúso de águas residuais tratadas é permitido em certos tipos de cultura. Valores menores que 100 coliformes fecais/100 mL e 1.000 coliformes totais são definidos para irrigar hortaliças para o consumo humano. Valores médios mensais de 5.000 coliformes totais e 1.000 coliformes fecais por 100 mL são permitidos em outros tipos de culturas utilizadas para a alimentação animal (JIMENEZ, ASANO, 2008).

## 5.3 Legislação brasileira

Apesar da grande disponibilidade hídrica do país, o Brasil sofre com a má distribuição da água em várias regiões e, quando há disponibilidade, nem sempre a qualidade dessa água é boa para seus fins.

Em nível Federal, a autarquia responsável pelo gerenciamento das águas é a Agência Nacional de Águas (ANA), cujas responsabilidades incluem a implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) e a coordenação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH). Esse último é dividido em diversas instâncias, das quais a mais alta é o Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), um colegiado que desenvolve regras de mediação entre os diversos usuários da água, sendo, assim, um dos grandes responsáveis pela implementação da gestão dos recursos hídricos no país. A Tabela 5.3 mostra algumas leis e resoluções vigentes aprovadas por esses órgãos.

Também, existem normas da ABNT que contemplam a questão do reúso de água, conforme apresentado na Tabela 5.4.

**Tabela 5.3:** Legislação Federal. Fonte: Adaptado de Brasil (1997), (2005) e (2011).

Ano	Legislação	Observações
1997	Lei n. 9.433 da PNRH – Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) e cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos.	Define a água como um bem público, dotado de valor econômico. O Capítulo IV trata dos instrumentos definidos para gestão dos recursos hídricos, como outorga pelo direito de uso da água e a cobrança correspondente. Esse indicativo de cobrança foi o grande impulsionador do reúso pelas indústrias.
2005	Resolução n. 357 do CONAMA – Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para seu enquadramento, bem como estabelece as condições de lançamento de efluentes.	Apesar de não tratar diretamente do reúso da água, segundo Luquez <i>et al.</i> (2006), a classificação das águas com seus usos preponderantes determinados permite um referenciamento para utilização das águas residuárias.
2005	Resolução n. 54 do CNRH – Critérios gerais para prática de reúso direto não potável.	Define cinco modalidades de reúso: Reúso para fins urbanos; Reúso para fins agrícolas e florestais; Reúso para fins ambientais; Reúso para fins industriais; Reúso para fins de aquicultura.
2011	Resolução n. 430 do CONAMA – Dispõe sobre as condições e os padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução n. 357 de 2005.	No artigo 27, Parágrafo único, cita a prática de reúso e dispõe sobre as concentrações de substâncias presentes no efluente.

**Tabela 5.4:** Normas. Fonte: Adaptado de ABNT (1997) e (2009).

Ano	Número	Observações
1997	ABNT NBR 13.969 – Tanques sépticos – Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos – Projeto, construção e operação.	Apresenta parâmetros para 4 Classes de reúso: Classe 1: lavagem de carros e outros usos com contato direto com o usuário. Classe 2: lavagem de pisos, calçadas e irrigação de jardins, manutenção de lagos e canais paisagísticos, exceto chafarizes. Classe 3: Descargas em vasos sanitários. Classe 4: Irrigação de pomares, cereais, forragens, pastagem para gados e outros cultivos através de escoamento superficial ou por sistema de irrigação pontual.
2009	ABNT NBR 15900-1 – Água para amassamento do concreto – Parte 1: Requisitos.	Essa norma especifica os requisitos para a água ser considerada adequada ao preparo de concreto e descreve os procedimentos de amostragem e abre a possibilidade do uso de água de reúso, desde que dentro dos padrões estabelecidos.

## 5.4 Legislação estadual

Em nível de estado não foi encontrada legislação específica para água de reúso. Foram encontradas leis para reutilização de água pluvial, entretanto esse não é o enfoque deste trabalho.

Foi encontrada referência a um plano para implantação de uma Política Estadual de Reúso de Água (ÁGUAS PARANÁ, 2010), como parte integrante do Plano Estadual de Recursos Hídricos, cujo documento redigido em 2010 integra os produtos previstos para o Plano Estadual de Recursos Hídricos do Paraná.

De acordo com o plano, o reúso da água surge como uma das formas mais interessantes de auxiliar a manutenção das disponibilidades hídricas sem a necessidade de busca de novas fontes de recursos hídricos. Especificamente, o Programa C.4. “Estudos para Implantação de uma Política Estadual de Reúso da Água” visa à elaboração da estratégia a ser adotada pelo Poder Público Estadual para a definição das diretrizes da Política Estadual de Reúso de Água e o detalhamento da Política Estadual de Reúso da Água (ÁGUAS PARANÁ, 2010).

Esses estudos têm como objetivos:

- Identificar as possíveis formas de reúso da água, destacando as práticas e técnicas atualmente em uso no Estado;
- Formular práticas orientativas quanto à viabilidade das diversas formas de reúso e as melhores condições de suas aplicações;
- Desenvolver e difundir tecnologias sustentáveis no uso da água, a fim de incrementar a oferta hídrica em áreas sujeitas a limitações de disponibilidade, tendo como uma das alternativas o reúso da água, obras de infraestrutura para regularização de vazões e ampliação da oferta de água bruta;
- Dar suporte para a sua operacionalização junto aos setores usuários de recursos hídricos, incluindo os consumidores finais dos sistemas de saneamento;
- Disseminar a prática e socialização de pesquisas acadêmicas para uso racional da água, tecnologias de captação, tratamento, armazenamento e uso da água de chuva;

- Identificar a compatibilidade das formas de reúso da água com a legislação vigente; e
- Adequar à legislação dos setores usuários de recursos hídricos, notadamente os setores de saneamento, agrícola, urbanístico e saúde pública (ÁGUAS PARANÁ, 2010).

## 5.5 Legislação municipal

No que tange ao nível municipal, os órgãos responsáveis pela elaboração das legislações vigentes nos municípios são geralmente autarquias dos municípios encarregadas do gerenciamento hídrico. A Tabela 5.5 mostra leis vigentes nos municípios de São Paulo e Maringá que cobrem a prática de reúso.

**Tabela 5.5:** Legislação Municipal. Fonte: Adaptado de Maringá (2003), São Paulo (2002) e (2015).

Cidade	Legislação	Observações
São Paulo (SP)	Lei n. 13309/2002 – Dispõe sobre o reúso de água não potável e dá outras providências.	Define que o município utilizará água de reúso, não potável, proveniente das estações de tratamento de esgoto, para a lavagem de ruas, praças públicas, passeios públicos, próprios municipais e outros logradouros, bem como para a irrigação de jardins, praças, campos esportivos e outros equipamentos.
São Paulo (SP)	Lei n. 16174/2015 – Estabelece regramento e medidas para fomento ao reúso de água para aplicações não potáveis, oriundas do polimento do efluente final do tratamento de esgoto, de recuperação de água de chuva, da drenagem de recintos subterrâneos e de rebaixamento de lençol freático e revoga a Lei Municipal n. 13.309/2002, no âmbito do município de São Paulo e dá outras providências.	Revoga a Lei n. 13.309/2002. Amplia e detalha o escopo da água de reúso no município. Indica padrões (ABNT NBR 15900-01:2009) que devem ser atendidos pela água de reúso.
Maringá (PR)	Lei n. 6076/2003 – Dispõe sobre o reúso de água não potável e dá outras providências.	Define que o município utilizará água de reúso, não potável, proveniente das estações de tratamento de esgoto, para a lavagem de ruas, praças públicas, passeios públicos, próprios municipais e outros logradouros, bem como para a irrigação de jardins, praças, campos esportivos e outros equipamentos.

## 5.6 Referências

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 13.969: Tanques sépticos – Unidades de tratamento complementas e disposição final dos efluentes líquidos – Projeto, construção e operação*. Rio de Janeiro, 1997.

\_\_\_\_\_. *NBR 15900-1: Água para amassamento do concreto – Parte 1: Requisitos*. Rio de Janeiro, 2009.

ÁGUAS PARANÁ – INSTITUTO DAS ÁGUAS DO PARANÁ. *Elaboração do Plano Estadual de Recursos Hídricos, 2010*. Disponível em: <[http://www.aguasparana.pr.gov.br/arquivos/File/PLERH/Produto3\\_2\\_e\\_2\\_2\\_RevisaoFinal.pdf](http://www.aguasparana.pr.gov.br/arquivos/File/PLERH/Produto3_2_e_2_2_RevisaoFinal.pdf)>. Acesso em: 14 abr. de 2020.

BRASIL. *Lei n. 9.433 de 08 de janeiro de 1997*. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei n. 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei n. 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 09 de janeiro de 1997.

\_\_\_\_\_. CNRH - Conselho Nacional de Recursos Hídricos. *Resolução n. 54, de 28 de novembro de 2005*. Estabelece modalidades, diretrizes e critérios gerais para a prática de reúso direto não potável de água, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 09 de março de 2006.

\_\_\_\_\_. CONAMA - Conselho Nacional de Meio Ambiente. *Resolução CONAMA n. 357, de 17 de março de 2005*. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 18 de março de 2005.

\_\_\_\_\_. CONAMA - Conselho Nacional de Meio Ambiente. *Resolução CONAMA n. 430, de 13 de maio de 2011*. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução n. 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 16 de maio de 2011.

- CALIFORNIA HEALTH LAWS RELATED TO RECYCLE WATER. *The Purple Book*. Califórnia Health Laws Related to Recycled Water. Ed. junho 2011. Disponível em: <<http://www.cdph.ca.gov/certlic/drinkingwater/Documents/Recharge/Purplebookupdate6-01.PDF>>. Acesso em: 21 mar. 2016.
- JIMENEZ; B.; ASANO, T. *Water Reuse – An Internacional Survey of current practice, issues and needs*. 1. ed. Scientific and Thecnical report n. 20. IWA Publishing, 2008.
- KARAM, M. K., 2013. *Technologies Used For Waste Water Treatment In Kuwait*. Environment Public Authority Kuwait. Disponível em: <[http://www.beatona.net/CMS/index.php?option=com\\_content&view=article&id=1658&Itemid=84&catid=37%3Aarticles&lang=en](http://www.beatona.net/CMS/index.php?option=com_content&view=article&id=1658&Itemid=84&catid=37%3Aarticles&lang=en)>. Acesso em: 21 de mar. 2016.
- LUQUEZ, L. P. Reúso de água à luz da legislação brasileira. *Revista Educação Agrícola Superior – Associação Brasileira de Educação Agrícola Superior*, v. 21, n. 02, p. 56-57, 2006.
- MARINGÁ. Lei n. 6.076, de 21 de janeiro de 2003. *Sistema de Leis Municipais. Maringá-PR*. Disponível em: <<https://leismunicipais.com.br/a/pr/m/maringa/lei-ordinaria/2003/608/6076/lei-ordinaria-n-6076-2003-dispoe-sobre-o-reuso-de-agua-nao-potavel-e-da-outras-providencias>>. Acesso em: 17 dez. 2019.
- MEDITERRANEAN WASTEWATER REUSE WORKING GROUP. *Mediterranean Wastewater Reuse Report*. Med Joint Process, 2007, 50 pp. Disponível em: <[http://ec.europa.eu/environment/water/water-urbanwaste/info/pdf/final\\_report.pdf](http://ec.europa.eu/environment/water/water-urbanwaste/info/pdf/final_report.pdf)>. Acesso em: 11 de fev. 2020.
- MINISTRY OF THE ENVIRONMENT AND WATER RESOURCES OF SINGAPORE, 2006. *The Singapore Green Plan 2012*. Disponível em: <<http://www.uncsd2012.org/content/documents/The%20Singapore%20Green%20Plan%202012.pdf>>. Acesso em: 19 abr. 2016.
- RASO, J. *Updated Report on Wastewater Reuse in the European Union*. 2013. Disponível em: <[http://ec.europa.eu/environment/water/blueprint/pdf/Final%20Report\\_Water%20Reuse\\_April%202013.pdf](http://ec.europa.eu/environment/water/blueprint/pdf/Final%20Report_Water%20Reuse_April%202013.pdf)>. Acesso em: 14 abr. 2020.

- SANZ, L. A.; GAWLIK, B. M. *Water Reuse in Europe - Relevant guidelines, needs for and barriers to innovation*. Luxembourg: Publications Office of the European Union. 48pp. Disponível em: <<http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC92582>>. Acesso em: 21 jan. 2020.
- SÃO PAULO. Lei n. 13.309, de 31 de janeiro de 2002. *Secretaria do Governo Municipal de São Paulo*. Disponível em: <[http://www3.prefeitura.sp.gov.br/cadlem/secretarias/negocios\\_juridicos/cadlem/integra.asp?alt=01022002L%20133090000](http://www3.prefeitura.sp.gov.br/cadlem/secretarias/negocios_juridicos/cadlem/integra.asp?alt=01022002L%20133090000)>. Acesso em: 21 mar. 2016.
- \_\_\_\_\_. Lei n. 16.174, de 22 de abril de 2015. *Secretaria do Governo Municipal de São Paulo*. Disponível em: <<http://legislacao.prefeitura.sp.gov.br/leis/lei-16174-de-22-de-abril-de-2015>>. Acesso em: 14 abr. 2020.
- SUPERINTENDÊNCIA DE RECURSOS HÍDRICOS, 2015. *Encarte Especial sobre a Crise Hídrica*. Conjuntura dos Recursos Hídricos do Brasil, Agência Nacional de Águas. Disponível em: <<http://www3.snirh.gov.br/portal/snirh/snirh-1/conjuntura-dos-recursos-hidricos/crisehidrica2014.pdf>>. Acesso em: 4 maio 2016.
- UNEP. *Guidelines for municipal wastewater reuse in the mediterranean regions*. 59pp. Disponível em: <[http://195.97.36.231/dbases/MEETING\\_DOCUMENTS/05WG264\\_9\\_eng.pdf](http://195.97.36.231/dbases/MEETING_DOCUMENTS/05WG264_9_eng.pdf)>. Acesso em: 29 mar. 2016.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). *2012 Guidelines for Water Reuse*. Washington, D.C. 643pp. Disponível em: <<http://nepis.epa.gov/Adobe/PDF/P100FS7K.pdf>>. Acesso em: 14 abr. 2020.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION. *A regional overview of wastewater management and reuse in the Eastern Mediterranean*. 67pp. Disponível em: <<http://applications.emro.who.int/dsaf/dsa759.pdf>>. Acesso em: 21 mar. 2016.
- \_\_\_\_\_. *Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater, Volume I: Policy and Regulatory Aspects*. Disponível em: <[http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/78265/1/9241546824\\_eng.pdf](http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/78265/1/9241546824_eng.pdf)>. Acesso em: 08 abr. 2020.

# 6

## Estudo de Caso: UEGA

Juliane de Melo Rodrigues  
Alike Solange Ferraro Pires  
Camila Melo Pesqueira  
Alcides Conte Neto  
Camila Marçal Gobi Pacher  
Heloisa Nunes da Motta  
João Paulo Jankowski Saboia  
Juliano de Andrade  
Rosana de Fátima Gibertoni





## 6.1 Introdução

Usinas termelétricas são consumidoras de grandes volumes de água, utilizados nas unidades de processo, nos sistemas de geração de vapor, nas torres de resfriamento, nos sistemas de combate a incêndio e para fins potáveis.

Segundo UNESCO (2020), é cada vez mais necessário considerar os recursos hídricos “não convencionais” no planejamento futuro. O reúso da água é uma alternativa confiável perante os recursos hídricos convencionais para uma série de usos, notadamente no setor industrial. Dessa forma, a Usina Elétrica a Gás de Araucária (UEGA) desenvolveu o projeto de pesquisa para estudar a disponibilidade de fontes de água/efluentes para obtenção de água de reúso, incluindo as possibilidades internas de reúso e sistemas avançados de tratamento associados às diferentes tecnologias convencionais de tratamento de águas e efluentes.

Essa iniciativa insere a UEGA como usuário responsável no contexto ambiental e tem relevância adicional no cenário estadual por propor a melhoria da gestão industrial da água. Está em sintonia com as metas previstas no Plano das Bacias do Alto Iguaçu e Afluentes do Alto Ribeira (ÁGUAS PARANÁ, 2014), que buscam a promoção do uso racional dos recursos hídricos a partir de ações que visem ao reúso da água.

## 6.2 A UEGA

A UEGA – Usina Elétrica a Gás de Araucária opera em ciclo combinado, com duas turbinas a gás e uma turbina a vapor, com potência instalada de 484,15 MW. A usina termelétrica ocupa uma área total de 250.000 m<sup>2</sup>, contando com: conjuntos turbina – geradores acionados a gás natural, caldeiras de recuperação de calor para geração de vapor, turbina a vapor do tipo condensação e respectivo alternador, condensador de vapor, sistema de água de resfriamento em circuito fechado com torre multicelular do tipo evaporativa com tiragem mecânica, sistema de tratamento de água, sistema de coleta e tratamento de efluentes, sistemas elétricos de baixa, média e alta tensão e sistemas de comando, controle e proteção (PROMON, 1999).

A produção de energia elétrica nos geradores acoplados às turbinas, com tecnologia de baixa emissão de óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), aliada ao fato de o gás natural ser o mais nobre combustível entre os de origem fóssil, apresenta baixo nível de emissões gasosas (PROMON, 1999).

A usina está situada no município de Araucária, que abrange uma área territorial de aproximadamente 469 km<sup>2</sup> na área de influência da região metropolitana de Curitiba. O município possui uma população residente estimada em 143.843 habitantes (IBGE, 2020).

A água constitui insumo de grande importância para a usina, que mantém com a Concessionária Estadual do Paraná um contrato para fornecimento da água industrial e potável.

A entrega da água industrial pré-tratada (clarificada) é feita nos limites do local da usina e a água potável chega à usina a partir da rede normal de abastecimento que atende a região. A vazão média de reposição (*make-up*) prevista em projeto é da ordem de 448 m<sup>3</sup>/h, para

substituição das perdas nos circuitos de resfriamento, caldeiras, resfriador evaporativo e uso geral. O valor máximo estimado em projeto é de 537 m<sup>3</sup>/h (PROMON, 1999).

O efluente final da usina é composto pelos efluentes líquidos relacionados abaixo:

- As águas servidas de instalações sanitárias e da cozinha, que recebem tratamento biológico e são monitoradas previamente ao seu envio ao tanque de monitoramento final de efluentes;
- As águas servidas utilizadas em limpeza de áreas de serviço e de manutenção da usina e a água de chuva drenada dessas áreas (que podem conter hidrocarbonetos), que são encaminhadas ao sistema de remoção de óleos e, posteriormente, ao tanque de monitoramento final de efluentes para posterior descarte ao rio Barigui e,
- As águas efluentes do processo oriundas das operações de regeneração de resinas e purgas da torre de resfriamento, que contêm sais dissolvidos e podem apresentar um pH ácido ou básico conforme a origem.

Os efluentes intermediários da regeneração de resinas são pré-tratados antes de seu envio ao tanque de neutralização, onde as correntes de purga são adicionadas para tratamento químico antes de seu envio ao tanque de monitoramento final de efluentes.

O corpo receptor do efluente final é o rio Barigui, um afluente da margem direita do rio Iguaçu. O rio possui 66 km de extensão e cruza os limites do município de Almirante Tamandaré, onde se localiza sua nascente, até sua foz nos municípios de Curitiba e Araucária.

A ocupação na região, mais a montante da bacia é preponderantemente rural, ocorrendo pequenos núcleos urbanos dispersos. Na parte média da bacia, no município de Curitiba, a densidade de ocupação urbana é alta, com muitos estabelecimentos comerciais e de serviços. E na região mais ao sul predomina o uso industrial devido à presença da Cidade Industrial de Curitiba (CIC) e parte da Cidade Industrial de Araucária (CIAr), que atraíram várias ocupações regulares e irregulares, pequenas indústrias e serviços. Os solos dessa bacia são utilizados em



As fontes alternativas previstas para o projeto foram a água industrial adquirida da concessionária estadual, as águas pluviais incidentes na área da usina, esgoto doméstico bruto de estação de tratamento de esgoto pertencente à concessionária estadual e o efluente industrial.

Durante o desenvolvimento do projeto, considerando a composição mista do efluente industrial, optou-se por testar a corrente de purga (*blowdown*) da torre de resfriamento, eliminando, assim, as possíveis contaminações. No entanto, como a usina esteve inoperante durante a maior parte da vigência do projeto, não foi possível testar essa fonte.

Estudos em escala laboratorial e piloto foram previstos para subsidiar a definição da melhor rota tecnológica para obtenção de água para o processo industrial da usina.

Ensaio de tratabilidade foram realizados no Laboratório de Processos de Separação com Membranas (PAM) da Universidade Federal do Rio de Janeiro. As amostras encaminhadas foram caracterizadas físico-quimicamente e foram testados em bancada os processos de microfiltração (MF), nanofiltração (NF) e osmose reversa (RO), que estão entre os mais amplamente utilizados em escala comercial.

Após a conclusão dos testes com os processos de separação por membranas, foi realizada a Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS), acoplada a Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), para as membranas dos processos de NF e RO, visando à identificação do material depositado na sua superfície. O MEV é um aparelho que fornece rapidamente informações sobre a morfologia e identificação de elementos químicos de uma amostra sólida, permitindo a observação e análise de suas características microestruturais (DEDAVID, 2007).

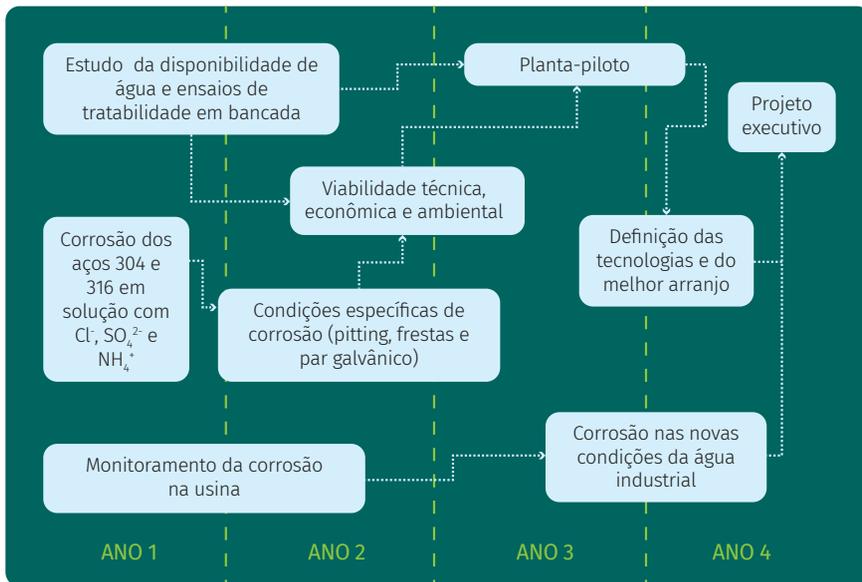
O projeto previu ainda a realização de campanhas analíticas para a geração de dados nas suas diversas etapas e, quando disponíveis, utilizou também dados de monitoramento fornecidos pela usina. Os resultados obtidos nas campanhas realizadas e na análise dos dados secundários foram comparados aos requisitos internos definidos pela usina para verificação do atendimento à qualidade de água desejada para admissão no sistema. Com base nessa análise, concluiu-se sobre a aplicabilidade das rotas tecnológicas pesquisadas.

O estudo em escala-piloto foi realizado para esgoto doméstico, em uma planta de MBR (biorreator de membranas) da WEHRLE do Brasil. O contêiner contendo a planta-piloto para testes e determinação do grau de biodegradabilidade foi utilizado pela primeira vez no Brasil e foi instalado nas dependências da estação de tratamento de esgoto da concessionária estadual, conforme acordo prévio.

A fim de garantir que os resultados do projeto pudessem ser aplicados na usina, foram realizados estudos de viabilidade ambiental, técnica e econômica para definição das tecnologias e do melhor arranjo a ser empregado para obtenção de água de reúso.

Os materiais do sistema de resfriamento de água da usina foram estudados quanto à corrosão, considerando a ação conjunta dos distintos íons existentes no sistema, em especial íons cloreto, sulfato e amônio. Foram avaliados o efeito sinérgico da interação entre as diferentes espécies e os possíveis mecanismos do processo corrosivo.

A Figura 6.2 apresenta o esquema básico do projeto.



**Figura 6.2:** Esquema do projeto de pesquisa.

Um aspecto de originalidade do projeto foi considerar as características específicas de cada fonte possível de reúso, associando-as às especificações da usina, incluindo avaliações quanto a eventuais processos de corrosão provenientes da inclusão da água de reúso no processo industrial.

Adicionalmente, a interação das áreas de conhecimento envolvidas com a atuação da equipe multidisciplinar possibilitou a análise conjunta de variáveis das áreas de meio ambiente, química, materiais e mecânica, incluindo análises em laboratório e ensaios em campo para definir uma forma de uso sustentável da água e proporcionar, à usina, informações técnicas e profissionais qualificados para a operação de sistemas de tratamento avançado de água e melhor gestão da demanda e oferta de água.

## 6.4 Disponibilidade de água industrial

Considerando que a água industrial adquirida pela usina necessita receber tratamento adicional a fim de atingir os requisitos internos para admissão no sistema, um dos objetivos específicos do projeto foi o estudo da água fornecida pela concessionária para fins industriais.

As tecnologias para reúso da água para fins industriais devem fornecer uma água com qualidade suficiente para atendimento aos requisitos internos da planta com vistas à manutenção da integridade dos equipamentos. Atualmente tem-se à disposição tecnologias consagradas, capazes de fornecer água com padrões compatíveis com aqueles desejados para água potável.

Para projetos de reutilização que exijam uma qualidade consistente da água final, o uso de sistemas de membrana que incorporam microfiltração (MF) ou ultrafiltração (UF) seguidos de nanofiltração (NF) ou osmose reversa (RO) apresenta excelentes resultados. NF e RO são processos de membrana acionados por pressão que separam constituintes dissolvidos de uma corrente de alimentação, gerando um permeado e um concentrado. O emprego desses processos geralmente resulta em recuperações de água do produto de 70 a 85% (ASANO, 2007).

De acordo com Seneviratne (2007), desde o seu advento na década de 1960, os processos de membrana são a opção preferida para o tratamento de água e águas residuais. Os custos dos sistemas de membrana diminuíram drasticamente ao longo dos anos e, juntamente com os avanços tecnológicos ocorridos, a sua gama de aplicações vem aumentando rapidamente, principalmente por serem eficazes na remoção de sólidos dissolvidos e em suspensão.

## 6.4.1 Metodologia

A metodologia utilizada no estudo da água industrial consistiu na realização de campanhas analíticas para geração de dados referentes à qualidade da água, adicionalmente à análise dos dados preexistentes oriundos do extenso banco de dados de monitoramento da usina. Os dados primários e secundários foram submetidos à análise estatística descritiva.

Após a caracterização da qualidade da água industrial, ensaios de tratabilidade em escala laboratorial foram realizados para a definição da melhor rota tecnológica a ser adotada. A discussão dos resultados foi realizada com base na verificação do atendimento aos requisitos de qualidade da água para o sistema da usina.

### 6.4.1.1 Caracterização da Água Industrial

As análises físico-químicas para a caracterização da água industrial ocorreram entre os meses de outubro de 2016 e julho de 2017, com base em duas campanhas analíticas de 3 meses de duração cada, sendo uma na estação mais seca e outra na estação mais chuvosa.

Nessas campanhas foram analisados os seguintes parâmetros de interesse direto para a usina:

- Carbono Orgânico Total (TOC);
- Óleos e Graxas (OG);
- Agentes Tensoativos.

Adicionalmente, para a caracterização da água industrial, a usina disponibilizou dados de monitoramento da qualidade da água industrial

referentes ao período compreendido entre os anos de 2013 e 2016. Das 31 variáveis monitoradas regularmente, a usina definiu 11 como sendo de interesse direto para a qualidade da água a ser admitida no processo, adotando limites para as variáveis críticas, objetivando estabelecer uma referência para a pesquisa. As variáveis críticas e os limites adotados pela usina estão listados na Tabela 6.1.

**Tabela 6.1:** Requisitos internos adotados pela UEGA para a qualidade da água industrial.

Variáveis	Unidade	Limite
Agentes tensoativos	mg/L	≤ 0,2
Alcalinidade total	mg/L	≤ 50
Carbono orgânico total (TOC)	mg/L	≤ 0,3
Cloretos	mg/L	≤ 40
Cloro residual	mg/L	> 0,2
Condutividade específica	μS/cm	≤ 280
Dureza total	mg/L	≤ 100
Ferro total	mg/L	≤ 0,1
Sílica	mg/L	≤ 12
Sulfatos	mg/L	≤ 50
Turbidez	UNT	≤ 2

### 6.4.1.2 Ensaios de Tratabilidade em Escala Laboratorial

Após a caracterização físico-química prévia, a amostra de água industrial seguiu para a etapa de determinação do índice de densidade de sedimentos (SDI) e do índice de sedimentos modificado (MFI), que permite uma avaliação preliminar do potencial de incrustação da amostra. Na sequência, seguiu para os testes de bancada, para investigação dos processos de microfiltração (MF), nanofiltração (NF) e osmose reversa (RO).

a) Determinação do Índice de Densidade de Sedimentos (SDI) e Índice de Sedimentos Modificado (MFI)

Diversas variáveis influenciam a vida útil das membranas, podendo ser determinadas por análises físico-químicas e testes específicos. Dentre os testes aplicáveis às membranas, pode-se citar especificamente o SDI, que serve como uma indicação confiável da quantidade de material particulado na água e se correlaciona com a tendência de incrustação dos sistemas de NF e RO. O experimento para SDI foi conduzido conforme a norma ASTM D4189-07 (2014).

O fluxograma e o sistema de filtração utilizados para a determinação de SDI e MFI seguem ilustrados na Figura 6.3 (a) e (b), respectivamente. Dentro da célula foi colocada uma membrana filtrante MF-Millipore™ HAWP04700, Merck S/A, com 47 mm de diâmetro e 0,45 µm de tamanho de poros. O experimento para SDI<sub>5</sub> (SDI de 5 minutos) padrão foi realizado com uma pressão de filtração de 30 psi, consistindo na medição do tempo gasto para coletar 500 mL de permeado no início da filtração (tempo  $t_1$ ) até o final do teste (tempo  $t_2$ ), em que a filtração entre as medidas de volumes possui uma duração predeterminada (tempo T). O cálculo do índice é dado pela Equação 6.1.

$$SDI(T) = ((1 - t_1/t_2) \times 100) / T$$

Equação 6.1

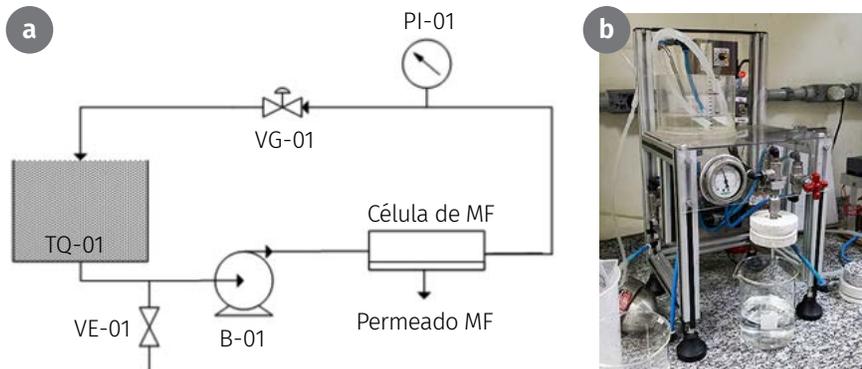


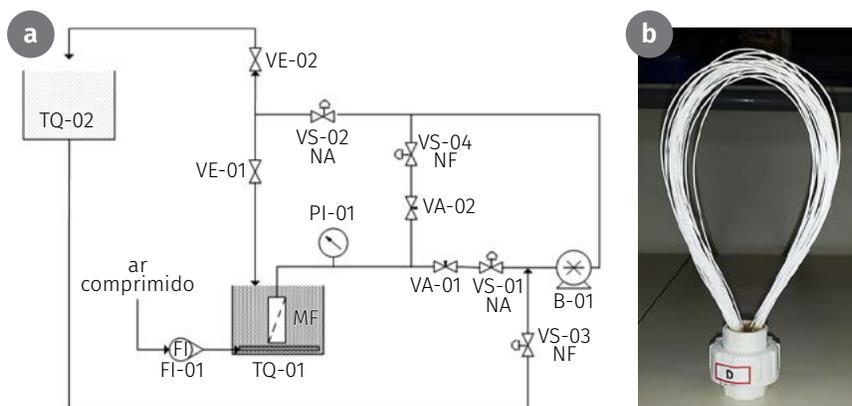
Figura 6.3: Fluxograma do sistema de MFI/SDI (a); Sistema de SDI/MFI (b).

O primeiro teste foi realizado com tempo entre as filtrações (T) igual a 5 minutos e o segundo, com tempo de 2,17 minutos. Foi adotado como valor final para o SDI o valor médio entre os dois ensaios.

Os valores de SDI podem variar de zero (efluente limpo) até 20 (para um tempo de  $t = 5$  min), 6,66 ( $t = 15$  min) ou 4 ( $t = 25$  min). De um modo geral, considera-se a alimentação em condições satisfatórias quando o índice de sedimentos está abaixo de 5.

#### b) Sistema de Microfiltração Submersa com Retrolavagem

A microfiltração (MF) vem sendo estudada e utilizada como pré-tratamento para processos de separação por membranas, especialmente para a RO, pela sua capacidade de remoção de matéria coloidal orgânica, sólidos suspensos e contaminantes biológicos presentes em correntes aquosas. Assim diminui a frequência das limpezas das membranas e aumenta o seu tempo de vida útil (BYRNE, 2002). A Figura 6.4 apresenta o fluxograma de microfiltração submersa (a) e o módulo de MF submersa utilizado no teste (b).



**Figura 6.4:** Fluxograma do sistema de MF submersa com retrolavagem (a); Imagem de módulo de MF Submersa (b).

O teste de MF submersa com a água industrial foi realizado com aplicação de retrolavagem (30 segundos a cada 15 minutos de filtração) e de aeração, ambos com o objetivo de avaliar a diminuição de incrustação na superfície das membranas.

O módulo foi inicialmente caracterizado com água microfiltrada, destilada e desmineralizada e registrada a permeabilidade hidráulica. Após uma hora de compactação da membrana, foi novamente medida a sua permeabilidade hidráulica. Ao longo dos testes os valores de permeabilidade se mantiveram razoavelmente estáveis, mostrando que a retrolavagem recuperou parcialmente a permeabilidade da membrana em cada ciclo, mantendo o fluxo permeado num patamar mais elevado.

A aeração não se mostrou eficaz, o que se deve ao fato de a amostra apresentar baixo valor de sólidos suspensos. Apesar de haver presença de sólidos suspensos finos nos testes de SDI/MFI, o valor obtido foi muito baixo, não sendo possível mensurar no experimento de sólidos, onde os resultados em triplicata foram zero.

A limpeza química consistiu em uma sequência de 2 horas com solução de ácido cítrico (pH 3,5) e mais 2 horas com solução de NaOH (pH 10). E mostrou-se eficaz na recuperação do fluxo permeado no módulo de MF, atingindo valor semelhante ao inicial para a membrana limpa no início do teste.

#### c) Sistema de Nanofiltração (NF) e Osmose Reversa (RO)

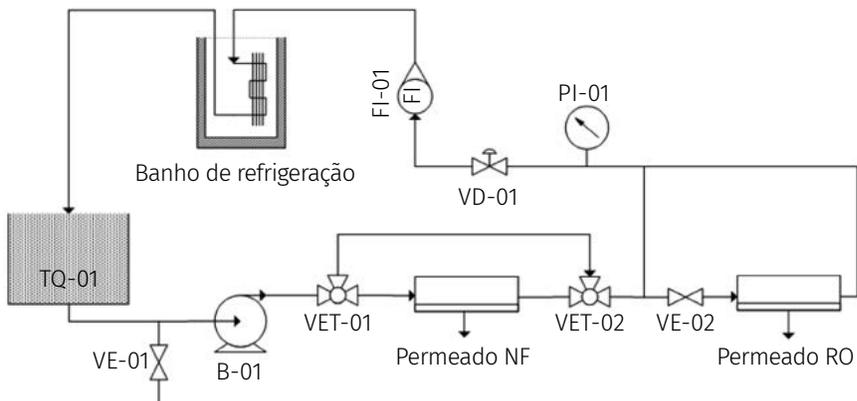
O experimento foi realizado com aplicação de 15 bar de pressão durante 9 horas e as medidas foram realizadas a cada meia hora. As correntes de concentrado NF/RO, permeado NF e permeado RO foram caracterizadas a cada meia hora em relação à condutividade e permeabilidade hidráulica. Também foram realizadas análises de caracterização de acordo com parâmetros de interesse dos processos.

Observou-se que os permeados de NF e RO se mostraram semelhantes em relação à condutividade. Foi possível observar aumento nas condutividades dos permeados ao longo do tempo, com o aumento da condutividade do concentrado, dado que a rejeição foi mantida constante em torno de 98% durante todo o período para os dois processos.

A permeabilidade hidráulica das membranas de NF e de RO se manteve semelhante aos valores das membranas novas inicialmente caracterizadas com solução de 2.000 ppm de NaCl em água. Dessa forma, comprovou-se

que as membranas foram eficazes durante todo o processo, mantendo rejeição e permeabilidade constantes sem apresentar incrustações.

As membranas utilizadas foram DOW FILMTEC™ NF90-2540 Nanofiltration Elements for Commercial Systems para o teste de nanofiltração e DOW FILMTEC™ BW30-2540 para o teste de osmose reversa. O fluxograma do sistema de nanofiltração e osmose reversa é apresentado na Figura 6.5.



**Figura 6.5:** Fluxograma do sistema de NF/RO.

## 6.4.2 Resultados e Discussão

Os resultados obtidos para os testes de tratabilidade e caracterização da água industrial são apresentados e discutidos nos itens seguintes. A discussão dos resultados foi realizada com base na verificação do atendimento aos requisitos de qualidade de água da usina.

### 6.4.2.1 Caracterização da Água Industrial

Os dados disponíveis para a caracterização da água industrial receberam tratamento estatístico e estão sumarizados na Tabela 6.2. A análise englobou os dados primários gerados pelo projeto e os dados secundários disponibilizados pela usina, perfazendo um total de mais de 600 determinações para os parâmetros de interesse direto da usina.

**Tabela 6.2:** Resumo estatístico dos dados de qualidade da água industrial.

Variáveis	N.	Mín.	p(25%)	Mediana	Média	p(75%)	Máx.	Desvio-padrão
Agentes tensoativos (mg/L)	130	0,05	0,20	0,29	0,38	0,60	1,00	0,24
Alcalinidade total (mg/L)	616	29,80	55,40	66,10	67,89	79,60	119,80	17,46
Bário (mg/L)	55	0,050	0,050	0,050	0,052	0,052	0,061	0,004
Cálcio (mg/L)	62	8,497	11,655	12,974	12,822	13,994	17,900	2,052
Carbono orgânico total (TOC) (mg/L)	75	1,6	3,7	4,6	4,6	5,3	9,5	1,4
Cloretos (mg/L)	620	13,30	27,68	32,95	34,05	39,42	61,60	8,63
Cloro residual (mg/L)	617	0,01	0,03	0,04	0,05	0,06	0,20	0,03
Condutividade específica (µS/cm)	680	120,70	272,20	322,95	333,07	384,00	565,50	80,13
Cor (uC)	4	5,00	8,75	12,50	11,25	15,00	15,00	4,79
DBO (mg/L)	28	0,30	1,55	2,80	3,35	4,10	8,90	2,38
Dióxido de carbono (mg/L)	58	5,00	13,23	17,18	19,68	24,99	48,63	9,03
DQO (mg/L)	52	2,00	9,50	16,00	16,61	21,25	40,00	9,49
Dureza cálcio (mg/L)	599	20,00	29,70	32,80	32,84	36,40	49,00	5,08
Dureza total (mg/L)	665	32,00	48,40	53,80	53,90	59,00	78,30	8,10
Ferro total (mg/L)	405	0,005	0,032	0,100	0,197	0,300	1,800	0,232
Magnésio (mg/L)	59	3,95	4,70	5,34	5,51	6,30	8,00	1,06
Nitratos (mg/L)	3	3,02	4,21	5,40	4,75	5,61	5,82	1,51
Nitritos (mg/L)	54	0,005	0,005	0,007	0,016	0,020	0,090	0,019
Nitrogênio amoniacal (mg/L)	139	0,13	3,33	6,97	7,23	9,65	21,300	4,68
pH	632	6,11	6,57	6,75	6,72	6,87	7,28	0,21
Potássio (mg/L)	4	3,40	4,60	5,00	5,30	5,70	7,80	1,83
Sílica (mg/L)	638	0,78	8,42	10,10	10,16	11,97	30,80	2,84
Sódio (mg/L)	62	11,50	19,93	26,51	26,07	32,21	41,60	7,68
Sólidos dissolvidos (mg/L)	4	5,00	89,75	134,00	119,00	163,25	203,00	83,69
Sólidos suspensos (mg/L)	3	1,0	2,0	3,0	60,3	90,0	177,0	101,0
Sulfatos (mg/L)	584	0,5	33,0	40,0	42,4	49,9	82,0	13,7
Temperatura da água (°C)	7	17,6	19,6	20,0	20,2	21,5	21,9	1,5
Turbidez (UNT)	621	0,10	0,26	0,59	0,83	1,10	4,64	0,79
Zinco (mg/L)	59	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,05	0,01

Os resultados obtidos para as variáveis críticas foram analisados em conjunto em relação aos limites de qualidade da água industrial adotados pela usina e estão sumarizados na Tabela 6.3.

**Tabela 6.3:** Variáveis críticas e limites adotados pela usina.

Variáveis	Unidade	Limite	% Valores em desacordo com o limite de qualidade de água adotado pela usina
Agentes tensoativos	mg/L	≤ 0,2	61,5
Alcalinidade total	mg/L	≤ 50	84,6
Carbono orgânico total (TOC)	mg/L	≤ 0,3	100
Cloretos	mg/L	≤ 40	23,7
Cloro residual	mg/L	> 0,2	100
Condutividade específica	μS/cm	≤ 280	70,6
Dureza total	mg/L	≤ 100	0
Ferro total	mg/L	≤ 0,1	48,6
Sílica	mg/L	≤ 12	24,5
Sulfatos	mg/L	≤ 50	23,5
Turbidez	UNT	≤ 2	9

A análise estatística evidenciou que, no período analisado, cem por cento dos resultados obtidos para TOC ficaram acima do limite adotado pela usina. O parâmetro TOC é de grande importância para a usina, indicando a presença de matéria orgânica na água, altamente indesejável no processo. De acordo com Asano (2007), o carbono orgânico pode revestir as superfícies dos tubos e impedir a liberação de metais, podendo também formar complexos metálicos que aumentam a liberação desses. Ainda, pode promover o crescimento biológico e induzir à corrosão.

Para cloro residual o limite mínimo não foi atingido, sendo necessário que a água industrial apresente um residual acima de 0,2 mg/L ao ser admitida na usina.

As variáveis alcalinidade total (84,6%) e condutividade específica (70,6%) também apresentaram elevada porcentagem de valores acima

dos limites adotados pela usina. Os íons cálcio, magnésio e alumínio contribuem para a formação de incrustações. Elevados valores de alcalinidade podem levar à liberação de dióxido de carbono, o que pode aumentar a acidez no vapor e a corrosão nos equipamentos (NRC, 2012).

Outra variável crítica para a usina, cuja presença é também altamente indesejada no processo, são os agentes tensoativos, apresentando 61,5% dos resultados acima do limite no período analisado.

Para as outras variáveis de interesse, os resultados referentes ao período analisado excederam os limites com baixa frequência e seus valores de mediana (Tabela 6.2) permaneceram abaixo dos limites adotados pela usina.

Os resultados obtidos para dureza total em nenhuma ocasião excederam o limite de qualidade de água requerido para o sistema da usina, de 100 mg/L, durante o período analisado (Tabela 6.2 e Tabela 6.3).

### **6.4.2.2 Ensaios de Tratabilidade em Escala Laboratorial**

A caracterização físico-química da água industrial em ensaio de tratabilidade apresentou valores baixos para turbidez e sólidos suspensos, refletindo em valores reduzidos para SDI médio (2,30), indicando que o pré-tratamento para o processo de separação por membranas poderia ser simplificado para uma filtração convencional.

No entanto, esse resultado não é corroborado quando considerados os valores máximos de qualidade da água industrial de 4,64 UNT para turbidez e 177 mg/L para sólidos suspensos, conforme a Tabela 6.2. Portanto, sugere-se um nível mais sofisticado de pré-tratamento para a água admitida na usina, dado que na condição real os valores para SDI e MFI certamente seriam maiores e a filtração convencional não garantiria proteção ao sistema de membranas.

A Tabela 6.4 sumariza os resultados obtidos na caracterização da amostra da água industrial e nos testes de tratabilidade em bancada, para microfiltração (MF), nanofiltração (NF) e osmose reversa (RO). Devido a questões logísticas, os parâmetros cloro residual e agentes tensoativos não foram avaliados em escala laboratorial.

**Tabela 6.4:** Resultados obtidos na caracterização da amostra da água industrial e nos testes de tratabilidade em escala laboratorial.

Variáveis	Unidade	Amostra da Água Industrial	Permeado MF	Permeado NF	Permeado RO
Turbidez	UNT	1,07	0,31	< 0,02	< 0,02
pH	adimensional	7,55	7,80	6,56	6,36
Condutividade específica	µS/cm	384,41	388,11	22,81	18,88
Cor aparente	uC	10,91	7,37	NR	NR
Cor verdadeira	uC	8,88	5,41	0,0	0,15
DQO	mg/L	19,13	15,06	1,27	3,41
Carbono orgânico total (TOC)	mg/L	2,43 (após MF)	2,43	0,0	0,0
Carbono inorgânico total (TIC)	mg/L	13,37 (após MF)	13,37	0,0	0,0
Dureza total	mg/L	72,5	70,0	0,0	0,0
Alcalinidade total	mg/L	65,0	77,5	2,0	0,0
Sólidos totais	mg/L	272,7	181,8	NR	NR
Sólidos suspensos	mg/L	0,0	0,0	NR	NR
Sólidos dissolvidos	mg/L	272,7	181,8	NR	NR
SDI <sub>5</sub>	adimensional	2,30	NR	NR	NR
MFI	adimensional	27,53	NR	NR	NR
Cálcio	mg/L	8,90	9,48	0,31	0,25
Magnésio	mg/L	5,61	5,34	0,02	0,002
Sódio	mg/L	28,65	27,33	2,78	2,20
Potássio	mg/L	5,35	4,59	0,05	0,07
Ferro	mg/L	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Manganês	mg/L	< 0,25	< 0,25	< 0,25	< 0,25
Sulfatos	mg/L	46,11	52,22	0	0
Sílica	mg/L	6,6	6,6	0,15	0,1
Cloretos	mg/L	51,5	NR	0,002	5,5
Nitratos	mg/L	NR	NR	NR	NR
Nitritos	mg/L	NR	NR	NR	NR
Nitrogênio amoniacal	mg/L	7,1	NR	1,7	1,0

NR: Não Realizado.

Devido à baixa concentração de sólidos dissolvidos na amostra (272,7 mg/L), não foi observada diferença significativa nos resultados obtidos para os processos de nanofiltração e osmose reversa. Conforme apresentado na Tabela 6.2, o valor máximo obtido para essa variável foi de 203 mg/L.

Os resultados operacionais mostraram que a condutividade do permeado foi inferior a 40  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (muito abaixo do limite fixado pela usina para esse parâmetro). A permeabilidade dos processos foi mantida praticamente inalterada durante o processo de concentração, indicando ausência da formação de incrustações na superfície das membranas, o que foi confirmando pela análise de EDS/MEV.

A espectroscopia por energia dispersiva (EDS) da membrana de NF, visando à identificação do material depositado na sua superfície após o teste com o permeado da MF, evidenciou a presença de carbono, oxigênio, enxofre, silício, alumínio, ferro e cromo.

Para a membrana de RO, os espectros do EDS mostraram a presença de carbono, oxigênio, enxofre, silício, alumínio, sódio, potássio e cálcio. Os achados são compatíveis com o esperado para a água industrial, podendo a presença do elemento cromo estar associada a processos corrosivos no sistema experimental de aço inoxidável.

A Tabela 6.5 apresenta a síntese dos resultados obtidos nos testes de bancada para as rotas tecnológicas pesquisadas e sua comparação com os limites de qualidade da água industrial adotados pela usina, para os permeados (saída) dos processos de nanofiltração e osmose reversa.

**Tabela 6.5:** Resultados obtidos na investigação das rotas tecnológicas e limites de qualidade da água industrial para o sistema da usina.

Variáveis	Unidade	Limite	Entrada	Permeado (Saída) NF	Permeado (Saída) RO
Alcalinidade total	mg/L	≤ 50	65	2	0
Carbono orgânico total (TOC)	mg/L	≤ 0,3	2,43	0	0
Cloretos	mg/L	≤ 40	51,5	0,002	5,5
Condutividade específica	μS/cm	≤ 280	384,41	22,81	18,88
Dureza total	mg/L	≤ 100	72,5	0	0
Ferro total	mg/L	≤ 0,1	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Sílica	mg/L	≤ 12	6,6	0,15	0,1
Sulfatos	mg/L	≤ 50	46,11	0	0
Turbidez	UNT	≤ 2	1,07	< 0,02	< 0,02

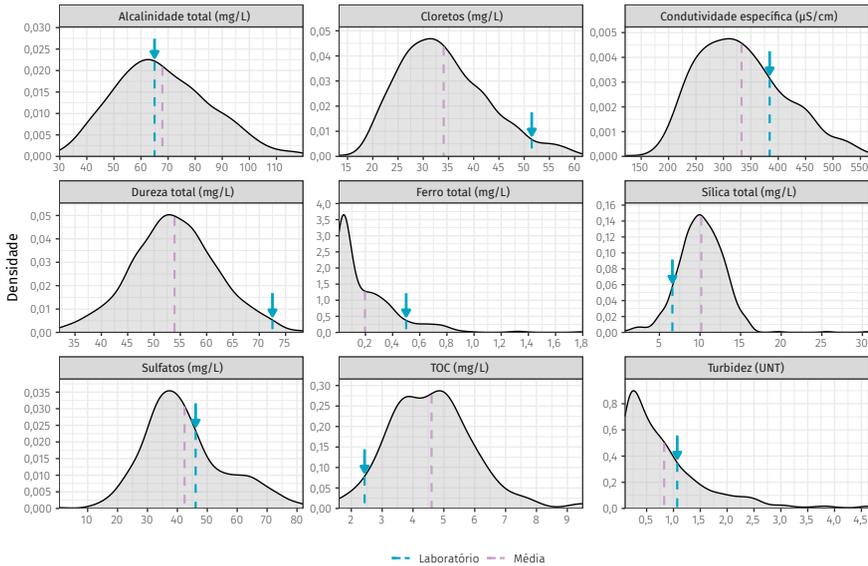
Os resultados obtidos para os processos de nanofiltração e osmose reversa evidenciaram a eficácia do uso dessas tecnologias, reduzindo drasticamente as concentrações para todas as variáveis de interesse da usina.

Os valores encontrados para sulfatos, TOC, dureza total e alcalinidade total foram nulos e o valor obtido para sílica ficou muito próximo desse patamar. Os valores obtidos para ferro total não puderam ser avaliados dado que a concentração da variável se encontra abaixo do limite de quantificação do método (< 0,5), sendo maior do que o limite requerido para o sistema da usina (≤ 0,1).

Esses valores, tomados em conjunto com as outras variáveis de interesse, indicam que, em princípio, essas tecnologias poderiam oferecer água com qualidade suficiente até mesmo para ser encaminhada à caldeira.

A fim de validar a representatividade dos valores obtidos nos ensaios de tratabilidade, foi estimada a densidade de probabilidade (distribuição de uma variável aleatória contínua) para as variáveis de qualidade da água industrial de interesse da usina (Figura 6.6). Referentes a essa distribuição, estão demonstrados os valores médios. Os valores relativos

à amostra da água industrial foram sobrepostos à figura (flecha), possibilitando caracterizar a amostra em relação à distribuição dos dados de qualidade da água industrial.



**Figura 6.6:** Distribuição das variáveis de qualidade de água de interesse da usina.

A caracterização físico-química da amostra, submetida aos ensaios de tratabilidade, apresentou valor superior aos valores médios de qualidade da água industrial para as variáveis cloretos, condutividade, dureza total, ferro total, sulfatos e turbidez. A distribuição dos dados de ferro total é assimétrica à direita, mostrando uma maior densidade de valores próximos a zero. Os valores de cloretos, dureza total e ferro total relativos à amostra da água industrial estão mais distantes da média da distribuição. Estão próximos aos valores máximos e caracterizando um dado não muito frequente, mas ainda dentro da faixa dos valores observados anteriormente.

As variáveis alcalinidade total, condutividade, sulfatos e turbidez determinadas nos ensaios de tratabilidade apresentaram valores mais próximos da média do conjunto de dados de qualidade da água industrial. Como pode ser notado na Figura 6.6, o valor de alcalinidade total amostrado também está próximo à moda, representada pelo pico da distri-

buição, demonstrando a representatividade do dado. Já os valores das variáveis TOC e sílica estão mais distantes da média, ficando próximos aos valores mínimos, mas ainda se localizando dentro do intervalo de valores observados previamente.

Apesar de alguns valores relativos à amostra da água industrial submetida aos ensaios de tratabilidade localizarem-se próximos às caudas da distribuição de probabilidade estimada, nenhum valor ficou fora da faixa de valores anteriormente observados de qualidade da água industrial, indicando a representatividade da amostra analisada em relação ao conjunto de dados.

### 6.4.3 Conclusões

A representatividade dos valores obtidos para a amostra da água industrial, submetida aos testes de tratabilidade, foi atestada a partir da comparação com a distribuição de probabilidade estimada para as variáveis de qualidade da água industrial de interesse da usina. Dessa forma, os valores obtidos para a amostra da água industrial se revelaram compatíveis com o universo de dados analisados e são válidos para análise e conclusões referentes às rotas tecnológicas pesquisadas.

A análise estatística aplicada ao conjunto de dados para a caracterização da qualidade da água industrial evidenciou que os valores obtidos para as variáveis agentes tensoativos, alcalinidade total, cloro residual, condutividade específica e matéria orgânica (TOC) são superiores aos limites internos adotados pela usina para as variáveis críticas definidas.

Assim, é necessário investimento em tratamento adicional para água industrial admitida na usina, em especial para as variáveis matéria orgânica (TOC) e agentes tensoativos, altamente indesejáveis no sistema.

Considerando os valores obtidos para dureza total, alcalinidade total e concentração de íons sulfato, seria indicada a adição de anti-incrustantes para controle da incrustação por precipitação (*scaling*) no sistema.

Nas condições em que foram realizados os testes de tratabilidade, o emprego de qualquer um dos processos de NF ou RO atenderia com folga aos requisitos de qualidade da água para o sistema da usina. A qualidade

da água obtida nos testes de tratabilidade permite a consideração de sua utilização na caldeira, a serem estudadas todas as condições da usina. Estudos subsequentes e complementares para a implementação em escala industrial suprirão informações necessárias para a definição entre as tecnologias de NF e RO.

A rota tecnológica a ser empregada em escala industrial deverá ser capaz de reduzir significativamente a concentração de matéria orgânica presente na água industrial (representada pela variável carbono orgânico total) e de agentes tensoativos, duas das variáveis críticas para a usina que apresentaram concentração muito superior ao limite requerido para o seu sistema.

## 6.5 Disponibilidade de água pluvial

Sendo considerada uma fonte alternativa de água, a água pluvial é usada mais frequentemente em situações em que não há necessidade de elevados níveis de qualidade, tais como água para fins não potáveis na irrigação, residências e edifícios comerciais, podendo, nestes casos, ocorrer a utilização em vasos sanitários, máquinas de lavar roupa, lavagem de calçadas e proteção contra incêndio. Os sistemas de captação de água pluvial são geralmente constituídos por uma instalação com cinco funções principais: coleta, tratamento, armazenamento, distribuição e sinalização.

- A coleta da água pluvial envolve a sua condução para um reservatório, sendo recomendado o descarte das primeiras chuvas em direção à rede pública de drenagem. Essa medida permite diminuir a taxa de impurezas indesejáveis, mas apresenta o inconveniente de diminuir os volumes coletados (ASTEE, 2015).
- O tratamento busca assegurar a qualidade da água em função dos usos visados. Na Tabela 6.6 é apresentado um resumo dos principais métodos de tratamento que podem ser empregados para os usos mais simples e corriqueiros. O sistema de tratamento a ser adotado dependerá diretamente dos usos desejados para a água. Contudo, independentemente do uso, é recomendável que no início da operação do sistema de aproveitamento de água pluvial se

faça uma caracterização físico-química e microbiológica da água coletada.

**Tabela 6.6:** Principais métodos de tratamento. Fonte: FIEMG/FEAM (2016).

Método		Localização	Resultado
Gradeamento	Telas e grades	Calhas e tubos de queda	Previne entrada de detritos no tanque
Sedimentação	Sedimentação	No tanque	Sedimenta matéria particulada
Filtração	Filtro autolimpante	Antes do tanque	Elimina material suspenso
	Carvão ativado	Na torneira	Remove o cloro e melhora o sabor
	Filtro lento de areia	Em tanque separado	Remove partículas
Desinfecção	Fervura/ destilação	Antes do uso	Elimina microrganismos
	Tratamento químico (cloro)	No reservatório	
	Luz ultravioleta	Após carvão ativado e/ou filtro, antes da torneira	
	Ozonização	Antes da torneira	

- O armazenamento visa acumular uma quantidade suficiente de água para uso, observando a disponibilidade de chuva do local e a demanda de consumo, bem como preservar a qualidade da água estocada pelo tempo definido. Os reservatórios podem ser instalados no interior ou no exterior do estabelecimento, podendo ser enterrados ou não.
- A distribuição tem por objetivo alimentar os pontos de consumo de uso prioritário para água pluvial recuperada. A adição de água da rede de abastecimento público pode ser executada por um dispositivo completamente desconectado, porém não é recomendável nenhuma ligação direta entre os sistemas de água pluvial e água potável.

- A sinalização deve fornecer aos usuários e responsáveis pela manutenção do sistema informações claras, assegurando a utilização segura das instalações e evitando ligações inapropriadas ao sistema. Os elementos do sistema de águas pluviais e do sistema de água potável devem estar claramente diferenciados e é obrigatória, segundo a NBR 15527:2007 (ABNT, 2007).

Para a gestão da oferta de água para a UEGA, um dos objetivos específicos do projeto foi o estudo da viabilidade da coleta e utilização da água pluvial para fins de reúso, como fonte alternativa de água para o processo. Entende-se por água pluvial toda a água de chuva drenada por um sistema de captação constituído de calhas, telhados e galerias.

## 6.5.1 Metodologia

Estudos quantitativos e qualitativos foram realizados para a determinação da viabilidade técnica de captação, armazenamento e uso futuro dessa possível fonte alternativa de água. Após as campanhas analíticas para a geração de dados referentes à qualidade da água pluvial, ensaios de tratabilidade em escala laboratorial foram realizados para a definição da melhor rota tecnológica e obtenção da qualidade de água desejada. Os testes foram conduzidos nos mesmos sistemas de bancada utilizados para a água industrial. A discussão dos resultados foi realizada com base na verificação do atendimento aos requisitos de qualidade da água para o sistema da usina.

### 6.5.1.1 Análise Quantitativa

O estudo quantitativo foi realizado a partir da seleção de estações pluviométricas localizadas na região metropolitana de Curitiba, que possuíssem no mínimo 20 anos de dados. Além dessas séries históricas, foram utilizados dados pluviométricos provenientes de uma estação de monitoramento desativada, pertencente à usina, registrados por um período de dez anos.

Para aprimorar a análise local da disponibilidade de chuva e complementar a série de dados proveniente da extinta estação, um pluviômetro, modelo RG4-M, foi instalado nas dependências da usina (Figura 6.7). Esse modelo possui um *datalogger* interno, permitindo gravar dados

automaticamente até 3.200 milímetros de chuva. Os dados armazenados nessa estação foram coletados periodicamente e analisados em conjunto.



**Figura 6.7:** Pluviômetro instalado nas dependências da UEGA.

Com o estudo produziu-se a climatologia (valores de longo período) das estações do entorno da usina, apresentando os valores médios mensais dos valores mínimos, médios e máximos do histórico de precipitação de cada estação. Os dados foram sempre considerados dentro de um período comum (1985 a 2016). A representação do total anual da precipitação na região do entorno da usina foi realizada com um mapa de isoietas (linhas de igual precipitação), considerando o conjunto das estações e o período-base adotado.

Para verificar a homogeneidade das estações, foi construída uma curva duplo-acumulativa, relacionando os totais de chuva acumulados de cada estação em questão e as médias acumuladas de todos os postos vizinhos estudados. Com o intuito de realizar uma extensão da série de dados para a região do empreendimento (visto que o período disponível era de apenas 10 anos), foi determinada uma função que relacionava a série dessa estação com as demais vizinhas baseada na correlação entre as séries.

Para o cálculo do volume do reservatório necessário, dadas as características de operação da usina (demanda muito alta e sem regularidade), foi necessário estabelecer uma metodologia de determinação do volume diferenciada, utilizando o balanço de massa. Foram utilizados dados históricos diários de pluviometria e de demanda de água e

considerados valores médios de coeficiente de escoamento superficial e perdas do sistema, conforme informações disponíveis em literatura.

A determinação do volume do reservatório foi auxiliada por uma análise econômica simplificada, através da qual foi avaliado o benefício obtido em economia na compra de água bruta (industrial) para diferentes volumes de reservatórios de água pluvial. O reservatório foi dimensionado conforme diretrizes da norma NBR 15527:2007 (ABNT, 2007).

O valor da área impermeável cuja precipitação incidente é passível de coleta foi obtido diretamente do projeto em planta fornecido pela usina – que disponibilizou também o custo por metro cúbico de água bruta praticado na data do estudo. O valor da demanda considerou o consumo de água utilizado no *make-up* das torres de resfriamento (água de reposição), assim como o volume demandado pelas bacias sanitárias diariamente, calculado através do número de funcionários da usina, também informado pela usina. A série de dados considerada nessa avaliação abrangeu o período de dados operativos.

### 6.5.1.2 Análise Qualitativa

A qualidade da água pluvial incidente na área da usina foi determinada em campanha analítica que considerou a sazonalidade do período de chuvas da região. As variáveis pesquisadas foram definidas após extensa pesquisa bibliográfica.

#### a) Caracterização da Água Pluvial

Para pesquisar a qualidade da água pluvial incidente na área da usina, foi implantado um sistema para coleta constituído de uma caixa d'água de 500 litros, conectada ao telhado de um dos galpões da usina. Considerando a sazonalidade do período de chuvas na região, foi elaborado um cronograma de amostragens pelo período de seis meses e definidas as variáveis de interesse, conforme pesquisa bibliográfica. Por se tratar de área industrial, foram pesquisados metais pesados.

Para a realização das campanhas analíticas previstas pelo cronograma idealizado no projeto, foi instalado na usina um sistema de coleta e armazenamento temporário da água pluvial, conforme Figura 6.8.



**Figura 6.8:** Imagem do sistema de coleta da água pluvial.

A caracterização da água pluvial ocorreu entre os meses de outubro de 2016 e julho de 2017, em duas campanhas analíticas de 3 meses de duração cada, sendo uma na estação mais seca e outra na estação mais chuvosa, tendo sido realizadas 14 amostragens no total. A Tabela 6.7 apresenta as variáveis pesquisadas.

**Tabela 6.7:** Variáveis pesquisadas para caracterização da água pluvial.

Variáveis					
Alcalinidade total (mg/L)	Cálcio (mg/L)	Cor (uC)	Fosfato total (mg/L)	pH	Sólidos dissolvidos (mg/L)
Alumínio (mg/L)	Chumbo (mg/L)	Cromo (mg/L)	Magnésio (mg/L)	Potássio (mg/L)	Sólidos suspensos (mg/L)
Amônia (mg/L)	Cianetos (mg/L)	DBO (mg/L)	Manganês (mg/L)	Prata (mg/L)	Sulfatos (mg/L)
Arsênio (mg/L)	Cloretos (mg/L)	DQO (mg/L)	Mercúrio (mg/L)	Selênio (mg/L)	Temperatura da água (°C)
Bário (mg/L)	Coliformes termotolerantes (NMP/100 mL)	Dureza total (mg/L)	Nitratos (mg/L)	Sílica (mg/L)	Turbidez (UNT)
Cádmio (mg/L)	Condutividade específica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Ferro total (mg/L)	Nitritos (mg/L)	Sódio (mg/L)	Zinco (mg/L)

## b) Ensaios de Tratabilidade em Escala Laboratorial

Após caracterização físico-química prévia, a amostra de água pluvial seguiu para a etapa de determinação do índice de densidade de sedimentos (SDI) e do índice de sedimentos modificado (MFI), para avaliação preliminar de seu potencial de incrustação. Na sequência, foram realizados os testes de bancada para investigação dos processos de microfiltração (MF), nanofiltração (NF) e osmose reversa (RO).

Considerando que a amostra apresentou, visualmente, grande quantidade de sólidos suspensos, cor e turbidez para uma amostra dessa natureza (água pluvial), foi realizada adicionalmente uma filtração por papel de filtro (para remoção de sólidos grosseiros) para fins de comparação, além do processo de microfiltração (MF) utilizado para remoção de turbidez e sólidos suspensos finos.

Portanto, para os ensaios de tratabilidade conduzidos em bancada, as análises de SDI/MFI foram realizadas com três amostras: a água pluvial original (denominada “água pluvial bruta”), a água pluvial após passar por filtração com papel de filtro e a água pluvial após passar pela MF. O experimento para SDI foi conduzido conforme a norma ASTM D4189-07 (2014) e o experimento para MFI foi conduzido conforme a norma ASTM D8002-15 (2015).

Para a etapa de microfiltração, o módulo de MF submersa foi inicialmente caracterizado com água microfiltrada, destilada e desmineralizada. O teste de MF submersa com a água pluvial bruta foi realizado com aplicação de retrolavagem (30 segundos a cada 15 minutos de filtração) e de aeração, ambos com o objetivo de avaliar a diminuição de incrustação na superfície das membranas.

Para os experimentos de nanofiltração e osmose reversa foram realizados dois experimentos para meios de comparação. O primeiro utilizou como alimentação água pluvial após passar por papel de filtro (com remoção de sólidos grosseiros apenas) e o segundo, utilizou o permeado da MF da água pluvial (com remoção de sólidos suspensos finos e material coloidal).

Dados operacionais foram registrados a cada meia hora e análises de espectroscopia por energia dispersiva (EDS) foram realizadas nas

superfícies das membranas. Para a água pluvial após papel de filtro, o experimento foi realizado com aplicação de 15 bar de pressão durante 10,5 horas e as medidas foram realizadas a cada meia hora.

## 6.5.2 Resultados e Discussão

Os resultados obtidos para os estudos quantitativo e qualitativo são apresentados e discutidos nos itens seguintes. Para a qualidade da água, a discussão dos resultados foi realizada com base na verificação do atendimento aos requisitos adotados pela usina para uso na torre de resfriamento como água de reposição e para admissão na unidade de desmineralização por troca iônica (DESMI).

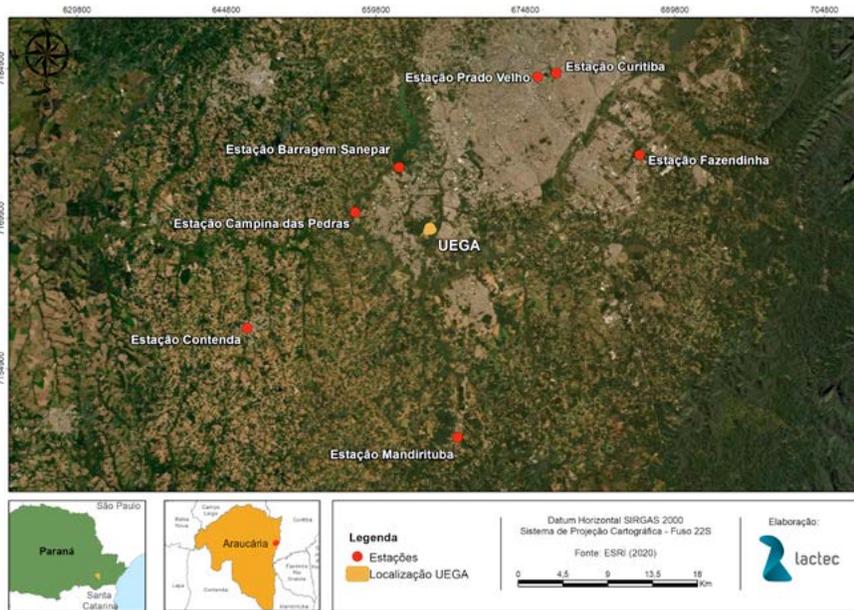
### 6.5.2.1 Análise Quantitativa

As sete estações pluviométricas selecionadas para auxiliar na estimativa da disponibilidade de água pluvial estão localizadas na região metropolitana de Curitiba e estão listadas na Tabela 6.8.

**Tabela 6.8:** Estações pluviométricas na região do entorno da usina.

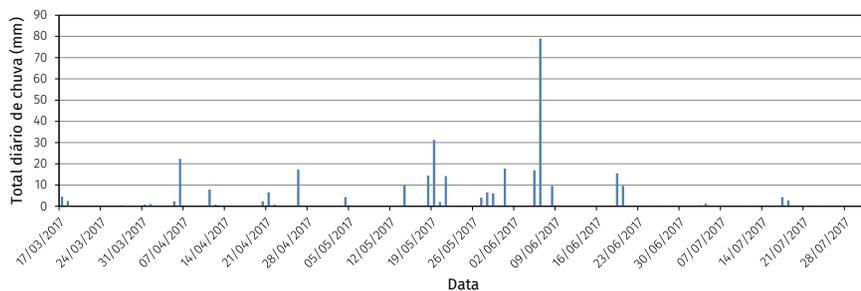
Estação	Nome	Altitude (m)	Latitude	Longitude	Data de instalação	Data de extinção
02549006	Curitiba	929	25° 26' 47"	49° 13' 51"	01/01/1889	--
02549017	Fazendinha	910	25° 31' 09"	49° 08' 48"	04/06/1964	--
02549040	Contenda	882	25° 40' 48"	49° 32' 11"	16/07/1974	31/12/2010
02549062	Mandirituba	920	25° 46' 35"	49° 19' 28"	09/07/1974	--
02549075	Prado Velho - PUC	884	25° 27' 00"	49° 14' 56"	25/03/1981	07/03/2014
02549081	Barragem Sanepar	902	25° 32' 00"	49° 23' 11"	27/04/1983	--
02549082	Campina das Pedras	864	25° 34' 28"	49° 25' 47"	06/10/1984	--

A Figura 6.9 apresenta a localização das estações no entorno da UEGA.



**Figura 6.9:** Distribuição das estações pluviométricas no entorno da UEGA.

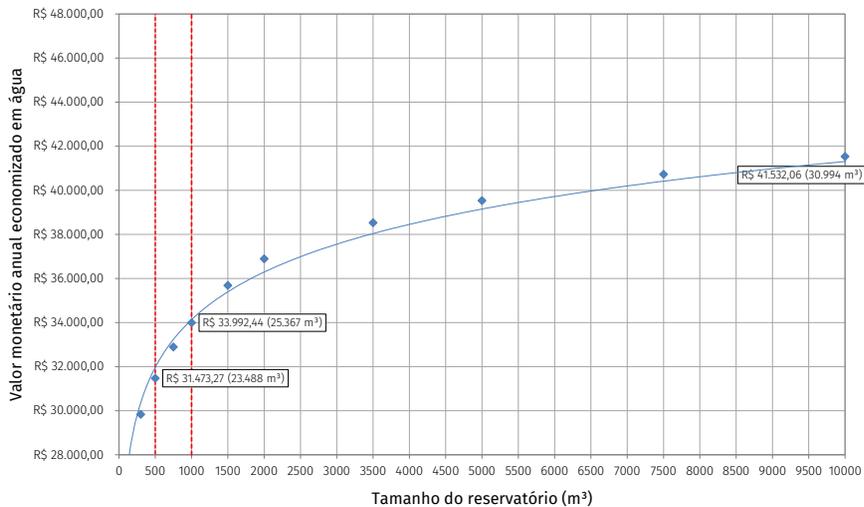
Os dados pluviométricos provenientes da estação de monitoramento desativada e pertencente à UEGA foram analisados em conjunto com a série histórica obtida das estações pluviométricas localizadas na região do entorno da usina. Uma amostra dos dados diários de precipitação coletados na estação instalada na UEGA pode ser vista na Figura 6.10.



**Figura 6.10:** Dados diários de chuva no período referentes à estação da UEGA.

O estudo realizado com base nas estações pluviométricas permitiu mensurar a quantidade (média) anual de água de chuva disponível para a região. Considerando a média de longo período das estações estudadas, obteve-se um valor acumulado anual de 1.470 mm de chuva.

Considerando uma área impermeável disponível para coleta na usina de 35.000 m<sup>2</sup> e um coeficiente de escoamento superficial de 0,8, obtém-se um volume total de 41.160 m<sup>3</sup> de água pluvial por ano – valor médio que em alguma medida poderia ser aumentado, por exemplo, com o acréscimo da área impermeável na usina. Foi realizada também uma estimativa do valor a ser economizado quando da utilização da água pluvial. A Figura 6.11 apresenta alguns valores calculados, com destaque para os volumes de reservatório de 500, 1.000 e 10.000 m<sup>3</sup>.



**Figura 6.11:** Relação da economia anual na conta de água para diferentes volumes de reservatório de água pluvial.

Nota-se na Figura 6.11 que a função logarítmica que especifica a economia de água em função do volume do reservatório corresponde a uma assíntota que tende a uma horizontal conforme o tamanho do reservatório tende ao infinito. Ou seja, quanto maior o reservatório, menos vantajosa é a economia com água. Sendo assim, o tamanho final do reservatório deve ser estabelecido através de uma refinada análise

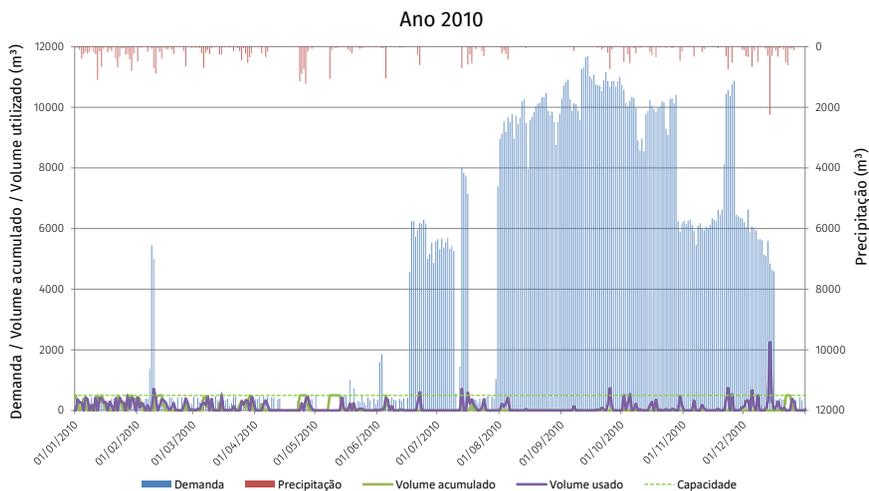
custo-benefício e da área disponível no terreno da usina para implantação do sistema de armazenamento.

A análise do gráfico permite também fazer uma inferência preliminar do volume ideal do reservatório, considerando os valores anuais economizados para as capacidades de 500, 1.000 e 10.000 m<sup>3</sup> (monetários e em volume de água).

Para o primeiro volume, podem-se tomar, a título de comparação, as dimensões de 5 x 10 x 10 m (altura x largura x comprimento). O volume de 500 m<sup>3</sup> corresponde a dimensões facilmente adaptáveis na implantação. Para o dobro desse volume, o ganho econômico seria de 8%.

Para um reservatório com capacidade de 10.000 m<sup>3</sup>, 20 vezes maior que o de 500 m<sup>3</sup> e com substanciais dificuldades de implantação devido às grandes dimensões, o ganho na economia seria de apenas 32% em relação ao de menor volume.

No caso específico do reservatório de 500 m<sup>3</sup>, a Figura 6.12 mostra uma análise detalhada das variáveis relacionadas, para o ano de 2010: precipitação, demanda de água total da usina, volume acumulado no reservatório ao final do dia e volume do reservatório utilizado para atender à usina durante o dia.



**Figura 6.12:** Séries simultâneas dos dados de total precipitado e demanda de água – ano de 2010.

A linha tracejada em verde indica a capacidade do reservatório considerada, no caso, o valor de 500 m<sup>3</sup>. Logo, o volume acumulado no reservatório ao final do dia nunca poderá ser maior que a capacidade. Por outro lado, o volume utilizado ao longo do dia poderá ser maior que 500 m<sup>3</sup>, considerando que, conforme o reservatório vai sendo preenchido, a água acumulada neste poderá ser utilizada diversas vezes ao longo de um mesmo dia, caso a duração e intensidade da precipitação assim permitam.

Verifica-se também que, para períodos em que a usina esteja inoperante, o reservatório com capacidade de 500 m<sup>3</sup> seria capaz de atender, além das descargas das bacias sanitárias, a demanda para a torre de resfriamento.

A análise econômica simplificada, objetivando estimar a economia financeira anual na compra de água bruta para diferentes volumes de reservatórios de água pluvial mostrou que, com um custo de 1,34 reais por m<sup>3</sup> (2017), a economia máxima nessas condições seria de 55.154,40 reais ao ano (sem considerar os custos para construção do reservatório).

### 6.5.2.2 Análise Qualitativa

A análise qualitativa compreendeu a caracterização físico-química da água pluvial realizada nas campanhas analíticas previstas no projeto e os resultados dos testes de tratabilidade realizados em escala laboratorial para pesquisa das rotas tecnológicas aplicáveis.

#### a) Caracterização da Água Pluvial

Os resultados obtidos para a caracterização da qualidade da água pluvial nas campanhas analíticas realizadas durante o projeto estão sumarizados na Tabela 6.9, que apresenta os valores mínimos e máximos obtidos para as variáveis pesquisadas.

**Tabela 6.9:** Resultados da caracterização da água pluvial.

Variáveis	N. Amostras	Mínimo	Máximo
Alcalinidade total (mg/L)	14	1,70	20
Amônia (mg/L)	14	0,15	0,73
Cálcio (mg/L)	7	0,4	1,4
Cloretos (mg/L)	14	0,27	0,49
Condutividade específica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	14	3	15
Cor (uC)	14	5	10
DQO (mg/L)	14	5,6	11,9
Dureza total (mg/L)	14	0,2	7,06
Nitratos (mg/L)	14	0,25	2,52
pH	14	6,8	8,8
Sódio (mg/L)	7	0,3	0,7
Sólidos dissolvidos (mg/L)	13	5	11
Sulfatos (mg/L)	14	0,51	1,9
Turbidez (UNT)	14	0,43	5

A Tabela 6.9 mostra que os resultados analíticos obtidos apresentam grande variação entre os valores mínimos e máximos para as concentrações das variáveis pesquisadas.

Para as variáveis alumínio, arsênio, bário, cádmio, chumbo, cianetos, cromo, ferro total, fosfato total, manganês, mercúrio, nitritos, potássio, prata, selênio, DBO, sólidos suspensos e sílica, a totalidade dos valores (100%) reportados nos certificados de análises foi igual ao limite de quantificação do método utilizado para sua determinação (LQ). Isso indica que a análise não permitiu a obtenção de um resultado numérico para a concentração da variável pesquisada.

Todas as demais variáveis pesquisadas apresentaram baixas concentrações, conforme esperado para a água pluvial, à exceção dos valores máximos de pH, considerados elevados.

A fim de verificar a viabilidade de utilização dessa possível fonte alternativa de água, os valores máximos obtidos para as variáveis pesquisadas foram comparados com os valores de referência adotados pela usina para admissão na unidade de desmineralização por troca iônica (DESMI) e no sistema de resfriamento (torre de resfriamento), conforme Tabela 6.10, em que ND é não definido.

**Tabela 6.10:** Valores máximos obtidos na caracterização da água pluvial e valores de referência para água na DESMI e Torre de Resfriamento.

Variáveis	Máximo	DESMI	Torre de Resfriamento
Alcalinidade total (mg/L)	20	≤ 50	119,8
Alumínio (mg/L)	< 5,0	≤ 0,1	ND
Arsênio (mg/L)	< 0,001	≤ 0,1	ND
Bário (mg/L)	< 1,0	≤ 0,1	0,061
Cádmio (mg/L)	< 0,5	≤ 0,1	ND
Cálcio (mg/L)	1,4	≤ 20	17,9
Chumbo (mg/L)	< 1,0	≤ 0,1	ND
Cianetos (mg/L)	< 0,005	≤ 0,1	ND
Cloretos (mg/L)	0,49	≤ 40	61,6
Condutividade específica (µS/cm)	15	≤ 280	565,5
Cor (uC)	10	≤ 10	15
Cromo (mg/L)	< 0,5	≤ 0,1	ND
DBO (mg/L)	< 3,0	≤ 3,0	8,9
DQO (mg/L)	11,9	≤ 8,0	40
Dureza total (mg/L)	7,06	≤ 100	78,3
Ferro total (mg/L)	< 0,5	≤ 0,1	1,8
Fosfato total (mg/L)	< 1,0	≤ 0,1	ND
Magnésio (mg/L)	0,6	≤ 5,0	8
Manganês (mg/L)	< 0,5	≤ 0,1	ND
Mercúrio (mg/L)	< 0,0002	≤ 0,1	ND
Nitratos (mg/L)	2,52	≤ 1,0	5,82
Nitritos (mg/L)	< 0,5	≤ 0,2	0,09
pH	8,8	≥ 6,2 e ≤ 8,2	7,28
Potássio (mg/L)	< 0,5	≤ 6,0	7,8
Prata (mg/L)	< 0,5	≤ 0,1	ND
Selênio (mg/L)	< 0,001	≤ 0,1	ND
Sílica (mg/L)	< 5,0	≤ 12	30,8
Sódio (mg/L)	0,7	≤ 30	41,6
Sólidos dissolvidos (mg/L)	11	≤ 190	203
Sólidos suspensos (mg/L)	< 5,0	≤ 2,0	177
Sulfatos (mg/L)	1,9	≤ 50	82
Turbidez (UNT)	5	≤ 2,0	4,64
Zinco (mg/L)	< 0,5	≤ 0,1	0,05

A análise dos dados da Tabela 6.10 mostra que a qualidade da água pluvial incidente na área da usina atende aos valores de referência adotados para admissão na unidade de desmineralização por troca iônica (DESMI) para as variáveis alcalinidade total, arsênio, cálcio, cianetos, cloretos, condutividade, cor, DBO, dureza total, magnésio, mercúrio, potássio, selênio, sílica, sódio, sólidos dissolvidos e sulfatos.

Para as variáveis alumínio, bário, cádmio, chumbo, cromo, ferro total, fosfato total, manganês, nitritos, prata, sólidos suspensos e zinco, os resultados obtidos encontram-se abaixo do limite de quantificação do método de ensaio (LQ), podendo ou não englobar os valores de referência adotados.

Portanto, a qualidade da água pluvial incidente na área da usina atende a 17 dos 33 valores de referência adotados para admissão na DESMI. Essa fonte alternativa de água poderia ser utilizada após um tratamento simplificado, visando principalmente à correção de pH e à redução das concentrações para turbidez e sólidos suspensos.

Para a admissão da água pluvial no sistema de resfriamento, como água de reposição para a torre, observa-se que a qualidade da água está de acordo com 17 dos 22 valores de referência para esse uso industrial. As variáveis alcalinidade total, cálcio, cloretos, condutividade, cor, DBO, DQO, dureza total, ferro total, magnésio, nitratos, potássio, sílica, sódio, sólidos dissolvidos, sólidos suspensos e sulfatos apresentaram concentrações máximas que permitiriam o uso da água pluvial no sistema de resfriamento da usina, sem necessidade de tratamento específico.

As variáveis pH e turbidez apresentaram valores máximos superiores aos valores de referência. Não se pode afirmar que o valor máximo obtido para bário, nitritos e zinco está em desacordo, visto que os resultados obtidos se encontram abaixo do limite de quantificação do método de ensaio (LQ), podendo ou não englobar os valores de referência adotados.

Portanto, a qualidade da água pluvial caracterizada pelo projeto no período das campanhas analíticas mostrou-se suficiente também para

uso no sistema de resfriamento. Essa fonte alternativa de água poderia ser utilizada para tal fim, após tratamento simplificado para a correção do pH.

#### b) Ensaios de Tratabilidade em Escala Laboratorial

Durante o acompanhamento dos testes em laboratório, observou-se uma queda constante com o tempo na permeabilidade hidráulica das membranas de nanofiltração (NF) e osmose reversa (RO), de 3,0 para 1,74 L.h<sup>-1</sup>.m<sup>2</sup>.bar<sup>-1</sup> na NF e de 5,0 para 2,58 L.h<sup>-1</sup>.m<sup>2</sup>.bar<sup>-1</sup> na RO. Esse fato evidenciou que a água pluvial filtrada em papel de filtro não constituiu um pré-tratamento eficiente para a NF e RO, pois as membranas sofreram incrustação durante o processo.

Para a água pluvial após microfiltração, o experimento de tratabilidade em bancada foi realizado com aplicação de 15 bar de pressão durante 11 horas e as medidas foram realizadas a cada meia hora. Observou-se que, com o aumento da condutividade do concentrado com o tempo, houve um aumento na condutividade dos permeados. Isso ocorreu dado que a rejeição é mantida constante, em torno de 98%, durante todo o período para os dois processos. A permeabilidade hidráulica da membrana de NF se manteve em torno de 2,5 e 3,0 L.h<sup>-1</sup>.m<sup>2</sup>.bar<sup>-1</sup> e a de RO, entre 3,5 e 4 L.h<sup>-1</sup>.m<sup>2</sup>.bar<sup>-1</sup>. Dessa forma, a MF (apesar dos altos valores de SDI e MFI) se mostrou um pré-tratamento adequado para a NF e RO, pois as membranas não mostraram incrustação durante o teste de longa duração.

A amostra submetida aos ensaios de tratabilidade apresentou grande quantidade de sólidos suspensos, elevada cor e turbidez. Assim, além do processo de microfiltração (MF) utilizado para remoção de turbidez e sólidos suspensos finos, foi realizada também uma filtração por papel de filtro (para remoção de sólidos grosseiros) para fins de comparação.

Os resultados obtidos na determinação do SDI são mostrados na Tabela 6.11. O valor encontrado para os testes com água pluvial bruta e após papel de filtro foi 20, pois os tempos  $t_1$  e  $t_2$  tenderam ao infinito. Para o permeado da MF o valor de SDI<sub>5</sub> resultante foi igual a 6,46.

**Tabela 6.11:** Resultados de SDI para a amostra de água pluvial.

Água pluvial	SDI <sub>5</sub>
Água pluvial bruta	20,0
Água pluvial após papel de filtro	20,0
Água pluvial microfiltrada	6,46

Os resultados obtidos para SDI e MFI indicaram elevado potencial incrustante da amostra, evidenciando que a existência de pré-tratamento desempenhou papel fundamental na estabilidade do processo. No caso da utilização de filtração simples, a permeabilidade das membranas decaiu constantemente durante o teste. Entretanto, o pré-tratamento por MF possibilitou que a NF e a RO operassem com permeabilidades estáveis, sendo possível observar intensa redução de valores para todas as variáveis pesquisadas e baixas concentrações dos íons analisados nesses processos.

A Tabela 6.12 sumariza os resultados obtidos na caracterização da amostra da água pluvial bruta e nos testes de tratabilidade em bancada, para microfiltração (MF), nanofiltração (NF) e osmose reversa (RO).

**Tabela 6.12:** Resultados obtidos na caracterização da amostra da água pluvial e nos testes de tratabilidade em escala laboratorial.

Variáveis	Unidade	Amostra Água Pluvial Bruta	Permeado MF	Permeado NF	Permeado RO
Turbidez	UNT	18,7	0,24	0,02	0,02
pH	adimensional	7,4	7,66	6,49	6,33
Condutividade específica	μS/cm	153,8	121,8	6,3	4,46
Cor aparente	uC	121,6	19,69	0	0
Cor verdadeira	uC	23,7	-	-	-

Continuação

Variáveis	Unidade	Amostra Água Pluvial Bruta	Permeado MF	Permeado NF	Permeado RO
DQO	mg/L	42,9	26,83	0	0
Carbono orgânico total (TOC)	mg/L	6,4	3,37	0	1,3
Carbono inorgânico total (TIC)	mg/L	20,1	15,17	3,2	3,2
Dureza total	mg/L	73,3	60	0	0
Alcalinidade total	mg/L	66,7	49	5	5
Óleos e graxas	mg/L	20,1	3,3	-	-
Sólidos totais	mg/L	168,7	-	-	-
Sólidos suspensos	mg/L	96,7	-	-	-
Sólidos dissolvidos	mg/L	74,9	-	-	-
Sólidos sedimentáveis	mg/L	< 0,1	-	-	-
SDI <sub>5</sub>	adimensional	20	6,46	-	-
Cálcio	mg/L	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0
Magnésio	mg/L	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0
Sódio	mg/L	2,24	4,16	0,70	0,20
Potássio	mg/L	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0
Sulfatos	mg/L	12,0	12,0	10	1,0
Sílica	mg/L	7,1	7,1	2,9	0,25
Cloretos	mg/L	1,11	1,11	1,30	< 1,0

- Não Realizado/não se aplica.

Comparando os resultados obtidos nos testes de tratabilidade com os valores de referência de qualidade da água para admissão nos sistemas da usina apresentados na Tabela 6.10, observou-se para a NF e RO uma drástica redução nos valores das variáveis pesquisadas, conforme esperado, atendendo aos requerimentos de qualidade da água para os sistemas de desmineralização (DESMI) e de resfriamento (torre de resfriamento). Observou-se, também, que o permeado da microfiltração atenderia plenamente aos requerimentos para uso no sistema de resfriamento, porém, para uso na DESMI algumas variáveis, como cor e DQO, apresentaram resultados que impediriam o uso sem tratamento prévio.

A espectroscopia por energia dispersiva (EDS) das membranas de NF e RO mostrou a presença dos elementos ferro, cobre, cromo, silício e enxofre.

### 6.5.3 Conclusões

Ao substituir volumes de água potável, o aproveitamento das águas pluviais pode auxiliar significativamente a preservação dos recursos hídricos de água doce em bacias hidrográficas comprometidas, como aquela na qual a usina está inserida. A utilização da água pluvial onde permitida pode resultar em economia significativa no consumo de água potável, dependendo das condições de consumo do empreendimento.

Como fonte alternativa de água para o processo, as águas pluviais poderiam — uma vez comprovada sua qualidade — ser utilizadas no processo industrial, atuando como água de resfriamento ou até mesmo sendo encaminhadas para a caldeira. Para fins de pesquisa do projeto, o aproveitamento da água pluvial não teve finalidade para irrigação ou limpeza, por se tratar de aplicações comuns, sem requerimento do uso de rotas tecnológicas mais avançadas. Esses usos poderão, no entanto, ser considerados sem prejuízo à análise realizada, dados os baixos valores demandados.

A análise quantitativa realizada permitiu mensurar a quantidade média anual de água de chuva disponível para a região a partir do valor acumulado anual, sendo estimado um volume total de 41.160 m<sup>3</sup> de água pluvial por ano, equivalente a aproximadamente 100 m<sup>3</sup>/mês.

Como não se trata de um valor constante, dada a distribuição desigual dos períodos de chuva, seria imprescindível a instalação de um sistema de captação, armazenamento, tratamento e bombeamento para seu uso posterior, não pesquisados no projeto e que demandariam custos adicionais. Assim, demonstrou-se que é possível obter economia financeira com a captação e utilização da água pluvial incidente na área da usina e, embora seja pequena frente aos custos atuais referentes à água industrial, questões ambientais e mais pressão por recursos hídricos no futuro podem tornar a economia gerada maior do que a demonstrada.

A análise qualitativa evidenciou uma boa qualidade para a água pluvial estudada, apresentando valores baixos para alcalinidade total, condutividade específica, dureza total, cloretos, sulfatos e sílica – variáveis críticas para sua utilização na usina. Os valores obtidos para pH, sólidos suspensos, sólidos dissolvidos e turbidez são os que mais requerem atenção para adequação da qualidade da água para uso no sistema de DESMI e/ou na torre de resfriamento.

A amostra de água pluvial utilizada nos testes de tratabilidade em escala laboratorial apresentou-se com menos qualidade quando comparada àquela caracterizada ao longo do projeto. No entanto, os resultados obtidos nos testes em bancada mostraram a aplicabilidade das rotas tecnológicas empregadas e os resultados positivos para sua utilização na usina, permitindo inclusive usos mais nobres para essa água, como a geração de vapor ou *make-up* de torre.

Os resultados obtidos para os processos de nanofiltração e osmose reversa se equivalem e evidenciaram a eficácia do uso dessas tecnologias, reduzindo drasticamente as concentrações para todas as variáveis de interesse da usina. Observou-se ainda que a microfiltração forneceu água com qualidade próxima àquela necessária para admissão nos sistemas da usina, exigindo tratamento prévio para remoção de cor e DQO para uso no sistema de desmineralização (DESMI).

Os testes em bancada evidenciaram a necessidade de implantação de um sistema de pré-tratamento - que desempenha papel fundamental na estabilidade dos processos de NF e RO - sendo indicada a microfiltração, a qual possibilitou que ambos os sistemas operassem com permeabilidades estáveis durante o período do teste.

Considerando que a quantidade de água pluvial disponível na área da usina constitui fator preponderante para a viabilidade de aproveitamento dessa fonte alternativa, um aumento da área de captação poderia ser estudado como forma de possibilitar a utilização dessa fonte alternativa de água para a usina no futuro.

## 6.6 Disponibilidade de água a partir de esgoto bruto

Estudar a viabilidade técnica da utilização de esgoto bruto para obtenção de água de reúso foi um dos objetivos específicos estabelecidos para o projeto. Embora a obtenção de água de reúso a partir de esgoto não seja o objetivo das suas atividades, a usina optou por somar esforços com a concessionária estadual no estudo das tecnologias aplicáveis para aumento da oferta de água industrial na região. Para tanto, o esgoto bruto foi pesquisado em escala laboratorial e em escala-piloto no sistema MBR BIOMEMBRAT®, desenvolvido pela WEHRLE Umwelt.

O tratamento de efluentes para reúso em processos industriais tem sido investigado a partir da combinação de diferentes tecnologias, em particular envolvendo os já citados processos de separação com membranas (PSM). A associação do processo de degradação biológica com o processo de separação por membranas, que ocorre em um MBR, representa uma inovação importante no tratamento de efluentes/esgotos. Em comparação com as técnicas convencionais (lodos ativados), os reatores de membranas produzem efluente de melhor qualidade, visto que permitem a retenção da biomassa gerada, além de ocuparem um espaço menor na planta. Com o pré-tratamento apropriado, o potencial de incrustação pode ser reduzido para os processos de nanofiltração (NF) e osmose reversa (RO), aumentando o tempo de vida útil das membranas.

Trata-se de tecnologia importante no avanço do conceito de tratamento descentralizado, devido ao seu tamanho compacto e capacidade de atender a rigorosos regulamentos de qualidade da água. Conforme

Asano (2007), são vantagens da utilização dos sistemas de MBR, entre outras:

- produção de efluente final de alta qualidade, com alto potencial para reúso;
- sistema adaptável para etapa de remoção de nutrientes, se necessário;
- sem necessidade de decantadores e/ou filtros;
- a construção modular permite expansão futura;
- redução de volume de lodo gerado;
- facilmente automatizável e,
- ocupa espaço reduzido quando comparado aos sistemas convencionais.

Entre todas essas vantagens, a que mais se destaca é a capacidade de obter um efluente tratado com excepcional qualidade, que pode ser reutilizado no processo produtivo diminuindo, assim, a captação de água e a geração de efluentes, impactando positivamente no ambiente.

Usualmente um tratamento completo compreende 3 ou 4 etapas. A etapa preliminar consiste em processos físicos para remoção de sólidos grosseiros. A próxima etapa consiste no tratamento primário, que tem como objetivo a remoção dos sólidos suspensos e a separação de materiais sobrenadantes (óleos e gorduras), através de processos físico-químicos como coagulação, floculação e decantação primária. A etapa secundária, por sua vez, atua diretamente na remoção de compostos solúveis e sólidos suspensos biodegradáveis.

Os processos utilizados no tratamento secundário podem ser subdivididos em tratamentos biológicos aeróbios e anaeróbios. No tratamento aeróbio a remoção se dá pela incorporação dos poluentes solúveis nas células dos microrganismos, que posteriormente são removidos pelo decantador secundário.

O tratamento terciário, para polimento final (última etapa), é destinado à remoção de contaminantes específicos, a fim de proporcionar o reúso do efluente como fonte de água. Algumas operações comuns do

tratamento terciário são a remoção de fósforo através da coagulação química, a remoção do nitrogênio através de reações de nitrificação/desnitrificação em reatores biológicos, a remoção de resíduos orgânicos ou compostos que conferem cor ao líquido através da adsorção com carbono ativado e a remoção de solutos dissolvidos através de processos de separação com membranas (MORORÓ, 2013).

## 6.6.1 Metodologia

Ensaio de tratabilidade em escala laboratorial e piloto foram realizados no estudo da possibilidade de obtenção de água de reúso a partir de esgoto bruto. O teste em escala-piloto foi realizado em parceria com a concessionária estadual de água e esgoto, em cuja área foi instalada a planta MBR BIOMEMBRAT®.

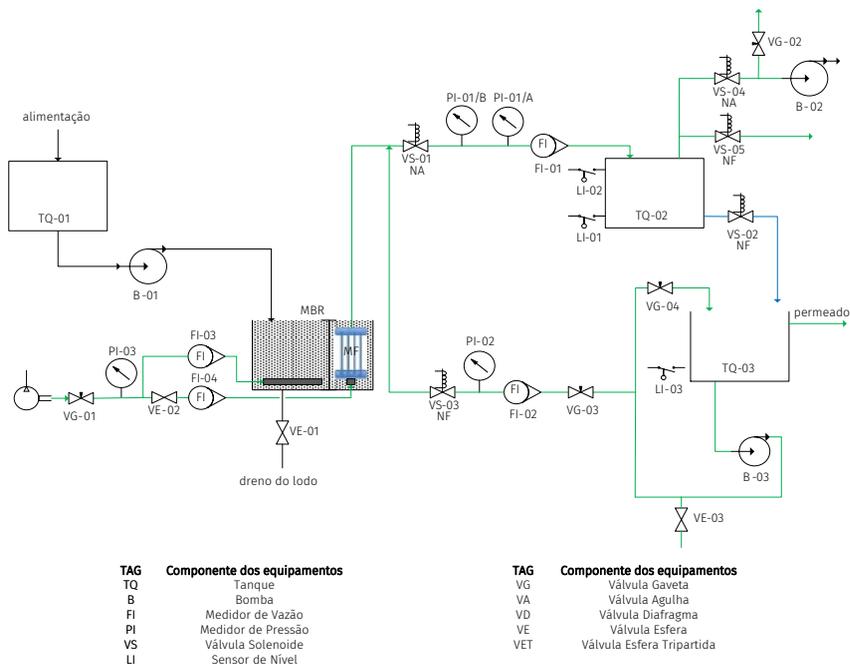
### 6.6.1.1 Ensaio de Tratabilidade em Escala Laboratorial

A caracterização físico-química do esgoto e das correntes geradas nos processos estudados é feita com o objetivo de determinar as condições de operação dos processos de tratamento selecionados. Para a caracterização do esgoto sanitário doméstico bruto, utilizado nos ensaios, foram realizadas adicionalmente as análises de nitratos, nitritos, fósforo, DBO, coliformes e óleos e graxas. A determinação do índice de densidade de sedimentos (*silt density index* – SDI), para avaliação preliminar do potencial de incrustação, foi realizada, conforme a norma ASTM D4189-07 (2014), com duas amostras: esgoto tratado pelo processo biológico (denominado “esgoto tratado”) e esgoto tratado após passar pela MF. Foi realizado SDI de 2 minutos (SDI<sub>2</sub>) devido ao alto potencial de incrustação do efluente.

O ensaio no biorreator foi realizado com amostras de esgoto sanitário doméstico bruto, coletadas em uma mesma ETE de condomínio residencial. O lodo utilizado para o tratamento biológico foi coletado em estação de tratamento de esgoto municipal (ETE). Para aclimatar o lodo com o esgoto sanitário residencial, o lodo foi colocado em um recipiente e, diariamente, misturado a pequenos volumes de esgoto sanitário. Para controle, os seguintes parâmetros foram monitorados diariamente: pH,

oxigênio dissolvido, temperatura, sólidos e índice volumétrico do lodo (IVL). Análises frequentes de DQO, nitratos, nitritos, nitrogênio amoniacal e fósforo total também foram realizadas.

Após o tratamento no biorreator, o esgoto tratado passou por processo de microfiltração (MF), realizado no próprio sistema do biorreator de membranas (MBR), para remoção de material coloidal e sólidos suspensos finos. Foi realizada também uma filtração por papel de filtro do esgoto tratado do biorreator (para remoção de sólidos grosseiros) para comparação. Na sequência foram investigados os processos de nanofiltração (NF) e osmose reversa (RO). Na Figura 6.13 é apresentado o fluxograma do sistema de MBR automatizado com opção de retrolavagem.



**Figura 6.13:** Fluxograma do sistema de Biorreator de Membranas (MBR) utilizado no tratamento do esgoto sanitário.

Para a NF e RO foram realizados dois experimentos para meios de comparação. O primeiro utilizou como alimentação o esgoto tratado após passar por filtração com papel de filtro (para remoção de sólidos

grosseiros apenas). O segundo utilizou o permeado da MF do esgoto tratado (com remoção de sólidos suspensos finos e material coloidal).

### 6.6.1.2 Ensaios de Tratabilidade em Escala-Piloto

Os ensaios foram realizados no sistema de tratamento BIOMEMBRAT®, um biorreator de membranas (MBR) de fluxo cruzado de alta performance, de engenharia exclusiva da WEHRLE, que opera automaticamente com registros completos dos principais parâmetros e dados do processo. O sistema foi instalado em estação de tratamento de esgotos da concessionária estadual e é composto basicamente pelos seguintes itens:

- bomba de alimentação com pré-filtração por filtro de saco (0,5mm);
- biorreator com equipamento de aeração e controle de nível;
- circuitos separados de ultrafiltração;
- bombas de dosagem de produtos químicos auxiliares (antiespumante e controle de pH) e,
- painel de controle e sistema de controle de processo.

Após equalização e filtração o esgoto/efluente é admitido no tanque de aeração do biorreator, o qual possui uma parede de separação interna que permite, se desejado, as operações de nitrificação e desnitrificação. O oxigênio é fornecido através de soprador e difusor por membrana. Quando necessário há dosagem de produtos químicos, como soda cáustica 50% e produtos para limpeza de membranas (ácido e básico).

A separação do efluente tratado da massa de lodo ocorre nos módulos de ultrafiltração (UF). A planta-piloto está equipada com *loops* de UF separados, operados em série. As bombas de alimentação circulam o lodo ativado do biorreator através dos módulos de UF, onde a separação de permeado ocorre, e retornam o lodo ao tanque de aeração.

O permeado de cada módulo individual de UF passa por um medidor de fluxo no tanque de permeado e é normalmente descartado por bomba, havendo controle de nível no reservatório. Porém, se necessário, é possível retornar o permeado ao tanque de aeração, dependendo da taxa de alimentação do conjunto, das condições dos efluentes de entrada e do nível do reator.

Durante os testes o desempenho da planta foi monitorado através de um cronograma de análises previamente estabelecido. As medições de temperatura, pH, pressão, vazão e oxigênio dissolvido eram realizadas *online* e as coletas e análises necessárias para controle da operação foram realizadas *in loco* pelo operador da planta-piloto. Além dessas, foram realizadas as seguintes análises nos laboratórios do Lactec para avaliação do desempenho:

- demanda química de oxigênio (DQO);
- demanda biológica de oxigênio (DBO);
- sólidos dissolvidos totais;
- sólidos fixos totais;
- sólidos sedimentáveis;
- sólidos suspensos totais;
- turbidez;
- nitrogênio total;
- nitrogênio amoniacal;
- nitratos;
- fósforo total (ou fosfatos totais);
- análises conforme a Resolução CONAMA n. 430/2011.

Para acompanhamento da operação do sistema, foi também realizada a medida dos parâmetros MLSS (*mixed liquor suspended solids*) e MVLSS (*mixed volatile liquor suspended solids*). Ambos se assemelham às medidas de SST e SSV, no entanto são análises realizadas diretamente no lodo ativado presente no interior de um tanque de aeração. O MLSS consiste basicamente em microrganismos e matéria não biodegradável suspensa, enquanto na análise de MVLSS assume-se que toda a matéria biológica é evaporada e, portanto, o restante constitui matéria não biodegradável. Esses valores são fundamentais para o acompanhamento dos processos de tratamento por lodos ativados, em que é importante garantir a existência de biomassa suficiente para consumir toda a matéria orgânica presente no esgoto/efluente.

A Figura 6.14 apresenta o sistema de tratamento BIOMEMBRAT®.



**Figura 6.14:** Imagens do sistema BIOMEMBRAT®. Fonte: WEHRLE (2015).

#### a) Instalação da planta-piloto

A instalação da planta-piloto foi executada conforme especificação das condições de operação e partida da planta definidas em projeto. E foi realizada em parceria com a concessionária estadual, que cedeu a área e providenciou as conexões com as redes de energia e água necessárias. O “lodo de semeadura” para partida da planta foi obtido da estação de tratamento de esgotos por lodo ativado pertencente também à concessionária.

Foram instalados dois tanques em série com a função de clarificação por sedimentação e de armazenagem para o esgoto bruto a ser encaminhado para a planta-piloto.

Na entrada da planta-piloto foram instalados também dois tanques, sendo um utilizado como tanque-pulmão para água bruta e outro como tanque de mistura e equalização.

Após a instalação de todos os sistemas e a conexão dos dutos no contêiner, foi realizado então o comissionamento a frio da planta, quando operou com a passagem de água potável, a fim de serem testadas as conexões e sensores do sistema. Na Figura 6.15 e Figura 6.16 são apresentadas imagens obtidas durante a instalação da planta-piloto.



**Figura 6.15:** Imagem do contêiner posicionado na área de estudo e do tanque-pulmão de 15 m<sup>3</sup>.



**Figura 6.16:** Imagens da bomba instalada na captação de esgoto.

## 6.6.2 Resultados e Discussão

Os resultados obtidos nas escalas de laboratório e piloto são apresentados e discutidos nos itens seguintes. A eficiência do sistema de MBR

para tratamento de esgoto foi avaliada, bem como seu desempenho na produção de água de reúso, visando à aplicação no processo industrial da usina (sistema de resfriamento e unidade de desmineralização - DESMI). Os resultados obtidos também foram comparados aos requisitos da Resolução CONAMA n. 430/2011, considerando a eventualidade de lançamento final em corpos hídricos.

### 6.6.2.1 Ensaios de Tratabilidade em Escala Laboratorial

A aclimação do lodo no biorreator, necessária para o início dos ensaios, deu-se em aproximadamente 50 dias e durante esse período o oxigênio dissolvido foi mantido em torno de 6 mg/L. O pH variou de 4,0 a 8,5 em sua maioria e a temperatura variou entre 20 e 30 °C durante todo o período. O crescimento dos microrganismos oscilou entre 85 e 52% até que se estabilizou em torno de 72%, quando a aclimação foi considerada completa e foi possível iniciar o experimento com o MBR.

- a) Caracterização da amostra de lodo ativado, utilizada como inóculo no biorreator

A amostra de lodo ativado coletada em estação de tratamento de esgoto municipal (ETE) foi caracterizada e os resultados são apresentados na Tabela 6.13.

**Tabela 6.13:** Resultados da caracterização do lodo ativado.

Variáveis	Unidade	Lodo Ativado
Oxigênio dissolvido	mg/L	4,0
Sólidos suspensos totais (SST)	mg/L	26.727,5
Sólidos suspensos fixos (SSF)	mg/L	8.796,7
Sólidos suspensos voláteis (SSV)	mg/L	17.930,8
Relação SST/SSV	%	67,1
Fósforo total	mg/L	33,7

## b) Caracterização do esgoto bruto, utilizado na aclimação

As amostras de esgoto sanitário doméstico bruto utilizadas durante o processo de aclimação do lodo foram caracterizadas e os resultados são apresentados na Tabela 6.14.

**Tabela 6.14:** Resultados da caracterização das amostras de esgoto utilizadas na aclimação.

Variáveis	Unidade	Esgoto Sanitário 1	Esgoto Sanitário 2
Turbidez	UNT	90,5	48,5
pH	adimensional	6,93	6,90
Condutividade específica	µS/cm	896,4	639,2
Cor aparente	uC	1.110,8	589,2
Cor verdadeira	uC	217,1	117,1
DBO	mg/L	720,3	453,7
DQO	mg/L	1.053,0	766,3
Carbono orgânico total (TOC)	mg/L	107,2	130,3
Carbono inorgânico total (TIC)	mg/L	45,8	33,3
Dureza total	mg/L	91,5	64,5
Alcalinidade total	mg/L	129,0	72,5
Sólidos totais	mg/L	1.628,3	804,2
Sólidos suspensos	mg/L	1.316,4	470,0
Sólidos dissolvidos	mg/L	427,3	350,0
Sólidos sedimentáveis	mg/L	14,0	6,5
Sulfatos	mg/L	29,5	68,5
Sílica	mg/L	86,1	35,2
Cloretos	mg/L	57,6	46,8
Nitratos	mg/L	6,4	6,1
Nitritos	mg/L	8,0	6,0
Nitrogênio amoniacal	mg/L	71,4	50,0

c) Caracterização do esgoto bruto, utilizado para tratamento no biorreator

Os resultados da caracterização do esgoto sanitário doméstico bruto, utilizado durante o processo de operação do biorreator de membranas, são apresentados na Tabela 6.15.

**Tabela 6.15:** Resultados da caracterização da amostra de esgoto utilizada para tratamento.

Variáveis	Unidade	Esgoto Sanitário
Turbidez	UNT	15,9
pH	adimensional	6,43
Condutividade específica	$\mu\text{S}/\text{cm}$	807,7
Cor aparente	uC	67,3
Cor verdadeira	uC	55,5
DBO	mg/L	116,2
DQO	mg/L	346,3
Carbono orgânico total (TOC)	mg/L	19,2
Carbono inorgânico total (TIC)	mg/L	60,6
Dureza total	mg/L	60,0
Alcalinidade total	mg/L	230,0
Óleos e graxas	mg/L	15,2
Coliformes termotolerantes	NMP/100mL	> 2.419,6
Sólidos totais	mg/L	665,0
Sólidos suspensos	mg/L	100,0
Sólidos dissolvidos	mg/L	540,7
Sólidos sedimentáveis	mg/L	2,0
Sulfatos	mg/L	85,0
Sílica	mg/L	16,0
Cloretos	mg/L	104,1
Nitratos	mg/L	4,5
Nitritos	mg/L	8,0
Nitrogênio amoniacal	mg/L	51,1
Fósforo total	mg/L	8,14

#### d) Resultados para SDI

Os resultados obtidos para SDI são mostrados na Tabela 6.16. Não foi possível obter resultado no teste com esgoto tratado pelo tratamento biológico, o que pode ser atribuído à presença de material coloidal que estaria sendo desestabilizado por adsorção na membrana celulósica utilizada para a determinação do SDI. Para o permeado da MF, o SDI encontrado foi de 26,36.

**Tabela 6.16:** Resultados de SDI do esgoto sanitário tratado.

Corrente	SDI <sub>2</sub>
Esgoto sanitário tratado pelo biológico	Não mensurável
Esgoto sanitário tratado microfiltrado	26,36

#### e) Resultados dos processos com membranas

Na Tabela 6.17 são apresentados os resultados obtidos na caracterização do esgoto sanitário doméstico bruto, utilizado durante o processo de operação do biorreator de membranas, do esgoto sanitário tratado no biorreator e das correntes dos processos com membranas.

**Tabela 6.17:** Resultados da caracterização do esgoto tratado no biorreator e das correntes dos processos com membranas.

Variáveis	Unidade	Esgoto Sanitário	Esgoto Tratado	Permeado MF	Permeado NF	Permeado RO
Turbidez	UNT	15,9	2,32	0,99	0,02	0,02
pH	adimensional	6,43	7,04	7,97	7,44	7,44
Condutividade específica	μS/cm	807,7	650,5	549,5	31,93	20,75
Cor aparente	uC	67,3	55,2	-	0	0
Cor verdadeira	uC	55,5	53,7	31,95	0	0
DBO	mg/L	116,2	19,80	-	-	-
DQO	mg/L	346,3	57,8	59,42	0,00	0,00
Carbono orgânico total (TOC)	mg/L	19,2	-	22,91	0	0
Carbono inorgânico total (TIC)	mg/L	60,6	-	14,64	3,87	3,69

Variáveis	Unidade	Esgoto Sanitário	Esgoto Tratado	Permeado MF	Permeado NF	Permeado RO
Dureza total	mg/L	60,0	72,50	60,0	17,5	12,5
Alcalinidade total	mg/L	230,0	15,0	32,50	5	2,5
Óleos e graxas	mg/L	15,2	13,9	3,42	0,58	0,17
Coliformes termotolerantes	NMP/100mL	> 2.419,6	> 2.419,6	203,50 *	< 1,0	< 1,0
Sólidos totais	mg/L	665,0	682,0	-	-	-
Sólidos suspensos	mg/L	100,0	30,0	-	-	-
Sólidos dissolvidos	mg/L	540,7	532,9	-	-	-
Sólidos sedimentáveis	mg/L	2,0	-	-	-	-
SDI <sub>2</sub>	adimensional	-	Não mensurável	26,36	-	-
Cálcio	mg/L	2,39	4,09	2,78	< 0,1	< 0,1
Magnésio	mg/L	3,79	4,48	3,55	< 0,1	< 0,1
Manganês	mg/L	22,90	23,98	17,84	0,54	0,51
Sódio	mg/L	65,89	71,88	71,59	3,76	2,88
Potássio	mg/L	< 0,25	< 0,25	< 0,25	< 0,25	< 0,25
Ferro	mg/L	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Alumínio	mg/L	< 2,0	< 2,0	< 2,0	< 2,0	< 2,0
Bário	mg/L	< 2,5	< 2,5	< 2,5	< 2,5	< 2,5
Sulfatos	mg/L	85,0	85,0	73	0,0	0,5
Sílica	mg/L	16,0	11,1	9,35	0,75	0,45
Cloretos	mg/L	104,1	64,3	59,62	49,1	4,87
Nitratos	mg/L	4,5	8,6	11,7	2,4	1,7
Nitritos	mg/L	8,0	3,5	3,9	2,0	3,0
Nitrogênio amoniacal	mg/L	51,1	14,7	9,81	1,04	2,46
Fósforo total	mg/L	8,14	8,79	8,06	0,06	0,04

\* Valor de coliformes resultante da contaminação do sistema, pois operou por 3 meses e não pôde ser realizado procedimento de limpeza.

- Não realizado/não se aplica.

O processo biológico reduziu DBO e DQO em aproximadamente 83% e turbidez em 85%. Nitrato, nitrito e nitrogênio amoniacal sofreram

variações durante o processo devido às reações de nitrificação/desnitrificação em reatores biológicos. Os valores de fósforo não sofreram alteração no processo, mantendo um valor aproximado de 8 mg/L. As análises de SDI indicaram elevado potencial incrustante do efluente, havendo necessidade de pré-tratamento para processos de dessalinização como osmose reversa e nanofiltração, conforme esperado.

A condutividade específica (650,5  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) e a concentração de sólidos dissolvidos (532,9 mg/L) do esgoto tratado por biológico podem permitir projetar uma alta recuperação de água no processo de dessalinização. Nessa situação, a dureza (72,5 mg/L) e a alcalinidade (15 mg/L) devem ser consideradas no controle da incrustação por precipitação (*scaling*) por adição de anti-incrustantes.

O permeado da MF ainda apresentou condutividade específica elevada (549,5  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), bem como valores de DQO (59,42 mg/L) e dureza (60 mg/L) que podem impedir seu uso como correntes de *make-up* em torres de resfriamento. Com as características observadas, essa corrente poderia ser utilizada como água para lavagem, rega ou outros usos secundários.

Os permeados da NF e RO apresentaram elevadas porcentagens de remoção das variáveis pesquisadas, apresentando resultados similares. A exceção foi nos valores obtidos para alcalinidade, dureza e cloretos, quando a eficiência de remoção por RO foi superior a 80% para os dois primeiros e superior a 90% para o último.

Embora ambos os processos tenham apresentado eficiências de remoção elevadas para a maioria das variáveis pesquisadas, observou-se que o pré-tratamento desempenha papel fundamental na estabilidade do processo. Em ambos os casos, a permeabilidade das membranas decaiu constantemente durante o segundo dia de teste. Entretanto, o pré-tratamento por MF possibilitou a queda na permeabilidade em menor proporção em comparação à filtração convencional. A limpeza química foi eficiente na recuperação das propriedades das membranas, indicando que não houve formação de incrustações irreversíveis.

A análise da superfície das membranas de NF e RO por EDS mostrou a presença de elementos fósforo, enxofre, cálcio, silício, alumínio,

ferro, cobre e cromo. Picos maiores mostraram mais concentração dos metais no efluente que passou no papel de filtro em comparação ao permeado da MF. Isso mostra que grande parte aparece sob a forma de material suspenso que não foi removido com papel de filtro, mas ficou retido na membrana de microfiltração do MBR.

### 6.6.2.2 Ensaios de Tratabilidade em Escala-Piloto

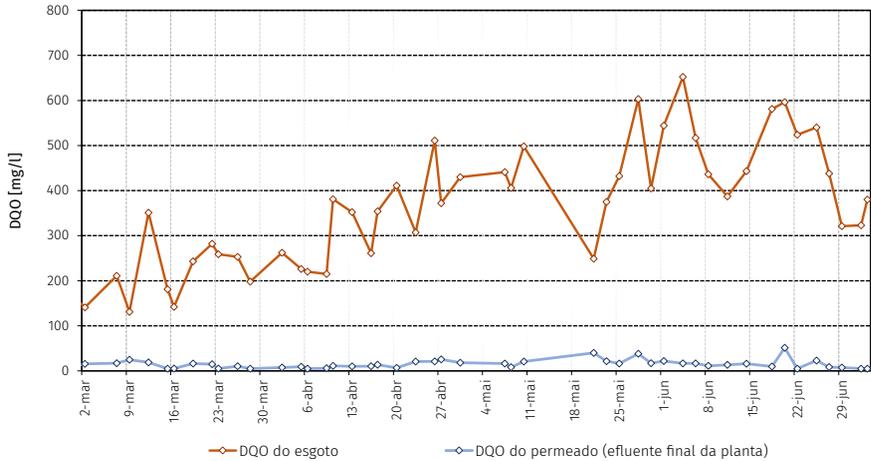
A planta-piloto operou em duas etapas (Etapa 1 e Etapa 2) ao longo do ano de 2018. Considerando que o MBR não apresentou os resultados esperados operando apenas com esgoto bruto (Etapa 1) em virtude da baixa carga orgânica do esgoto afluente, optou-se por não realizar a mistura do esgoto com a água do rio prevista para a etapa 2. Sendo assim, essa etapa seguiu com os mesmos parâmetros da etapa 1, com o objetivo de avaliar o ciclo de aproximadamente um ano de operação com o esgoto bruto no MBR.

#### a) Eficiência da planta-piloto no tratamento de esgoto sanitário

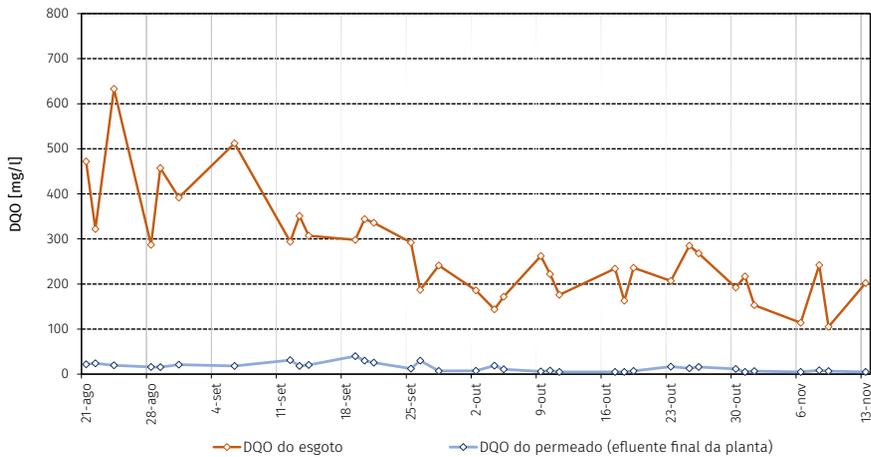
Os resultados obtidos após ambas as etapas de operação da planta-piloto evidenciaram sua autonomia operacional e capacidade de remoção de carga orgânica presente no esgoto sanitário doméstico, como era esperado. Mesmo com o efluente alimentado ao sistema em uma condição bastante diluída no primeiro mês de operação, foi possível conduzir o crescimento e a estabilização da biologia no tanque de aeração.

Foi possível manter a temperatura e o oxigênio dissolvido dentro das faixas requeridas pelo processo, acontecendo desvios desses parâmetros apenas quando da operação manual do sistema. As membranas foram substituídas durante o período de monitoramento devido a entupimento, porém sem alterações significativas nos resultados. As lavagens das membranas instaladas na planta foram realizadas de maneira automática, quando necessário.

Os gráficos da Figura 6.17 e da Figura 6.18 mostram os valores de entrada e saída para DQO nas duas etapas de operação.



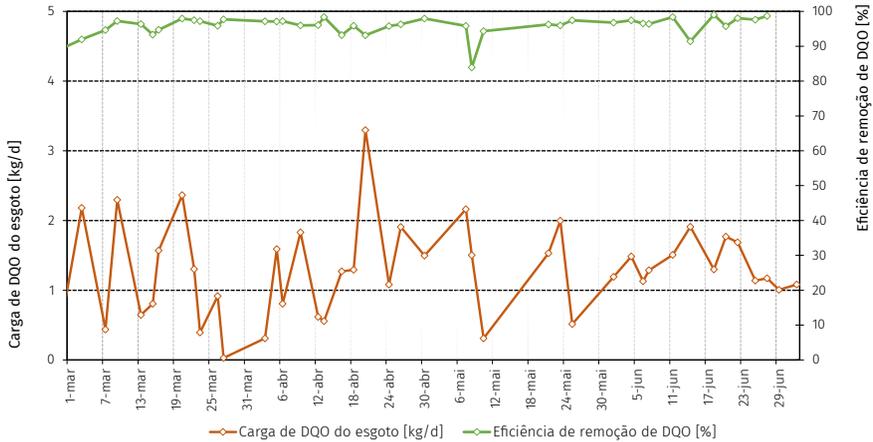
**Figura 6.17:** Resultados de DQO – Etapa 1.



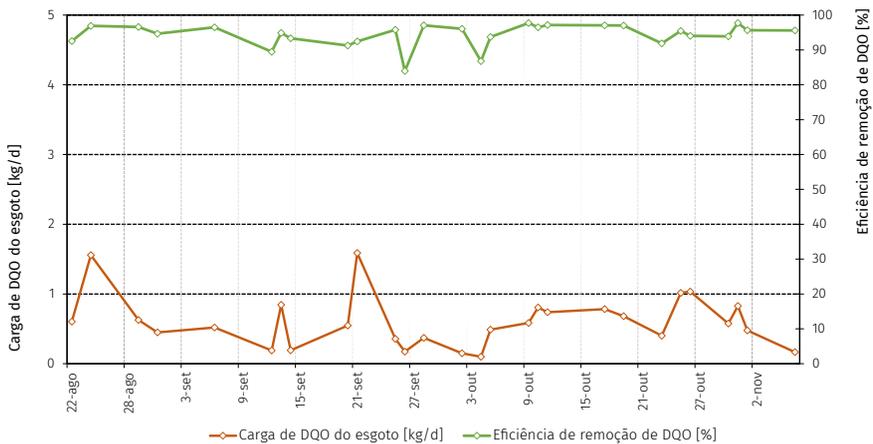
**Figura 6.18:** Resultados de DQO – Etapa 2.

A segunda etapa dos testes foi marcada por uma alta pluviometria na região e, conseqüentemente, uma diluição ainda maior do esgoto bruto alimentado na planta-piloto. Ainda assim foi possível manter a estabilidade biológica no tanque de aeração, porém não foram atingidos níveis de biomassa muito altos devido à falta de carga orgânica.

Apesar disso, a remoção de DQO promovida pela planta-piloto foi mantida em níveis altos durante todo o período de monitoramento, sofrendo somente duas baixas de eficiência pontuais devido a problemas com o compressor na planta – que comprometeu temporariamente a capacidade autônoma do sistema. As cargas orgânicas aplicadas ao MBR e a eficiência de remoção de DQO nas duas etapas de testes são apresentadas na Figura 6.19 e na Figura 6.20.



**Figura 6.19:** Eficiência de remoção de DQO e carga de DQO alimentada – Etapa 1.



**Figura 6.20:** Eficiência de remoção de DQO e carga de DQO alimentada – Etapa 2.

Como esperado, a remoção de DQO foi superior a 90%, apesar das acentuadas oscilações na carga orgânica alimentada no MBR, evidenciando a aplicabilidade do MBR para tratamento de esgoto mesmo em condições de baixa carga orgânica aplicada. A remoção de DBO obtida na planta-piloto também foi bastante significativa, conforme monitoramento realizado nas duas etapas.

A operação da planta-piloto foi conduzida sem o processo de desnitrificação, razão pela qual não houve expressiva remoção de nitrogênio. Os compostos nitrogenados alimentados, majoritariamente na forma de amônio, são reduzidos a íons nitrato por meio do processo de nitrificação e esses não são removidos do efluente tratado. A planta-piloto tem capacidade para remoção de nitrogênio total. No entanto, deve ser realizada a operação separada da nitrificação e desnitrificação, o que não era objetivo específico da pesquisa.

Observou-se, também, uma baixa remoção de fósforo, comum em sistemas de tratamento de esgoto sanitário doméstico por lodo ativado que trabalham com uma única etapa aeróbica.

- b)** Possibilidade de utilização do permeado da planta-piloto no processo industrial da usina

A fim de verificar a viabilidade de utilização dessa possível fonte alternativa de água, os valores obtidos nas análises físico-químicas em amostras do permeado foram comparados com os valores de referência adotados pela usina para admissão no sistema de troca iônica (DESMI) e sistema de resfriamento (torre de resfriamento), conforme Tabela 6.18.

**Tabela 6.18:** Valores obtidos na caracterização do permeado do MBR e valores de referência para água na DESMI e Torre de Resfriamento.

Variáveis	N.	Valores máximos (Permeado)	Valores de referência (DESMI)	Valores de referência (Torre de Resfriamento)	% Valores em desacordo (DESMI)	% Valores em desacordo (Torre de Resfriamento)
Alcalinidade total (mg/L)	22	253,86	≤ 50	119,8	32	14
Cloretos (mg/L)	22	71,5	≤ 40	61,6	77	23
Condutividade específica (µS/cm)	22	1.179	≤ 280	565,5	100	82
Cromo total (mg/L)	7	0,031	≤ 0,1	ND	0	ND
DBO (mg/L)	22	8,5	≤ 3,0	8,9	36	0
DQO (mg/L)	22	54,1	≤ 8,0	40	100	9
Dureza cálcio (mg/L)	22	104,7	ND	49	ND	73
Dureza total (mg/L)	22	142,3	≤ 100	78,3	23	55
Fenóis (mg/L)	6	0,0001	≤ 0,1	ND	0	ND
Ferro total (mg/L)	19	< 0,5	≤ 0,1	1,8	ND	0
Fluoretos (mg/L)	7	0,7	≤ 0,1	ND	100	ND
Fosfato total (mg/L)	22	47,1	≤ 0,1	ND	95	ND
Mercúrio (mg/L)	7	< 0,001	≤ 0,1	ND	0	ND
Nitrogênio amoniacal (mg/L)	7	37,9	≤ 2,0	21,3	43	14
pH	7	8,3	≥ 6,2 e ≤ 8,2	7,28	43	28
Selênio (mg/L)	7	0,006	≤ 0,1	ND	0	ND
Sílica (mg/L)	20	16,5	≤ 12	30,8	5	0
Sulfatos (mg/L)	22	90,4	≤ 50	82	68	9
Turbidez (UNT)	22	2,1	≤ 2,0	4,6	5	0

ND: Não Definido.

Para admissão no sistema DESMI observa-se que haveria restrições para as variáveis condutividade específica, DQO e fluoretos, pois 100% dos resultados obtidos nos testes não satisfazem os valores de referência adotados pela usina. Ainda, os resultados obtidos para cloretos (77%), sulfatos (68%), nitrogênio amoniacal (43%), pH (43%), DBO (36%), fosfato total (95%) e dureza total (23%) também apresentam desacordo numa frequência não desejada. Portanto, é possível concluir que o processo de MBR necessita de tratamento complementar para produção de um permeado com qualidade suficiente para admissão na DESMI.

Para uso no sistema de resfriamento da usina como água de *make-up*, as variáveis condutividade específica (82%) e dureza total (55%) seriam as mais limitantes, seguidas de pH (28%) e cloretos (23%). Nesse caso também seria necessário tratamento complementar para adequação da qualidade da água, visando principalmente à redução dos valores de condutividade e dureza.

#### c) Conformidade com a Resolução CONAMA n. 430/2011

A análise da conformidade com a Resolução CONAMA n. 430/2011, que dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, foi realizada tendo em vista a hipótese da impossibilidade de reúso do efluente da planta-piloto e a subsequente necessidade de lançamento em corpo hídrico. Para tanto, foram analisadas as condições e padrões de lançamento de efluentes dessa Resolução, que estabelece para o lançamento direto de efluentes oriundos de sistemas de tratamento de esgotos sanitários as seguintes condições e padrões específicos:

- pH entre 5 a 9;
- temperatura: inferior a 40 °C, sendo que a variação de temperatura do corpo receptor não deverá exceder a 3 °C no limite da zona de mistura;
- materiais sedimentáveis: até 1 mL/L em teste de 1 hora em cone *Imhoff*. Para o lançamento em lagos e lagoas, cuja velocidade de circulação seja praticamente nula, os materiais sedimentáveis deverão estar virtualmente ausentes;

- demanda bioquímica de oxigênio-DBO 5 dias, 20 °C: máximo de 120 mg/L, sendo que esse limite somente poderá ser ultrapassado no caso de efluente de sistema de tratamento com eficiência de remoção mínima de 60% de DBO, ou mediante estudo de autodepuração do corpo hídrico que comprove atendimento às metas do enquadramento do corpo receptor;
- substâncias solúveis em hexano (óleos e graxas) até 100 mg/L; e
- ausência de materiais flutuantes.

Como facultado pela Resolução, optou-se por observar os valores máximos para os parâmetros orgânicos e inorgânicos de lançamento para efluentes, não sendo exigível o padrão de nitrogênio amoniacal total aos sistemas de tratamento de esgotos sanitários.

Os valores máximos (mg/L) para os parâmetros orgânicos e inorgânicos constantes dessa Resolução são apresentados na Tabela 6.19, juntamente com os resultados máximos e mínimos obtidos para o permeado da planta-piloto.

**Tabela 6.19:** Conformidade com a Resolução CONAMA n. 430/2011.

Variáveis	N.	Valores mínimos (Permeado)	Valores máximos (Permeado)	Valores máximos (CONAMA n. 430/2011)
Arsênio total (mg/L)	7	< 0,0002	0,0072	0,5
Bário total (mg/L)	7	< 1,0	< 1,0	5
Benzeno (mg/L)	7	< 0,0005	< 0,0005	1,2
Boro total (mg/L)	7	0,019	0,24	5
Cádmio total (mg/L)	7	< 0,5	< 0,5	0,2
Chumbo total (mg/L)	7	< 1,0	< 1,0	0,5
Cianeto livre (mg/L)	7	0,001	0,0034	0,2
Cianeto total (mg/L)	7	< 0,001	0,052	1
Clorofórmio (mg/L)	7	< 0,0005	< 0,0005	1
Cobre dissolvido (mg/L)	6	< 0,5	< 0,5	1
Cromo hexavalente (mg/L)	7	< 0,01	< 0,01	0,1

Variáveis	N.	Valores mínimos (Permeado)	Valores máximos (Permeado)	Valores máximos (CONAMA n. 430/2011)
Cromo trivalente (mg/L)	7	< 0,01	0,031	1
DBO (mg/L)	22	< 2,0	8,5	120
Dicloroetano (mg/L)	7	< 0,0005	< 0,0005	1
DQO (mg/L)	22	8,7	54,1	ND
Estanho total (mg/L)	7	< 15,0	< 15,0	4
Estireno (mg/L)	7	< 0,0005	0,0037	0,07
Etilbenzeno (mg/L)	7	< 0,0005	0,0037	0,84
Fenóis (mg/L)	6	< 0,00005	0,0001	0,5
Ferro dissolvido (mg/L)	6	< 0,5	< 0,5	15
Fluoretos (mg/L)	7	0,2	0,7	10
Manganês dissolvido (mg/L)	6	< 0,5	< 0,5	1
Mercúrio total (mg/L)	7	< 0,0002	< 0,0002	0,01
Níquel total (mg/L)	7	< 0,5	< 0,5	2
Nitrogênio amoniacal total (mg/L)	7	< 0,1	37,9	20
Óleos minerais (mg/L)	7	< 5,0	< 5,0	20
Óleos vegetais e gorduras animais (mg/L)	7	< 5,0	< 5,0	50
pH	7	5,9	8,3	> 5 e < 9
Prata total (mg/L)	7	< 0,5	< 0,5	0,1
Selênio total (mg/L)	7	< 0,0010	0,006	0,3
Sólidos sedimentáveis (mL/L)	7	< 0,1	< 0,1	1
Sulfeto (mg/L)	7	< 0,05	< 0,05	1
Temperatura da água (°C)	7	28,1	37,0	40
Tetracloroeto de carbono (mg/L)	6	< 0,0005	< 0,0005	1
Tolueno (mg/L)	7	< 0,0005	0,0008	1,2
Tricloroetano (mg/L)	7	< 0,0005	< 0,0005	1
Xileno (mg/L)	7	< 0,0005	< 0,0005	1,6
Zinco total (mg/L)	7	< 0,5	< 0,5	5

ND: Não Definido.

A partir dos resultados obtidos pode-se concluir que, à exceção da variável nitrogênio amoniacal total, todas as condições e padrões para lançamento em corpo hídrico foram atendidas para o efluente final da planta-piloto. No entanto, para tratamento de esgotos sanitários não é exigível o padrão de nitrogênio amoniacal total, conforme Resolução CONAMA n. 430/2011.

### 6.6.3 Conclusões

Os ensaios laboratoriais apresentaram elevada eficiência nas etapas de MBR, nanofiltração e osmose reversa para todos os parâmetros analisados e concentrações dos íons analisados. O elevado potencial incrustante do efluente foi evidenciado pelos resultados das análises de SDI, confirmando o papel fundamental que o pré-tratamento desempenha na estabilidade dos processos de RO e NF.

Os valores elevados obtidos para condutividade, DQO e dureza total no permeado da MF impedem seu uso como correntes de *make-up* em torres de resfriamento. Com as características observadas e sem nenhum tratamento adicional, essa corrente poderia ser utilizada como água para lavagem, rega ou outros usos secundários.

Nos testes com a planta-piloto a utilização de equipamentos para pré-tratamento do esgoto sanitário doméstico se mostrou imperativa para a retirada de sólidos, como fibras e fios de cabelo — presentes em grande quantidade no esgoto bruto — que podem bloquear a superfície das membranas e interromper a operação do sistema, como ocorrido durante a fase de testes.

De acordo com Asano (2007), elevadas concentrações de sólidos suspensos totais — SST (>30 mg/L) representadas pela presença de fios de cabelo, materiais fibrosos e outros sólidos inertes podem formar acúmulo na superfície da membrana, causando redução da eficiência, bem como danos físicos, podendo também diminuir a qualidade do permeado. Também, a presença de óleos e graxas pode afetar o desempenho das membranas por incrustação, diminuindo seu desempenho e demandando limpezas mais frequentes.

A planta-piloto se mostrou muito eficiente na redução da carga orgânica presente no esgoto bruto (representada pela DBO e DQO), com eficiências superiores a 90%, apesar das oscilações de carga orgânica na alimentação do sistema.

Para remoção de nitrogênio são necessários ajustes, sendo possível operar a planta com desnitrificação criando regiões anóxicas no tanque de aeração, se desejado.

Na eventualidade do lançamento de seu efluente final em corpos d'água, há necessidade de considerar a remoção de fósforo, com a implementação de tratamento adicional para evitar a eutrofização do corpo receptor.

Para uso no processo industrial da usina como água de *make-up* para a torre de resfriamento ou na DESMI, os resultados obtidos para as variáveis críticas permitem concluir que seria necessário investimento adicional em tratamento complementar. Os estudos em escala laboratorial apontam que seria possível utilizar nanofiltração (NF) ou osmose reversa (RO) para adequar a qualidade do permeado do MBR aos requisitos adotados pela usina para esses usos.

Com os resultados obtidos durante a fase de testes em escala-piloto, é possível afirmar que o efluente final apresenta conformidade com a Resolução CONAMA n. 430/2011, considerada a hipótese de impossibilidade de reúso industrial do efluente da planta-piloto e a subsequente necessidade de lançamento em corpo hídrico.

## 6.7 Corrosividade da água industrial do sistema de resfriamento

Conforme já comentado, usinas termelétricas utilizam água industrial em seu sistema de resfriamento, cuja função é retirar dos equipamentos o calor gerado durante a operação da planta. A água utilizada nesses sistemas deve ser tratada corretamente para evitar danos às estruturas e problemas na operação.

Após gerar energia na turbina a vapor, o vapor produzido pelas caldeiras é condensado em trocadores de calor chamados condensadores - onde troca calor com a água industrial - e retorna às caldeiras para um novo ciclo. As caldeiras necessitam de água com alto grau de pureza na sua operação, de forma que, caso o condensado produzido nos condensadores e a água industrial se misturem por problemas de corrosão nestes equipa-

mentos, as unidades geradoras devem ser desligadas para não causar problemas nas caldeiras. Um dos principais constituintes da água industrial que pode causar danos aos materiais metálicos é o íon cloreto, causador de corrosão localizada nos metais. Outro problema que deve ser evitado é a formação de incrustações nas paredes dos tubos para não prejudicar a troca térmica, mas também para minimizar possíveis problemas de corrosão por aeração diferencial. Assim, outros constituintes da água industrial também necessitam ser ajustados aos níveis aceitáveis para o sistema de refrigeração, como o oxigênio dissolvido, sulfatos, equilíbrio cálcio-carbônico, dentre outros.

Os condensadores do sistema de refrigeração da UEGA são construídos em tubos de aço inoxidável 304 fixados por expansão em placas (“espelhos”) de aço inoxidável 316. Essa configuração gera duas situações de risco no que se refere à corrosão: dois materiais metálicos diferentes em contato podem levar à corrosão galvânica; ainda, o método de fixação pode originar frestas que favorecem a corrosão localizada.

Na ocasião da construção dos condensadores da UEGA, foi proposta a utilização de ligas de cobre. Porém, como a água fornecida pela Sanepar chega à usina com concentração de amônia entre 6 e 7 ppm, com picos de 12 ppm, foi efetuado pelo Lactec um estudo de corrosão de diferentes ligas de cobre em presença de amônia. Então foi constatada a alta corrosividade desse composto em relação às ligas estudadas, levando à construção dos condensadores em aço inoxidável. Por outro lado, o limite máximo fixado para a concentração de íons cloreto pelos fornecedores desses equipamentos está em 300 ppm, uma vez que os cloretos são reconhecidamente corrosivos. Esse é um limite genérico, definido pelo fabricante, sendo que não se tem acesso a informações a respeito de como esse limite foi definido e de quais dados foram utilizados para se chegar a esse valor. Portanto, não se sabe até que ponto o limite definido foi personalizado para a aplicação em questão. Por segurança operacional, a UEGA exige no contrato de fornecimento de água níveis máximos de cloretos de 40 ppm.

Durante a operação da usina, após a troca térmica, a água dos condensadores segue para a torre de resfriamento, onde quantidades variáveis

de água são perdidas por evaporação. Isso leva a uma concentração dos seus teores de cloretos e das outras impurezas presentes. Quando atingido o limite de 300 ppm de íons cloreto, parte da água concentrada é descartada e admite-se nova água ao sistema, de forma a reduzir essa concentração e manter em circulação o volume de água necessário. Nesse momento, inicia-se um novo ciclo, até que a água atinja novamente o limite de 300 ppm de íons cloreto e ocorra novo descarte.

Para o controle dos agentes biológicos presentes na água do sistema de resfriamento, é realizado um tratamento com biocida na alimentação das torres de resfriamento. Esse tratamento químico é baseado no cloro ativo (ácido hipocloroso) formado pela adição do hipoclorito de sódio na água. O valor de pH ideal para a atuação do biocida é 7,3. Por isso, originalmente durante a operação era feito um ajuste do pH da água pela adição do ácido sulfúrico, o que implicava também na adição de íons sulfato ao sistema. Posteriormente o tratamento passou a incluir sais de brometo para formação da cloramina bromo ativada, diminuindo o período de adição do hipoclorito e do ácido sulfúrico para ajuste de pH.

O processo de controle da corrosão e incrustações do sistema de resfriamento da usina é terceirizado, por meio de concorrência para prestação de serviços. A empresa ganhadora do processo entrega a solução fechada, controlando inclusive a dosagem dos produtos a serem adicionados ao sistema. A composição detalhada dos aditivos não é divulgada, no entanto, sabe-se que é composta pela combinação de dois aditivos, um inibidor de corrosão à base de fosfonato e um dispersante à base de poliacrilato. A função do agente dispersante é promover a separação entre as partículas sólidas, para que não ocorra a floculação. E os fosfonatos são inibidores do tipo misto, amplamente empregados no tratamento de água em sistemas de resfriamento devido ao seu bom desempenho inibitivo em ambientes de pH neutro e por apresentarem baixa toxicidade e alta estabilidade química.

O principal objetivo do estudo da corrosão desenvolvido no projeto foi determinar a corrosividade do meio aos materiais componentes dos equipamentos, considerando o efeito sinérgico da combinação das principais espécies químicas presentes na água do sistema de resfriamento. Nesse sentido, as espécies químicas consideradas foram:

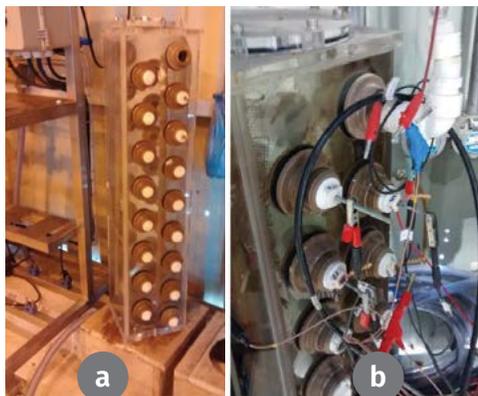
- Cloreto: presente na água industrial e subproduto do biocida, trata-se de um íon agressivo aos aços inoxidáveis, promove a destruição local da proteção desses materiais pela ruptura do filme passivo;
- Sulfato: presente na água industrial e subproduto da adição de ácido sulfúrico para ajuste do pH; e
- Amônia: presente na água industrial e característica peculiar da água, determinante na escolha dos materiais dos equipamentos.

## 6.7.1 Metodologia

O estudo da corrosão foi composto por diferentes etapas que incluíram o monitoramento em campo a partir da instalação de uma estação de corrosão, bem como experimentos em laboratório.

### 6.7.1.1 Estudo da Corrosão em Campo

A instalação da estação de corrosão foi realizada na tomada de água na base da torre de resfriamento, de modo que a água circulasse constantemente por ela (Figura 6.21). A estação foi construída sob medida para permitir a realização tanto de medidas simples, tais como perda de massa e potencial, quanto medidas eletroquímicas mais complexas, como voltametrias e espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS).



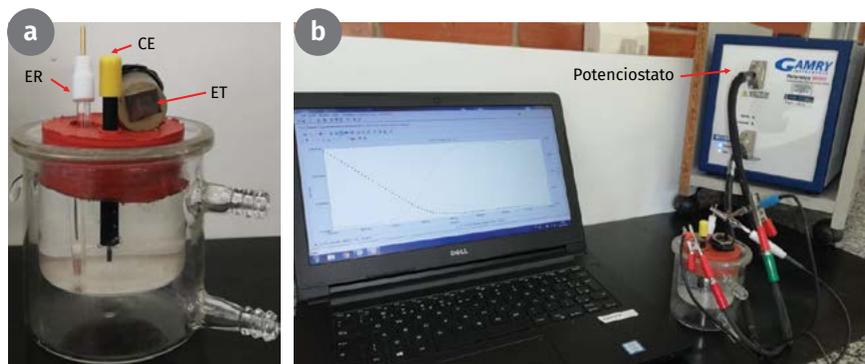
**Figura 6.21:** Estação de corrosão sendo instalada em (A) e já com os eletrodos instalados para medidas em (B).

Foram realizadas medidas eletroquímicas para determinar parâmetros como a taxa de corrosão, suscetibilidade à corrosão por pites, potencial de passivação e de quebra de passivação. Além disso, foram monitorados os potenciais de circuito aberto dos eletrodos ao longo do tempo, com monitoramento contínuo no período entre maio de 2016 e março de 2017.

### 6.7.1.2 Estudo da Corrosão em Laboratório

Os efeitos do contato entre os materiais do trocador de calor e as espécies químicas presentes na água industrial foram avaliados em condições estáticas e em fluxo considerando os diferentes mecanismos do processo corrosivo. Para isso, foram utilizadas soluções preparadas em laboratório, com quantidades determinadas das espécies de interesse.

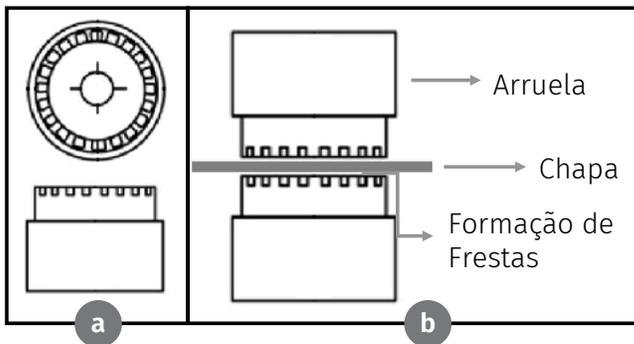
Os aços inoxidáveis apresentam uma boa resistência à corrosão generalizada, mas na presença de íons cloreto são bastante suscetíveis à corrosão localizada por pites (MA, 2012). Por isso, essa forma de corrosão foi avaliada em situação estática e na presença de fluxo pela aplicação de medidas eletroquímicas de voltametria cíclica, isso para medir os parâmetros de potencial de circuito aberto, potencial de passivação e de quebra de passivação. O arranjo experimental com a célula eletroquímica e o potenciostato está apresentado na Figura 6.22.



**Figura 6.22:** Em (A) Célula eletroquímica composta por eletrodo de referência (ER) de Ag/AgCl, contra-eletrodo (CE) de grafite e eletrodo de trabalho (ET) de aço inoxidável 304. Em (B), a conexão da célula eletroquímica com o potenciostato.

A corrosão galvânica que ocorre devido ao contato de dois distintos metais na presença de água foi avaliada para os dois aços inoxidáveis. Os metais foram imersos nas soluções e conectados externamente através do potenciostato na configuração de resistência baixa (*Zero Resistance Ammeter - ZRA*). Assim, era possível medir o fluxo de corrente resultante da corrosão entre eles.

A corrosão por frestas ocorre em regiões de união entre duas superfícies. Para avaliação desse tipo de corrosão, foram realizadas medidas eletroquímicas utilizando uma configuração de eletrodo de trabalho, contendo uma combinação chapa-arruela composta por arruela de teflon e chapa dos aços inoxidáveis, como indicado pela Figura 6.23 (ASTM, 2014). Foi avaliada também a ação combinada dos mecanismos de corrosão por frestas e corrosão galvânica, numa combinação de chapa-arruela dos dois aços.



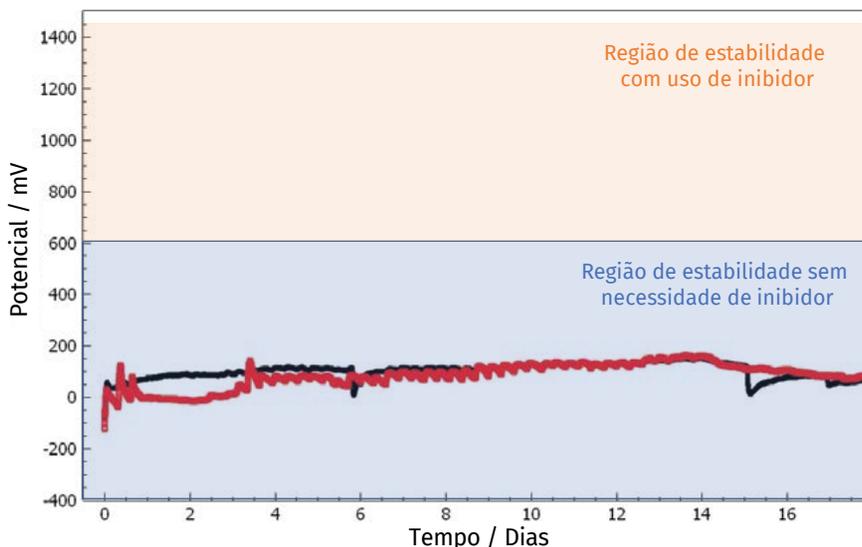
**Figura 6.23:** Eletrodo chapa-arruela para teste de corrosão por frestas e corrosão galvânica + frestas.

## 6.7.2 Resultados e Discussão

Como mencionado no item anterior, os estudos de corrosão foram desenvolvidos em dois ambientes diferentes, tanto na estação de corrosão instalada na usina quanto em laboratório. As medidas de laboratório foram realizadas em soluções preparadas com água retirada diretamente da torre de resfriamento, bem como em soluções idealizadas, preparadas a partir de água deionizada e reagentes analíticos.

### 6.7.2.1 Resultados em Campo

A Figura 6.24 mostra a variação de potencial de circuito aberto de dois eletrodos, um de aço inox 304 e outro de aço inox 316, instalados na estação de corrosão, entre maio e junho de 2016. Nesta figura estão ilustradas as regiões de potencial onde esses metais são estáveis (passivos) ou sujeitos a corrosão por pites.

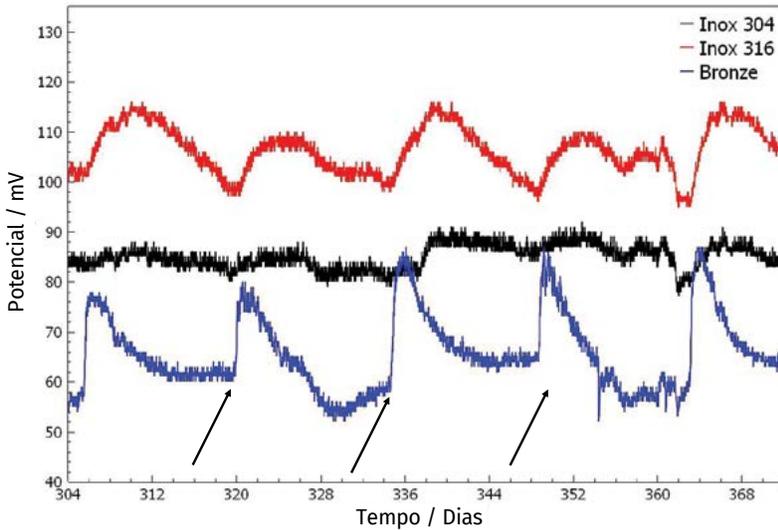


**Figura 6.24:** Valores de potencial de circuito aberto para os eletrodos de aço inoxidável 304 e 316 monitorados na estação de corrosão.

A região de estabilidade à corrosão, mesmo na ausência do inibidor, é aquela onde o aço inoxidável se encontra no seu estado passivado, ou seja, de acordo com a Figura 6.24, a corrosão por pites é favorável em valores de potencial superiores a 0,6 V. Na presença de inibidor, a janela de estabilidade do filme passivo se estende até cerca de 1,4 V. Em potenciais acima desse valor, a reação de formação de oxigênio é a mais favorável.

Tanto o aço inox 304 quanto o aço inox 316 permaneceram dentro de uma “região segura de potencial”, durante todo o período monitorado, incluindo os dias apresentados no gráfico.

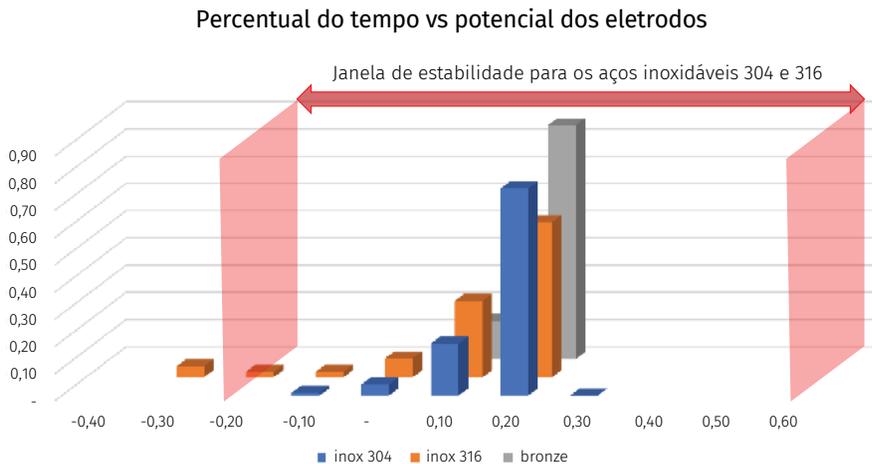
A Figura 6.25 apresenta de forma mais detalhada os valores de potencial de circuito aberto dos eletrodos monitorados. Apresenta também a variação de potencial de um eletrodo de bronze instalado juntamente com os de aço inox, de modo a utilizar a mesma estrutura para avaliar paralelamente o comportamento dessa liga adicional, verificando seu potencial como opção futura para componentes do sistema.



**Figura 6.25:** Valores de potencial de circuito aberto para amostras de aços inoxidáveis 304 e 316, e de bronze, monitorados na estação de corrosão.

Os valores de potencial dos eletrodos apresentaram oscilações constantes em um período aproximado de 12 h, idêntico ao regime de injeção do agente biocida na torre de resfriamento, conforme levantado com a equipe de operação da usina. Logo após a injeção do produto, o potencial de todos os eletrodos aumenta e volta a diminuir ao longo do tempo, sendo que, no período em questão, o potencial do eletrodo de aço inox 304 é o que menos varia dentre os três eletrodos. O potencial do eletrodo de bronze é o que tem a variação mais pronunciada dos avaliados, pois atinge um valor máximo em um tempo mais curto e depois volta a diminuir e se estabilizar. Verifica-se ainda que ele apresenta uma resposta mais rápida que o aço inox 316.

O comportamento geral do potencial ao longo de todo o monitoramento pode ser melhor visualizado analisando-se a Figura 6.26, que mostra a fração do tempo total monitorado em que cada uma das ligas permaneceu em um dado potencial.



**Figura 6.26:** Fração do tempo total monitorado de cada uma das ligas estudadas.

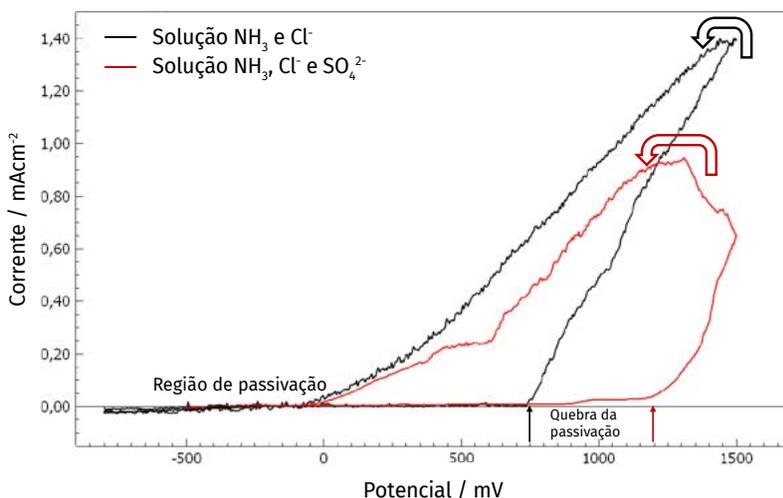
Considerando que foram realizadas medições a cada minuto, tem-se uma boa estimativa do comportamento geral das ligas nesse meio, e, na maior parte do tempo, elas permanecem dentro de uma região de potencial “segura” para a operação.

### 6.7.2.2 Resultados em Laboratório

Com o intuito de avaliar a influência das espécies químicas que compõem o fluido presente nos trocadores de calor da usina, as soluções aquosas foram preparadas com os íons cloreto, sulfato e amônio, incluindo as máximas e as mínimas concentrações de cada íon obtidas nas análises químicas da água industrial.

Nos meios estudados contendo apenas amônia, nas concentrações mínima e máxima de 8 ppm e 24 ppm, respectivamente, os aços apresentaram boa estabilidade e ausência da corrosão localizada, nas condições estáticas e em fluxo.

Os resultados de avaliação da corrosão por pites indicaram que esse tipo de corrosão localizada pode ocorrer nas condições avaliadas, variando em intensidade de acordo com a proporção entre a concentração do íon sulfato – que age como um inibidor – e do íon agressivo cloreto (PESQUEIRA, 2018a; POHJANNE, 2007). O meio contendo baixa concentração dos íons cloreto e amônia para o aço inoxidável 316 e o resultado para a adição do sulfato ao meio estão apresentados no gráfico da Figura 6.27.



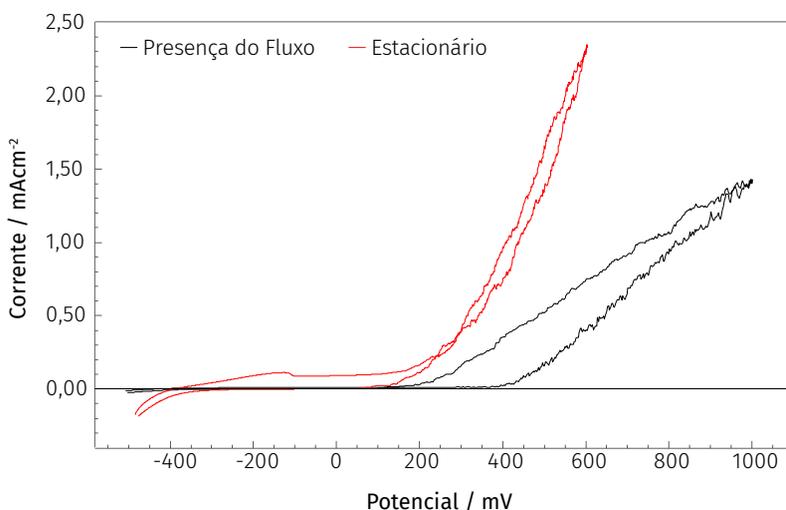
**Figura 6.27:** Voltametrias cíclicas para o aço inoxidável 316 nos meios de baixa concentração de amônia e cloreto e, também, o efeito da adição de sulfato.

A partir do gráfico, é possível determinar a região de passivação, que é caracterizada por apresentar corrente com valores muito baixos, independentemente do aumento do potencial, visto que não há reação acontecendo e o material está protegido pelo filme passivo na sua superfície. A região de transpassivação é caracterizada pela mudança de comportamento da corrente, que apresenta um aumento acentuado, a partir do potencial de quebra, e atinge valores altos, indicando que está acontecendo uma reação eletroquímica; nesse caso, da corrosão por pites do aço. Ao atingir o limite da voltametria em 1,5 V, o sentido da varredura foi invertido (como indicado pelas setas) e a densidade de corrente retornou em valores mais altos, formando uma histerese positiva no gráfico. Tal comportamento é

típico da corrosão por pites, uma vez que houve exposição do material, pela ruptura do filme passivo, disponibilizando maior área de ataque para o processo corrosivo, resultando em maiores valores de corrente.

Observa-se assim que a ausência do sulfato torna o ambiente com cloreto mais nocivo e favorece a corrosão por pites nos dois tipos de aço inox, visto que a quebra da passivação e o início da corrosão ocorrem em valores de potencial inferiores.

O meio contendo baixa concentração dos íons cloreto e amônia para o aço inoxidável 304 sob fluxo de 2 m/s apresentou os resultados de voltametria cíclica ilustrados na Figura 6.28.



**Figura 6.28:** Voltametrias cíclicas do aço inox 304 em condição estacionária e sob fluxo.

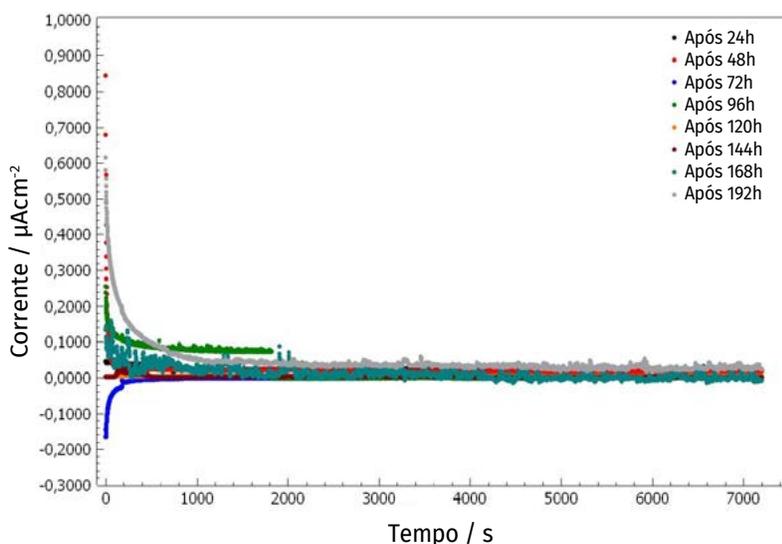
A avaliação da Figura 6.28 permite afirmar que a presença do fluxo interfere no processo da corrosão por pites. No caso do eletrodo estacionário, a quebra de passivação ocorre em potencial inferior, se comparado ao eletrodo sob fluxo, indicando maior suscetibilidade ao processo corrosivo.

Em todas as soluções estudadas, a presença do fluxo aumentou a resistência à corrosão dos dois materiais nos meios em questão. A imposição dos processos hidrodinâmicos, ou seja, o transporte por convecção

forçada das espécies químicas, impede o acúmulo dos íons agressivos nas proximidades do eletrodo e dificulta a formação da microrregião concentrada que promove a formação do pite. Dessa forma, o processo corrosivo, quando ocorre, é menos intenso.

Experimentalmente também foram estudados os mecanismos de corrosão galvânica e de corrosão por frestas de forma isolada e, em seguida, a soma de ambos os mecanismos.

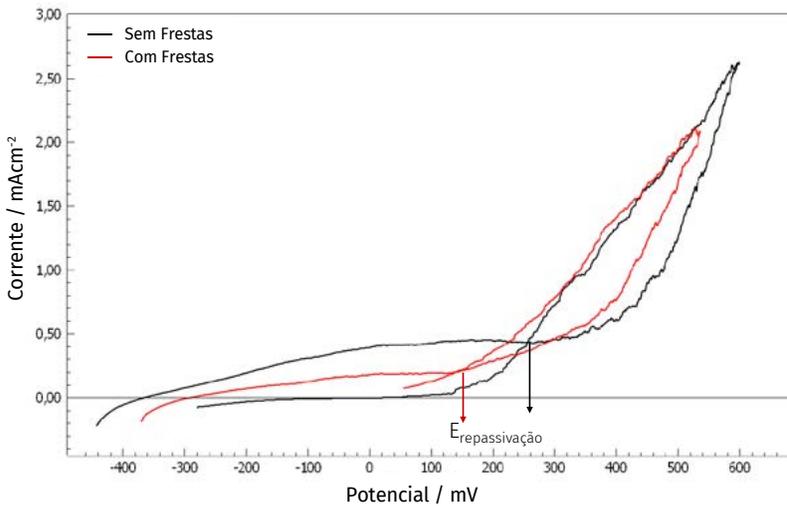
Durante o experimento de corrosão galvânica foi verificado que o contato elétrico entre as ligas distintas (aço inox 304 e aço inox 316) não implicou taxas de corrosão relevantes (praticamente nulas em todos os casos), como apresentado no gráfico da Figura 6.29. Mesmo após 192 h de imersão e contato, as imagens de microscopia não indicaram nenhum tipo de ataque corrosivo.



**Figura 6.29:** Estudo da corrosão galvânica para as ligas de aço inox 304 e 316 em contato.

As medidas de corrosão por frestas mostraram que a presença de regiões de contato entre as superfícies no eletrodo de trabalho modifica efetivamente o mecanismo principal de ataque corrosivo (de ataque por pites dispersos para ataque por frestas).

O gráfico da Figura 6.30 mostra o resultado de duas voltametrias: a curva em preto refere-se apenas ao eletrodo de aço inox e a curva vermelha trata do experimento da chapa + formador de frestas.



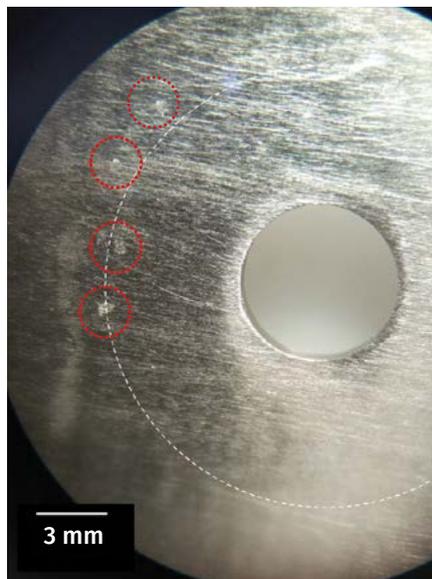
**Figura 6.30:** Voltametrias do aço inox (em preto) e do conjunto chapa + formador de frestas (em vermelho).

O deslocamento para valores menores dos potenciais de quebra de passivação e de repassivação indica o aumento da suscetibilidade da liga à corrosão pela ocorrência das frestas na presença do íon cloreto (PESQUEIRA, 2018b). Inicialmente, foi possível verificar que o potencial de circuito aberto do conjunto com frestas é mais anódico que o da chapa sem frestas; e isso indica que o caráter passivo da arruela predominou no comportamento do conjunto. Apesar de um início mais nobre do conjunto chapa + formador de frestas, o potencial de quebra de passivação foi mais catódico neste caso que no da chapa sem frestas e isso demonstra que a presença destas diminui a resistência do conjunto à corrosão localizada. O deslocamento do potencial de repassivação para valores mais catódicos mostrou que a presença das frestas dificulta a recuperação do filme passivo na corrosão localizada formada sob as frestas. Na presença do sulfato no meio, o deslocamento de potencial foi menos evidente. A imagem de microscopia ótica para o aço inox após o experimento mostra que a corrosão se

concentra sob as frestas, como na Figura 6.31.

Todavia, em todos os casos observados verificou-se que a presença de frestas não implicou ataque corrosivo autossustentável, ou seja, em todos os experimentos realizados foi verificado que o sistema recupera o caráter passivo após a corrosão por frestas.

Por sua vez, a combinação frestas + par galvânico mostrou que a presença de frestas é mais significativa. No entanto, o contato elétrico das ligas pode tornar o sistema mais instável.



**Figura 6.31:** Detalhe da corrosão em frestas observada na chapa de aço inox.

### 6.7.3 Conclusões

Foram realizadas medidas eletroquímicas em laboratório e na estação de corrosão instalada na usina, a fim de caracterizar o nível de corrosividade da água industrial utilizada no sistema de resfriamento em distintas condições. Como a composição da água de resfriamento varia com o tempo (características da água industrial, injeção periódica de biocida e aditivos), foram utilizadas no estudo soluções preparadas em laboratório, com mais controle sobre as variáveis experimentais, de modo a avaliar o efeito dessas variações.

Em linhas gerais, o potencial de circuito aberto de todas as ligas permaneceu dentro dos limites de estabilidade do filme de passivação, o que sugere que o sistema em questão está seguro no que diz respeito à corrosão generalizada e por pites.

Demonstrou-se que o potencial de circuito aberto dos materiais varia sensivelmente com a injeção de aditivos no sistema, com comportamento oscilatório cujo período coincide com o regime de injeção, que

implica diminuição do caráter nobre das ligas, mas sem comprometer a estabilidade. A presença dos íons sulfato diminui a probabilidade da corrosão por pites favorecida pelos íons cloreto. A redução da adição do ácido sulfúrico no sistema afetará sua concentração, de forma que a concentração desses dois íons deve ser controlada, levando em consideração a proporção entre eles.

A corrosão galvânica não se mostrou relevante na interação entre os dois distintos materiais. Já a presença de frestas geradas pelo contato entre duas superfícies favoreceu a probabilidade de corrosão localizada, tornando essas regiões mais suscetíveis. A combinação das frestas e par galvânico (região de contato entre superfícies dos dois materiais) mostrou que o contato elétrico das ligas pode reduzir a estabilidade do sistema.

## 6.8 Referências

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15527: Água de chuva – Aproveitamento de coberturas em áreas urbanas para fins não potáveis*. Rio de Janeiro, 2007.

ÁGUAS PARANÁ – INSTITUTO DAS ÁGUAS DO PARANÁ. “Plano das Bacias do Alto Iguaçu e Afluentes do Alto Ribeira - *Relatório Executivo, Versão – 03. Abril/2014*. Curitiba, 2014.

ASANO, T.; BURTON, F.L.; LEVERENZ, H.L.; TSUCHIHASHI, R. TCHOBANOGLIOUS, G. *Water Reuse: Issues, Technologies, and Applications*. New York, 2007.

ASTEE – ASSOCIATION SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE POUR L’EAU ET L’ENVIRONNEMENT. *Guide Technique – Récupération et utilisation de l’eau de pluie: Informations et recommandations relatives à la réalisation de dispositifs utilisant les eaux issues de toitures et stockées in situ*. 2015.

ASTM INTERNATIONAL. *ASTM D4189-07: Standard Test Method for Silt Density Index (SDI) of Water*. West Conshohocken, PA, 2014.

\_\_\_\_\_. *ASTM D8002-15: Standard Test Method for Modified Fouling Index (MFI-0.45) of Water*. West Conshohocken, PA, 2015.

- \_\_\_\_\_. *ASTM G192-08: Standard Test Method for Determining the Crevice Repassivation Potential of Corrosion-Resistant Alloys Using a Potentiodynamic-Galvanostatic-Potentiostatic Technique*. West Conshohocken, 2014.
- BRASIL. CONAMA - Conselho Nacional de Meio Ambiente. *Resolução CONAMA n. 430*, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução n. 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 16 de maio de 2011.
- BYRNE, W. *Reverse Osmosis – A practical guide for industrial users*. Tall Oaks Publishing, Inc., 2nd edition, USA, 2002.
- DEDAVID, B.A.; GOMES, C.I.; MACHADO, G. *Microscopia eletrônica de varredura: aplicações e preparação de amostras – materiais poliméricos, metálicos e semicondutores [recurso eletrônico]*. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007.
- FIEMG/FEAM – FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DE MINAS GERAIS / FUNDAÇÃO ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE. *Cartilha de Aproveitamento de Água Pluvial: Conceitos e Informações Gerais*. 2016.
- IAP – INSTITUTO AMBIENTAL DO PARANÁ. *Qualidade das Águas: rios da Bacia do Alto Iguaçu, na região metropolitana de Curitiba, 2010 a 2018*. Curitiba: IAP, 2018. 76 p. Disponível em: <[http://www.iap.pr.gov.br/arquivos/File/Qualidade\\_das\\_aguas/Relatorio\\_Alto\\_Iguacu\\_2018.pdf](http://www.iap.pr.gov.br/arquivos/File/Qualidade_das_aguas/Relatorio_Alto_Iguacu_2018.pdf)>. Acesso em: 20 abr. 2020.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 10 mar. 2020.
- MA, F. *Corrosive Effects of Chlorides on Metals, Pitting Corrosion*. 1st. ed. InTech, 2012.
- MORORÓ, R. R. *Estudo de Novo Permeador para Biorreatores com Membranas (BRM) Visando ao Controle de Incrustações*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), COPPE/UF RJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2013.

NRC – NATIONAL RESEARCH COUNCIL. *Water Reuse: Potential for Expanding the Nation's Water Supply Through Reuse of Municipal Wastewater*. National Academies Press. Washington, 2012.

PESQUEIRA, C. M. *Influência da natureza do meio nas propriedades semicondutoras do filme passivo formado em aço inoxidável AISI 304 e sua relação com a corrosão localizada*. Dissertação (Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2018a.

PESQUEIRA, C. M.; ANDRADE, J.; MOTTA, H. N.; RUTHES, J. G. A.; CORTEZ, L. F. *Estudo Laboratorial e em Campo da Combinação dos Mecanismos de Corrosão Galvânica e por frestas* In: II Workshop de Corrosão para o Setor Elétrico, 2018b, Rio de Janeiro, RJ.

POHJANNE, P. *et al. Stainless Steel Pitting In Chloride sulfate Solutions - The Role Of Cations*. NACE International, p. 1–13, 2007.

PROMON Engenharia. *Estudo de Impacto Ambiental - UEG Araucária*. São Paulo, 1999.

SENEVIRATNE, M. *A practical approach to water conservation for commercial and industrial facilities*. Burlington, MA: Elsevier, 2007.

UNESCO, UN-Water. *The United Nations world water development report 2020: water and climate change*. Paris: UNESCO, 2020. 219 p.

WEHRLE DO BRASIL LTDA. *Biorreator de Membrana de Osmose Inversa - Planta Piloto*. Curitiba, 2015.





Esta é a primeira edição do livro elaborado como um dos produtos do projeto de Pesquisa e Desenvolvimento P&D ANEEL PD 0539-0004-2015 “Gestão de Água em Complexo de Geração Termelétrica”, executado pela Usina Elétrica a Gás de Araucária – UEGA e pelo Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – Lactec.

Neste livro encontram-se:

- Panorama do setor elétrico e termelétrico;
- Panorama da disponibilidade hídrica;
- Importância do reúso da água na gestão hídrica e tecnologias de reúso;
- Panorama da legislação sobre as diferentes formas de reúso de água;
- Estudo de caso: UEGA.

