

A photograph of a large industrial water treatment facility. The image shows a complex network of large, bright green pipes running through a facility with a high ceiling and concrete pillars. Yellow safety railings are visible along the pipes. In the background, there are various pieces of industrial equipment, including tanks and pumps, some with blue and pink components. The overall scene is a detailed view of a modern water purification plant.

oficina de textos

Dessalinização de águas

Ana Paula Pereira da Silveira
Ariovaldo Nuvolari

Francisco Tadeu Degasperi
Wladimir Firsoff

oficina de textos

Ana Paula Pereira da Silveira
Ariovaldo Nuvolari
Francisco Tadeu Degasperi
Wladimir Firsoff

Dessalinização de águas

Copyright © 2015 Oficina de Textos

Grafia atualizada conforme o Acordo Ortográfico da Língua Portuguesa de 1990, em vigor no Brasil desde 2009.

Conselho editorial Cylon Gonçalves da Silva; Doris C. C. K. Kowaltowski;
José Galizia Tundisi; Luis Enrique Sánchez; Paulo Helene;
Rozely Ferreira dos Santos; Teresa Gallotti Florenzano

Capa e projeto gráfico Malu Vallim

Diagramação Alexandre Babadobulos

Preparação de figuras Letícia Schneiater

Preparação de textos Hélio Hideki Iraha

Revisão de textos Mariana Góis

Impressão e acabamento Vida & Consciência gráfica editora

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

Dessalinização de águas / Ana Paula Pereira da Silveira...[et al.].
São Paulo : Oficina de Textos, 2015.

Outros autores: Ariovaldo Nuvolari, Francisco Tadeu Degasper, Wladimir Firsoff

Bibliografia

ISBN 978-5-7975-194-3

1. Água - Abastecimento 2. Água - Aspectos ambientais 3. Água - Aspectos sociais 4. Água - Brasil 5. Água - Conservação 6. Água - Estações de tratamento - Equipamento e acessórios 7. Conversão de água salina 8. Dessalinização da água I. Silveira, Ana Paula Pereira da. II. Nuvolari, Ariovaldo. III. Degasper, Francisco Tadeu. IV. Wladimir Firsoff.

15-05680

CDD-628.167

Índices para catálogo sistemático:

1. Dessalinização da água : Engenharia 628.167

O United States Bureau of Reclamation não é responsável por quaisquer imprecisões desta tradução.

Todos os direitos reservados à Editora **Oficina de Textos**

Rua Cubatão, 959

CEP 04013-043 São Paulo SP

tel. (11) 3085-7933 (11) 3083-0849

www.ofitexto.com.br atend@ofitexto.com.br

Agradecimentos

Os autores agradecem:

Primeiramente a Deus, por ter-lhes dado vida, saúde e relativa inteligência.

A compreensão de seus familiares.

Ao Departamento de Hidráulica e Saneamento e à Congregação da Fatec-SP e à Comissão Permanente de Regime de Jornada Integral, órgãos colegiados do Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza (Ceeteps), que aprovaram a ideia da criação do Grupo de Estudos e Pesquisas sobre Dessalinização de Águas Salobras e Salinas, o que possibilitou a elaboração deste trabalho.

Ao United States Bureau of Reclamation (USBR). Neste trabalho foi utilizado amplo material traduzido do *Desalting handbook for planners*, elaborado por essa instituição e cuja terceira edição foi publicada em 2003. O uso desse material foi autorizado com uma condição: de que fosse informado aos leitores que o USBR não se responsabiliza por quaisquer imprecisões na tradução.

Prefácio

O problema da escassez da água utilizada nas diversas atividades humanas, isto é, no abastecimento público e industrial e no uso agropecuário (irrigação de culturas agrícolas e dessedentação de animais), vem recrudescendo nas últimas décadas. A situação está se tornando cada vez mais crítica não só pelo aumento populacional, que exige uma produção crescente de água para suprir a demanda, mas também pelo alto nível de poluição dos corpos d'água, o que vem diminuindo a qualidade das águas brutas e exigindo cada vez mais técnicas avançadas e/ou produtos químicos para fazer o tratamento visando à obtenção de água adequada a cada uso.

Em várias regiões do planeta onde a disponibilidade hídrica é baixa, a situação já é tão crítica que a única solução viável, apesar de ser ainda considerada de alto custo, é a dessalinização de águas salobras ou salinas. Isso ocorre não somente nos países do Oriente Médio, mas também em algumas cidades da Austrália, Singapura, Argélia, Espanha, Israel, em diversas ilhas do mundo e em algumas regiões costeiras dos Estados Unidos, bem como no Brasil, lugares nos quais a dessalinização já é uma alternativa corriqueira e viável.

No Brasil, a Agência Nacional de Águas (ANA, 2012) apresentou as principais características de cada uma das cinco grandes regiões hidrográficas (RHs) litorâneas. Hoje, nessas regiões, vivem aproximadamente 87 milhões de pessoas (cerca de 45,6% da população total brasileira, que, segundo o censo realizado em 2010, mostrou ser de quase 191 milhões de pessoas). As cinco grandes RHs litorâneas abrangem as Regiões Metropolitanas de 11 capitais de Estado. Algumas delas já estão em condições críticas no que se refere à disponibilidade hídrica (escassez), o que leva a crer que haverá necessidade de dessalinizar a água do mar com a finalidade de complementar os volumes já obtidos por meio dos mananciais de água doce. Sabe-se também que muitas localidades situadas no Nordeste brasileiro, além da escassez hídrica, têm problemas com a qualidade das águas, que apresentam elevada concentração de sais e são, portanto, salobras, impróprias para consumo direto.

Por essas razões, considera-se oportuno discutir o tema da dessalinização, não muito abordado no nosso País. Um fator de extrema importância que não deve ser esquecido é que as plantas de dessalinização não estão sujeitas aos eventos críticos de estiagem como no caso dos mananciais de águas doces superficiais (vale lembrar os sérios problemas de abastecimento em São Paulo em 2014).

Assim, com o intuito de conhecer melhor as questões relacionadas com a dessalinização de águas foi criado, em 2011, no Departamento de Hidráulica e Saneamento da Fatec-SP, o Grupo de Estudos e Pesquisas sobre Dessalinização de Águas Salobras e Salinas. Foram elaboradas revisões de literatura, aqui apresentadas, e a montagem de um protótipo para o estudo da relação vácuo *versus* temperatura, com resultados publicados em congressos, nos boletins técnicos da Fatec-SP e, mais detalhadamente, na seção 8.10 deste livro. Apesar de os autores não se considerarem especialistas no assunto, pelo fato de não existir literatura em português sobre esse tema e por terem acumulado algumas informações consideradas relevantes resolveram torná-las públicas, apresentando-as de forma mais abrangente, por meio deste livro.

Lista de abreviaturas e siglas

AGB	Associação dos Geógrafos Brasileiros
AHA	Ácido haloacético
ANA	Agência Nacional de Águas
Aneel	Agência Nacional de Energia Elétrica
ASTM	American Society for Testing and Materials (órgão norte-americano de normalização)
BH	Bacia hidrográfica
Catalisa	Rede de Cooperação para a Sustentabilidade (Organização da Sociedade Civil de Interesse Público)
CBH	Comissão de Bacia Hidrográfica
CCC	California Coastal Commission
CERH	Conselho Estadual de Recursos Hídricos
COB	Carbono orgânico biodegradável
Compesa	Companhia Estadual de Água de Pernambuco
Conama	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COT	Carbono orgânico total
CT	Binômio concentração do oxidante x tempo de contato na inativação de patógenos
CTI	Capacidade de troca iônica
CVF	Controlador de variação de frequência
CWA	Clean Water Act (Lei da Água Limpa)
DCAV	Dessalinização por congelamento a vácuo (<i>vacuum freeze desalination</i> , VFD)
DCMV	Destilação por compressão mecânica do vapor
DCRS	Dessalinização por congelamento com refrigeração secundária (<i>secondary refrigerant freezing</i> , SRF)
DCV	Destilação por compressão de vapor
DEST_MEMB	Processo de dessalinização que combina destilação e membranas
DHPC	Disponibilidade hídrica <i>per capita</i>
DME	Destilação por múltiplo efeito
DQO	Demanda química de oxigênio
DTCV	Destilação por termocompressão do vapor
ED	Eletrodíálise
EDR	Eletrodíálise reversa
EIA	Estudo de Impacto Ambiental
Fatec-SP	Faculdade de Tecnologia de São Paulo
FC	Fator de concentração

GEP	Grupo de Estudos e Pesquisas
hab.	Habitantes
HDC	Harlingen Development Corporation
HP	<i>Horse-power</i>
HWWS	Harlingen Water Works System
IAA	Índice de agressividade da água
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDS	Índice de densidade do silte
IEA	International Energy Agency
IER	Índice de estabilidade de Ryznar
Inmet	Instituto Nacional de Meteorologia
ISD	Índice de Stiff e Davis
ISL	Índice de saturação de Langelier
ITA	Instituto Tecnológico de Aeronáutica
IWP	Projeto independente de água
KWES	Key World Energy Statistics, da IEA
MCPQ	Membranas em configuração de placa e quadros
MCT	Membranas em configuração tubular
MEE	Membranas enroladas em espiral
MEF	Destilação por multiestágio <i>flash</i>
MF	Microfiltração
MF	Membrana filtrante (método usado para a contagem de coliformes em 100 mL)
MFOF	Membranas de fibras ocas finas
MPa	Megapascal
ND	Informação não disponível
NF	Nanofiltração
NMP	Número mais provável (método usado para a contagem de coliformes em 100 mL). Observação: a legislação brasileira recomenda o uso de dez porções de 10 mL para obtenção do NMP. Caso não seja possível, admita-se o uso de cinco porções de 10 mL.
NPDES	National Pollutant Discharge Elimination System (Sistema Nacional de Eliminação de Descarga de Poluentes dos Estados Unidos)
NRC	National Research Council (Conselho Nacional de Pesquisa do Reino Unido)
NSF	National Sanitation Foundation
OMS	Organização Mundial da Saúde (World Health Organization, WHO)
ONU	Organização das Nações Unidas
OR	Osmose reversa
PERH	Plano Estadual de Recursos Hídricos
pH	Potencial hidrogeniônico
PLNP	Pressão líquida necessária para possibilitar a permeação
PRB	Population Reference Bureau
PVDF	Polivinilidenofluoreto
Q _{7,10}	Vazão mínima de sete dias consecutivos com tempo de recorrência de dez anos

R	Recuperação
RH	Região hidrográfica
RM	Região Metropolitana
RMSP	Região Metropolitana de São Paulo
Sabesp	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
SCP	Sistemas de controle programáveis
SDWA	Safe Drinking Water Act (lei norte-americana para água potável)
SPD	Subproduto da desinfecção (<i>desinfection by-product</i> , DBP)
SPE	Substância polimérica extracelular (<i>extracellular polymeric substance</i> , EPS)
SST	Sólidos suspensos totais
STD	Sólidos totais dissolvidos
SWFWMD	Southwest Florida Water Management District
TBW	Tampa Bay Water (concessionária de água da cidade de Tampa Bay, EUA)
THM	Tri-halometano
TMWDSC	The Metropolitan Water District of Southern California
TQ	Tanque
TRE	Turbina de recuperação de energia
UF	Ultrafiltração
UIC	Underground Injection Control
UNT	Unidade nefelométrica de turbidez
UNWCED	United Nations World Commission on Environment and Development
US\$	Dólar comercial norte-americano
USBR	United States Bureau of Reclamation
Usepa	United States Environmental Protection Agency
UV	Ultravioleta

Sumário

1	A água.....	13
1.1	Os desafios do abastecimento público de água	13
1.2	Conceito de desenvolvimento sustentável.....	18
1.3	Disponibilidade hídrica.....	20
1.4	Aspectos gerais sobre os processos de dessalinização	38
2	Processos de dessalinização	45
2.1	Arranjos esquemáticos dos processos de dessalinização	47
2.2	Fundamentos dos processos de destilação	49
2.3	Principais características dos processos de destilação.....	50
2.4	Processo de destilação por múltiplo efeito (DME)	55
2.5	Processo de destilação por multiestágio <i>flash</i> (MEF)	67
2.6	Destilação por compressão de vapor (DCV)	77
2.7	Processos de destilação comparados aos demais processos.....	82
2.8	Processos de eletrodialise e eletrodialise reversa (ED/EDR)	83
2.9	Dessalinização por OR e por NF.....	97
2.10	Outros processos de dessalinização	121
3	Química da água	128
3.1	Química básica da água.....	128
3.2	Ciclo da água e constituintes	128
3.3	Principais termos usados na Química	129
3.4	Compostos e fórmulas químicas	130
3.5	Constituintes da água	133
3.6	Medições em amostras de água.....	134
3.7	Tipos de água e de tratamento	137
3.8	Análises químicas da água	141
4	Pré-tratamento da água bruta	147
4.1	Processos de destilação.....	147
4.2	Pré-tratamento nos processos com a utilização de membranas.....	151
5	Pós-tratamento da água produzida.....	169
5.1	Estabilização	171
5.2	Estabilização pela mistura com outras águas.....	174

5.3	Remoção de gases dissolvidos	175
5.4	Desinfecção da água produzida	177
6	Considerações ambientais.....	183
6.1	Impactos ambientais e destinação final do concentrado salino	184
6.2	Impactos na captação de água bruta: colisão e arrastamento	192
6.3	Estudos de impacto ambiental no Brasil.....	193
7	Microbiologia sanitária na dessalinização	194
7.1	Fontes e sobrevivência de organismos patogênicos.....	194
7.2	Indicadores biológicos de qualidade de águas.....	196
7.3	Microbiologia nos processos de dessalinização	197
8	Uso do vácuo na destilação térmica	209
8.1	Objetivo.....	209
8.2	Escopo e objetivos da tecnologia do vácuo	210
8.3	Considerações para a modelagem e o cálculo de sistemas de vácuo	211
8.4	Necessidades do vácuo na indústria e na ciência.....	215
8.5	Aplicações do vácuo na indústria e na ciência	218
8.6	Circuitos de vácuo usados na destilação.....	223
8.7	Bombas, medidores de vácuo e componentes auxiliares	225
8.8	Escopo e objetivos da Termodinâmica e da transferência de calor	233
8.9	Definições e conceitos básicos da Termodinâmica	235
8.10	Pesquisa: destilação térmica com utilização de vácuo	236
8.11	Considerações finais.....	258
8.12	Bibliografia específica.....	258
9	Alguns relatos de casos.....	259
9.1	Dessalinização de água salobra utilizando OR	259
9.2	Dessalinização de água do mar utilizando OR	263
9.3	Recuperação de águas residuárias utilizando OR	265
9.4	Dessalinização de água do mar pelo processo de destilação MEF	268
9.5	Dessalinização de água de irrigação utilizando OR	274
9.6	Dessalinização de água do mar utilizando OR	277
9.7	Considerações finais a respeito das usinas de dessalinização.....	278
	Referências bibliográficas	282
	Sobre os autores	287

1 | A água

1.1 OS DESAFIOS DO ABASTECIMENTO PÚBLICO DE ÁGUA

De maneira geral, com um simples olhar para o passado pode-se constatar que, ao longo dos séculos, a Humanidade utilizou e gerenciou os recursos naturais de maneira no mínimo irresponsável.

Em sua história o homem adotou diferentes posturas, políticas de crescimento e tecnologias pouco comprometidas com a conservação do meio ambiente (Capra, 1991), o que ocorreu e ainda ocorre por vários motivos, entre os quais:

- falta de conhecimento e de comprometimento de grande parte da população, em geral mais preocupada com a sua própria sobrevivência;
- falta de sensibilidade da área governamental aliada, às vezes, à ausência de recursos, o que impede uma fiscalização mais rigorosa para o cumprimento das leis; e principalmente
- extrema ganância de grande parte dos empresários, preocupados apenas com os lucros a serem obtidos em suas atividades.

A água, um dos recursos de maior importância para a vida no planeta, também vem sofrendo as consequências dessa irresponsabilidade ao longo dos tempos. Segundo Rebouças (2006, p. VII), o vocábulo *água*

tem muitos significados. Para o ambientalista significa vida para a flora e fauna aquáticas. Para a religião tem o poder de purificar a alma. Para empreendedores de vários setores usuários, é um recurso de grande utilidade que pode: servir de meio de transporte e diluição de efluentes, produzir alimentos, gerar energia, abastecer populações e indústrias. Certamente cada cidadão comum tem sua visão particular acerca desse importante recurso natural.

construção de espaços públicos comunitários, maior autonomia dos governos locais e descentralização da gestão de recursos;

- *sustentabilidade ambiental* – abarca todas as dimensões anteriores por meio de processos complexos. Conservação geográfica, equilíbrio de ecossistemas, erradicação da pobreza e da exclusão, respeito aos direitos humanos e integração social.

Considerando que em várias regiões do planeta a dessalinização de águas salobras e salinas é uma alternativa viável e, em várias outras, a única viável, resta saber quais tecnologias poderiam ser consideradas sustentáveis em se tratando de dessalinização.

O que salta aos olhos é que os locais onde a dessalinização é necessária estão quase sempre localizados em regiões quentes e secas, nas quais, muitas vezes, o vento perene se faz presente. Assim, alternativas que levem em conta a utilização das energias solar e eólica, além de sistemas mais sustentáveis para a obtenção de vácuo, podem ser listadas como itens a serem pesquisados. É nessa linha de pensamento que se insere a proposta do Grupo de Estudos e Pesquisas (GEP) sobre Dessalinização de Águas Salobras e Salinas da Fatec-SP. Sem descartar o conhecimento das tecnologias atuais, buscou-se estudar soluções alternativas e sustentáveis para a obtenção de água potável de águas salobras e salinas.

1.3 DISPONIBILIDADE HÍDRICA

A Agência Nacional de Águas (ANA, 2012) define *vazão natural de uma bacia hidrográfica* (BH) como aquela originada sem qualquer interferência humana. Essas interferências seriam, por exemplo, os diversos usos consuntivos (que consomem água) e as eventuais derivações, transposições, regularizações, importações e exportações de água. Portanto, a chamada vazão natural nem sempre ocorre nas BHs em decorrência das atividades antrópicas (ações humanas), que alteram as condições de uso e ocupação do solo e afetam diretamente o escoamento superficial, em especial quando se consideram as barragens com os seus reservatórios de regularização.

Por esse motivo, a vazão natural média não é o parâmetro mais adequado para representar a disponibilidade hídrica, uma vez que a descarga dos rios tem caráter sazonal e exhibe variabilidade plurianual. Os períodos críticos de estiagem, em termos de disponibilidade hídrica, devem ser ava-

em condições supercríticas, ou seja, ostentava a pior situação entre todas as 22 BHs do Estado de São Paulo, com uma relação demanda/disponibilidade de 415%, de acordo com os dados da Tab. 1.5. É bom lembrar que a relação demanda/disponibilidade aqui referida é a vazão $Q_{7,10}$, estimada para o Alto Tietê em apenas 20 m³/s. Assim, para suprir a demanda, já são importados, por meio do Sistema Cantareira, cerca de 26 m³/s da bacia do rio Piracicaba.

TAB. 1.5 Estimativa de demanda de água na RMSP para 2004

Água de abastecimento	Água industrial	Água de irrigação	Demanda total
68,50 m ³ /s	10,93 m ³ /s	3,59 m ³ /s	83,02 m ³ /s
5,92 milhões de m ³ /dia	0,94 milhão de m ³ /dia	0,31 milhão de m ³ /dia	7,17 milhões de m ³ /dia
2,16 bilhões de m ³ /ano	0,34 bilhão de m ³ /ano	0,11 bilhão de m ³ /ano	2,61 bilhões de m ³ /ano

Fonte: adaptado de CERH-SP (2006).

Disponibilidade hídrica nas BHs litorâneas

Apresenta-se a seguir a transcrição de um trecho de ANA (2012) em que é mostrada uma visão geral das cinco RHs litorâneas. Algumas delas em breve terão que buscar alternativas, entre as quais a dessalinização de águas salinas e/ou salobras, para suprir as demandas necessárias aos diversos usos. A Fig. 1.1 mostra essas cinco RHs litorâneas.

Região hidrográfica Atlântico Nordeste Ocidental

A RH Atlântico Nordeste Ocidental, identificada na Fig. 1.1 com o número 1, engloba uma área de 274.301 km², cerca de 3% da área do Brasil, que totaliza 8.511.965 km², e abrange o Estado do Maranhão e pequena parcela do Pará. A região circunscreve as sub-bacias dos rios Gurupi, Munim, Mearim e Itapecuru, sendo as desses dois últimos as que possuem maiores áreas.

A população total da região, segundo dados referentes a 2010 do IBGE (2011), é de aproximadamente 6,2 milhões de habitantes, dos quais 61% vivem em áreas urbanas. Sua densidade demográfica média é de 22,8 hab./km².

Na RH Atlântico Nordeste Ocidental, a precipitação média anual é de 1.700 mm, valor bastante próximo da média do País, que é de 1.761 mm. A região apresenta ainda, de acordo com dados levantados até dezembro

água, enquanto uma DHPC menor que 500 m³/hab.ano configura uma situação de escassez de água.

TAB. 1.6 Resumo geral das principais características das cinco RHs litorâneas brasileiras

Região hidrográfica	Abrangência (Estados)	Área (km ²)	População (hab.)	QREG (m ³ /s)	DHPC anual (m ³ /hab.ano)
1 Atlântico Nordeste Ocidental	Maranhão e pequena parcela do Pará	274.301	6.200.000	320,4	1.630
2 Atlântico Nordeste Oriental	Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco e Alagoas	286.802	24.100.000	91,5	120
3 Atlântico Leste	Bahia, Minas Gerais, Sergipe e Espírito Santo	388.160	15.100.000	305,0	637
4 Atlântico Sudeste	Minas Gerais, Espírito Santo, Rio de Janeiro, São Paulo e Paraná	214.629	28.200.000	1.109	1.240
5 Atlântico Sul	São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul	187.552	13.400.000	647,4	1.524
Total		1.351.444	87.000.000	-	-

Observação:

Q_{REG} = vazão regularizada (leva em conta a influência dos reservatórios existentes).

Fonte: adaptado de ANA (2012).

A RH do Atlântico Sudeste, apesar de a DHPC estar hoje ainda acima de 1.000 m³/hab.ano, pode se tornar problemática ao longo das próximas décadas em função de seu alto crescimento demográfico e do alto nível de população flutuante decorrente do turismo.

1.4 ASPECTOS GERAIS SOBRE OS PROCESSOS DE DESSALINIZAÇÃO

1.4.1 Breve histórico

O ato de coletar o vapor oriundo de águas salgadas, resfriá-lo e usá-lo para saciar a sede é provavelmente tão antigo quanto a Humanidade. É também um fenômeno natural que faz parte do ciclo hidrológico, uma vez que a água doce presente no planeta, em seu maior percentual, tem origem na evapora-

2 | Processos de dessalinização

Salvo indicação expressa, os itens referentes aos processos usuais de dessalinização aqui apresentados foram adaptados de USBR (2003).

Hoje, em nível comercial e em se tratando de tecnologias utilizadas nas grandes usinas de dessalinização, existem basicamente duas grandes vertentes: processos de destilação térmica e processos que utilizam membranas, sendo estes últimos cada vez mais utilizados.

Deve-se ressaltar que, independentemente do processo de dessalinização adotado, o objetivo é sempre reduzir a quantidade de substâncias dissolvidas na água bruta para torná-la utilizável. Sabe-se que a água salobra, assim como a água do mar, apresenta sabor bastante desagradável (muito salgado) e pode trazer problemas de saúde, não podendo, em circunstâncias normais, ser ingerida ou utilizada para fins domésticos, como lavar e cozinhar. No entanto, se o teor de sais é reduzido, a água resultante passa a ser adequada para tais usos.

Sabe-se ainda que todas as águas naturais contêm substâncias dissolvidas, como cloreto de sódio, bicarbonato de cálcio e sulfato de magnésio, entre outras. A água desprovida de substâncias dissolvidas também apresenta sabor desagradável (insosso). Assim, na água destinada ao abastecimento público deve sempre haver um equilíbrio entre esses dois extremos. A Tab. 2.1 mostra a palatabilidade da água, em função da concentração de sólidos totais nela dissolvidos, recomendada pela Organização Mundial da Saúde (OMS).

Na Tab. 2.2 é apresentada a classificação da água, em função da concentração de sólidos totais dissolvidos, estabelecida pelo National Research Council (Conselho Nacional de Pesquisa do Reino Unido) (NRC, 2004 apud FWR, 2011).

2.1 ARRANJOS ESQUEMÁTICOS DOS PROCESSOS DE DESSALINIZAÇÃO

Serão abordadas as duas principais tecnologias de dessalinização aplicadas no mundo em grande escala, a destilação térmica e a dessalinização por membranas, além de outros processos menos utilizados. Os esquemas gerais dos processos de dessalinização com água provida de fontes superficiais e subterrâneas são apresentados, respectivamente, nas Figs. 2.1 e 2.2.

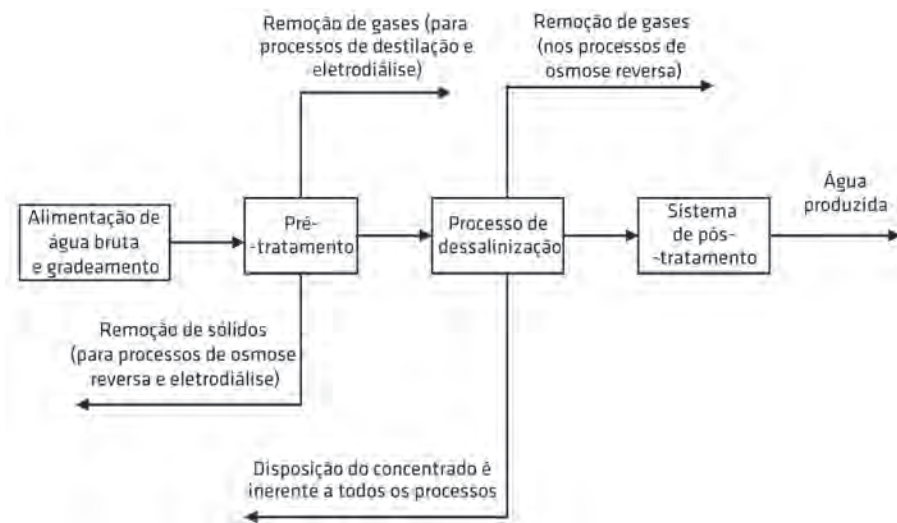


FIG. 2.1 Arranjo geral esquemático da dessalinização para fontes de água bruta superficiais

Fonte: adaptado de USBR (2003).

Na Fig. 2.1, a água bruta passa primeiramente por um sistema de gradeamento para remover detritos, sendo então posteriormente bombeada para um pré-tratamento, onde é adequadamente preparada para o processo de dessalinização. O pré-tratamento inerente aos processos de destilação envolve a remoção de gases como o dióxido de carbono (CO_2), se utilizado ácido no pré-tratamento da água de alimentação, e de areia.

O pré-tratamento para o processo OR precisa ser muito mais rigoroso, exigindo a remoção de partículas em suspensão, como matéria coloidal. Esse tipo de remoção requer o uso de ácidos e coagulantes para permitir a utilização de processos de filtração comum e/ou filtração direta em membranas de microfiltração (MF) ou de ultrafiltração (UF). A retrolavagem de filtros resulta na necessidade de fazer a disposição final de sólidos, como ilustra a Fig. 2.2.

O concentrado de cada uma dessas fases pode ser direcionado para a fase imediatamente inferior ou ser retirado em pontos específicos do processo. O destilado, ou água produzida, é obtido da condensação do vapor em cada fase e do condensador principal.

2.4.2 Configurações de projeto para processos DME

Existem três tipos de arranjo para processos DME, que se baseiam principalmente no tipo de arranjo dos tubos trocadores de calor: conjunto de tubos horizontais, conjunto de tubos verticais e feixes de tubos empilhados verticalmente. Cada um desses tipos é descrito nas subseções a seguir.

Arranjo com tubos horizontais

Nesse arranjo, os feixes de tubos são dispostos horizontalmente no vaso, como é mostrado na Fig. 2.6. Seu princípio de funcionamento é o seguinte: as superfícies externas da tubulação estão aquecidas porque dentro dela circula vapor; a água de alimentação é pulverizada sobre a superfície externa dos tubos, sendo parcialmente vaporizada; o vapor gerado em cada fase é direcionado para produzir o efeito de pressão imediatamente posterior (reator da fase seguinte).

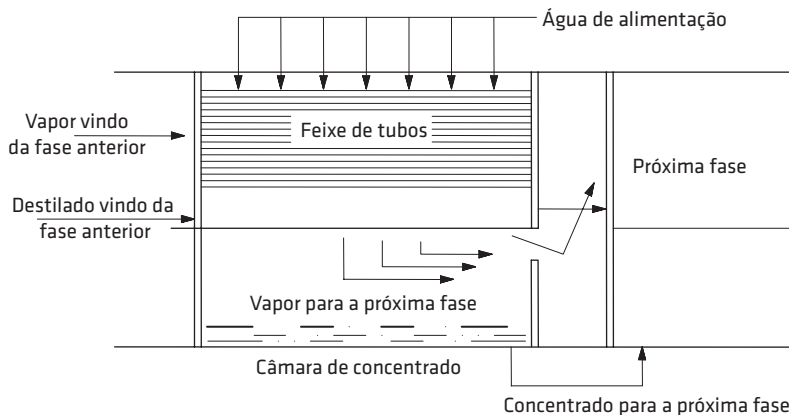


FIG. 2.6 Arranjo parcial da DME com tubos horizontais
Fonte: USBR (2003).

O processo esquemático completo da DME é apresentado na Fig. 2.7. A água de alimentação entra no condensador principal, que pode ser do tipo concha e tubo convencional, como descrito, ou ser concebido conforme o efeito desejado no projeto. A maior parte do fluxo de água de alimentação é usada para resfria-

2.5.1 Princípio de operação do processo MEF

Nesse processo, a água de alimentação é aquecida com pressão suficiente para impedir a sua ebulição, até atingir o primeiro reator, onde é liberada, ocorrendo o primeiro *flash* (ou evaporação súbita). Esse *flash* de parte da água de alimentação vai ocorrendo em cada estágio sucessivo, pois a pressão em cada reator sequencial é cada vez menor.

Diferentemente do processo DME, o MEF gera e condensa o vapor em cada estágio e apresenta, portanto, uma vantagem sobre o primeiro, que é a recuperação de calor. Isso ocorre porque a água de alimentação ganha calor ao passar pelo trocador de calor na parte superior da câmara de *flash*, ao mesmo tempo que condensa o vapor destilado.

Existem duas seções distintas em cada fase: a câmara de *flash* (onde os vapores são produzidos) e a seção de condensação (onde os vapores são condensados). A quantidade de água que evapora é proporcional à diferença de temperatura entre os estágios. Assim, quanto maior a diferença de temperatura, maior a quantidade de vapor gerado. À medida que a água evapora, a temperatura do concentrado diminui, até entrar em equilíbrio termodinâmico com a pressão nessa fase. Ao mesmo tempo, conforme o vapor é gerado, aumenta a concentração de sólidos no concentrado.

A seção de condensação contém o tubo trocador de calor, onde o vapor é condensado pela água de resfriamento que vem do mar (ver Fig. 2.15).

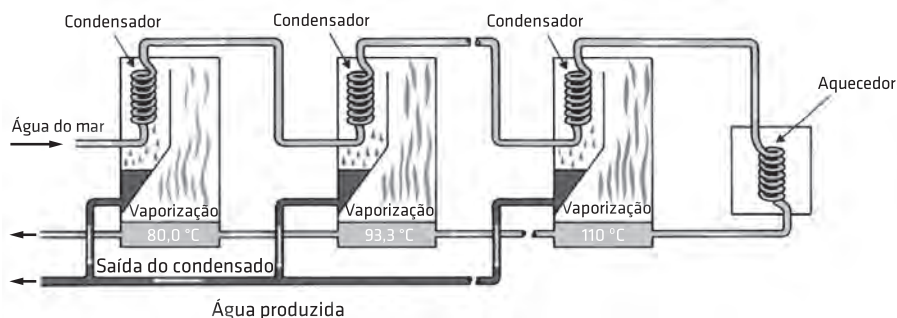


FIG. 2.15 Arranjo típico do processo de destilação MEF

Fonte: adaptado de USBR (2003).

O processo de destilação MEF começa logo que a água de alimentação entra na tubulação de recuperação de calor. À medida que a água passa em cada estágio, vai ganhando temperatura, ao trocar calor, provocando a condensação dos vapores gerados em cada reator.

inoxidável. O vaso de pressão padrão pode conter de um a oito elementos com comprimento de 40 polegadas ($\approx 1,00$ m).

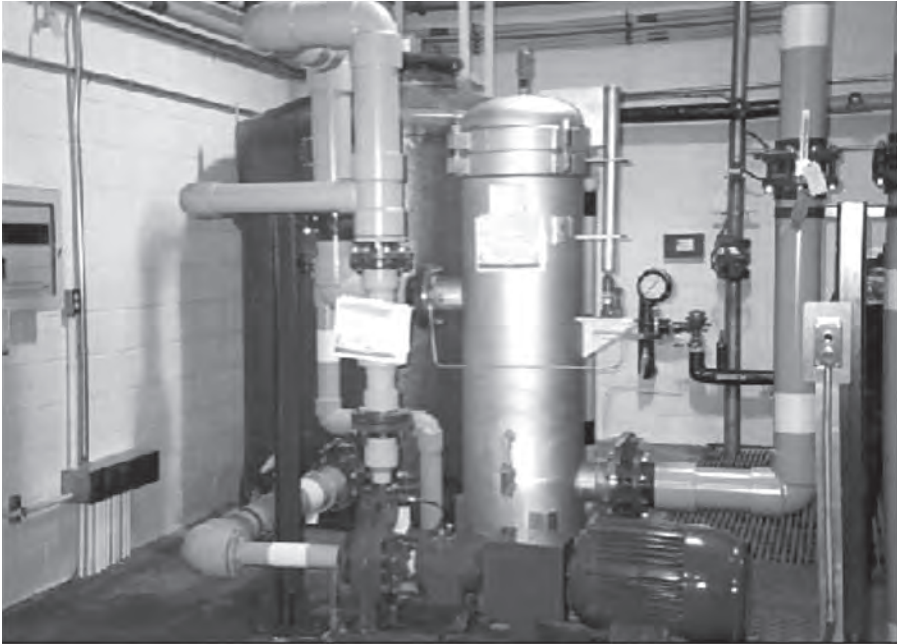


FIG. 2.40 Sistema de filtração final instalado na usina de dessalinização de Hatteras Norte, no condado de Dare, na Carolina do Norte (EUA)

Fonte: USBR (2003).

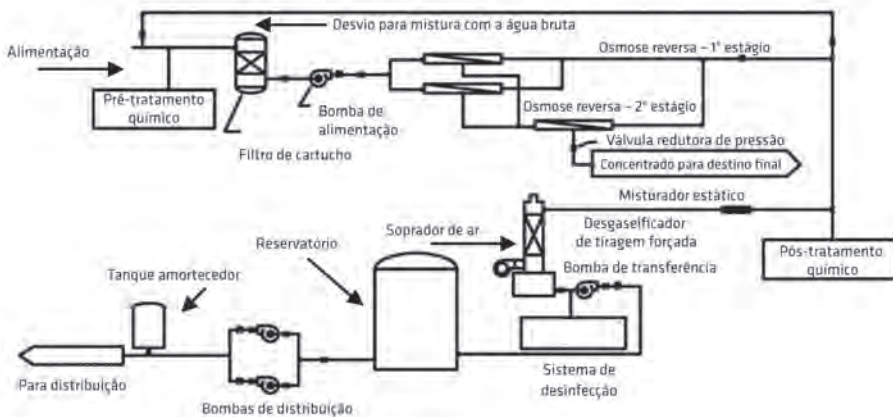


FIG. 2.41 Diagrama simplificado do processo de dessalinização por OR

Fonte: USBR (2003).

3 | Química da água

Considerou-se importante incluir neste livro um tópico sobre a química da água, em especial nos aspectos referentes às águas salobras e salinas, para que os leitores pudessem entender melhor os fenômenos que ocorrem nos processos de dessalinização, principalmente a corrosão, a incrustação e outros fenômenos de obstrução das membranas. Salvo indicação expressa, o texto foi totalmente traduzido de USBR (2003).

3.1 QUÍMICA BÁSICA DA ÁGUA

O conhecimento da química da água é necessário para:

- interpretar análises químicas das águas salinas;
- compreender as reações químicas associadas aos processos de dessalinização;
- lembrar alguns conceitos fundamentais da Química geral a serem discutidos em conjunto com a Química específica. A Química geral, a química da água e a Eletroquímica fornecem a base para as discussões sobre os tipos de água e tratamento e, principalmente, os vários processos de dessalinização e pré-tratamento a serem vistos mais adiante.

3.2 CICLO DA ÁGUA E CONSTITUINTES

Os depósitos de água da Terra estão constantemente em movimento. A água ora é removida dos corpos d'água e das plantas por evapotranspiração, ora é reposta por meio das precipitações, na forma de chuva, neve, granizo ou orvalho, num circuito fechado denominado ciclo hidrológico. Por exemplo, sabe-se que diariamente, somente nos Estados Unidos, cerca de 15 bilhões de metros cúbicos de água caem sobre a superfície por meio desses fenômenos. Desse

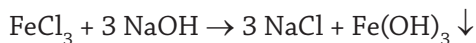
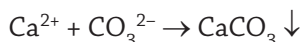
- sulfato de magnésio (MgSO_4);
- cloreto de cálcio (CaCl_2);
- sulfato de cálcio (CaSO_4).

3.5 CONSTITUINTES DA ÁGUA

A água é também chamada de solvente universal. Em graus variados, ela dissolve os gases, como o oxigênio (O_2) e o dióxido de carbono (CO_2), os compostos inorgânicos e alguns compostos orgânicos, como a glicose e o ácido tânico.

O parâmetro denominado STD, normalmente expresso em mg/L, é a soma de todos os constituintes dissolvidos na água, sejam orgânicos, sejam inorgânicos. A água pode manter em suspensão alguns materiais insolúveis finamente divididos, chamados de sólidos em suspensão, e tanto esses sólidos em suspensão como os sólidos dissolvidos podem ser classificados como constituintes da água. Os sólidos suspensos totais (SST), expressos em mg/L, são a soma de todos os sólidos, exceto os dissolvidos, presentes numa amostra de água. Vale dizer que os sólidos presentes numa água podem conferir a ela propriedades bastante diferentes da água pura característica (H_2O).

Alguns sais, como o NaCl , são bastante solúveis na água, enquanto outros, como o CaCO_3 , são solúveis até certo limite. Quando o limite de solubilidade é excedido, o composto precipita. Algumas equações que expressam o fenômeno da precipitação de sais são descritas a seguir, e o símbolo $\downarrow$ representa um sal ou um sólido que precipita ou sedimenta:



O Quadro 3.1 apresenta uma lista de elementos que ocorrem frequentemente nas águas naturais, assim como o símbolo de cada elemento, seu peso atômico aproximado e sua carga iônica usual. Em média, os principais componentes de uma análise de água incluem apenas um número limitado desses elementos ou de suas combinações.

Os principais componentes que normalmente constituem a quase totalidade dos STD presentes na água estão listados no Quadro 3.2.

QUADRO 3.4 Classificação das águas naturais em função da concentração de STD

Concentração de STD (mg/L)	Classificação
< 1.000	Águas doces
de 1.000 a 5.000	Águas ligeiramente salobras
5.001 a 15.000	Águas moderadamente salobras
15.001 a 35.000	Águas fortemente salobras
> 35.000	Águas marinhas

Com base nos padrões da United States Environmental Protection Agency (Usepa), para ser considerada potável uma água deve possuir uma concentração de STD que não exceda 500 mg/L. No entanto, uma concentração de até 1.000 mg/L pode ser considerada aceitável. No Brasil, a Resolução Conama nº 357 (Conama, 2005) adota a seguinte classificação:

- *água doce*: apresenta salinidade igual ou inferior a 0,05% ou $\approx$ 500 mg/L;
- *água salobra*: apresenta salinidade superior a 0,05% e inferior a 3,0% ou entre 500 mg/L e 30.000 mg/L;
- *água salina*: apresenta salinidade igual ou superior a 3,0% ou acima de 30.000 mg/L.

3.7.2 Água doce

Na maioria dos casos, se uma fonte de água doce está disponível, o tratamento para produzir água potável para distribuição à população é relativamente barato. Em algumas regiões, o simples ajuste do pH e a desinfecção podem ser as únicas ações necessárias. Em outras regiões, no entanto, esse recurso pode ser de má qualidade, exigindo tratamentos mais sofisticados. Nesses casos, uma fonte de água salobra pode ser utilizada de forma mais confiável e com menor custo.

3.7.3 Água salobra

Comparado com a dessalinização da água do mar, o tratamento da água salobra é muito mais dependente das condições locais. Águas interiores superficiais e subterrâneas apresentam variações na concentração de STD e em sua própria composição. Espécies iônicas individuais podem variar significativamente mesmo dentro de uma única região de exploração.

Essa variação é particularmente importante no caso das águas subterrâneas, uma vez que as águas superficiais são constantemente renovadas. São necessárias análises cuidadosas e precisas, de preferência enquanto

3.8 ANÁLISES QUÍMICAS DA ÁGUA

Uma análise química típica da água coletada no poço 1 de Dalpra (EUA), que tem sido bastante usada para a avaliação do processo de dessalinização por membrana daquela usina, mostra que essa água contém os constituintes listados na Tab. 3.2 e as características apresentadas a seguir.

TAB. 3.2 Concentração dos constituintes da água coletada no poço 1 de Dalpra (EUA)

Constituinte	Símbolo	Concentração (mg/L)
Cálcio	Ca	107
Magnésio	Mg	65
Sódio	Na	936
Potássio	K	11
Carbonato	CO ₃	0
Bicarbonato	HCO ₃	470
Sulfato	SO ₄	1.958
Cloreto	Cl	135
Total:		3.682

Outras características da água coletada são:

- condutividade específica a 25 °C = 4.420 $\mu\text{S}/\text{cm}$;
- pH = 7,7;
- STD por secagem a 105 °C = 3.512 mg/L;
- estrôncio = 3,35 mg/L;
- ferro = 0,23 mg/L;
- manganês = 0,08 mg/L.

Pode-se obter a concentração de STD pela soma das concentrações dos íons individuais. Ressalte-se que no cálculo dos STD a concentração deve ser expressa como íons, e não como CaCO₃. Nesse exemplo, a concentração de STD é de 3.682 mg/L.

A concentração de STD pode também ser usualmente obtida por secagem da amostra a 105 °C. Nesse exemplo, o valor obtido por esse método de análise foi de 3.489 mg/L. Como se pode perceber, a concentração de STD obtida por secagem da amostra a 105 °C resulta num valor menor, devido à decomposição térmica parcial do bicarbonato. Essa diferença é estimada, por vezes, assumindo que mais ou menos metade do bicarbonato é perdida por decomposição térmica. A Tab. 3.3 apresenta os resultados da análise de três diferentes águas salobras, ilustrando outro método de apresentar os resultados.

4 Pré-tratamento da água bruta

É sempre necessário promover algum tipo de pré-tratamento para a água de alimentação de uma estação de dessalinização. Isso impede que as substâncias normalmente presentes na água bruta acarretem perdas de desempenho ou redução na quantidade de água produzida durante a operação normal da estação. Este capítulo foi totalmente baseado em USBR (2003).

Cada tecnologia de dessalinização apresenta suas próprias exigências em relação à qualidade da água de alimentação.

Nos processos de dessalinização por destilação, as maiores preocupações são:

- incrustações na superfície dos tubos trocadores de calor;
- corrosão dos componentes da planta;
- erosão por partículas sólidas em suspensão, especialmente a areia;
- efeitos específicos de outros constituintes.

Nos processos de membranas, as preocupações principais são:

- *fouling* e/ou incrustações nas membranas;
- obstrução por sólidos suspensos;
- crescimento de micro-organismos nas membranas (*biofouling*);
- degradação da membrana por oxidação ou outros meios.

4.1 PROCESSOS DE DESTILAÇÃO

4.1.1 Incrustações nos processos de destilação

Nos processos de destilação, a presença de sulfato de cálcio (CaSO_4), de hidróxido de magnésio [$\text{Mg}(\text{OH})_2$] e de carbonato de cálcio (CaCO_3) na água de alimentação pode causar incrustações na

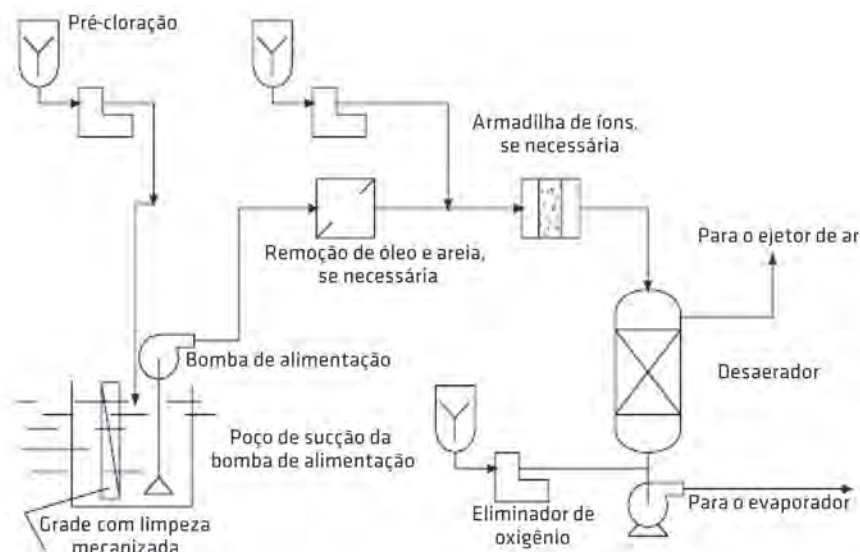


FIG. 4.1 Pré-tratamento da água de alimentação com o uso de polifosfato, para $T \leq 90^\circ\text{C}$
 Fonte: USBR (2003).

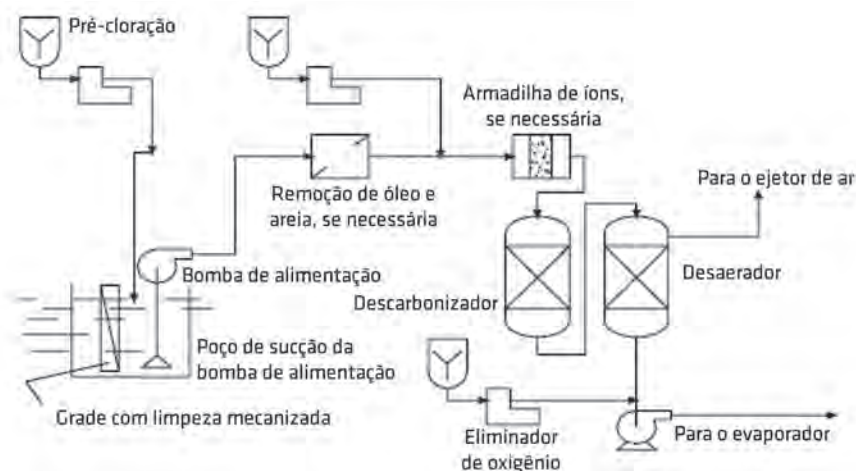


FIG. 4.2 Pré-tratamento da água de alimentação com o uso de ácidos, para $T = 110^\circ\text{C}$
 Fonte: USBR (2003).

4.2 PRÉ-TRATAMENTO NOS PROCESSOS COM A UTILIZAÇÃO DE MEMBRANAS

Fouling, um termo técnico muito utilizado na língua inglesa e que significa basicamente incrustação, é o resultado do acúmulo de materiais não desejados em superfícies sólidas, telas, membranas etc. em detrimento de

tivamente, 2,0 mg/L e 0,5 mg/L. Maiores concentrações podem causar problemas de coprecipitação com outros constituintes, como a sílica. Isso é particularmente importante para sistemas de abastecimento, porque as concentrações de ferro e de manganês são limitadas também pelos padrões secundários de água potável.

Para sistemas EDR, a concentração de ferro deve ser limitada a 0,3 mg/L, e a de manganês, a 0,1 mg/L. Da mesma forma, níveis elevados de ferro podem também influenciar a efetividade dos inibidores de incrustações, possivelmente conduzindo a uma prematura precipitação dos compostos responsáveis pelas incrustações.

Ao se conceber uma usina de dessalinização por membranas, a água de alimentação deve ser mantida anaeróbia, de modo que o ferro e o manganês permaneçam no estado solúvel divalente em vez de no estado oxidado insolúvel e trivalente. Essa recomendação não considera outras influências ou outros aspectos de projeto.

4.2.3 Crescimento microbiano nas membranas (*biofouling*)

A incrustação causada pelo desenvolvimento de colônias de micro-organismos nas membranas (*biofouling*) é uma grande preocupação, uma vez que resulta na redução do fluxo de permeado e num apreciável incremento da pressão hidráulica no espaço destinado à passagem do concentrado de alimentação. Embora a formação de biofilme seja geralmente precursora da bioincrustação, a presença de biofilme na superfície da membrana pode acontecer sem necessariamente existir uma bioincrustação detectável (Costerterton et al., 1985 apud USBR, 2003).

Mesmo quando a água de alimentação é salobra, oriunda de poços, portanto mais limpa, pode ocorrer a bioincrustação.

Nos primeiros tempos do desenvolvimento das membranas OR, aquelas de acetato de celulose eram susceptíveis ao ataque de uma grande variedade de bactérias. Esses ataques provocavam o aparecimento de furos nas membranas, que eram percebidos pelo rápido aumento do fluxo de permeado e pela consequente passagem de sais. No entanto, o sintoma mais típico era a perda de fluxo de permeado devido à bioincrustação, ao longo de vários dias ou mesmo semanas, que resultava em alteração na passagem de sais e aumento significativo nos requisitos de energia. A desinfecção com cloro pode ser utilizada para controlar a bioincrustação nas situações em que esse produto, utilizado em pequenas doses, não venha a prejudicar o material das membranas.

QUADRO 4.1 Principais ocorrências no processo de formação do biofilme nas membranas (continuação)

Observações:

⁽¹⁾ Refere-se ao tempo após a membrana ter sido colocada em operação.

⁽²⁾ *Extracellular polymeric substance* (substância polimérica extracelular, SPE) são enzimas secretadas pelos micro-organismos e lançadas para fora da célula que têm a função de facilitar a digestão da matéria orgânica, quebrando, por exemplo, as proteínas em aminoácidos e/ou transformando outras substâncias mais complexas em substâncias solúveis ou mais facilmente assimiláveis.

⁽³⁾ Senescência é o processo natural de envelhecimento no nível celular ou o conjunto de fenômenos associados a ele. Trata-se de um processo metabólico ativo que provoca o envelhecimento. As células que entram em processo de senescência perdem a capacidade proliferativa após um determinado número de divisões celulares e, na sequência, ocorre a morte e o consequente rompimento da estrutura celular.

Fonte: USBR (2003).

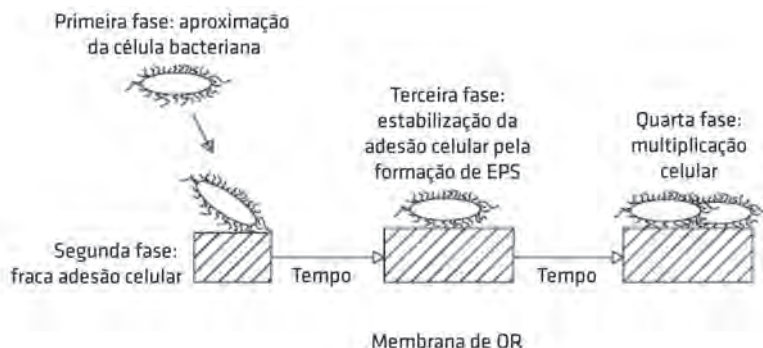


FIG. 4.4 Adesão da célula bacteriana à superfície da membrana

Fonte: Rostec Assoc. Inc. (apud USBR, 2003).

4.2.4 Influência dos sólidos suspensos nos processos de membranas

Nos projetos corretamente elaborados, embora não seja preocupante a questão de sólidos suspensos nas águas de alimentação oriundas de fontes subterrâneas, eles devem ser considerados no tratamento de águas vindas de fontes superficiais ou mesmo se é feita a recuperação de águas residuárias.

Os sólidos em suspensão presentes na água de alimentação podem ser tanto materiais inorgânicos, como argilas e óxidos metálicos insolúveis, quanto substâncias orgânicas coloidais, causadoras de cor na água.

5 Pós-tratamento da água produzida

A água produzida nos processos de dessalinização requer pós-tratamento, cuja finalidade é prepará-la para o uso a que se destina, seja qual for: abastecimento público, usos não potáveis e/ou industriais etc. As práticas de pós-tratamento visam normalmente o atendimento às leis e/ou normas de conformidades regulatórias. Independentemente de qualquer outro tratamento necessário, a desinfecção e a manutenção de certo percentual de cloro residual no sistema de distribuição de água são sempre necessárias para todos os sistemas de abastecimento público.

Nos Estados Unidos, cada Estado é obrigado a cumprir os requisitos federais mínimos do Safe Drinking Water Act (SDWA), de 1974, reavaliado e alterado em 1996. Alguns Estados adotaram normas próprias específicas mais rigorosas, como a Flórida, por exemplo, em que há um limite primário para o sódio de 160 mg/L, tendo esse Estado também reforçado como primários quase todos os padrões federais secundários.

No Brasil são atualmente adotados, para a água potável distribuída à população, os padrões estabelecidos na Portaria nº. 2.914 (Ministério da Saúde, 2011), que define, além dos padrões-limites, as responsabilidades de cada órgão de saúde em nível federal, estadual e municipal. Por exemplo, para o sódio é estabelecido o limite de 200 mg/L.

Nos Estados Unidos, as normas aplicáveis à qualidade da água foram publicadas no Federal Register e incluem:

- normas para o tratamento de água oriunda de mananciais superficiais;
- normas para a presença de chumbo e de cobre;
- normas para subprodutos da desinfecção.

As concentrações de minerais (sólidos dissolvidos na água produzida) a partir de processos de dessalinização são consideradas

calcário como pós-tratamento térmico, particularmente no Oriente Médio. A vantagem é que tanto a dureza do cálcio quanto a alcalinidade são transmitidas à água ao mesmo tempo.

5.1.1 Estabilização por adição de produtos químicos

A quantidade de produtos químicos a ser adicionada pode ser determinada pela fórmula de reação química, visando o aumento da alcalinidade e da dureza total e a redução do gás carbônico.

Essas informações estão resumidas na Tab. 5.1 e, como se pode nela observar, nem todos os produtos químicos vão aumentar a alcalinidade e a dureza. Por exemplo, a soda cáustica aumenta a alcalinidade, mas não a dureza. Assim, o produto químico a ser utilizado vai depender da qualidade da água a ser tratada. Em outras palavras, se o grau de dureza da água já é adequado, podem ser utilizados tanto o bicarbonato quanto a soda cáustica ou o carbonato de sódio. No entanto, se a dureza precisa ser aumentada, deve ser utilizada uma substância que contenha cálcio, como a cal virgem ou a cal hidratada. Em alguns casos, a cal deve ser utilizada em conjunto com produtos químicos que contenham sódio, ou outros.

TAB. 5.1 Efeito da adição de alguns produtos químicos na dureza e na alcalinidade da água produzida

Adição de 1 mg/L do produto	Incremento da alcalinidade (mg/L CaCO ₃)	Decréscimo do CO ₂ livre (mg/L)	Incremento de dureza total (mg/L CaCO ₃)
Soda cáustica (98,06%)	1,23	1,08	Sem efeito
Bicarbonato de sódio (100%)	0,60	Sem efeito	Sem efeito
Carbonato de sódio (99,16%)	0,94	0,41	Sem efeito
Cal virgem (90%)	1,61	0,41	1,61
Cal hidratada (93%)	1,26	1,11	1,26

Fonte: USBR (2003).

5.1.2 Considerações sobre corrosão

Índices de corrosão são utilizados para avaliar a agressividade de uma fonte de água. Existem muitos fatores que contribuem para a corrosão, incluindo:

- temperatura;
- teor de oxigênio dissolvido;
- pH;

minar a quantidade de mistura que pode ser feita. Antes deve ser executada uma análise criteriosa da água de cada fonte em potencial, a fim de realizar o balanço de massa. A Fig. 5.1 mostra o diagrama de balanço de massa.

Se a dureza total é menor do que o padrão para tratamento de água, que é de 40 mg/L, deve ser adicionado cálcio à água produzida, o que pode ser feito por adição de cal virgem, cal hidratada, cloreto de cálcio, dolomita ou outros minerais similares que contenham cálcio solúvel.

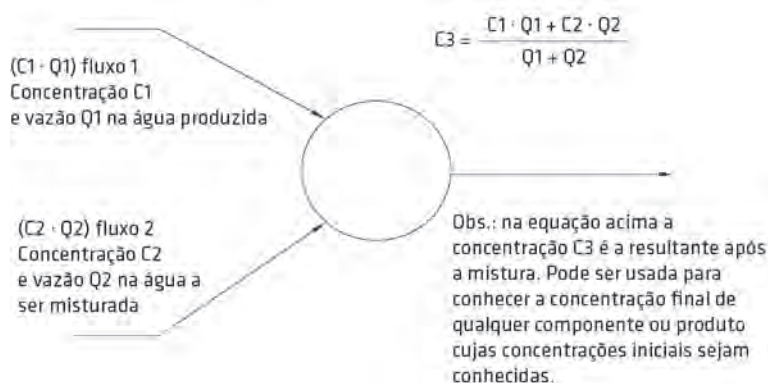


FIG. 5.1 Balanço de massa na mistura de águas para estabilização
Fonte: adaptado de USBR (2003).

5.3 REMOÇÃO DE GASES DISSOLVIDOS

A água produzida nas estações de dessalinização por EDR pode conter dióxido de carbono (CO_2). Nas estações por OR, a água produzida pode conter, além de CO_2 , sulfeto de hidrogênio, também conhecido como gás sulfídrico (H_2S). Nas plantas EDR, o H_2S precisa ser removido no pré-tratamento e, portanto, não deverá ocorrer na água produzida.

A mistura para estabilização da concentração de STD pode ser feita com água de poço não tratada e normalmente ocorre antes da remoção de gases, de modo que o equipamento de extração deve ser dimensionado para a somatória dessas vazões em vez de apenas para a vazão de água produzida.

A remoção do H_2S geralmente não é feita como pós-tratamento nos processos de destilação ou de EDR. Em ambos os casos, esse gás deve ser removido durante o pré-tratamento.

Já a remoção do CO_2 , que pode estar contida, por vezes, em elevadas concentrações em águas naturais, é realizada normalmente no pós-tratamento.

- a taxa máxima de carregamento de líquido é geralmente fixada em aproximadamente $1,2 \text{ m}^3/\text{m}^2$;
- vazão de ar;
- tipo de material de enchimento;
- espaço adequado acima e abaixo do material de enchimento para distribuição eficiente do líquido;
- espaço adequado acima do enchimento para distribuição eficiente do líquido;
- seleção adequada do material a ser utilizado.

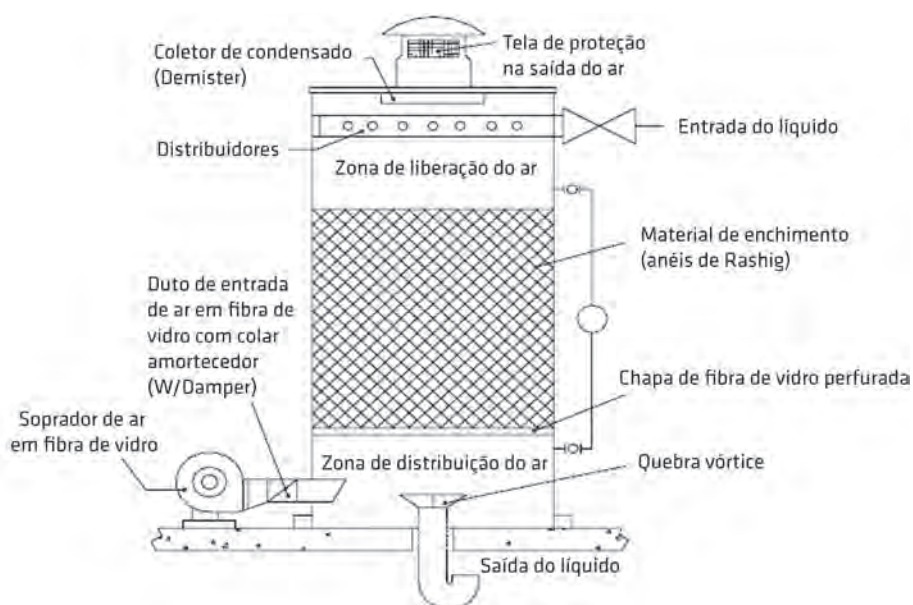


FIG. 5.2 Seção transversal típica de uma torre de enchimento com ar forçado

Fonte: USBR (2003).

5.4 DESINFECÇÃO DA ÁGUA PRODUZIDA

A água produzida nos processos de dessalinização é geralmente livre de vírus e organismos patogênicos, entre outros. No entanto, esses sistemas devem ser projetados para fornecer algum tipo de desinfecção do fluxo de produto para que se possa:

- garantir uma desinfecção residual nos sistemas de distribuição;
- impedir a entrada de contaminantes no sistema de distribuição devido a algum tipo de falha nas membranas.

assim produzidas, 1 mg/L de cloro injetado deverá resultar em 1 mg/L de cloro residual livre, ou seja, o cloro não reagirá com nenhuma substância e, portanto, não será consumido. Nos processos EDR, pode ser necessário um estudo sobre a demanda de cloro para cumprir as exigências quanto à presença de substâncias orgânicas naturais.

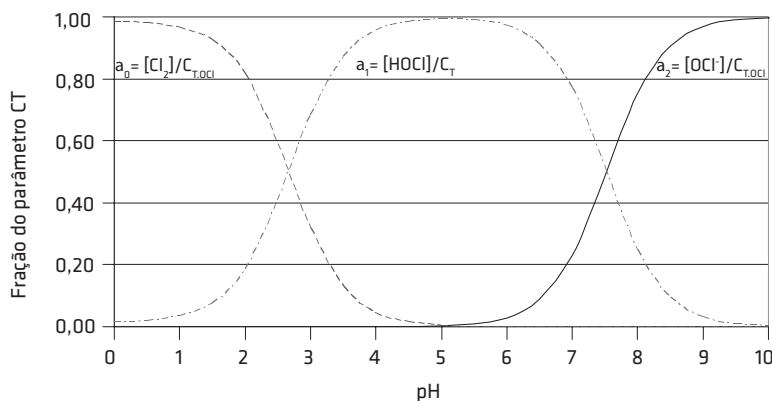


FIG. 5.3 Diagrama de equilíbrio do HOCl e do OCl⁻ em função do pH
Fonte: USBR (2003).

Para garantir o tempo de contato adequado, após a adição do cloro primário, conforme definido pela EPA para fontes de águas superficiais, um volume mínimo de armazenamento deve ser providenciado. Normalmente, o tanque de armazenamento de água final tem volume suficiente, a menos que sejam utilizadas cloraminas na desinfecção.

Desinfecção com cloro líquido: hipocloritos de sódio ou de cálcio

A utilização do chamado cloro líquido tornou-se cada vez mais generalizada em razão de os requisitos de segurança associados ao uso de cloro gasoso tornarem-se cada vez mais rigorosos.

O cloro líquido é geralmente empregado nos serviços públicos de abastecimento de água como solução de hipoclorito de sódio. Em alguns casos, a utilização do hipoclorito de cálcio é benéfica, uma vez que se trata de uma fonte de dureza de cálcio.

O hipoclorito de sódio pode ser produzido no próprio local, com o uso de uma solução de cloreto de sódio como matéria-prima, numa célula eletrolítica. A solução de hipoclorito resultante apresenta uma concentração da ordem de 0,8% em peso.

Alvejantes comerciais podem ser obtidos em grande quantidade, com concentrações mais fortes (cerca de 11% a 15%), porém devem ter armazenamento adequado, além de ser necessário observar a vida útil da solução. O hipoclorito de cálcio é geralmente adquirido na forma sólida e dissolvido no ponto de aplicação.

A Fig. 5.4 mostra as opções para a adição de desinfetante em plantas de dessalinização típicas.

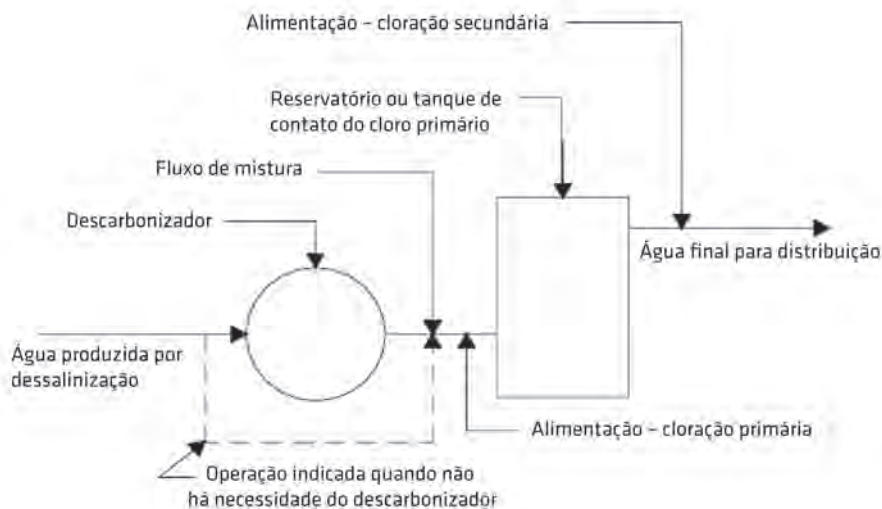


FIG. 5.4 Diagrama esquemático da adição de cloro
Fonte: USBR (2003).

Nos produtos comerciais, cerca de 70% do hipoclorito está disponível como cloro. Pode-se estimar que haja cerca de 120 g de cloro por litro de solução. Sistemas-padrão de alimentação de produtos químicos, muito semelhantes aos utilizados para ácidos e inibidores de incrustação, podem ser usados em plantas de dessalinização.

Desinfecção com cloraminas

As cloraminas, formadas a partir de reações entre cloro e amônia nas proporções corretas, não reagem com nenhuma substância orgânica natural presente na água. Esse esquema de tratamento pode ser utilizado onde se quer evitar a produção de THMs na água potável.

Em muitas aplicações, portanto, a desinfecção com cloraminas pode oferecer uma solução mais rentável quando se quer evitar a formação de THMs.

6 | Considerações ambientais

Este capítulo, em sua maior parte, salvo onde expressamente indicado, foi baseado em USBR (2003) e tem como objetivo relatar as preocupações ambientais relacionadas aos projetos de dessalinização.

A dessalinização, como qualquer outro grande processo industrial, causa impactos ambientais que devem ser compreendidos e mitigados. Esses impactos incluem efeitos associados à construção da usina e, em especial, à sua operação de longo prazo, incluindo os efeitos da retirada de grandes volumes de água salobra de um aquífero ou de água do mar, bem como a descarga de grandes volumes de água salgada altamente concentrada (concentrado salino). Alguns impactos indiretos associados ao consumo substancial de energia devem também ser considerados. Cada usina de dessalinização deve ser individualmente avaliada com relação à sua localização, ao seu projeto e às condições ambientais locais. Além disso, é necessário ressaltar e descrever, ainda que de forma abreviada, certas considerações de projeto e de operação que podem reduzir impactos ambientais associados à dessalinização (Cooley; Gleick; Wolff, 2006).

Para estabelecer uma relação entre a dessalinização e o meio ambiente, cada etapa do processo de dessalinização deve ser estudada e avaliada. Toda entrada e toda saída de um processo de dessalinização resultarão num efeito positivo ou negativo sobre o ambiente, e com as medidas apropriadas os efeitos adversos podem ser minimizados, e os efeitos positivos, ampliados ou multiplicados. Com base em estudos recentes pode-se concluir que a dessalinização e o meio ambiente não precisam competir entre si, mas estabelecer uma relação de benefícios mútuos (Tsiourtis, 2001).

Durante os estudos preliminares para a seleção do processo de dessalinização, os planejadores devem levar em conta as exigências impostas pelas peculiaridades ou autoridades locais no que con-

cerne ao meio ambiente. Essas exigências incluem controle das emissões de gases para a atmosfera, concentração dos efluentes, níveis de ruído, riscos durante o transporte e o manuseio de produtos químicos, segurança pública nas fases de construção e operação, possíveis odores e impacto sobre o meio físico e biótico (Tsiourtis, 2001).

Seguindo o estudo de seleção do local, o estudo de impacto ambiental (EIA) deve ser realizado para os locais mais promissores. Esse estudo deve considerar todos os parâmetros e critérios ambientais, avaliar o impacto do projeto sobre o meio ambiente terrestre e aquático e propor medidas para mitigar esses possíveis impactos (Tsiourtis, 2001). Os procedimentos básicos para a execução de um EIA para projetos de dessalinização são descritos no final deste capítulo.

Todos os processos de dessalinização geram dois fluxos principais, um de água produzida (de baixa salinidade) e outro de concentrado (salmoura, de alta salinidade). A disposição final do concentrado é a questão ambiental mais significativa em uma instalação de dessalinização. A composição do concentrado varia muito em função do processo de dessalinização utilizado, portanto, o impacto ambiental da disposição final do concentrado também varia muito.

6.1 IMPACTOS AMBIENTAIS E DESTINAÇÃO FINAL DO CONCENTRADO SALINO

A indústria da dessalinização apresenta um longo histórico de operações ambientalmente seguras. No entanto, em algumas partes do mundo, particularmente nos Estados Unidos, a regulamentação para o descarte do concentrado pode ser um fator importante para esse segmento de produção de água de abastecimento. Nos últimos anos, muitos artigos foram publicados sobre os impactos ambientais globais das usinas de dessalinização. Além disso, a Sociedade Europeia de Dessalinização patrocina uma conferência bianual denominada Conferência Europeia sobre Dessalinização e Meio Ambiente, cujo enfoque é principalmente o efeito causado pela destinação final do concentrado ao meio ambiente.

- A qualidade da água do fluxo de concentrado depende:
- da qualidade da água de alimentação;
- dos produtos químicos utilizados no pré-tratamento, como polímeros, ácidos, cloro, inibidores de corrosão e removedores de cloro;

regulamentadas pela Usepa e também por agências de Estado, na maioria dos casos, e avaliadas com base na localização específica, pois sua viabilidade é altamente dependente da geologia regional. A licença do NPDES é suficiente para permitir a injeção em poços profundos, embora o Under-ground Injection Control (UIC) e as agências estatais possam exigir uma análise adicional desse licenciamento.

Um exemplo de estação de dessalinização e remoção de dureza que opera por OR e faz a disposição em poços profundos do concentrado gerado é a estação do Condado de North Collier, na Flórida (EUA), que opera desde 1993. Essa estação processa água subterrânea salobra com valores de STD de 600 mg/L e tem capacidade projetada de 75.700 m³/dia de água potável. Poços de monitoramento asseguram o cumprimento das exigências desse sistema de eliminação de concentrado.

Aplicação do concentrado em solos agrícolas

A aplicação do concentrado em solos agrícolas, assim como sua descarga em águas superficiais, pode afetar tanto os recursos hídricos superficiais quanto as águas subterrâneas. A irrigação por aspersão pode ser utilizada se existir a necessidade de irrigação dos solos agrícolas próximos à estação de dessalinização e se os STD presentes no concentrado forem aceitáveis para o crescimento da cultura agrícola. A mistura do concentrado com outras águas residuárias de menor salinidade pode ser necessária. Esse método de disposição não é praticado com muita frequência.

Lagoas de evaporação/usinas de processamento de sal

As lagoas de evaporação necessitam de extensas áreas e, portanto, são aplicáveis apenas onde o valor das terras é baixo, sendo apropriadas para pequenas instalações de dessalinização localizadas em climas áridos, como as situadas no sudoeste dos Estados Unidos. São de construção simples, apresentam baixo custo de manutenção e geralmente precisam ser revestidas com mantas impermeáveis, cujo custo, somado ao da terra, constitui o maior valor de investimento a ser considerado. Essas lagoas não necessitam de licenças do NPDES ou do UIC, desde que o responsável forneça provas conclusivas de que nenhum vazamento ocorrerá. Normalmente, os proprietários de lagoas de evaporação preferem obter uma licença do NPDES em vez de tentar provar que não ocorrerão vazamentos no seu sistema.

7.1 FONTES E SOBREVIVÊNCIA DE ORGANISMOS PATOGENICOS

As doenças causadas por micro-organismos constituem riscos graves para a saúde da população, sendo seus agentes os vírus, bactérias, cistos e parasitas. A hepatite A, cujos sintomas mais comuns são inflamação do fígado, fraqueza, perda de apetite, náuseas, febre e icterícia, possui um vírus causador muito pequeno e que pode ser transmitido a partir de água contaminada por esgoto. Os vírus causadores de gastroenterites epidêmicas também podem ser encontrados na água contaminada.

Por sua vez, protozoários como, por exemplo, *Giardia lamblia* podem ser localizados em águas de abastecimento público quando a fonte de água está contaminada por esgoto e/ou dejetos de origem animal ou quando os poços foram mal construídos ou indevidamente vedados e podem causar giardíase, uma infecção gastrointestinal que provoca diarreia, cólicas abdominais e flatulência. Já outros micro-organismos persistem, por exemplo, como cistos de *Entamoeba histolytica*, que são resistentes a desinfetantes e podem sobreviver por semanas ou meses em um ambiente úmido, sendo os portadores assintomáticos desses cistos uma importante fonte de infecção.

Os parasitas são a causa mais frequentemente identificada de doenças de veiculação hídrica. Nos Estados Unidos, um surto de *Cryptosporidium parvum*, que é o protozoário parasita causador da criptosporidiose, cujos sintomas nos seres humanos incluem diarreia, dor de cabeça, cólicas abdominais, náuseas, vômitos e febre baixa (Haneya, 2012), afetou quase meio milhão de pessoas e foi responsável por uma centena de mortes.

A sobrevivência de agentes patogênicos no ambiente tem sido extensivamente estudada. Alguns organismos patogênicos são capazes

- *Clostridium perfringens*;
- colifagos;
- fagos de *Bacteroides fragilis*;
- vírus entéricos.

7.2.1 Critérios para a escolha de organismos indicadores

Os micro-organismos indicadores não são necessariamente patogênicos, mas possuem a mesma origem fecal dos organismos patogênicos e, portanto, podem indicar a contaminação fecal de água. O organismo indicador deve atender a vários critérios, que são, segundo Haneya (2012):

- 1] o organismo deve ser um indicador de contaminação fecal;
- 2] deve fazer parte da flora intestinal normal de pessoas saudáveis;
- 3] deve habitar exclusivamente o *habitat* intestinal;
- 4] deve ser encontrado apenas em humanos e estar presente quando os patógenos fecais estiverem presentes;
- 5] deve estar presente em número maior do que o agente patogênico que se quer indicar;
- 6] deve ser incapaz de crescer fora do intestino, com uma taxa de mortalidade ligeiramente menor do que a do organismo patogênico, e ser fácil de isolar, identificar e enumerar.

A concentração dos organismos indicadores deve estar relacionada à extensão da contaminação, à concentração dos agentes patogênicos e à incidência da doença na água. Não existe uma correlação absoluta entre os números do organismo indicador e a presença ou a quantidade real dos agentes patogênicos entéricos. A descoberta de um organismo indicador em uma água devidamente tratada indica a presença de material de origem fecal e, portanto, é o principal meio pelo qual a qualidade sanitária da água é determinada (Haneya, 2012).

7.3 MICROBIOLOGIA NOS PROCESSOS DE DESSALINIZAÇÃO

O grupo coliforme é um dos mais importantes parâmetros usados para a determinação de qualidade de água potável, sendo utilizado como indicador de outros micro-organismos potencialmente nocivos à saúde humana (Haneya, 2012).

A presença de bactérias do grupo coliforme em águas potáveis indica a ausência de práticas sanitárias na operação do sistema. Essa ocorrência é

A incrustação nas membranas é a acumulação progressiva de material sobre a superfície da membrana ou nos seus poros. A bioincrustação ocorre quando micro-organismos se acumulam e/ou crescem na superfície da membrana, o que resulta na diminuição prematura do fluxo através da membrana e/ou provoca a queda de pressão. De acordo com Flemming et al. (1997), praticamente todos os sistemas de membrana que operam com água salina suportam relativamente bem os biofilmes, mas quase todos contam com problemas operacionais por causa da formação de biofilme em excesso. Foram relatados problemas de incrustação em 58 das 70 usinas de dessalinização que operam com OR nos Estados Unidos (Paul, 1991).

7.3.4 Matéria orgânica e crescimento bacteriano na água dessalinizada

A água dessalinizada contém geralmente concentrações baixas ou muito baixas de COT e concentrações também muito baixas de carbono orgânico biodegradável (COB), que podem ser parcial ou quase completamente removidos por OR. A NF e a OR parecem ser os processos mais eficazes disponíveis hoje para a remoção de COB.

Laurent et al. (2005) fornecem um resumo das remoções de COT e COB por OR. Mesmo que a OR possua um excelente potencial para a remoção completa do COB, as remoções por membranas OR em escala real documentadas são raras. Não foi quantificado diretamente o impacto do COB sobre o potencial para a criação e o posterior desenvolvimento de patógenos oportunistas nos biofilmes fixos em membranas OR.

No entanto, há algumas informações disponíveis sobre a colonização e a sobrevivência de patógenos em meios filtrantes, em carvão ativado e em superfícies de tubos. No geral, as indicações são de que os patógenos não parasitários não são competitivos no estabelecimento e no desenvolvimento de biofilmes heterotróficos, com exceção notável da *Legionella*. A presença de contaminantes microbianos em água tratada por OR estaria principalmente relacionada às operações posteriores, e não à multiplicação/colonização no próprio sistema. Além disso, a ocorrência desses contaminantes no sistema de distribuição também pode decorrer da entrada de água contaminada (Ainsworth, 2004).

A passagem de agentes patogênicos bacterianos do biofilme ou da água pré-tratada depende da disponibilidade dos orifícios nas membranas e da integridade dos anéis de vedação. Esses problemas não são diferentes das

questões gerais de integridade da membrana que devem ser abordadas para impedir a passagem de patógenos no líquido a granel. A sobrevivência de algumas bactérias foi pesquisada no processo de tratamento por OR e também no transporte ao longo do sistema de distribuição. Espécies identificadas incluem bactérias encapsuladas, como *Novosphingobium capsulatum* (MacAree et al., 2005).

7.3.5 Processos térmicos de dessalinização

Quando são utilizados processos térmicos para a dessalinização, a inativação microbiana é controlada pela temperatura alcançada aliada ao tempo que a água permanece nessa temperatura. As temperaturas típicas para garantir a inativação das células vegetativas por calor úmido variam de 50 °C a 60 °C, e, quando essas células são mantidas a essas temperaturas por 5 a 30 minutos, alcançam a pasteurização. Esporos endósporos são mais resistentes ao calor e necessitam de temperaturas mais elevadas (70 °C a 100 °C), que devem ser mantidas por longos períodos de tempo. Patógenos mais vegetativos são inativados em condições de pasteurização *flash* (temperatura de 72 °C durante 15 segundos). É improvável que o condensado contenha agentes patogênicos devido ao processo de destilação pelo calor e pelo arraste mecânico. No entanto, pressões reduzidas são usadas em alguns processos de dessalinização para reduzir o ponto de ebulição e a demanda de energia. Temperaturas baixas como 50 °C podem ser utilizadas (USBR, 2003), mas nesse caso é possível que não se atinjam as metas de inativação necessárias. Nos processos de destilação térmica, de modo geral, a inativação de patogênicos é considerada satisfatória, já que há uma semelhança de temperatura e tempo de contato com os processos de pasteurização (WHO, 2007).

7.3.6 Desinfecção de águas dessalinizadas

A desinfecção de águas dessalinizadas é um processo relativamente fácil devido ao baixo teor de COT e de partículas, à baixa carga microbiana e à demanda química de oxigênio (DQO) mínima após a dessalinização. A turbidez não representa problema no desempenho da desinfecção química, já que os valores de turbidez da água dessalinizada são relativamente baixos. Alguns tipos de pós-tratamento podem causar um aumento de turbidez inorgânica que não interfere na desinfecção. Os padrões necessários para a inativação de agentes patogênicos em águas dessalinizadas podem ser facil-

8 | Uso do vácuo na destilação térmica

8.1 OBJETIVO

Pretende-se apresentar neste capítulo, de forma abreviada, os conceitos básicos envolvidos na dessalinização de águas salobras e salinas por meio de destilação térmica com utilização de vácuo, incluindo os resultados de uma pesquisa laboratorial. Para ser possível transitar no assunto, cuja base físico-química está no processo de destilação, é necessário um conhecimento básico do transporte de gases e vapores em baixa pressão e da termodinâmica envolvida referente ao transporte de gás, vapor e calor.

Certamente são assuntos que exigem estudos mais detalhados e aprofundados que escapam aos objetivos deste capítulo, de modo que serão apresentados apenas os princípios básicos que possam tornar a atividade de pesquisa da dessalinização de águas salobras e salinas mais consistente em suas bases teóricas. Inicia-se com a tecnologia do vácuo, com a apresentação dos conceitos referentes ao transporte dos gases e vapores. Serão também apresentados circuitos de vácuo que podem ser usados, além das bombas de vácuo e dos medidores de vácuo que podem ser utilizados nesse tipo de trabalho.

Alguns conceitos e definições referentes à termodinâmica envolvida nesse tipo de trabalho serão descritos, além de conceitos importantes relativos ao transporte de calor que estão envolvidos no processo de destilação assistida a vácuo. Na seção 8.10 são apresentados os principais resultados e conclusões de uma pesquisa realizada em laboratório. Considerando que os temas tratados são extensos e exigem um bom tempo de assimilação e entendimento, ao final do capítulo foi incluída uma listagem com literatura específica para os que desejarem se aprofundar no assunto.

superfícies em geral, fenômenos relacionados à adesão, atrito, emissão de elétrons e alteração de reatividade das superfícies, técnicas de caracterização, entre outros.

As aplicações citadas nesta seção mostram que a atuação da tecnologia do vácuo na indústria e na ciência é abrangente. Constata-se que o número de novas aplicações está sempre em constante crescimento e que o desenvolvimento experimental de algumas áreas da ciência está intimamente ligado ao desenvolvimento de novas técnicas e instrumentação na área da tecnologia do vácuo. Em contrapartida, desenvolvimentos que ocorrem em várias áreas da ciência e da tecnologia em geral influenciam muito o desenvolvimento da tecnologia do vácuo, uma vez que novas soluções devem ser criadas, e outras, aprimoradas. Com esta seção, procurou-se dar uma visão geral do alcance e da necessidade da tecnologia do vácuo, ajudando o pesquisador a ter um melhor posicionamento com relação a essa importante e atuante tecnologia.

8.6 CIRCUITOS DE VÁCUO USADOS NA DESTILAÇÃO

Nesta seção, são apresentados três circuitos de vácuo passíveis de utilização na destilação para fazer a dessalinização de águas salobras e salinas. Como primeiro circuito de vácuo, tem-se o mostrado na Fig. 8.3, em que está representada uma bomba mecânica de palhetas que pode ser tanto de estágio simples (também chamada de um estágio) como de estágio duplo (também chamada de dois estágios).

A Fig. 8.3 mostra também a câmara de vácuo com sensores (medidores) de vácuo e temperatura. Há a conexão da linha de bombeamento com válvulas, fole metálico (trecho de tubulação flexível em metal), anteparo resfriado para reter o vapor de água do processo de destilação com o filtro de exaustão. Cabe mencionar que a bomba mecânica de palhetas, ao exaurir os gases e vapores por ela bombeados, exaure também vapor de óleo (a bomba precisa de óleo de lubrificação para seu funcionamento).

Na Fig. 8.4 é apresentado o esquema de um circuito de vácuo usando bomba de anel líquido, a qual opera com água em seu interior. Essa bomba, muito robusta e de fácil operação e manutenção, é o equipamento de vácuo mais utilizado nos processos de secagem em plantas industriais, como nas áreas farmacêutica e petroquímica. Para possíveis plantas de dessalinização de águas de grande porte, as bombas de vácuo do tipo anel líquido são fortes candidatas a serem consideradas. Aspectos referentes à troca de

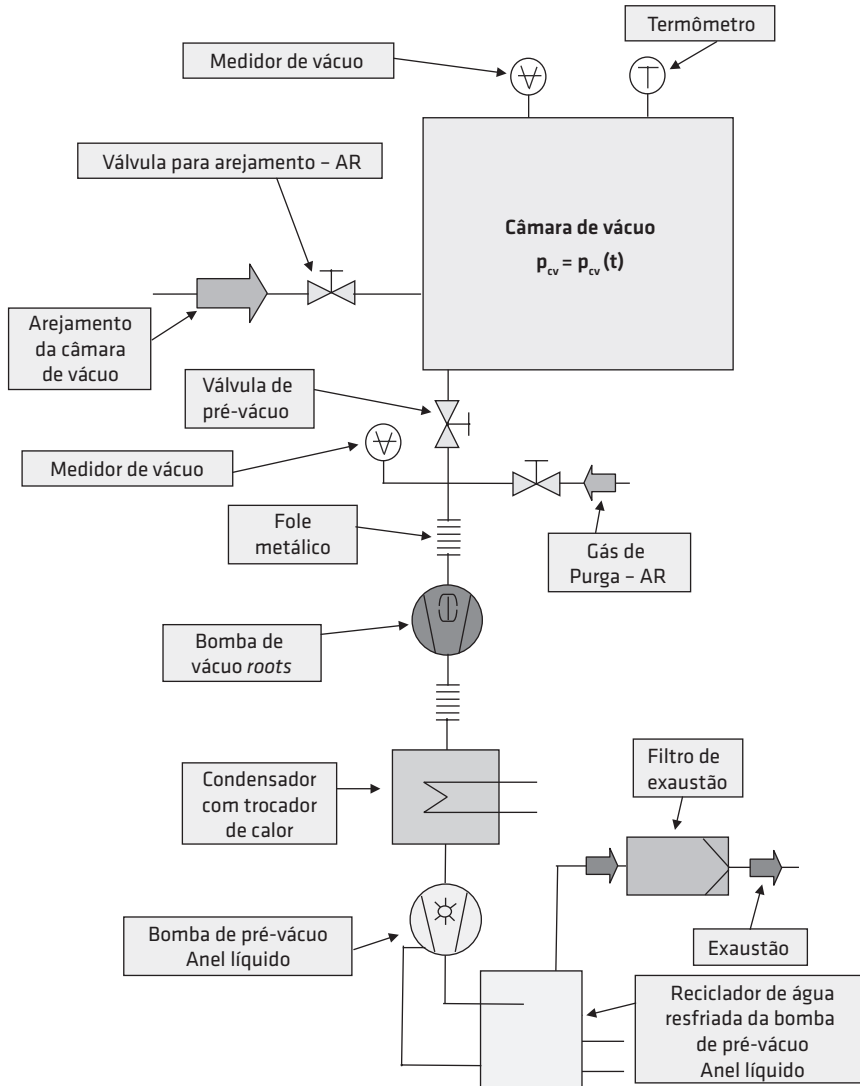


FIG. 8.5 Esquema de circuito de vácuo com bombas roots e de anel líquido

8.7.1 Bomba mecânica de palhetas

É um dos tipos de bomba de vácuo mais importantes que existem e está entre os mais utilizados. O princípio de funcionamento é bastante simples, sendo o mesmo daquele da bomba de vácuo baseada em um pistão movimentando-se em um êmbolo. A Fig. 8.6 mostra a câmara de vácuo conectada à bomba de vácuo de êmbolo por meio da válvula à esquerda, sendo a saída (exaustão) da bomba de vácuo conectada à atmosfera por meio da

8.7.2 Bomba de anel líquido

O princípio de funcionamento da bomba de anel líquido (Fig. 8.9) é essencialmente o mesmo daquele da bomba mecânica de palhetas, característica que se observa em todas as bombas de vácuo baseadas na compressão dos gases.

O anel líquido que se estabelece decorre da rotação do rotor da bomba de vácuo, que faz com que o líquido seja posto em movimento e, assim, seja centrifugado. Na Fig. 8.9, vê-se uma abertura para a entrada dos gases, que ficarão confinados entre as pás do rotor e serão comprimidos até serem expulsos para a atmosfera.

Para diminuir a pressão final da bomba de anel líquido, pode-se utilizar água gelada. Em geral, a água utilizada é colocada em circuito fechado, caso contrário seu consumo seria muito alto. Essa bomba de vácuo é usada para bombear sistemas de vácuo em processos sujos.

A bomba de anel líquido funciona com água, de modo que o fator que limita a pressão final é a pressão de vapor da água, ao redor de 20 mbar à temperatura ambiente. Em geral, esse tipo de bomba de vácuo é construído para grandes velocidades de bombe-

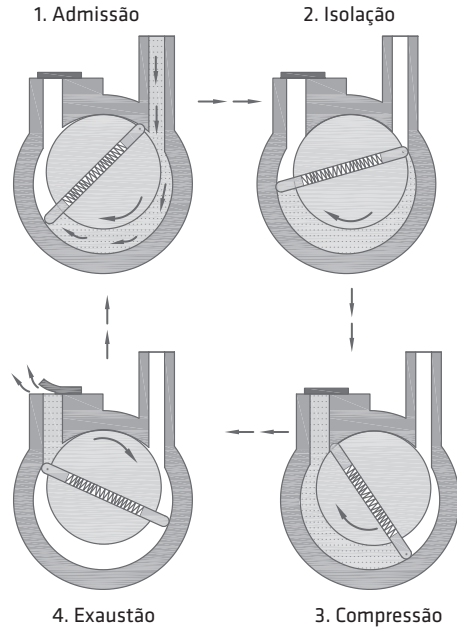


FIG. 8.8 *Etapas de funcionamento da bomba mecânica de palhetas*

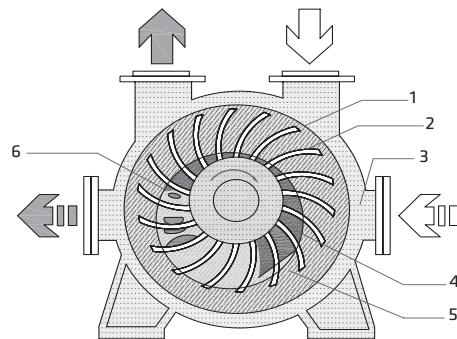


FIG. 8.9 *Bomba de anel líquido com as suas partes principais: (1) rotor; (2) borda externa de uma das aletas do rotor; (3) carcaça da bomba de anel líquido; (4) tomada de gás a ser bombeado (ligação da entrada da bomba de vácuo até a câmara de compressão de gás); (5) anel líquido (conseguido devido à rotação do rotor); (6) saída do gás comprimido*

8.9 DEFINIÇÕES E CONCEITOS BÁSICOS DA TERMODINÂMICA E DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR

A Termodinâmica e a transferência de calor são áreas do conhecimento que têm material bibliográfico extenso e de muito boa qualidade. Apresentam-se a seguir algumas definições e conceitos básicos a serem considerados na pesquisa envolvendo a destilação a vácuo. Mais informações podem ser encontradas nos livros indicados na bibliografia específica.

- *Temperatura*: é a grandeza que praticamente define e dá existência à Termodinâmica e à transferência de calor. É uma propriedade dos corpos e, do ponto de vista da teoria cinética da matéria, uma medida da energia cinética média de translação dos átomos e moléculas. Trata-se de uma grandeza escalar, e sua unidade no SI é o kelvin (K).
- *Calor*: essa grandeza, junto com a temperatura, está presente na Termodinâmica e na transferência de calor. Calor é energia em trânsito. É errado dizer que um corpo tem calor; ele tem energia. Calor é a energia que deixa um corpo devido exclusivamente à diferença de temperatura. Para haver fluxo de calor, necessariamente deve haver diferença de temperatura. O sentido do fluxo de calor é da temperatura maior para a menor. De forma alguma se pode confundir temperatura e calor, pois, apesar de essas grandezas estarem intimamente ligadas, são completamente diferentes. A unidade de calor no SI é o joule (J), sendo a unidade caloria (cal) ainda intensamente utilizada (1 cal equivale a 4,18 joule).
- *Calor específico*: é a quantidade de energia necessária para fazer com que uma determinada quantidade de massa de um material sofra uma mudança de temperatura. Rigorosamente falando, o calor específico depende da temperatura. Na maior parte dos casos, para um dado estado da matéria, o calor específico pode ser tomado como constante. É possível expressar a quantidade de matéria por meio da massa ou do número de moles. Nesse caso, o calor específico deve ser especificado conforme é especificada a forma de quantificar a matéria.
- *Estados da matéria*: na natureza, a matéria pode se apresentar nos estados sólido, líquido e gasoso. No estado sólido, a forma e o volume estão bem definidos, sendo tomados constantes se desconsiderados os efeitos da dilatação. No estado líquido, o volume é bem definido e a forma é dada pelo recipiente que contém a matéria, e mesmo diante

- T1: ponto de medida de temperatura situado dentro do balão que contém a água bruta em processo de aquecimento. Esse líquido, ao final de cada ensaio, foi chamado de condensado por apresentar salinidade bem maior do que a da água bruta.
- T2: ponto de medida de temperatura situado na parte superior do balão que contém a água bruta em processo de aquecimento. Na verdade, esse termopar mede a temperatura do vapor que passa em direção ao sistema de arrefecimento.
- T3: ponto de medida de temperatura situado dentro do kitassato que recebe o destilado.

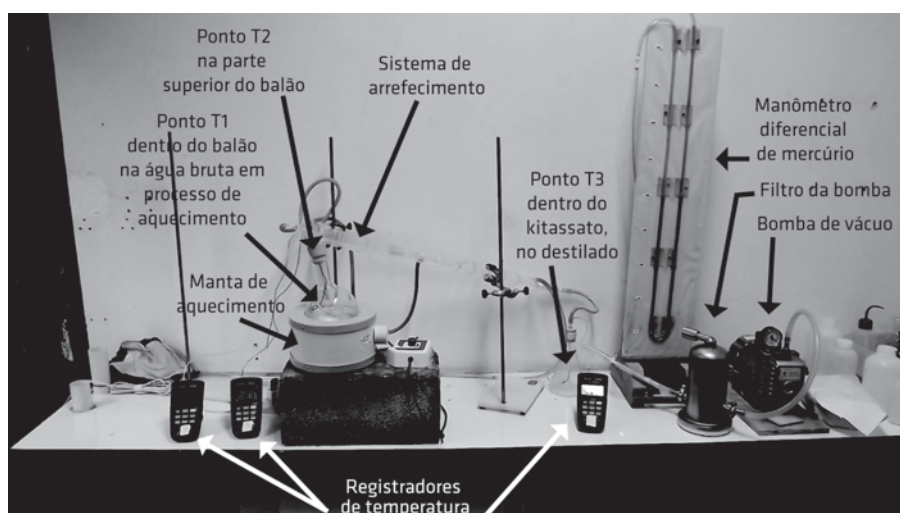


FIG. 8.11 Banco de ensaio utilizado em 2013

A pressão foi medida no manômetro instalado na bomba, podendo ser aferida pelo manômetro de coluna de mercúrio. Os ensaios realizados com esse protótipo foram feitos em dias e horários diferentes, de modo que a fixação da temperatura inicial em 30 °C teve por objetivo evitar a influência da variação da temperatura ambiente nos ensaios. O tempo de cada ensaio foi fixado em 30 minutos contados a partir do momento em que a temperatura no *ponto T1* (dentro do líquido em processo de aquecimento) atingisse 30 °C.

Os ensaios foram feitos em triplicata, sempre mantendo a mesma pressão no kitassato durante cada ensaio. Com a ajuda da bomba de vácuo, foram feitos ensaios com as seguintes pressões: 700 mmHg (valor estimado para a pressão atmosférica local), 600 mmHg, 500 mmHg, 400 mmHg, 300 mmHg, 200 mmHg, 100 mmHg e 80 mmHg. Foi medido o tempo até

uma produção média de 235 mL em 30 minutos ou 1,38 Wh/mL (ou 1.380 kWh/m³ ou 0,725 L/kWh), e, para a pressão de 80 mmHg, uma produção média de 268 mL em 30 minutos ou 1,21 Wh/mL (ou 1.210 kWh/m³ ou 0,826 L/kWh). Com a utilização da bomba de vácuo, seria ainda necessário somar seu consumo, que é de 180 W.

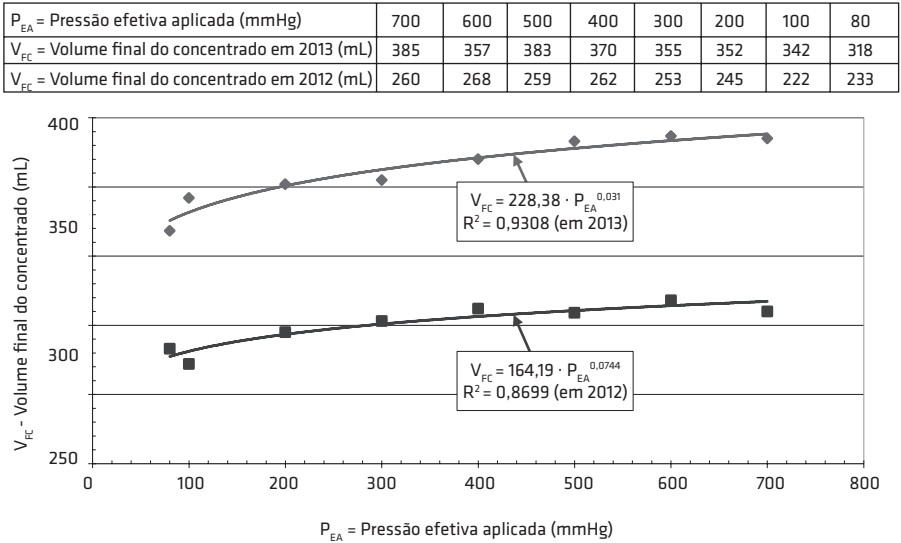


FIG. 8.16 Correlação entre a pressão efetiva aplicada e o volume final do concentrado em 2012 e 2013

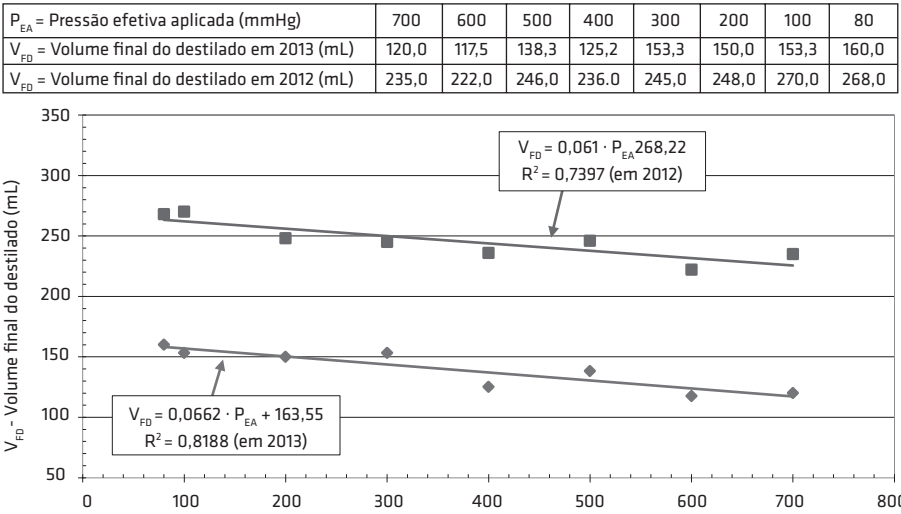


FIG. 8.17 Correlação entre a pressão efetiva aplicada e o volume final do destilado em 2012 e 2013

9 | Alguns relatos de casos

Os autores consideram importante anexar alguns relatos de casos além daqueles já comentados anteriormente. Mostrar as experiências de outras comunidades, em especial aquelas que resultaram em insucesso, ajuda a evitar perda de tempo e gastos desnecessários. As experiências bem-sucedidas podem servir de exemplo de solução para casos semelhantes. O que se pode observar é que algumas comunidades, em vez de ficarem se lamentando por não dispor dos recursos hídricos suficientes para manter seu nível de desenvolvimento, dispuseram-se a obter água de abastecimento de fontes alternativas, destacando-se, nesse caso, a utilidade da tecnologia de dessalinização para satisfazer essa necessidade.

Serão apresentados seis relatos de casos com diferentes peculiaridades. Salvo exceções devidamente citadas, a maior parte do texto é baseada em USBR (2003), que, por sua vez, cita Wangnick (2000) como sua fonte de consulta.

Cada relato de caso inclui uma descrição da situação em termos de necessidade de água e de eventuais problemas em relação à demanda em cada área geográfica e a solução encontrada. A maioria dos relatos mostra como foi feita a implantação da tecnologia de dessalinização, incluindo um fluxograma do processo, sua descrição e instalação, e contém um resumo dos custos envolvidos nessas tecnologias.

9.1 DESSALINIZAÇÃO DE ÁGUA SALOBRA UTILIZANDO OR

Localização: Condado de Dare, na Carolina do Norte (EUA).

Considerações preliminares: o Departamento de Águas do Condado de Dare, a comunidade local e os respectivos conselhos de administração decidiram utilizar a dessalinização em meados da década de 1980, motivados pela necessidade de aumentar a quanti-

(R\$ 31,16), distribuição (R\$ 17,42), transmissão (R\$ 3,67), encargos setoriais (R\$ 11,24) e tributos (R\$ 36,50). A soma dos encargos setoriais com os tributos resulta no valor de R\$ 47,74, ou seja, os 47,74% anteriormente citados. No caso de um consumidor industrial, a distribuição de valores sofreria algumas alterações, mas as proporções seriam semelhantes, havendo um acréscimo na energia e uma redução nos tributos (Aguiar, 2011).

Disso se pode deduzir que, para a viabilização de projetos de dessalinização no Brasil, em especial no caso de se adotarem plantas que utilizam o processo OR, nas quais a energia elétrica é o insumo mais importante em termos de custos, seriam necessários esforços para a diminuição do custo de energia elétrica para esse setor.

9.2 DESSALINIZAÇÃO DE ÁGUA DO MAR UTILIZANDO OR

Localidade: Tampa Bay, Flórida (EUA).

Considerações preliminares: a empresa Tampa Bay Water (TBW), a maior produtora de água da Flórida, é uma espécie de atacadista do setor, fornecendo água aos seus filiados dos condados de Hillsborough, Pasco e Pinellas, além das cidades de New Port Richey, São Petersburgo e Tampa. Essas concessionárias, que são membros da TBW, por sua vez, fornecem água para dois milhões de pessoas na área da baía de Tampa. A TBW, em parceria com as empresas Poseidon Recursos Elétricos e Southwest Florida Water Management District (SWFWMD), desenvolveram a maior planta de dessalinização de água do mar dos Estados Unidos, com capacidade inicial de produção da ordem de 95.000 m³/dia de água potável.

A partir dos anos 2000, a área dos três condados, assim como muitas outras cidades costeiras, experimentou um crescimento significativo. Por causa desse crescimento estava havendo sobre-extração de água subterrânea dos poços, criando estresses ambientais nessa área. A SWFWMD determinou então que a TBW reduzisse a extração de águas subterrâneas de uma vazão de 598.000 m³/dia para 458.000 m³/dia e que até o ano de 2008 a reduzisse ainda mais, para cerca de 340.000 m³/dia. Para atender a essa significativa redução na extração de água subterrânea, foi elaborado um plano diretor de água para essa comunidade no qual a dessalinização de água do mar passaria a contribuir com 10% do total do suprimento de água, previsão essa feita para o ano de 2007.

utilizando soluções criativas para vencer as limitações de seus recursos hídricos. Trazer um cliente industrial forte para a comunidade, com potencial de crescimento futuro, pode desempenhar papel significativo no bem-estar econômico de uma comunidade suscetível aos impactos da seca em sua forte base agrícola. O reúso da água tem desempenhado papel fundamental na satisfação das necessidades dessa comunidade, e essa experiência não é única. Outras comunidades estão considerando o reúso das águas por causa do crescimento da demanda de água enquanto as fontes de abastecimento convencionais permanecem constantes ou estão em declínio.

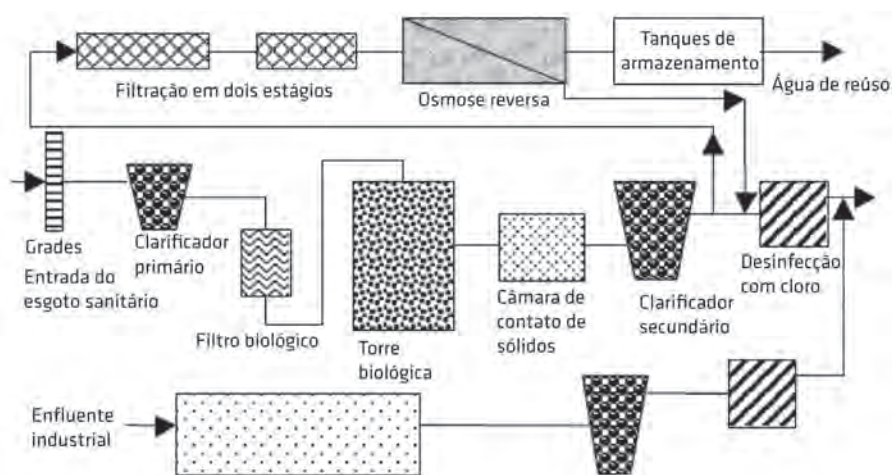


FIG. 9.2 Esquema da estação de recuperação de águas residuais de Harlingen, Texas (EUA)
Fonte: USBR (2003).

9.4 DESSALINIZAÇÃO DE ÁGUA DO MAR PELO PROCESSO DE DESTILAÇÃO MEF

Localidade: Complexo de Ghubrah, Muscat, Sultanato de Omã (Golfo Pérsico)

Considerações preliminares: a cidade de Muscat, capital do Sultanato de Omã, tinha aproximadamente 832.000 habitantes em 2008 (Wikipédia, 2011). Segundo o USBR (2003), a decisão de fazer a dessalinização da água do mar em Omã ocorreu mais tarde que na maioria dos outros países do Golfo Pérsico. Lá, as primeiras usinas começaram a operar somente em 1976, talvez em decorrência de ele apresentar, em comparação com os países vizinhos, uma situação relativamente favorável em termos de recursos hí-

de operação em relação à planta de geração de energia elétrica. Em face da necessidade de ativar as caldeiras no inverno para fornecer vapor suficiente para o processo MEF, os custos operacionais tornam-se significativamente mais dispendiosos nessa estação. No verão, além das temperaturas serem mais altas, o que diminui as perdas por esfriamento, tem-se maior excedente de vapor vindo da usina elétrica, porque ela está operando a plena carga, o que diminui a distribuição dos custos de combustíveis para o processo de destilação.

A Fig. 9.3 mostra a tubulação de tomada de água do Complexo de Ghubrah. As bombas centrífugas levam a água, a partir desse local, para dentro da planta para o processo de destilação. A Fig. 9.4 mostra uma das unidades MEF desse complexo.

Na Tab. 9.3 são apresentados os custos médios, considerando todas as unidades de dessalinização do Complexo de Gubrah, em relação a combustíveis e outros custos, que incluem custos de energia auxiliar, recursos humanos, suprimentos, peças de reposição, depreciação e produtos químicos, para os períodos de verão e de inverno.



FIG. 9.3 *Tubulações da tomada de água do Complexo de Ghubrah*
Fonte: USBR (2003).

TAB. 9.3 Custos médios de dessalinização de água do mar no Complexo de Ghubrah		
Custos (US\$/m³)	No verão	No inverno
Com combustíveis	0,073	0,284
Outros custos	0,563	0,599
Custo total	0,636	0,883

Fonte: USBR (2003).

Sobre os autores

Ana Paula Pereira da Silveira

Nascida em 1986 na cidade de São Paulo (SP), é graduada em Biologia pela Fundação Santo André (2007), tecnóloga em Saneamento Ambiental pela Faculdade de Tecnologia de São Paulo (Fatec-SP) (2012) e mestre em Tecnologias Ambientais pelo Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza (Ceeteps) (2012). É coautora do livro *Ciclo ambiental da água* (2012). Foi auxiliar docente no Laboratório de Saneamento Ambiental e Química (Labsan) da Fatec-SP, com atuação em análises de água e esgoto. Atualmente é professora-assistente da disciplina Introdução à Hidráulica e ao Saneamento Ambiental da Fatec-SP e funcionária da Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (Sabesp). Faz parte do Grupo de Estudos e Pesquisas sobre Dessalinização de Águas Salobras e Salinas da Fatec-SP.

Ariovaldo Nuvolari

Nascido em 1949 na cidade de Jaú (SP), é graduado em Tecnologia das Construções Cíveis – modalidade Obras Hidráulicas pela Faculdade de Tecnologia de São Paulo (Fatec-SP) (1976), mestre (1996) e doutor (2002) na área de Recursos Hídricos e Saneamento pela Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo (FEC) da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp). Desde 1977 é professor de graduação e pós-graduação na área de Saneamento Ambiental da Fatec-SP. Concomitantemente, atuou em empresas como Themag Engenharia Ltda. (1972 a 1982), Paulo Abib Engenharia S/A (1982 e 1983), Serviço Municipal de Saneamento Ambiental de Santo André (Semasa) (1984 a 1987) e Petróleo Brasileiro S/A (1987 a 1991). Suas pesquisas de mestrado e doutorado estão relacionadas com o destino final do lodo de esgoto sanitário. Atualmente coordena o Grupo de Estudos e Pesquisas sobre Dessalinização de Águas Salobras e Salinas da Fatec-SP. É coordenador e coautor do livro *Esgoto Sanitário: coleta, transporte, tratamento e reúso agrícola* (1ª ed., 2003, e 2ª ed., 2011), coautor dos livros *Reúso da água* (1ª ed., 2007, e 2ª ed., 2010) e *Ciclo ambiental da água* (2012) e autor do livro *Dicionário de saneamento ambiental* (2013).

Francisco Tadeu Degasperi

Nascido em 1956 na cidade de São Paulo (SP), é bacharel em Física pelo Instituto de Física da Universidade de São Paulo (USP), mestre e doutor pela Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp). Trabalhou por quase 24 anos no Instituto de Física da USP com instrumentação científica e tecnológica voltada à tecnologia do vácuo, problemas de transferência de calor e sistemas mecânico-estruturais. Desde 2000 trabalha em tempo integral na Faculdade de Tecnologia de São Paulo (Fatec-SP) como Professor Pleno II. Montou e coordena o Laboratório de Tecnologia do Vácuo (LTV). Possui experiência na área de Física voltada à tecnologia, com especialidade em tecnologia do vácuo e fenômenos de transporte. Tem realizado trabalhos tanto acadêmicos como industriais, com apresentação em congressos e publicação em revistas especializadas. Nos últimos anos tem feito em média oito trabalhos por ano com a indústria, sendo os recursos obtidos transferidos ao LTV. Os assuntos de trabalhos são: metrologia em vácuo-pressão, vazão, velocidade de bombeamento, condutância, transporte de gases em baixa pressão, desenvolvimento e implantação de simulador para estudos de sistemas de vácuo de uso geral, ensino em tecnologia do vácuo, análise e modelagem de sistemas de vácuo pela equação de difusão e pelo método de Monte Carlo. É coautor de livro de Física voltado à graduação de tecnologia. Vem desenvolvendo, construindo e caracterizando sistemas metrológicos na área de vácuo e detecção de vazamentos para a indústria. Ministra as disciplinas de graduação de Tecnologia do Vácuo, Termodinâmica e Fenômenos de Transporte e Ondulatória, com desenvolvimento de textos e experiências didáticos. Atua também no programa de mestrado profissionalizante da pós-graduação do Ceeteps.

Wladimir Firsoff

Nascido em 1952 na cidade de São Paulo (SP), é graduado em Tecnologia das Construções Civis – modalidade Obras Hidráulicas pela Faculdade de Tecnologia de São Paulo (Fatec-SP) (1978). Desde 1980 é professor de graduação na área de Saneamento Ambiental da Fatec-SP. Concomitantemente, atuou na empresa Themag Engenharia Ltda. (1979 a 1983). Faz parte do Grupo de Estudos e Pesquisas sobre Dessalinização de Águas Salobras e Salinas da Fatec-SP.

A dessalinização tem se mostrado um método cada vez mais viável em termos técnicos e econômicos no combate à escassez de água para o abastecimento da população, de indústrias e para uso agropecuário. Em regiões isoladas e sem água doce, como ilhas, chega a ser a única solução para a obtenção dessa água, possibilitando, dessa maneira, a própria vida nesses locais.

Dessalinização de águas apresenta os diferentes processos de destilação e os materiais e tecnologias utilizados e explica detalhadamente o processo de obtenção de água, desde os conceitos químicos e o pré-tratamento da água bruta até as considerações ambientais, a microbiologia sanitária e o pós-tratamento da água produzida.

A obra inclui ainda um estudo detalhado sobre o uso do vácuo na destilação térmica e relatos de caso reais, com exemplos no Brasil e no exterior.

Dessalinização de águas vem preencher uma importante lacuna na bibliografia brasileira sobre o tema, sendo uma referência completa para pesquisadores e profissionais da área e de especial interesse quando crises de escassez começam a ocorrer onde nunca antes imaginado.

ISBN 978-85-7975-194-3



9 788579 751943