

UNIVERSIDADE DE UBERABA – UNIUBE

MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA QUÍMICA

LILIAN CRISTINA DE OLIVEIRA CARETA

**RECUPERAÇÃO DE ÁGUA RESIDUAL POR OSMOSE REVERSA PARA
REPOSIÇÃO EM SISTEMA DE TROCADORES DE CALOR**

UBERABA – MG

2017

LILIAN CRISTINA DE OLIVEIRA CARETA

**RECUPERAÇÃO DE ÁGUA RESIDUAL POR OSMOSE REVERSA PARA
REPOSIÇÃO EM SISTEMA DE TROCADORES DE CALOR**

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado Profissional em Engenharia Química da Universidade de Uberaba, como requisito parcial, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Química, sob a orientação do Prof. Dr. Mauro Luiz Begnini.

UBERABA – MG

2017

Catálogo elaborado pelo Setor de Referência da Biblioteca Central UNIUBE

C186r Careta, Lilian Cristina de Oliveira.
Recuperação de água residual por osmose reversa para
reposição em sistema de trocadores de calor / Lilian Cristina de
Oliveira Careta. – Uberaba, 2017.
82 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade de Uberaba. Programa de
Mestrado em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Mauro Luiz Begnini.

1. Recursos hídricos – Desenvolvimento. 2. Osmose. 3.
Sustentabilidade. I. Begnini, Mauro Luiz. II. Universidade de
Uberaba. Programa de Mestrado em Engenharia Química. III.
Título.

CDD 333.91

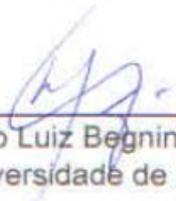
LILIAN CRISTINA DE OLIVEIRA CARETA

**RECUPERAÇÃO DE ÁGUA RESIDUAL POR OSMOSE REVERSA PARA
REPOSIÇÃO EM SISTEMA DE TROCADORES DE CALOR**

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado Profissional em Engenharia Química da Universidade de Uberaba, como requisito parcial, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Aprovado em: 19/09/2017

BANCA EXAMINADORA:



Dr. Mauro Luiz Begnini- Orientador
Universidade de Uberaba



Dr. Marcelo Bacci da Silva
Universidade Federal do Triângulo Mineiro



Dr. José Roberto Delalibera Finzer
Universidade de Uberaba

AGRADECIMENTOS

À Deus, pelo dom da vida e do conhecimento, que me permite ir e estar sempre em busca de novos conhecimentos para a prática do bem.

À minha família que sempre me apoiou para que eu concluísse esta etapa da minha vida acadêmica, especialmente meus pais, João e Marli, meus irmãos, Liliane e João Gabriel e minha filha Ísis.

Ao professor e orientador Mauro Luiz Begnini pela orientação e apoio durante o desenvolvimento do presente trabalho.

Ao meu coorientador Euclides Antônio Pereira de Lima por toda dedicação e conhecimento compartilhado.

Ao professor José Roberto Delalibera Finzer, por suas contribuições e conhecimento para o desenvolvimento deste trabalho.

À todos os amigos especialmente a Vivian Regina de Oliveira, que direta e indiretamente me ajudaram em todas as etapas deste trabalho.

À Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais - FAPEMIG, pelo suporte dado ao desenvolvimento dessa dissertação.

Dedico à...

Deus, primeiramente, por ser o princípio,
meio e fim de todas as coisas;

Família, pois sem ela não teria base para
nada;

meu orientador, pela paciência e
dedicação a mim dispensada;

todos os profissionais da área química
que trabalham em busca de soluções
para que a humanidade viva e tenha uma
qualidade de vida melhor, sem que com
isso, destrua o meio ambiente.

RESUMO

Tendo em vista os problemas relacionados à questão de recursos hídricos em todo o mundo, nos dias atuais tornou-se de fundamental importância economizar e fazer o uso racional deste recurso. Sendo assim, a indústria em estudo, sendo hoje a segunda maior processadora de óleo de soja no Brasil, teve o objetivo de analisar o processo de recuperação de água residual do rejeito proveniente da aplicação de osmose reversa para reposição de água em torres de resfriamento. Trata-se de um sistema que reduz significativamente a quantidade total de resíduos sólidos dissolvidos na água, proporcionando o reuso da água, sem ocasionar problemas de incrustações e desperdícios de energia elétrica. Acredita-se que este sistema serve como uma contribuição para as outras empresas, tanto no que se refere à produtividade, economia e sustentabilidade. Para o desenvolvimento deste trabalho foram realizadas pesquisas bibliográficas e um estudo de caso. O estudo baseou-se em dados adquiridos em um processo de produção no qual foi feita uma discussão geral sobre os pesquisadores que estudam a temática e, em seguida apresenta-se uma análise descritiva dos dados coletados com interpretação dos resultados. Antes da implantação do projeto era necessária uma descarga contínua (purga) diária de aproximadamente $7,81\text{m}^3/\text{h}$ para mantermos todos os parâmetros dentro do especificado, ou seja um volume bastante significativo de perda de água. Após a implantação do projeto não foi mais necessário a realização de purga, devido à baixa concentração de sais dissolvidos na água utilizada para a reposição de água na torre de resfriamento, sendo assim a taxa de ar de escoamento requerida para a operação da torre de resfriamento foi de $1,75 \times 10^6 \text{ Kg/h}$.

Palavras chaves: Osmose, Osmose reversa, Sustentabilidade.

ABSTRACT

In view of the problems related to the issue of water resources around the world, it has become fundamentally important today to economize and make rational use of this resource. Therefore, the industry under study, being today the second largest soybean oil processor in Brazil, had the objective of analyzing the wastewater recovery process of the waste from the application of reverse osmosis for the replacement of water in cooling towers. It is a system that significantly reduces the total amount of solid waste dissolved in water, providing water reuse, without causing scale problems and waste of electricity. It is believed that this system serves as a contribution to other companies, both in terms of productivity, economy and sustainability. For the development of this work were carried out bibliographical research and a case study. The study was based on data acquired in a production process in which a general discussion about the researchers studying the subject was made and then a descriptive analysis of the collected data with interpretation of the results is presented. Prior to the implementation of the project, a daily continuous discharge (purge) of approximately 7.81m³/h was required to maintain all parameters within the specified, is a very significant volume of water loss. After the implementation of the project, it was no longer necessary to perform a purge, due to the low concentration of solids dissolved in the water used for the replacement of water in the cooling tower, thus the rate of flow air required for the operation of the cooling tower was 1.75 x 10⁶ kg / hr.

Key words: Osmosis, Reverse osmosis, Sustainability.

LISTA DE ABREVIATURAS

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente
OD – Quantidade de oxigênio dissolvido na água
DBO – Demanda Bioquímica de oxigênio das águas
Eh - Potência de redução
IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
N – Nitrogênio
NH₄NO₃ – Nitrato de Amônia
NO₃⁻ - Nitrato
P – Fósforo
PL – Perda Líquida
pH – Potencial Hidrogênico
PNMA – Política Nacional do Meio Ambiente
Φ_{os} – Potencial Osmótico
RO – Osmose Reversa
SS – Sólidos Suspensos
SISNAMA – Sistema Nacional do Meio Ambiente
C_p - Concentração de sais na água dessalinizada
C_a - Concentração de sais na água a dessalinizar
%E - percentual ou rejeição de sais (a eficiência da membrana)
F_t - Potencial total
F_g - Potencial gravitacional
F_p - Potencial de pressão
F_m - Potencial mátrico
F_{os} - Potencial osmótico
%R - Recuperação de água
V_p - Água potável
V_a - Volume de água de alimentação do sistema
DS – Desenvolvimento Sustentável
VPM = Valor Máximo Permitido

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema desenvolvimento sustentável	16
Figura 2 – Principais aquíferos do Brasil.....	26
Figura 3 – Principais domínios sedimentares e cristalinos no Brasil	27
Figura 4 – Modelo de membrana de sistema de osmose reversa.....	46
Figura 5 – Formato de uma membrana do sistema de osmose reversa	47
Figura 6 – Separação por membranas de osmose reversa	47
Figura 7 – Funcionamento osmose reversa	49
Figura 8 – Partes da Torre de Resfriamento	55
Figura 9 – Torre direta.....	56
Figura 10 – Torre indireta	57
Figura 11 – Torre de tiragem hiperbólica	59
Figura 12 – Torre de tiragem mecânica	59
Figura 13 – Torre de resfriamento com fluxo cruzado	60
Figura 14 – Torre de resfriamento com fluxo contracorrente	60
Figura 15 – Modelo de um sistema de água de resfriamento	62
Figura 16 – Etapas do processo de osmose reversa e trocadores de calor.....	67
Figura 17 – Dados da torre do processo antes e depois da osmose reversa	77
Figura 18 – Dados da torre de reuso antes e depois da osmose reversa	77
Figura 19 – Relação entre perda por evaporação, perda por arraste e ciclos de concentração.....	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Fontes de contaminação de águas subterrâneas.....	23
Tabela 2 – Parâmetros físico-químico das águas subterrâneas do Mato Grosso ...	38
Tabela 3 – Disponibilidade hídrica per capita no Brasil.....	39
Tabela 4 – Resumo dos dados do aquífero Salto das Nuvens	42
Tabela 5 – Resumo dos dados do aquífero Ronuro.....	42
Tabela 6 – Dados químicos do aquífero Utiariti.....	42
Tabela 7 – Dados químicos do aquífero Salto das Nuvens.....	43
Tabela 8 – Dados químicos do aquífero Ronuro	44
Tabela 9 – Características técnicas da osmose reversa	50
Tabela 10 – Dados da torre do processo	57
Tabela 11 – Análise diária da composição química da água da bacia da torre de resfriamento antes da implantação do projeto.....	73
Tabela 12 – Análise realizada semanalmente na composição química da água de rejeito.....	73
Tabela 13 – Características da água após o sistema de osmose reversa	74
Tabela 14 – Composição da água recirculada após a implantação do sistema de osmose reversa.....	74

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVO	14
2.1 OBJETIVO GERAL	14
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
3 FUDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
3.1 CARACTERÍSTICAS DA ÁGUA SUBTERRÂNEAS	15
3.1.1 Águas, sustentabilidade e desenvolvimento social	15
3.1.2 Recursos hídricos.....	20
3.1.3 Mares e oceanos.....	24
3.1.4 Águas subterrâneas	25
3.1.4.1 Águas subterrâneas do Estado de Mato Grosso.....	40
3.2 OSMOSE REVERSA.....	44
3.2.1 Osmose Reversa no tratamento de águas subterrâneas	51
3.3 TORRES DE RESFRIAMENTO	55
4 MATERIAIS E MÉTODOS	66
4.1 PLANEJAMENTO DA PESQUISA	66
4.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	66
4.3 PLANEJAMENTO DE COLETA DE DADOS.....	66
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	72
5.1 O ESTUDO DE CASO REAL	72
5.2 ANÁLISE DA QUALIDADE DA ÁGUA DA BACIA DA TORRE DE RESFRIAMENTO	72
6 CONCLUSÃO	76
REFERÊNCIAS	79
APÊNDICE	85
ANEXOS	87

1 INTRODUÇÃO

A questão da gestão de recursos hídricos mobiliza a cada ano mais cientistas, organizações não governamentais e a sociedade civil organizada, explicitando a preocupação com a manutenção de um recurso que apesar de renovável tem sofrido diminuições sucessivas de sua potabilidade/qualidade diante do crescimento populacional e das atividades econômicas. Constitui, portanto, matéria de interesse internacional, transcendendo as barreiras entre os hemisférios Norte e Sul (BAPTISTA, 2015).

Sendo a água um dos recursos naturais mais intensamente utilizados torna-se nítida a necessidade de administrá-la, garantindo seus requisitos de qualidade e uma oferta que atenda à demanda dos polos industriais, dos grandes centros urbanos, zonas de irrigação, bem como as necessidades metabólicas do homem e de outros seres vivos (BAPTISTA, 2015).

A qualidade da água tem uma relação intrínseca com a gestão da bacia hidrográfica, onde as formas de uso do solo serão os parâmetros para definir o grau de impacto na área da bacia hidrográfica.

Vale lembrar que, os estudos relacionados à análise ambiental, têm sempre como referencial uma determinada sociedade e sua relação com o contexto espacial em que vive e desenvolve suas atividades, pode ser um país, estado, município, lugarejo ou bacia hidrográfica (BAPTISTA, 2015).

Desse modo, os estudos ambientais apresentam uma preocupação holística de relacionar a complexidade social, cultural e econômica de uma sociedade com o processo de apropriação e ocupação do meio ambiente em que vivem (ROSS, 2006).

Assim, o estudo do presente trabalho foi planejado para compreender como é feita a recuperação de água residual por osmose reversa para abastecer torres de resfriamento.

Diante dessas questões, o objetivo geral deste estudo foi analisar o processo de recuperação de água residual por osmose reversa para reposição em torre de resfriamento em sistema de trocadores de calor. No decorrer do estudo procurou-se alcançar os seguintes objetivos específicos: a)apresentar as características das águas subterrâneas usada para trocas de calor; b)verificar como acontece a osmose

reversa para tratamento da água, e por fim, c)discorrer sobre torres de resfriamento, onde a água aquecida em trocadores de calor é resfriada para ser recirculada.

A empresa em estudo é uma das maiores exportadoras de soja em grãos do Brasil e a segunda maior processadora de soja. Em maio de 2009 ela inaugurou sua primeira unidade no Mato Grosso, sendo o Mato Grosso considerado o principal estado produtor de soja no Brasil.

Este trabalho está dividido em referencial teórico, no qual foi feito uma discussão geral sobre o segmento técnico e de engenharia relacionado com o estudo e, em seguida apresenta uma análise descritiva dos dados coletados e interpretação dos dados obtidos.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho teve como objetivo geral analisar o processo de recuperação de água residual por osmose reversa para reposição em torres de resfriamento, acopladas com sistema de trocadores de calor.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Apresentar as características físico-químicas das águas subterrâneas;
- ✓ Verificar como acontece a osmose reversa para tratamento da água;
- ✓ Discorrer sobre torres de resfriamento;
- ✓ Estudo de caso;
- ✓ Comparar antes e depois da implantação do 3º estágio de osmose reversa.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 CARACTERÍSTICAS DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Neste capítulo inicia-se a abordagem do tema proposto a partir do estudo sobre as características das águas subterrâneas. Inicialmente, faz-se um estudo sobre a água, sustentabilidade e desenvolvimento social, destacando-se a crise climática enfrentada no Brasil. Em seguida, faz-se um estudo sobre os recursos hídricos, abordando também a disponibilidade de mares e oceanos. Por fim, o estudo deste capítulo foca nas águas subterrâneas que são processadas em osmose reversa, sendo o rejeito tratado novamente por osmose reversa e a água obtida é usada em torres de resfriamento, tendo como foco o Estado do Mato Grosso.

3.1.1 Águas, sustentabilidade e desenvolvimento social

Para Strieder e Deluque (2012), o conceito de desenvolvimento sustentável é amplo, cabendo diversos significados, estando o mesmo associado à sociedade racional, indústrias limpas, crescimento econômico, utopias românticas, entre outros. Segundo estes autores, este conceito abrange a satisfação das necessidades do presente, o atendimento das penúrias dos pobres e manutenção da capacidade das gerações futuras para satisfazer suas necessidades.

Ainda, segundo Strieder e Deluque (2012), falar em desenvolvimento sustentável é o mesmo que falar em equilibrar as dimensões econômicas, sociais e ambientais. Segundo os autores, o desenvolvimento sustentável visa a distribuição igual de riquezas na sociedade, fator que, segundo eles, pode ser alcançado a partir de uma melhor alocação de recursos e uma melhor gestão, limitando-se o uso dos recursos esgotáveis, substituindo-os por renováveis, bem como limitação do consumo, geração de tecnologias limpas e criação e consolidação de mecanismos administrativos de proteção ambiental.

De acordo com Kraemer (2003), para que se tenha noção mais exata acerca do desenvolvimento sustentável, é necessário apoiar-se no chamado *triple bottom line*, ou seja, na integração de questões sociais, ambientais e econômicas. A Figura

1 demonstra o esquema de desenvolvimento sustentável (DS):

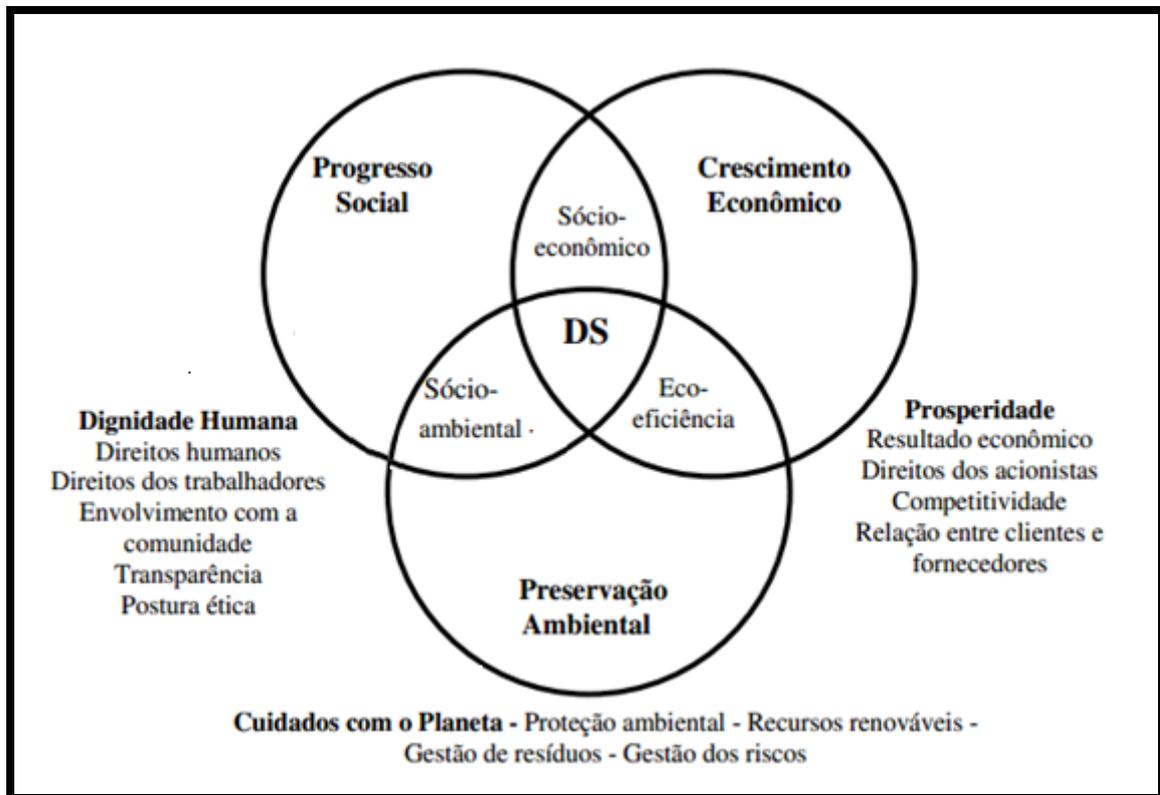


Figura 1 - Esquema de desenvolvimento sustentável.
Fonte: Kraemer (2003).

Pela análise da Figura (1), percebe-se que o desenvolvimento sustentável envolve o progresso social, o crescimento econômico e a preservação ambiental, os quais possuem como ponto em comum o desenvolvimento socioeconômico, socioambiental e a eco-eficiência, sempre no intuito de reunir esses aspectos visando à melhoria da qualidade ambiental e de vida da sociedade (KRAEMER, 2003).

Legalmente, o conceito de meio ambiente consiste no “conjunto de condições, leis, influências e interações de ordem física, química e biológica, que permite, abriga e rege a vida, em todas as suas formas”. (Lei 6.938/81, I, art. 3º). Desta maneira, de acordo com o conceito disposto pela lei, o meio ambiente engloba os elementos vivos ou não da natureza, como aqueles que abrigam qualquer tipo de vida, incluindo, assim, os espaços artificiais criados pelo homem, melhorando sua qualidade de vida (KRAEMER, 2003).

A preocupação com a degradação e o desrespeito ao meio ambiente fazem parte do cotidiano de todos os países do mundo, porém, são os países com menos

recursos os que mais sentem, pois a fiscalização é deficiente, a qualidade educacional da população é precária, a miséria é acentuada e a impunidade é latente. Estas circunstâncias tornam mais fáceis à prática de crimes contra o meio ambiente (MARTINS; LIUTI, 2010).

A degradação do meio ambiente está associada ao sistema capitalista, que se baseia na lei da oferta e da procura de produtos e serviços. O estímulo constante ao consumo é o alicerce desse sistema, e tem a natureza como inesgotável fonte de energia e matéria-prima. A natureza funciona ainda como receptadora de dejetos produzidos por suas cidades e indústrias (NAGALLI; NEMES, 2009). Assim, pode-se dizer que o sistema capitalista é um dos grandes responsáveis pela degradação ambiental, visto que demanda de um sistema de produção estimulado pelo constante consumo da população.

Pode-se afirmar que a qualidade do ambiente em que se vive indica a qualidade de vida do ser humano. Assim uma pessoa de baixa renda inserida em um local sem saneamento básico, com condições precárias de vida apresentará um comportamento totalmente diferente de uma pessoa que vive em um ambiente saudável, que possui condições básicas de vida e esta ainda será diferente de uma pessoa com renda relativamente alta, moradora de um bairro nobre, com privilégios ambientais. Portanto, as condições climáticas, as tradições de cada local, as paisagens, as construções e tudo que pode ser considerado como parte, são características do ambiente seja ele natural ou artificial, influencia diretamente o ser humano nele inserido, que por sua vez cria e transforma o ambiente em que vive (CONSUMO SUSTENTÁVEL, 2005).

Segundo Castro (2006), nas grandes cidades o maior problema de manejo das águas está no abastecimento de água potável para a população, e o tratamento das águas servidas. As residências que não dispõem de abastecimento de água e rede de esgotos sanitários, geralmente são abastecidas na própria propriedade por poços que captam água no lençol freático. Nesta mesma propriedade ficam a fossa e sumidouro. A água do lençol freático muitas vezes está comprometida pela poluição com elementos patogênicos, introduzidos no ambiente devido à ausência de fossa séptica e filtro anaeróbico nas unidades domiciliares.

De acordo com Silva e Pruski (2000) "A água presente em nosso ambiente encontra-se em constante movimento. O processo de transporte de massa tem lugar na atmosfera, em terra e nos oceanos, sendo o conjunto desses processos chamado

de Ciclo Hidrológico”.

Devem ser analisadas, diversas formas de utilização de abastecimento na manutenção das reservas de água existentes (MARQUES, ZANDONA, XAVIER, 2005).

O controle ambiental se dá pela aplicação efetiva da legislação, sendo que para cada esfera, municipal, estadual ou federal, há um conjunto de leis que orientam as organizações e órgãos sobre o compromisso e a melhor prática no que tange às práticas de proteção e controle dos recursos naturais, da fauna e da flora, além dos aspectos relacionados à presença do homem como elemento deste cenário.

No Brasil, a Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, regulamentada pelo decreto nº 99.974, de 06 de Junho de 1990, que dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA), traz em seu conteúdo disposições sobre o Sistema Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA), estrutura que congrega os órgãos responsáveis pelo controle e fiscalização ambiental, em nível nacional, estadual e municipal.

O Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Renováveis – IBAMA foi criado pela Lei nº 7.735 de 22 de fevereiro de 1989. Componente do SISNAMA e vinculado diretamente ao Ministério do Meio Ambiente, tem papel fundamental no cumprimento da PNMA.

Para Machado (1992), o IBAMA, como autarquia federal de regime especial vinculada ao Ministério do Interior, é dotada de personalidade jurídica de direito público, autonomia administrativa e financeira, e o vínculo à SEMAM proporciona credibilidade e consistência às tomadas de decisões da Presidência da República. Ressalta Machado que sua criação e existência é uma tentativa de coordenar, em nível federal, solicitações diversas com caráter ambiental, mesmo as vinculadas a outros ministérios, tais como Saúde, Marinha, Agricultura, Minas e Energia e Cultura, responsáveis por fiscalizar e gerenciar ações sobre água potável e alimentos, rios e mares, agrotóxicos, solos e minerais, e patrimônio cultural, respectivamente. Conclui que o Instituto tem como responsabilidade harmonizar o desenvolvimento econômico e social com a conservação e preservação do meio ambiente.

Já para Antunes (2005), a competência em nível federal é difusa, pois descreve existir constatação de desconexão e desentrosamento entre os diversos órgãos e níveis de poder com as responsabilidades na área ambiental,

principalmente as desenvolvidas pelo IBAMA. Defende a hipótese de que a atuação do Órgão, além de suas competências em determinados estados brasileiros, se faz necessária em virtude da falta de recursos estaduais, mesmo contrariando a Lei nº 7.735/89, art. 2º, e que a estrutura e competência técnica do IBAMA devem prevalecer, inclusive sobre as questões políticas e partidárias contrárias a sua atuação superior.

O direito à vida é um direito fundamental do homem, visto que é dele que emanam todos os outros direitos. É ainda direito natural essencial à condição de ser humano. Diante disso, a Constituição Federal afirma que o direito à vida é inviolável. Conforme o artigo 5º da Constituição, “todos são iguais perante a lei, sem distinção de qualquer natureza, garantindo-se aos brasileiros e aos estrangeiros residentes no País a inviolabilidade do direito à vida (...)”.

Pode-se dizer que o artigo 225 da CF/88 consiste em uma garantia dos direitos metaindividuais relacionados ao meio ambiente. Desta forma, a Constituição Federal de 1988 garante a todos o direito a um meio ambiente equilibrado, disponibilizando, assim, qualidade de vida em harmonia com a natureza. Para tanto, o artigo 225 da CF/88, com o objetivo de assegurar esse direito, impõe ao poder público que passe a funcionar como um gestor, que deve administrar um bem pertencente a toda a sociedade, de forma a informar sobre o que é feito e trazer a população para a participação na gestão desses bens, visando concretizar um Estado democrático e ecológico de direito. (MACHADO, 2008).

O risco ambiental aparece em todas as atividades, em maior ou menor intensidade; com isso, o sistema jurídico brasileiro adotou a teoria do risco integral ou responsabilidade objetiva, sem culpa, em que, em se verificando o dano, há a necessidade de sua reparação. Todavia, há certa dificuldade de se comprovar a culpa única e exclusiva da empresa poluidora, mas certo é que, se houve ocorrência de dano, esta deverá ser responsabilizada pela degradação ocasionada. As medidas assecuratórias de natureza patrimonial deverão ser aceitas, mas com cuidado redobrado, demonstrando-se o nexo de causalidade entre a vantagem econômica e o delito ambiental produzido.

3.1.2 Recursos Hídricos

A questão da gestão de recursos hídricos mobiliza a cada ano mais cientistas, organizações não governamentais e a sociedade civil organizada, explicitando a preocupação com a manutenção de um recurso que apesar de renovável tem sofrido diminuições sucessivas de sua potabilidade/qualidade diante do crescimento populacional e das atividades econômicas. Constitui, portanto, matéria de interesse internacional. (BAPTISTA, 2015).

Sendo a água um dos recursos naturais mais intensamente utilizados torna-se nítida a necessidade de administrá-la, garantindo seus requisitos de qualidade e uma oferta que atenda à demanda dos polos industriais, dos grandes centros urbanos, zonas de irrigação, bem como as necessidades metabólicas do homem e de outros seres vivos.

A qualidade da água tem uma relação intrínseca com a gestão da bacia hidrográfica, onde as formas de uso do solo serão os parâmetros para definir o grau de impacto na área da bacia hidrográfica.

De acordo com Braga (2002), o planeta terra possui 265.400 trilhões de toneladas de águas, todavia, somente 0,5% é de água doce, com viabilidade tecnológica e econômica de ser explorada. Deduzindo as águas que estão em difícil acesso ou que estão muito poluídas, esse percentual cai para 0,003% do total.

A qualidade da água, por sua vez, é diretamente dependente de sua quantidade, haja vista os ingredientes necessários à dissolução, diluição e transporte de uma gama de substâncias benéficas ou maléficas à vida, tratando-se de uma relação de proporção entre quantidade e qualidade. Os riscos de estiagem, escassez e mesmo as cheias potencializam mais ainda os riscos de poluição dos mananciais. Quanto a isso, cabe ressaltar o alerta da Organização Mundial da Saúde a qual estima que 25 milhões de pessoas no mundo morram a cada ano por doenças transmitidas pela água, tais como cólera e diarreias, sendo os países em “desenvolvimento” o alvo das maiores preocupações, pois neles 70% da população rural e 25% da população urbana não dispõem de adequado abastecimento de água potável (CIMA, 1991).

A qualidade da água tem uma relação intrínseca com a gestão da bacia hidrográfica, onde as formas de uso do solo serão os parâmetros para definir o grau de impacto na área da bacia hidrográfica.

O Brasil, como um país em “desenvolvimento” há um dilema de qual modelo de desenvolvimento adotar: um lento, porém responsável (ecologicamente correto); ou um modelo ligado ao perverso capital, descompromissado com o desenvolvimento humano e econômico da sociedade em geral. Este dilema é notoriamente mais enfrentado pelos organismos responsáveis pelo ordenamento e gestão do território, que são os Executivos dos três escalões da Federação, e são quem definem os instrumentos legais para a gestão ambiental (BAPTISTA, 2015).

O gestor público muitas vezes vê-se comprometido não com o interesse social (sua obrigação precípua), aliando-se ao poder econômico quase sempre indiferente à sua responsabilidade social, o que deve ser fiscalizado e combatido pelos outros ramos do poder público (Legislativo e Judiciário). Nestes termos é colocada a ideia “desenvolvimentista” do progresso do município, ou do Estado, ou mesmo da União, fazendo-se concessões inconsequentes aos investidores privados (às vezes internacionais), além de vista grossa às suas irregularidades (PEREIRA, 2008).

O ambiente corresponde, dentro desta lógica, ao conjunto de recursos naturais disponíveis à apropriação dos grupos sociais. Assim sendo, a complexidade a ser decifrada pela análise ambiental pode ser mais intensa a partir do vínculo social, cultural e econômico da sociedade com o meio ambiente, logicamente que as configurações naturais do meio ambiente podem ser um agravante a mais. Isso pode ser exemplificado pelos inúmeros casos de ocupações em planícies de inundação, que são áreas de alta fragilidade ambiental, uma vez que essas superfícies pouco elevadas acima do nível médio das águas, são frequentemente inundadas por ocasião das cheias (GUERRA, 2005).

Desta forma, apresentam todos os velhos problemas de ocupação no contexto fisiográfico das bacias hidrográficas e questões mais diretamente relacionadas aos recursos hídricos.

A Resolução do CONAMA nº 396/08 oferece um entendimento de que as águas subterrâneas são aquelas que ocorrem naturalmente ou artificialmente no subsolo. Tais águas ocorrem em zonas de aeração e de saturação, sendo que a primeira é constituída de água e ar, sendo dividida em zona de umidade do solo, franja capilar e zona intermediária (TUCCI; CABRAL, 2003).

Por sua vez, a zona de saturação está limitada na parte superior em uma barreira impermeável na parte inferior (TUCCI et al., 2007).

A Resolução nº 396/2008 do CONAMA define um aquífero como um corpo hidrológico que acumula e transmite água por meio de seus poros, podendo ser classificado de acordo com suas características hidrodinâmicas e geológicas (WENDLAND, 2003).

Dentre os tipos de aquíferos, tem-se o fissural que ocorre em rochas metamórficas abrigando água de má qualidade em pouca quantidade. O aquífero cárstico ocorre em rochas carbonáticas na qual existem cavidades de grande porte (FEITOSA; MANOEL FILHO, 2000).

Têm-se ainda os aquíferos confinados, que estão limitados no topo e na base, e são relativamente impermeáveis (CLEARY, 1989).

Boa parte do País encontra-se em condição satisfatória quanto à quantidade e à qualidade de água. Destacam-se as RHs Amazônica, Tocantins-Araguaia e Paraguai; Na Região Nordeste ocorre grande ocorrência de rios classificados com criticidade quantitativa devido à baixa disponibilidade hídrica dos corpos d'água; Rios localizados em regiões metropolitanas apresentam criticidade quali-quantitativa, tendo em vista a alta demanda de água existente e a grande quantidade de carga orgânica lançada aos rios; No Sul do Brasil muitos rios possuem criticidade quantitativa, devido à grande demanda para irrigação (ANA, 2005).

A Lei nº 9.433/1997, no seu art. 3º, define a gestão sistemática dos recursos hídricos sem dissociação dos aspectos de quantidade e qualidade como uma das diretrizes para implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos. Nesse sentido, realizou-se o diagnóstico das bacias críticas brasileiras, considerando, de forma integrada, a análise de criticidade sob o ponto de vista qualitativo e quantitativo (ANA, 2005).

A partir da análise do quadro, pode-se observar que os esgotos sanitários são uma das maiores causas de contaminação de águas subterrâneas, haja vista, provirem de águas utilizadas na higiene pessoal e lavagem de alimentos e utensílios domésticos pela população. Nesse caso, as fossas sépticas precisam ser substituídas por redes coletoras de esgotos, visando reduzir a quantidade de cargas contaminantes que são depositadas no subsolo (FOSTER et al., 2006).

No que se refere à contaminação de águas subterrâneas, verifica-se que muitas atividades podem causar alterações físicas, químicas ou biológicas, como esgotos sanitários, resíduos industriais, águas de drenagem urbana, fontes acidentais e atmosféricas (TUCCI et al., 2007).

A Tabela (1) descreve detalhadamente as fontes de contaminação das águas subterrâneas explanando também as suas características.

Tabela 1 - Fontes de contaminação de águas subterrâneas.

Fontes de contaminação	Características	Contaminantes
Esgotos sanitários e fossas sépticas	Águas servidas, utilizadas para higiene pessoal, lavagem de utensílios e cozimento de alimentos.	Matéria orgânica biodegradável, microrganismos, nutrientes, óleos, graxas e detergentes.
Resíduos sólidos	São os rejeitos de atividades industriais, domésticas, hospitalares e agrícolas.	Chorume, microrganismos patogênicos, fenóis, óleos e graxas e metais pesados.
Águas residuárias industriais	Água de processo e águas sanitárias.	Hidrocarbonetos aromáticos, metais pesados, organismos fecais, nitratos, metais e substâncias radioativas.
Água de drenagem urbana	Água de lavagem sobre o solo.	Microrganismos, nutrientes e materiais em suspensão.
Fontes acidentais	Acidentes ocorridos em depósitos de produtos perigosos, derramamento de óleo e explosão de caráter radioativo.	Substâncias radioativas, metais pesados e ácidos.
Fontes atmosféricas e Run-off urbano	Queima de combustíveis fósseis, que geram chuvas ácidas e percolação de poluentes atmosféricos. Emissão de veículos automotores.	Sólidos dissolvidos em suspensão, hidrocarbonetos orgânicos, químicos sintéticos e naturais, metais pesados, compostos de enxofre e nitrogênio.
Manejo da água subterrânea	Poço ou captação cuja construção/projeto inadequado permite o ingresso direto de água superficial ou água subterrânea rasa poluída. Intrusão salina, rebaixamento do aquífero.	Sais, acidez da água e aumento da concentração de poluentes.
Contaminação natural	Está relacionada com a evolução química da água subterrânea e a dissolução de minerais (pode ser agravada pela poluição ocasionada pela atividade humana e/ou extração excessiva).	Principalmente fluoreto e ferro solúvel, às vezes sulfato de magnésio, arsênico, manganês, selênio, cromo e outras espécies inorgânicas.
Atividade cemiterial	Substâncias provenientes da decomposição de cadáveres.	Necrochorume (liquame ou putrilagem).

Fonte: Foster et al. (2006).

A poluição da água consiste na alteração de suas características por qualquer ação ou interferência, naturais ou antrópicas. Tais alterações podem provocar impactos estéticos, fisiológicos ou ecológicos. De acordo com o principal regulamento nacional (Resolução CONAMA nº 20/86) consideram-se como parâmetros para avaliação da qualidade da água: os limites de coliformes fecais; as

quantidades de oxigênio dissolvido na água (OD); a demanda bioquímica de oxigênio das águas (DBO); turgidez; cor; pH além das quantidades máximas de metais pesados, dentre outras substâncias nocivas (BRASIL, 1986).

Os resíduos sólidos provenientes de águas industriais, possuem uma variação química ampla e por isso introduzem várias substâncias tóxicas e radioativas no subsolo (TUCCI et al., 2007).

Em atividades agrícolas o uso de fertilizante acaba contribuindo para a degradação das águas subterrâneas, tendo como principais nutrientes nitrogênio, fósforo e potássio, na qual o nitrogênio constitui a principal fonte de contaminante em forma de nitrato (FEITOSA; MANOEL FILHO, 2000).

Em se tratando de atividade cemiterial, entende-se que falta medida de proteção ambiental no sepultamento dos corpos humanos, na qual acabam contaminando o solo com substâncias orgânicas e inorgânicas (SILVA; MALAGUTTI FILHO, 2009).

3.1.3 Mares e oceanos

Quanto ao conceito de mares, pode-se dizer que são zonas próximas às costas, situadas geralmente sobre a plataforma continental e com pequenas profundidades, já os oceanos são os grandes corpos de água salgada que separam os continentes e com uma profundidade média de 3.000m e áreas de mais de 10 milhões de km² (SILVA, 2013).

O oceano mais extenso é o Pacífico, com 180 milhões de km², ultrapassando em extensão todos os continentes. Os outros quatro oceanos são o Atlântico, o Índico, o Antártico ou Austral e o Ártico (SILVA, 2013).

As correntes oceânicas transportam grandes quantidades de calor das zonas equatoriais às polares e, junto com as correntes atmosféricas, fazem com que as diferenças térmicas na Terra não sejam tão fortes como as dos planetas que não possuem atmosfera nem hidrosfera.

Durante a formação da Terra, a água e os gases inertes encontravam-se sob a superfície da crosta terrestre; motivo pelo qual a maior parte da água surgiu do interior como resultado da atividade vulcânica, da força rotacional e da gravitação (SILVA, 2013).

A água encontrava-se em forma de vapor, em nuvens com espessura de

milhares de quilômetros e no início, a crosta sólida estava tão quente que a água das chuvas se evaporava imediatamente (TAVARES et al., 2013).

No entanto, a temperatura diminuiu, o que permitiu o depósito da água. Posteriormente, os terrenos baixos e as bacias saturaram-se de água e os rios baixaram das montanhas para originar os oceanos há 4 bilhões de anos. Acredita-se que já existia cerca de 10% da água dos oceanos quando o planeta acabou de se formar (TAVARES et al., 2013).

A água dos mares e oceanos é composta basicamente por uma mistura de sais e gases (em média 35 gramas de sal a cada litro de água) que se acumularam pelo arrasto de partículas nos rios, o choque das ondas e as erupções vulcânicas (submarinas e terrestres). Dado que a salinidade varia de acordo com a temperatura (quanto maior a temperatura, maior a concentração de sais) e com as precipitações (quanto mais precipitações, menor a concentração de sais), os mares tropicais têm uma salinidade de 3,8%; em mares fechados, como o Mar Morto, chega-se a ultrapassar 4%, enquanto que os mares frios têm uma salinidade de 3,3% (TAVARES et al., 2013).

Os oceanos e mares possuem uma grande diversidade de seres vivos, que se adaptaram a diversas condições físicas (correntes, salinidade, temperatura, pressão, luz e gases dissolvidos) e a condições fisiomorfológicas especiais. As correntes tróficas começam com os organismos fotossintéticos produtores primários: algas macro e microscópicas (fitoplâncton) que vivem na superfície da água e até onde pode penetrar a luz.

Esse fitoplâncton alimenta o zooplâncton e, posteriormente, ambos alimentam um grupo de animais filtradores que obtêm seu alimento filtrando grandes quantidades de água (baleias, mariscos e peixes). Os resíduos orgânicos dos animais submergem ao fundo do mar, onde continua a cadeia trófica que permite a sobrevivência dos organismos que aí habitam (CORREIA; SOVIERZOSKI, 2005).

3.1.4 Águas subterrâneas

As águas subterrâneas se configuram como um dos mais importantes reservatórios de água do Brasil, de acordo com John (2015), essa importância pode ser justificada não somente pela abundante distribuição no país, mas também pela sua qualidade, em decorrência de sua relativa estabilidade química e biológica,

destacando-se suas características qualitativas que podem responder aos diferentes usos.

Para Zoby e Oliveira (2005), existem basicamente três formas em que a água ocorre no subsolo: nas rochas fraturadas, estando presente nas discontinuidades das rochas como falhas e fraturas; nos terrenos fraturados-cársticos, com a presença de minerais solúveis nas rochas calcárias; e nas rochas sedimentares, onde a água é armazenada no espaço entre os grãos da rocha, são nestas que se apresentam os melhores aquíferos, ocupando cerca de 4.130.000 km², ou seja, aproximadamente 48% do território nacional, conforme demonstra a Figura (2):

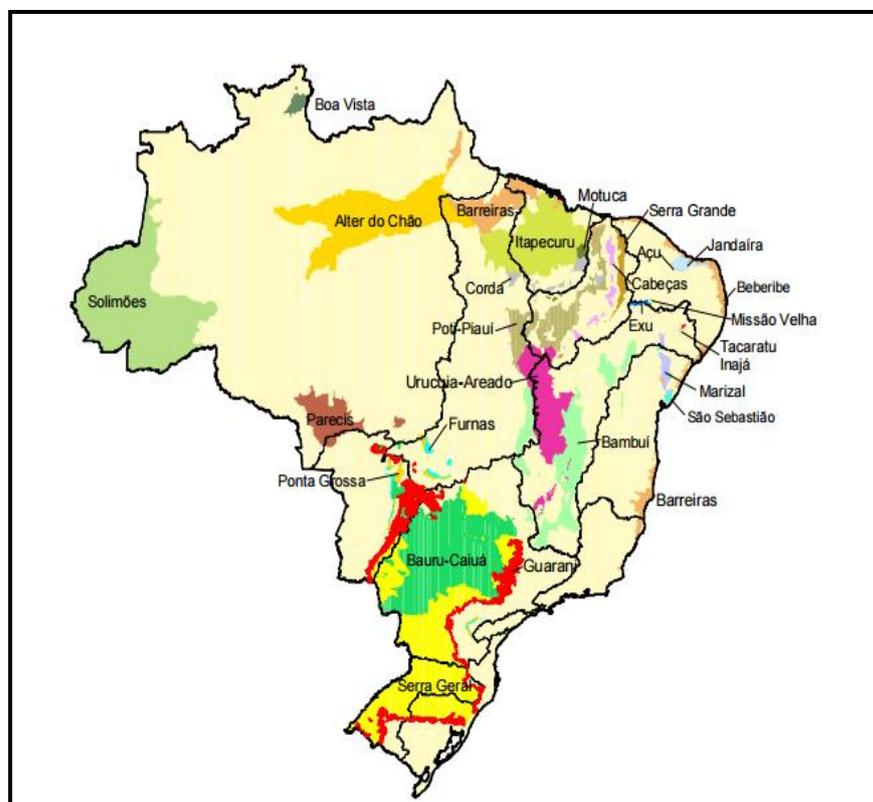


Figura 2 - Principais aquíferos do Brasil, indicados pelas áreas coloridas.
Fonte: Zoby e Oliveira (2005).

Nota-se que a água subterrânea pode estar abrigada em amplos depósitos sedimentares, em vale de rios enterrados ou leitos de velho lagos, podendo também ser encontrada em bolsões de água mantida por uma camada impermeável subterrânea, tipo uma bacia (GHANEM, 2009).

Ao fazer a distinção entre o que é porosidade do que é permeabilidade, nota-se que a porosidade consiste no volume de poros existentes em uma superfície, representado o seu volume total. Quanto á permeabilidade, esta é a capacidade que

a substância tem de permitir que a água escoe, estando disponível para uso em um suprimento (GHANEM, 2009).

Nas situações em que a água subterrânea encontra-se contida em solos porosos, formado por arenito, ou em rochas altamente fraturadas, como pedregulho ou areia, e se caso as águas mais profundas entejam em contato com alguma cama de argila ou de algum tipo de rocha impermeável, neste local acaba prevalecendo um reservatório permanente, um tipo de lago subterrâneo, que acaba sendo conhecido como aquífero (GHANEM, 2009). A figura (3), mostra os principais domínios sedimentares e cristalinos no Brasil.



Figura 3 – Principais domínios sedimentares e cristalinos no Brasil.
 Fonte: Ghanem, 2009.

No Brasil, a principal bacia sedimentar proterozóica existente, levando em consideração o uso de todo o potencial hidrogeológico é a do São Francisco, que comporta dois importantes sistemas aquíferos de dimensões regionais. O Grupo Bambuí, do Neoproterozóico (850 a 650 Ma.), o qual origina o sistema aquífero

BambuÍ, que percorre os estados de Minas Gerais, Bahia e Goiás, atingindo cerca de 175.000 km², e o sistema aquífero Urucuais-Areado, que a sua extensão comporta os mesmos estados que o do Grupo Bambuí, sendo o principal aquífero dessa bacia (ANA, 2005).

A respeito das Bacias Sedimentares Fanerozóicas, as maiores são do Paleozóico (540 a 250 Ma.), sendo elas, na região norte, a Bacia do Paraná, do Parnaíba e do Amazonas. A Bacia Sedimentar do Amazonas, também comporta-se com estruturas regionais em bacias menores: do Acre, Solimões e Amazonas. A bacia hidrográfica do rio Amazonas, tem área de cerca de 1.300.000 km² e espessuras que podem atingir milhares de metros. Os sistemas aquíferos mais importantes são o Solimões e Alter do Chão (ANA, 2005).

Na região Nordeste, Bacia Sedimentar do Parnaíba é a principal bacia, com uma área de 600.000 km², envolvendo boa parte dos estados do Piauí e Maranhão. Os quatro sistemas aquíferos regionais mais importantes dessa bacia são: Cabeças, Serra Grande, Poti-Piauí e Itapecuru (ANA, 2005).

Outra grande e importante bacia paleozóica é a Bacia Sedimentar do Paraná, que ocupa uma área de aproximadamente 1.000.000 km² em território brasileiro, estendendo-se para a Argentina, Paraguai e Uruguai. Ocupa parte das regiões Centro-Oeste, Sudeste e Sul do país. Dentre os principais sistemas aquíferos sedimentares desta região, destacam-se o sistema aquífero Guarani, um dos maiores mananciais subterrâneos do mundo, além dos sedimentos dos grupos Bauru e Caiuá, os quais originam o sistema aquífero Bauru-Caiuá (ANA, 2005).

No estado de São Paulo, os principais sistemas aquíferos explorados encontram-se na Bacia do Paraná. Dos 645 municípios, 462 (71,6%) são abastecidos total ou parcialmente com águas subterrâneas, sendo que 308 (47,7%) são totalmente abastecidos por este recurso hídrico (ANA, 2005).

As principais bacias sedimentares mesozóicas, em relação ao potencial hidrogeológico, são:

- a) Potiguar: ocupa uma área de cerca de 25.000 km² nos Estados do Rio Grande do Norte e Ceará. Tem como principais aquíferos o Açú e o Jandaíra, este último do tipo cárstico-fraturado;
- b) Pernambuco-Paraíba: ocupa a costa oriental nordestina, entre o Rio Grande do Norte e Pernambuco, com cerca de 9.000 km², tendo como principais sistemas aquíferos o Beberibe e Barreiras;

- c) Araripe: tem cerca de 9.000 km², ocupa partes dos estados do Ceará, Pernambuco e Piauí. Destaca-se por apresentar na região do semi-árido nordestino, aquíferos porosos com boa produtividade. O sistema aquífero Missão Velha destaca-se como um dos mais importantes nessa bacia;
- d) Jatobá: Essa bacia tem cerca de 5.600 km² localiza-se no estado de Pernambuco, apresentando como principal sistema aquífero os sedimentos paleozóicos da Formação Tacaratu;
- e) Tucano: As formações paleozóicas Inajá e Tacaratu originam os sistemas aquíferos homônimos nessa bacia. Merecem destaque ainda os sedimentos cretácicos das formações Marizal e São Sebastião, que formam os sistemas aquíferos de mesmo nome, e a cobertura cenozóica representada pelo sistema Barreiras. A área dessa bacia é de cerca de 28.400 km², localizando-se nos estados de Pernambuco e Bahia.
- f) Recôncavo: As formações cretácicas São Sebastião e Marizal representam os principais sistemas aquíferos dessa bacia. Ocorre em uma porção do estado da Bahia, ocupando cerca de 11.000 km².

A respeito dos terrenos cristalinos, estes ocupam uma área de aproximadamente 4.380.000 km² do território nacional. São formados pelos seguintes tipos de rochas: gnaisses, xistos, filitos, granitos, metacalcários, quartzitos de idade pré-cambriana (superior a 540 Ma.). No entanto, apresentam produtividades inferiores à média dos aquíferos sedimentares (ANA, 2005).

Quanto aos principais aquíferos do país, tem-se as seguintes características:

O Sistema aquífero Alter do Chão, trata-se de um aquífero da idade cretácica (145) e a formação dos seus sedimentos assemelham-se aos presentes no Solimões e em parte da Bacia Sedimentar do Amazonas. Seu solo é composto por arenitos e argilitos, com intercalações de termos granulométricos semelhantes, entretanto não consolidados. Sendo, portanto, um aquífero do tipo livre.

Sua origem é na região centro norte do Pará e leste do Amazonas, com grande disposição areal, perfazendo 312.574 km². Apresenta uma espessura máxima de 1.250 metros, além de ter uma disponibilidade hídrica (reserva explorável) de 249,5 m³/s.

De acordo com ANA (2005), dos 145 poços consultados no sistema Alter do Chão, a profundidade média é 133 m, a vazão média dos é de 53,8 m³/h, e a capacidade específica média atinge 1,893 m³/h, portanto, de elevada produtividade. Os parâmetros hidrodinâmicos médios do sistema aquífero são: 7,0.10⁻⁵ m²/s de transmissividade, 1,4.10⁻⁵ m/s de condutividade hidráulica e 3,5.10⁻² de coeficiente de armazenamento (condições de aquífero livre).

O Sistema aquífero Solimões é caracterizado por apresentar se sedimentos terciários (65 Ma.) da formação homônima, localizados no topo da sequência sedimentar da Bacia do Amazonas, com ampla área de ocorrência. Tem grande expressão areal, com cerca de 457.664 km², aflora em todo o estado do Acre e na parte do oeste do estado do Amazonas. Recobre os sedimentos da Formação Alter do Chão e é constituído por arenitos, conglomerados, siltitos, argilitos, calcários siltico-argilosos. Clásticos não consolidados com granulometria variando de areia a argila também ocorrem nesse sistema. Sua espessura máxima pode atingir até 2.200 m. Em geral, este aquífero é classificado como sendo livre, apesar de estar presente em condições confinadas, haja vista que tem contribuição pelítica (argilosa) e grande espessura. A estimativa da disponibilidade hídrica (reserva explotável) desse sistema é de 896,3 m³/s (ANA, 2005).

Nesse sistema aquífero, a vazão média dos poços é de 27,3 m³/h e a capacidade específica média, é de 3,062 m³/h (36 poços consultados, com uma profundidade média de 56 m). Tais valores configuram um sistema de elevada produtividade. A utilização desse aquífero é, principalmente, no abastecimento doméstico, sendo fonte importante para a cidade de Rio Branco (ANA, 2005).

O Sistema aquífero Boa Vista caracterizado por apresentar em sua formação sedimentos cenozóicos (65 Ma.), contendo arenitos conglomeráticos e arcoseanos. Localizado no nordeste do estado de Roraima, aflorando por cerca de 14.888 km², com espessura máxima, estimada, em 120 m. Sua disponibilidade hídrica (reserva explotável) é de 32,4 m³/s (ANA, 2005).

A exploração ocorre como aquífero livre, com poços apresentando vazão média de 32,7 m³/h e elevada capacidade específica média, alcançando 5,737 m³/h, conforme observado em 9 poços consultados (profundidade média de 36 m). É importante fonte de abastecimento para a cidade de Boa Vista (ANA, 2005).

O Sistema aquífero Parecis é formado por arenitos com intercalações de níveis de conglomerado e lentes pelíticas. As rochas possuem idade cretácea (145

Ma.). Esse sistema surge no oeste de Mato Grosso e na extremidade leste do estado de Rondônia, ocupando cerca de 88.157 km² e tem espessura média de 150 m. A reserva explotável estimada para esse sistema é de 464, 8 m³/s (ANA, 2005).

Geralmente é explotado em condições livres, entretanto, pode apresentar condições de semiconfinamento, estabelecido por coberturas lateríticas e/ou argilosas. Apresenta excelente produtividade, com vazão média de 146,9 m³/h e capacidade específica média de 8,830 m³/h (8 poços consultados, com profundidade média de 102 m) (ANA, 2005).

As águas deste aquífero são utilizadas, principalmente, para o abastecimento doméstico, com destaque para a cidade de Vilhena, a qual é inteiramente suprida por esse manancial (ANA, 2005).

O Sistema aquífero Açú, de idade cretácica (145 Ma.), tem sua origem em uma faixa que circunda a Bacia Potiguar entre as rochas do embasamento e os sedimentos da Formação Jandaíra, ocupando cerca de 3.764 km² (ANA, 2005).

Sua formação é subdividida em dois membros. O Membro Superior é constituído de folhelhos, argilitos e siltitos, com intercalações de arenitos finos, e espessura que pode atingir 60 m. O Membro Inferior é constituído por arenitos grosseiros a conglomeráticos, arenitos finos e intercalações de folhelhos e siltitos, e apresenta espessuras superiores a 200 m (ANA, 2005).

No Membro Superior da Formação Açú, estão localizadas as jazidas de petróleo, explotadas na região de Mossoró. Já o Membro Inferior dessa formação constitui o aquífero Açú, de elevado potencial hidrogeológico. Esse aquífero é explotado em condições livre e confinada. O confinamento do sistema aquífero é promovido pelos calcários da Formação Jandaíra (ANA, 2005).

A disponibilidade hídrica (reserva explotável) estimada é de 2,2 m³/s. Os poços profundos, em geral, são mais produtivos. A vazão média é 24,9 m³/h e a capacidade específica média é 2,925 m³/h (16 poços consultados, com profundidade média de 310 m) (ANA, 2005).

Na bacia hidrográfica do rio Ceará Mirim, no Rio Grande do Norte, a transmissividade obtida para o Açú foi de $6,3 \cdot 10^{-5}$ m²/s, a condutividade hidráulica de $1,26 \cdot 10^{-6}$ m/s e o coeficiente de armazenamento de $1,4 \cdot 10^{-4}$. Os parâmetros hidrodinâmicos médios do sistema aquífero são $2,3 \cdot 10^{-4}$ m²/s de transmissividade, $7,5 \cdot 10^{-6}$ m/s de condutividade hidráulica e $1,0 \cdot 10^{-4}$ de coeficiente de armazenamento (condições de aquífero confinado) (ANA, 2005).

Na região do Mossoró (RN), o sistema aquífero é intensamente explorado em projetos de irrigação. De forma geral, os principais usos das suas águas são o abastecimento doméstico, industrial e irrigação (ANA, 2005).

O Sistema aquífero Jandaíra, tem em sua formação, características de carbonatos marinhos de idade Cretácea (145 Ma.), com intercalações de argilitos e folhelhos. Está localizado na porção superior das sequências carbonáticas dessa formação. Tais carbonatos, frequentemente, apresentam indícios de carstificação, de forma que o fluxo no aquífero é influenciado pelas feições de dissolução cársticas associadas à presença de descontinuidades rúpteis (fraturas). Apresenta uma natureza cárstico-fraturada, e sendo, de modo geral, como uma camada sub-horizontal, com espessuras variando de 50 a 250 metros, comportando-se como aquífero livre. Recobrimo o Jandaíra, ocorrem as rochas da Formação Barreiras (ANA, 2005).

A área de afloramento do Jandaíra compreende cerca de 11.589 km², ocupando partes dos estados do Rio Grande do Norte e Ceará, no contexto da Bacia Potiguar. O estado do Rio Grande do Norte tem a maior parte das áreas aflorantes. A disponibilidade hídrica (reserva explotável) estimada para esse aquífero é de 6,2 m³/s, entretanto a demanda potencial é cerca de três vezes maior, como será mostrado no balanço entre disponibilidade e demandas (ANA, 2005).

Os valores médios de vazão e capacidade específica são, respectivamente, de 6,2 m³/h e 4,453 m³/h (180 poços consultados, com profundidade média de 98 m), indicando que se trata de aquífero de produtividade regular. A natureza cárstica desse aquífero implica em extrema variabilidade espacial na produção do mesmo.

O aquífero Jandaíra é intensamente utilizado para a irrigação na região da chapada do Apodi, na área limítrofe entre os estados do Ceará e Rio Grande do Norte (ANA, 2005).

O Sistema aquífero Serra Grande se destaca por apresentar uma porção basal da Bacia Sedimentar do Parnaíba, que corresponde aos sedimentos de idade siluriana (440 Ma.) da formação de mesmo nome. É constituído por arenitos finos a grossos, níveis de conglomerados e intercalações de siltitos. Assenta-se diretamente sobre o embasamento cristalino, sendo confinado pelo aquífero Pimenteiras e apresenta espessura média de 500 m. A porção aflorante do Serra Grande ocorre na região limítrofe entre o estado do Piauí e Ceará, bem como no sul do Piauí, totalizando cerca de 30.450 km². Condições de artesianismo são frequentes, ao

longo da borda oriental da Bacia Sedimentar do Parnaíba, nesse aquífero (ANA, 2005).

A disponibilidade hídrica (reserva explotável) estimada para esse sistema é 12,7 m³/s. A vazão média dos poços desse sistema tem valores, respectivamente, de 6,3 e 13,7 m³/h, para as porções livres e confinadas. A capacidade específica média é 0,439 m³/h, nas áreas livres e, de 2,406 m³/h, nos locais confinados. Os parâmetros hidrodinâmicos médios do aquífero, no estado do Piauí, são 3,0.10⁻³ m²/s de transmissividade, 1,0.10⁻⁵ m/s de condutividade hidráulica e 4,3.10⁻⁴ de coeficiente de armazenamento (condições confinadas). Sendo usado para o abastecimento doméstico e irrigação (ANA, 2005).

O Sistema aquífero Cabeças é formado por arenitos, localmente silicificados, depositados no terço inferior da Bacia Sedimentar do Parnaíba, pertencentes à formação homônima, de idade devoniana (420 Ma.). Esse sistema é considerado como o de melhor potencial hidrogeológico nessa bacia. Tem comportamento livre e confinado. O confinamento é dado pela Formação Longa que exhibe espessuras, localmente, de até 200 m (ANA, 2005).

A área total de afloramento é estimada em 34.318 km². A espessura média é de 300 m. A disponibilidade hídrica (reserva explotável) estimada desse sistema é de 7,2 m³/s (ANA, 2005).

Os poços locados exclusivamente no Sistema Aquífero Cabeças, apresentam vazões médias, na porção livre e confinada, respectivamente, de 12 e 50,2 m³/h. A capacidade específica média da porção livre desse sistema é 1,774 m³/h, enquanto para a porção confinada é de 8,179 m³/h. Tais valores médios demonstram que este aquífero de produtividade boa a elevada. Os parâmetros hidrodinâmicos médios do sistema aquífero são 1,3.10⁻² m²/s de transmissividade, 5,4.10⁻⁵ m/s de condutividade hidráulica e 3,7.10⁻⁴ de coeficiente de armazenamento (condições confinadas). Os principais usos da água desse aquífero são o doméstico e para a irrigação (ANA, 2005).

O sistema aquífero Poti-Piauí, pertencente ao Carbonífero (360 Ma.). É formado por arenitos, siltitos e folhelhos e localmente, calcários, sendo explotado como aquífero livre e confinado. Tem sua origem em grande parte da porção ocidental do estado do Piauí, alcançando o sul do Pará e o nordeste do Tocantins, perfazendo 117.012 km², sendo um dos sistemas aquíferos de maior abrangência

areal na Bacia Sedimentar do Parnaíba. Sua espessura média é de 400 m. A disponibilidade hídrica (reserva explotável) estimada é de 130,0 m³/s (ANA, 2005).

Esse sistema apresenta capacidade específica média entre 1,4 (livre) e 2,57 m³/h/m (confinado). As vazões médias nas porções livre e semi-confinada, são respectivamente, de 18 e 40 m³/h. O principal uso das águas do sistema aquífero Poti-Piauí é o doméstico (ANA, 2005).

O Sistema aquífero Motuca é composto por folhelhos e siltitos com intercalações de arenitos, calcários e argilitos, da formação homônima, depositado no final do Permiano (250 Ma.). Em geral é um aquífero de baixa capacidade, sendo explotado em condições livres. Localmente tem suas águas captadas para uso o doméstico. Aflora por cerca de 10.717 km² na forma de manchas no leste e sul do estado do Pará. A disponibilidade hídrica (reserva explotável) foi estimada em 3,0 m³/s (ANA, 2005).

Os 22 poços consultados (profundidade média de 96 m) desse sistema apresentam capacidade específica média de 2,28 m³/h e vazão média de 16,3 m³/h. Os parâmetros hidrodinâmicos médios para o sistema aquífero Motuca são 2,3.10⁻⁴ m²/s de transmissividade, 3,6.10⁻⁶ m/s de condutividade hidráulica e 2,0.10⁻⁴ de coeficiente de armazenamento (condição confinada). O uso preponderante da água é para o abastecimento doméstico (ANA, 2005).

O Sistema aquífero Corda é composto por arenitos, siltitos e folhelhos do Jurássico (200 Ma.). Os níveis arenosos (psamíticos) dessa unidade correspondem ao aquífero Corda. Esse ocorre em condições livre, semiconfinado e confinado. É aflorante no centro-sul do estado do Maranhão, extremo norte de Tocantins e na porção centro-oeste do Piauí, perfazendo cerca de 35.266 km². Sua disponibilidade hídrica (reserva explotável) estimada é 9,2 m³/s. O principal uso desse manancial é para o abastecimento doméstico (ANA, 2005).

O Sistema aquífero Itapecuru é composto predominantemente por arenitos, siltitos e folhelhos, de idade cretácea, pertencentes à formação homônima, tem grande área de ocorrência superficial, sendo comumente livre e, localmente, semiconfinado. Ocupa a região centro-nordeste do estado do Maranhão e uma faixa no leste do Pará, aflorando por cerca de 204.979 km² nesses estados, portanto, uma expressiva área de recarga. A espessura média do aquífero é de 100 m. A disponibilidade hídrica (reserva explotável) estimada para esse sistema atinge 214,8 m³/s (ANA, 2005).

É utilizado principalmente para a pecuária e abastecimento rural no interior do Estado do Maranhão, e para abastecimento doméstico na cidade de São Luís conjuntamente com o sistema aquífero Barreiras (ANA, 2005).

Os poços apresentam vazão média de 12,3 m³/h e capacidade específica, também média, de 1,862 m³/h (116 poços consultados, com uma profundidade média de 91 m). Os parâmetros hidrodinâmicos médios do sistema aquífero são 2,3.10⁻⁴ m²/s de transmissividade, 3,6.10⁻⁶ m/s de condutividade hidráulica e 2,0.10⁻³ de coeficiente de armazenamento (condição de aquífero livre) (ANA, 2005).

O Sistema aquífero Missão Velha é constituído por arenitos e intercalações siltícas da formação homônima, de idade jurássica (200 Ma.), sendo recoberto pelos sedimentos da Formação Abaiara, que cria condições de confinamento na Bacia Sedimentar do Araripe (ANA, 2005).

O Sistema aquífero Exu é composto pelos sedimentos cretácicos (145 Ma.). Ocupa uma área de 6.397 km² e encontra-se localizado no planalto da Chapada do Araripe. Este aquífero é predominantemente livre, apresentando vazões médias de 6,0 m³/h e capacidade específica média de 7,922 m³/h (ANA, 2005).

O Sistema aquífero Barreiras, de idade tércio-quadernária (deposição iniciada há 65 Ma.), tem ampla distribuição na costa brasileira. Ele aflora de forma descontínua ao longo da costa brasileira em uma área de cerca de 176.532 km².

O Sistema aquífero Beberibe, de idade cretácica (145 Ma.), apresenta uma sequência de arenitos de granulação variada, tendo, na base, clastos de natureza silicosa que gradam, progressivamente, para sedimentos calcíferos, no topo. A sua área aflorante localiza-se nos estados de Pernambuco e Paraíba, na forma de duas manchas alongadas de direção norte-sul, ocupando uma área de cerca de 318 km². A disponibilidade hídrica (reserva explotável) estimada para esse aquífero é de 0,4 m³/s (ANA, 2005).

O Sistema aquífero Tacaratu, de idade siluro-devoniana (445 Ma. a 415 Ma.), representa a porção basal do Grupo Jatobá. Ele ocorre na Bacia Sedimentar do Tucano-Jatobá. Os afloramentos desse aquífero estão localizados na porção central do estado de Pernambuco e sudeste do Estado do Ceará, totalizando cerca de 3.890 km². A disponibilidade hídrica (reserva explotável) desse sistema é estimada em 2,9 m³/s (ANA, 2005).

O Sistema aquífero Inajá, de idade devoniana (420 Ma.). Trata-se de um sistema poroso, que apresenta reserva explotável estimada é de 0,3 m³/s (ANA, 2005).

O Sistema aquífero São Sebastião, de idade cretácica (145 Ma.), é constituído predominantemente por termos arenosos com intercalações argilosas, e aflora, em sua maior parte, na Bacia Sedimentar do Recôncavo, na região do sudeste da Bahia. A disponibilidade hídrica (reserva explotável) estimada para esse sistema é de 8,2 m³/s. Este aquífero apresenta elevada produtividade, tanto nas áreas livres como naquelas confinadas (ANA, 2005).

O Sistema aquífero Marizal, de idade cretácica, ocorre nas bacias Tucano e Recôncavo. É constituído por arenitos grosseiros, níveis sílticos, além de conglomerados em sua porção basal, e é, portanto, de natureza porosa. Aflora por cerca de 18.797 km², ocupando uma faixa alongada na direção nortesul, no leste do estado da Bahia, recobrendo a Formação São Sebastião. A disponibilidade hídrica (reserva explotável) estimada para esse aquífero é de 7,2 m³/s (ANA, 2005).

O Sistema aquífero Bambuí, formada por metassedimentos, sendo sua maioria, de natureza carbonática, dos grupos Bambuí e Una, de idade neoproterozóica (850 a 650 Ma.), enquanto a Formação Caatinga compreende materiais quaternários (1,75 Ma.) (ANA, 2005).

Esse sistema aquífero possui uma área de afloramento de 181.868 km², que corresponde à porção centro norte do estado de Minas Gerais, região centrooeste da Bahia, além dos extremos sudeste de Tocantins e noroeste de Goiás (ANA, 2005).

O Sistema aquífero Urucuia-Areado abrange os sedimentos cretácicos (145 Ma.) das formações Urucuia e Areado, que recobrem, na sua maior parte, as rochas do Grupo Bambuí.

Trata-se de um aquífero do tipo livre, com espessura do Urucuia pode atingir valores superiores a 1.500 m. A disponibilidade hídrica (reserva explotável) estimada desse sistema alcança 236,4 m³/s.

O Sistema aquífero Furnas, de idade devoniana (420 Ma.), é considerada como unidade basal da Bacia Sedimentar do Paraná, assentando-se no embasamento cristalino. É constituída por arenitos, predominantemente de granulação grossa, pobremente classificada e com matriz caulínica (ANA, 2005).

O aquífero Furnas é de natureza porosa, variando de livre a confinado, a depender da ocorrência de estratos sobrepostos. Sob condições livres, a vazão média dos poços é de 17,4 m³/h e a capacidade específica média de 1,556 m³/h. Na porção confinada, a produtividade dos poços é similar à porção livre, com capacidade específica média de 1,510 m³/h.

O Sistema aquífero Ponta Grossa, de idade devoniana (420 Ma.), consiste, na base de folhelhos e siltitos, e em direção ao topo há intercalações de arenitos finos a muito finos. Por sua constituição, essa formação representa um aquífero de baixa potencialidade, reduzida às camadas arenosas. As áreas de afloramento estão nos estados de Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Goiás e Paraná, perfazendo cerca de 24.807 km². A disponibilidade hídrica (reserva explotável) estimada é de 29,1 m³/s (ANA, 2005).

O Sistema aquífero Guarani compreende um pacote de rochas arenosas que ocorrem sotopostos às rochas basálticas da Formação Serra Geral. Tem espessura variando entre 200 e 800 m, com valor médio de 250 m. Distribui-se numa área de aproximadamente 1.195.000 km², no Brasil, Argentina, Paraguai e Uruguai. Cerca de 71% (840.000 km²) dessa área está no Brasil. Cerca de 90% do SAG é confinado.

O Sistema aquífero Serra Geral, de idade jurássica (200 Ma.) e é constituído pelas rochas que compõem uma sequência de derrames de lavas basálticas e ácidas, com intercalações de lentes e camadas arenosas. Forma aquíferos fraturados que em sua grande maioria, têm condição livre. Apresenta uma área de recarga de cerca de 411.855 km² e espessura média de 150 m. A sua disponibilidade hídrica (reserva explotável) é estimada em 7.463 m³/s (ANA, 2005).

O Sistema aquífero Bauru-Caiuá, poroso e livre a semi-confinado, possui uma área aflorante de 353.420 km² e espessura média de 200 m. Ele tem maior exposição areal na região hidrográfica do Paraná, sobreposto às intrusivas do sistema aquífero Serra Geral e ocupa grande parte do oeste do estado de São Paulo.

A disponibilidade hídrica (reserva explotável) nesse sistema aquífero é estimada em 587,9 m³/s. A profundidade média dos poços nesse sistema é de 140 m, os quais apresentam vazão média de 18,7 m³/h e capacidade específica média de 0,919 m³/h (119 poços consultados). Para o Bauru-Caiuá, os parâmetros hidrodinâmicos médios do aquífero são: condutividade hidráulica de 10⁻⁶ a 10⁻⁵ m/s

e, os coeficientes de armazenamento variam de 5.10^{-2} a 15.10^{-2} , em condições de aquífero livre, e é de 10^{-3} , sob condições confinadas (ANA, 2005).

A composição da água subterrânea é função de diversos fatores, tais como, o potencial hidrogênio (pH), a potência de redução (Eh), a temperatura da água, a pressão parcial dos gases dissolvidos, o clima da região, a composição inicial da água na área de recarga, a velocidade do deslocamento subterrâneo, o tempo de residência (tempo de contato da água com a rocha), o tipo de sistema de fluxo hidrogeológico e, como não se pode esquecer nos dias atuais, as atividades antrópicas (SILVA; MIGLIORINI, 2014).

Em geral, a qualidade da água subterrânea é boa, no entanto, ao se infiltrar no terreno e percorrer pelos espaços vazios dos solos e das rochas, tende a se enriquecer no teor de sais dissolvidos, isto ocorre porque a água tem capacidade de dissolução muito elevada (é um solvente natural). Alguns destes constituintes iônicos estão presentes em quase todas as águas subterrâneas e em muitos casos, apresentam concentrações elevadas (SILVA; MIGLIORINI, 2014).

Os autores destacam, ainda, os parâmetros físico-químicos das águas subterrâneas do referido Estado do Mato Grosso, demonstrados no Tabela (2):

Tabela 2 - Parâmetros físico-químicos das águas subterrâneas do Mato Grosso.

Poço	Temp. (°C)	pH	Condut. Elétrica ($\mu\text{S/cm}$)	S.T. (mg/L)
P1	42	4,80	9,80	6,37
P2	41	5,00	50,80	33,00
P3	36	6,30	90,80	59,00
P4	47	6,50	82,90	53,80
P5	51	6,70	108,90	70,70
P6	39	7,20	130,00	84,50
P7	27	6,80	8,10	5,20
P8	30	6,00	11,00	7,15
P9	43	6,20	54,00	35,50
P10	40	6,50	57,00	37,00
P11	31	6,30	10,00	6,50

Fonte: Silva e Migliorini (2014).

Diante do que foi demonstrado, percebe-se que as reservas de águas renováveis no Brasil atingem, aproximadamente $42.289,2 \text{ m}^3/\text{s}$ ou $1.333.6 \text{ km}^3/\text{ano}$. O que equivale a 24% do escoamento dos rios em território nacional e 49% da vazão de estiagem. Quanto a disponibilidade hídrica subterrânea total, ou seja, a reserva explorável, esta equivale a 20% desse valor, ou seja, $8.457,8 \text{ m}^3/\text{s}$.

Tabela 3 - Disponibilidade hídrica per capita no Brasil.

Sistema Aquífero	Tipo ¹	Região Hidrográfica dominante	Área de recarga (km ²)	Espessura média (m)	Precipitação (mm/ano)	Reserva (m ³ /s)	
						Renovável	Explorável ²
Solimões	P, L	Amazônica	457.664	-	2.206	4.481,50	896,3
Alter do Chão	P, L		312.574	-	2.098	1.247,5	249,5
Boa Vista	P, L		14.888	-	2.450	462,0	32,4
Parecis	P, L		88.157	150	1.890	2.324,0	464,8
Jandaíra	CF	Atl. NE Ori.	11.589	600	823	30,5	6,1
Açu	P, C		3.674	200	881	10,5	2,1
Itapecuru	P, L	Tocantins/ Araguaia Parnaíba	204.979	100	1.836	1.074,0	214,8
Corda	P, L, C,		35.266	160	1.371	46,0	9,2
Motuca	P, L		10.717	---	1.470	15,0	3,0
Poti-Piauí	P, L, C		117.012	400	1.342	650,0	130,0
Cabeças	P, L, C		34.318	300	1.104	36,0	7,2
Serra Grande	P, L, C		30.450	500	943	63,5	12,7
Barreiras	P, L, C	Atl. Leste Atl SE Atl. NE Ori. Atl. NE Ocid. Tocantins/Araguaia	176.532	60	1.938	1.085,0	217,0
Beberibe	P, L, C	Atl. NE Ori.	318	100	2.073	2,0	0,4
Marizal	P, L, C	Atl. Leste São Francisco	18.797	200	514	36,0	7,2
São Sebastião	P, L, C	Atl. Leste	6.783	---	1.358	41,0	8,2
Inajá	P, L, C	São Francisco	956	300	722	1,5	0,3
Tacaratu	P, L	São Francisco Atl. NE Ori.	3.890	200	965	14,5	2,9
Exu	P, L		6.397	---	777	3,0	0,6
Missão Velha	P, L, C	Atl NE Ori.	1.324	130	1.115	1,0	0,2
Urucuia-Areado	P, L	São Francisco Parnaíba Tocantins/ Araguai	144.086	300	1.294	1.182,0	236,4
Bambuú	CF		181.868	---	1.165	201,5	40,3
Bauru-Caiuá	P, L	Paraná	353.420	200	1.457	2.939,5	587,9
Serra Geral	F	Paraná Atl. Sul	411.855	150	1.681	3.731,5	746,3
Guarani	P, L, C	Uruguai Paraguai	89.939	250	1.487	805,7	161,10
Ponta Grossa	P, L, C	Tocantins/ Araguaia Paraguai	24.807	300	1.543	143,0	29,1
Furnas	P, L, C		24.894	200	1.511	143,0	28,6
TOTAL			2.761.086			20.473,2	4.094,6

Fonte: Ferreira et al. (2009).

Assim, o Brasil possui um campo vasto de águas subterrâneas, acontece que

¹ P: Poroso; L: Livre; C: Confinado; F: Fraturado; CF: Cárstico-fraturado.

² 20% das reservas renováveis.

essas águas têm sido contaminadas inviabilizando seu uso, principalmente por efluentes, assim, busca-se um processo de tratamento para essas águas, sendo a osmose reversa considerada como a mais efetiva e econômica disponível atualmente.

3.1.4.1 Águas subterrâneas do Estado de Mato Grosso

No Estado de Mato Grosso, a Bacia dos Parecis é uma das maiores bacias intracratônicas brasileiras. Esta bacia encontra-se localizada nas regiões amazônica e Centro Oeste do Brasil, entre as bacias sedimentares do Solimões, Alto Tapajós e Paraná (PEIXOTO; VASCONCELOS; THOME FILHO, 2012).

A área ocupada por esta bacia é de 500.000 km² ocupando os estados de Rondônia e Mato Grosso. Possui mais de 6.000 m de sedimentos acumulados de idade paleozoica, mesozoica e cenozoica. Tendo em seus limites sudeste e nordeste, respectivamente, os arcos do Xingu e Rio Guaporé (PEIXOTO; VASCONCELOS; THOME FILHO, 2012).

O afloramento do Parecis se dá entre as cidades de Vilhena-RO (oeste), Brasnorte-MT (Leste) e Alto Paraguai-MT (centrosul), ocupando uma área aproximada de 160.201 km², o que equivale a cerca de 17,7% da área total do estado de Mato Grosso. Nota-se que este espaço físico formou-se no período Cretáceo Superior, sendo constituído por, principalmente, conglomerados e arenitos depositados em ambiente continental, tipo desértico, fluvial, lacustre e glacial, como, também, marinho raso (PEIXOTO; VASCONCELOS; THOME FILHO, 2012).

A partir desta elevação, surgem duas novas formações: Salto das Nuvens e Utiariti (PEIXOTO; VASCONCELOS; THOME FILHO, 2012).

No que se refere à formação dos Salto das Nuvens, esta possui conglomerados, intercalados com lentes de arenito vermelho, e arenitos bimodais. Para que ela pudesse chegar na condição atual, durante muito tempo foram depositados sedimentos em ambientes de leque aluvial e canal fluvial, com contribuição eólica (PEIXOTO; VASCONCELOS; THOME FILHO, 2012).

Já na formação Utiariti, esta é formada por arenitos com cores variadas, desde amarela, roxa a vermelha- compostos essencialmente de quartzo e feldspato. São maciços, mas podem localmente apresentar estratificação plano-paralela ou cruzada de pequeno porte. Sendo que a sua composição granulosa varia de fina a

média nas porções basais (PEIXOTO; VASCONCELOS; THOME FILHO, 2012).

A bacia dos Parecis encontra-se na parte centro oeste da província hidrogeológica, onde há predominância de aquíferos fraturados em terrenos granito-gnáissicos (Complexo Xingu), em coberturas metassedimentares e em rochas vulcânicas ácidas (vulcanismo Uatumã). Esta bacia pertence a um subgrupo de bacias sedimentares, constituído aquíferos de altas vazões, com produções entre 100 e 200 m³/h e com águas de boa qualidade química (PEIXOTO; VASCONCELOS; THOME FILHO, 2012).

Nota-se que mais de 270 poços tubulares aproveitam as águas subterrâneas que circulam na bacia Parecis e na Formação Ronuro. De acordo com Peixoto, Vasconcelos e Thomé Filho (2012), a Formação Salto das Nuvens é a que mais apresenta poços cadastrados, com aproximadamente 46,5% do total, acompanhado pelo aquífero Ronuro, que apresenta cerca de 44,7%. Sendo a maior parte destes poços utilizados para fins domésticos.

A respeito do Aquífero Utiariti, este o ocupa uma área que vai desde o centro oeste do Mato Grosso, entre os municípios de Juína, Brasnorte, Sapezal, Campos de Júlio, Comodoro, Tangará da Serra, Campo Novo dos Parecis, Nova Lacerda, Barra dos Bugres e Pontes e Lacerda. Registram-se ainda ocorrências na porção leste do estado, nos municípios de São Jose do Rio Claro, Diamantino e até Paranatinga, nas proximidades das cabeceiras do rio Xingu (PEIXOTO; VASCONCELOS; THOME FILHO, 2012).

Estes poços apresentam vazões que variam de 2,28 a 158,4 m³/h, com média de 20,95 m³/h, sendo que a vazão específica regional gira em torno de 1,77 m³/h. lembrando-se que ocupam uma profundidade que varia entre 55 e 180 m (PEIXOTO; VASCONCELOS; THOME FILHO, 2012).

O Aquífero Salto das Nuvens, que ocupa a porção central do estado de Mato Grosso. O município de Nova Mutum comporta grande maioria dos poços instalados, com 29,6%, seguido 14,0% (PEIXOTO; VASCONCELOS; THOME FILHO, 2012).

A respeito do aquífera Salto das Nuvens, estes poços apresentam profundidades que vão de 10 a 152 metros e vazões que vão desde 0,77 até 110,97 m³/h, com média de 20,48 m³/h.

Tabela 4 - Resumo dos dados do aquífero Salto das Nuvens.

PARÂMETRO	INTERVALO	MÉDIA ARITMÉTICA
Profundidades (m)	10 – 152	69,02
Vazão (m ³ /h)	0,77 – 110,97	20,48
Vazão específica (m ³ /h)	0,15 – 11,44	2,01
NE (m)	2,04 - 51,8	17,63

Fonte: Peixoto; Vasconcelos; Thome Filho, 2012.

No Aquífero Ronuro encontra-se em uma posição geográfica que o torna muito importante durante as etapas dos aquíferos subjacentes, além de alimentar a sistema hidrológico do alto Xingu. Os seus poços apresentam profundidades que variam entre 18 e 140 m, totalizando mais de 6000 m perfurados no aquífero. As vazões de exploração variam entre 1 e 105 m³/h e média de 10,42 m³/h, com vazão específica regional em torno de 1,5 m³/h. O valor médio reduzido para a vazão é explicado pelo fato de que a maior parte dos poços (78%) não alcançam 10 m³/h (PEIXOTO; VASCONCELOS; THOME FILHO, 2012).

Tabela 5 - Resumo dos dados do aquífero Ronuro.

PARÂMETRO	INTERVALO	MÉDIA ARITMÉTICA
Profundidades (m)	18 -140	50,08
Vazão (m ³ /h)	0,6 – 105	10,51
Vazão específica (m ³ /h)	0,053 – 8,8	1,52
NE (m)	0,85 – 32	13,13

Fonte: Rio de Janeiro: Peixoto; Vasconcelos; Thome Filho, 2012.

Quanto às características químicas das águas do aquífero Utiariti, elas apresentam uma tendência ácida, com pH entre 4,1 e 7,01 e sua condutividade elétrica varia entre 5 e 12 μ S/cm. Conforme pode ser visto na Tabela (6):

Tabela 6 - Dados químicos do aquífero Utiariti.

PARAMETROS	Nº DE POÇOS	VALORES (mg/L)	
		INTERVALO (CONCENTRAÇÃO >VMP)	MÉDIA
Cloreto	02	2,01 – 2,01	2,01
Ferro Total	17	0 – 0,2	0,16
Manganês	07	0 – 0,002	0,001
Sólidos Totais	10	3 – 80	21,9

Fonte: Rio de Janeiro: Peixoto; Vasconcelos; Thome Filho, 2012.

Conforme a Resolução CONAMA nº 396/2008, que descreve a respeito da classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas, as águas do encontram-se dentro dos valores máximos permitidos (VMP) estabelecidos para consumo humano e animal, com exceção da concentração de ferro total (PEIXOTO; VASCONCELOS; THOME FILHO, 2012).

No Aquífero Salto das Nuvens, as águas apresentam um pH variando entre 3,46 e 7,39, e uma condutividade elétrica entre 1 e 40 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Na Tabela (7) os parâmetros inorgânicos são confrontados com os valores máximo permitidos indicado pelo CONAMA nº396/2008, sendo que os valores elevados observados se encontram entre parênteses (ferro total) e (nitrato). Os demais parâmetros estão dentro dos limites definidos na resolução (PEIXOTO; VASCONCELOS; THOME FILHO, 2012).

Tabela 7 - Dados químicos do aquífero Salto das Nuvens.

PARAMETROS	Nº DE POÇOS	VALORES (mg/L)	
		INTERVALO (CONCENTRAÇÃO >VMP)	MÉDIA
Cloreto	76	0 - 49	13,10
Cobre	06	0 - 0,01	0,002
Ferro Total	104	0 - 0,88 (1,19 - 7,52)	0,07
Fluoreto	02	0 - 0,98	0,49
Manganês	08	0 - 08	0,012
Nitrato	32	0 - 4 (25)	0,46
Nitrito	06	0,002 - 0,043	0,011
Sódio	05	0,2 - 2,1	0,62
Sólidos Totais	76	01, - 114	25,06
Zinco	06	0 - 0,05	0,01

Fonte: Rio de Janeiro: Peixoto; Vasconcelos; Thome Filho, 2012.

A respeito do Aquífero Ronuro, suas águas tendem a serem ácidas, chegando a atingir o valor de 8,51 para o pH. A sua condutividade elétrica é também elevada, entre 72 e 91 $\mu\text{S}/\text{cm}$, sendo que a média regional é de 17,5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (PEIXOTO; VASCONCELOS; THOME FILHO, 2012).

A alcalinidade total varia entre 6 e 32 mg/L, enquanto que a dureza total se encontra entre 0 e 26 mg/L. Na Tabela (8) descreve-se os teores de íons possíveis de serem encontrados nestas águas:

Tabela 8 - Dados químicos do aquífero Ronuro.

PARAMETROS	Nº DE POÇOS	VALORES (mg/L)	
		INTERVALO (CONCENTRAÇÃO >VMP)	MÉDIA
Cloreto	76	0 - 45	13,80
Cobre	02	0 - 0,01	0,005
Ferro Total	118	0 - 0,30 (1,089)	0,07
Fluoreto	02	002 - 0,82	0,42
Manganês	11	0 - 0,01 (0,2)	0,031
Nitrato	41	0 - 4	1,6
Sódio	02	0 - 4,8	2,4
Sólidos Totais	79	2 - 111	30,65
Zinco	02	0 - 0,01	0,005

Fonte: Rio de Janeiro: Peixoto; Vasconcelos; Thome Filho, 2012.

3.2 OSMOSE REVERSA

A osmose natural é um fenômeno que ocorre em vários sistemas de natureza, nas células do corpo humano. A osmose é responsável pelo equilíbrio de sais nas células, a membrana separa o meio intracelular do meio extracelular e permite a passagem de substâncias em ambos os sentidos (DA SILVA; DOS SANTOS, 2017).

O processo de osmose foi descoberto há mais de duzentos anos atrás por Abbè Nollet, ao observar o deslocamento da água através de uma bexiga de porco que tampava a boca de uma jarra contendo “espírito de vinho” (CUNHA, 2015).

Após esta descoberta, somente em 1855, ou seja, cem anos depois, que foi publicado, por Fick, a lei da difusão, que até nos dias atuais tem servido de parâmetro para descrever muitos fenômenos que ocorrem em membranas. Mais tarde, Graham estudou a permeação de gases através de borrachas e efetuou as primeiras medidas experimentais de diálise utilizando membranas sintéticas (CUNHA, 2015).

Para Cunha (2015), o processo de osmose acompanha os seres vivos desde a sua origem, sendo aplicado, também, durante o processo evolutivo, tendo em vista que além de os seres vivos terem desenvolvido os meios de evitar os problemas causados pela osmose (inchação ou dessecamento), também desenvolveram processos que aproveitam a dinâmica osmótica nos fenômenos biológicos.

Por outro lado, Da Silva e Dos Santos (2017), destacam que a palavra osmose somente foi introduzida no dicionário no final do século XIX. Tendo origem na palavra grega *osmós*, significando impulso, a palavra osmose, desde então, tem sido empregada por muitos pensadores ao longo da história como uma das menções da palavra vida.

Em se tratando do processo de Osmose Reversa (R.O.), este processo consiste na separação da água dos sais minerais. Esta processo apresenta duas soluções, uma com concentração maior de sais em relação à outra concentração, diferentemente da osmose natural, o solvente da solução mais concentrada tende a ir para solução menos concentrada (DA SILVA; DOS SANTOS; 2017).

Isto ocorre, por causa da pressão mecânica ser maior do que a pressão osmótica aplicada sobre a solução mais concentrada. Devido a pressão aplicada, as moléculas de água passam pela membrana semipermeável separando a solução em duas partes distintas: permeado e rejeito, este último percorre a membrana sem atravessá-la para formar o que deve ser desprezado, já o permeado é a parte da solução que atravessa a membrana contendo alto grau de pureza. O processo de tratamento remove grande parte dos componentes orgânicos e até 99% dos sais dissolvidos (DA SILVA; DOS SANTOS; 2017).

Segundo Cunha (2015), foi a partir do final da década de 1950 e começo da década de 1960 que a tecnologia de osmose reversa foi introduzida nas indústrias como operação unitária, para produzir água e energia, controlar poluição e recuperar materiais em geral.

A diferença de nível entre as duas soluções, resultante da passagem de água pura através de uma membrana semipermeável de uma solução salina diluída para uma solução mais concentrada, é conhecida como pressão osmótica de equilíbrio (CUNHA, 2015).

Para este autor, o processo de separação por membranas não pode ser comparado com o processo de filtração convencional pelos seguintes motivos:

- a) o fluxo de água é paralelo às membranas, ou seja, não é necessário que todo efluente passe através da membrana;
- b) as membranas são eficientes para a separação de partículas sólidas de pequenas dimensões e compostos orgânicos e inorgânicos dissolvidos;
- c) a pressão de operação dos sistemas de separação por

membranas é significativamente maior que nos processos de filtração convencional.

Para tanto, os mecanismos de separação por membranas de osmose reversa operam com fluxo paralelo às membranas, proporcionando duas correntes distintas: sendo uma que passou através da membrana e da qual foram removidos os contaminantes, esta corrente é chamada de Permeado, e a outra que apresenta uma maior parte dos contaminantes que inicialmente estavam presentes (CUNHA, 2015).

A Figura (4) mostra um modelo da membrana de sistema de osmose reversa.

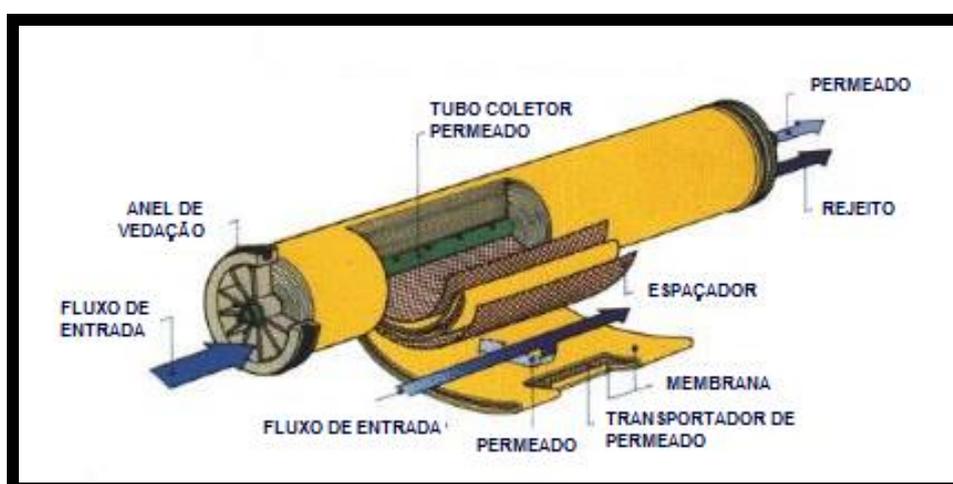


Figura 4 – Modelo da membrana de sistema de osmose reversa.
Fonte: SILVA e Santos, 2017.

Conforme pôde ser observado na Figura (4), trata-se de uma camada de barreira densa, constituída com polímeros, por onde a maior parte da separação acontece. Esta membrana, na maioria dos casos, é feita para permitir que passe somente água através dessa camada densa, enquanto previne a passagem de solutos (SILVA; SANTOS, 2017).

De acordo com Silva e Santos (2017), os modelos de membranas de osmose reversa, disponíveis no mercado, apresentam um formato em forma de um sanduíche de membranas, justa posicionadas em espiral, permear o fluxo da água purificada através das membranas e reter a solução iônica para descarte, conforme pode ser observado na Figura (5).

Sua composição é normalmente de poliamida, apresentando poros em torno

de 0,0005 micrômetros (2 milhões de vezes menor que 1 milímetro), sendo muito eficientes para remover partículas maiores e microorganismos (SILVA; SANTOS, 2017).

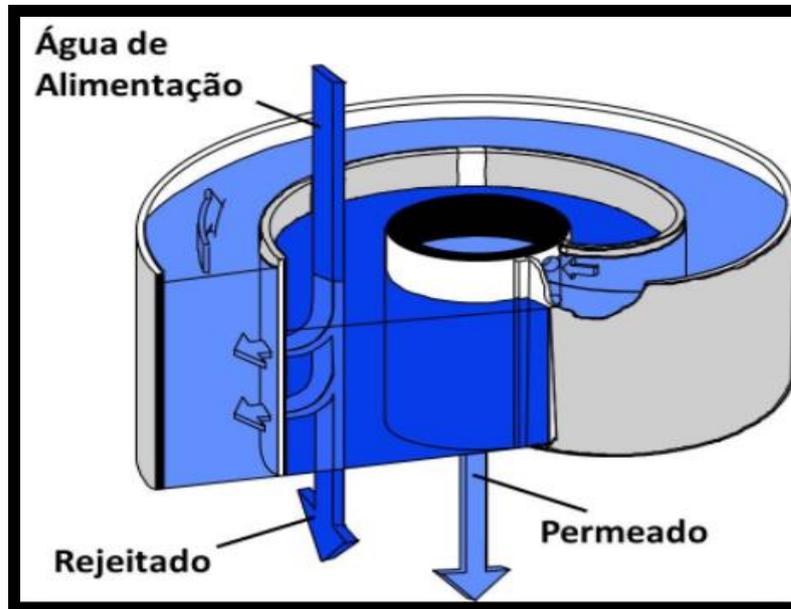


Figura 5 – Formato de uma membrana dos sistema de osmose reversa.
Fonte: SILVA e Santos, 2017.

Durante este processo, faz-se o uso da pressão como força motriz para a separação dos sais dissolvidos. Tendo em vista que o processo de osmose reversa dessaliniza e remove compostos orgânicos e inorgânicos, conforme pode ser observado na Figura 6 (CUNHA, 2015).

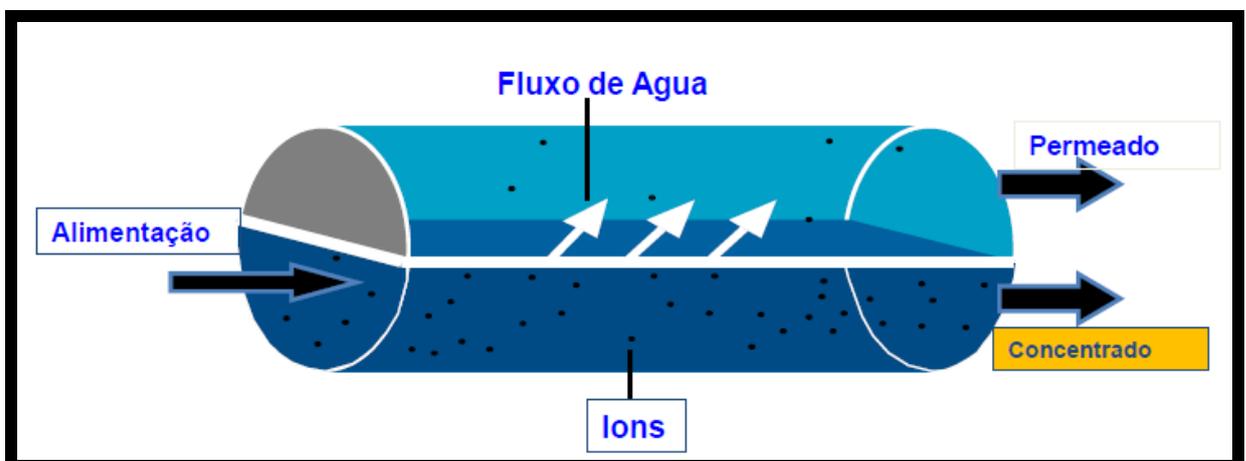


Figura 6 – Separação por membranas de osmose reversa.
Fonte: Cunha, 2015.

Osmose Reversa (OR) é uma técnica de desmineralização baseada em

membranas, que é utilizada para separar sólidos dissolvidos de soluções. As membranas atuam como uma barreira semipermeável que permite a passagem de algumas espécies (por exemplo, água) e, por outro lado, seletivamente, retém outras espécies dissolvidas (por exemplo, íons) (DA SILVA; DOS SANTOS, 2017).

A pressão osmótica, conforme Soares et al. (2006), é a diferença de nível entre as duas soluções após se atingir o equilíbrio. Como neste caso a água pura se estaria movimentando em sentido contrário ao sentido natural da osmose dá-se, a este processo, o nome de osmose reversa ou osmose inversa.

Para a dessalinização por osmose reversa, portanto, dois aspectos são fundamentais, de acordo com Soares et al. (2006): a existência de fonte de energia para vencer o potencial osmótico da água salina, ou seja, para 'inverter a direção' que ocorreria na osmose, e a qualidade da membrana semi-permeável que irá separar os sais. Para quantificar e qualificar a água potável e rejeito diversas equações são utilizadas.

O sistema de osmose reversa é um processo que tem a capacidade de remover sólidos dissolvidos na água com eficiência altíssima. É possível obter de forma simples e contínua, água puríssima com salinidade próxima a água destilada.

Os usos da osmose reversa no tratamento de água são diversos, segundo Soares (2006):

- Dessalinização de água do mar: Tanto para consumo humano quanto para outros processos, a membrana de Osmose Reversa pode reduzir a concentração de cloreto de sódio de 35.000 mg/L para 350 mg/L.
- Irrigação: Um dos problemas da agricultura é a acumulação de sais no solo em função da irrigação com água de rios ou poços. A partir de certo patamar os sais tornam-se nocivos às plantações. A Osmose Reversa é capaz de remover este excesso de sais de forma economicamente viável.
- Alimentação de caldeiras: Caldeiras exigem água puríssima, pois a evaporação da água causa a incrustação da superfície dos tubos pelos sólidos presentes na mesma, reduzindo a transferência de calor, aumentando o consumo de combustível e o risco de explosões. A osmose reversa, assim como a troca iônica, têm sido o tratamento mais utilizado nestes casos.

- Produção de produtos químicos: hospitais, conglomerados farmacêuticos e laboratórios utilizam o processo de Osmose Reversa para garantir a máxima pureza em seus produtos. Processos de hemodiálise são alimentados com água desmineralizada ou destilada.

Comparada ao processo de troca iônica, muito utilizado para o abrandamento (remoção de dureza) de águas industriais, a osmose reversa tem a vantagem de dispensar a etapa de regeneração, um processo que interrompe a produção e ao mesmo tempo consome uma grande quantidade de soluções químicas (ácidos e bases fortes). Como desvantagem existe a geração de um fluxo de rejeito, solução com elevadas concentrações de sais em volumes de até 50% da alimentação total (SOARES et al., 2006).

O princípio de funcionamento dos sistemas de osmose reversa baseia-se na inversão do fenômeno do equilíbrio osmótico, que consiste na geração de um gradiente de pressão para levar um solvente da fase mais concentrada para a menos concentrada através de uma membrana semipermeável, conforme pode ser observado na Figura (7):

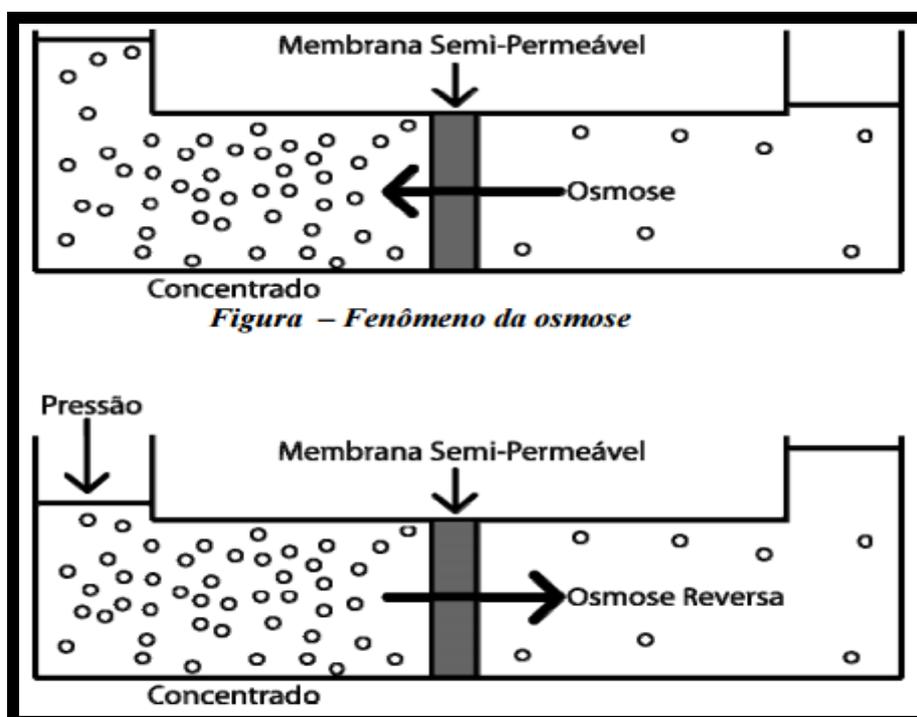


Figura 7 - Funcionamento osmose reversa.
Fonte: Oristanio et al. (2006).

As membranas semipermeáveis de osmose-reversa são compostas de três camadas. A primeira é um suporte de poliéster, que garante a resistência mecânica do conjunto. A segunda é uma camada de polisulfona com característica de membrana de ultrafiltração, cujo objetivo é funcionar como suporte para a fixação da terceira camada, que é a membrana de osmose, uma película ultrafina de poliamida, que estabelece a barreira de rejeição dos sais. Todo este conjunto possui cerca de 1/10 de milímetro e consistência e aparência de uma folha de papel.

Ao realizar a comparação entre os procedimentos de purificação de água através da osmose reversa, da deionização e do destilador, conforme pode ser observado no Tabela (9):

Tabela 9 – Características técnicas da osmose reversa.

	OSMOSE REVERSA	DESTILADOR X DEIONIZADOR
Consumo de energia	35 W	3500W + 6 W
Desperdício de água	10 lts/h	200 lts/h
Produção de água	10 lts/h	5 lts/h
Condutividade	< 1 us	<20 us / < 1 us
Controle Microbiológico	Membrana de Osmose + U.V	Não tem

Fonte: Majop, 2017.

No processo de destilação, o trabalho de purificação da água tem início com o aquecimento da água em um compartimento que, ao evaporar, direciona o vapor condensado para outro compartimento, enquanto que os íons e outros componentes orgânicos contidos na água não evaporam e permanecem onde estão. Para tanto, neste processo remove-se tanto os íons, como também os outros contaminantes presentes na água, como bactérias, endotoxinas e matéria orgânica. No entanto, a água não fica totalmente pura pois quando em contato com as superfícies de aquecimento e resfriamento, carrega consigo “partes” destes materiais e se contamina (HARADA; RIBEIRO; ASSIS, 2008).

Para que se adquira, através da destilação, um volume considerável de água destilada, precisa-se de uma grande quantidade de muita água comum, o que acaba proporcionado um grande desperdício de água potável e um alto consumo de energia (HARADA; RIBEIRO; ASSIS, 2008).

A respeito do processo de deionização este, segundo Harada, Ribeiro e Assis (2008), é realizado em colunas de troca iônica. Nas colunas, as micro esferas entram em contato com a água, liberam íons de hidrogênio (H^+) (resina catiônica) e hidroxilas (OH^-) (resina aniônica) ligados de forma instável, pelos íons mais

altamente carregados presentes na água, como o íon cálcio (Ca^{2+}), íon magnésio (Mg^{2+}) que grudam nas resinas. Com isso, removem-se os cátions e ânions dissociados na água, além dos nitratos, cálcio, magnésio, cádmio, bário, chumbo e algumas formas de rádio.

Apesar de ser quimicamente pura, a água obtida através do processo de deionização pode ser facilmente contaminada por bactérias de baixo requerimento nutritivo, tais como: bactérias gram-negativas não fermentativas e *P. aeruginosa* (HARADA; RIBEIRO; ASSIS, 2008).

Para Farrugia (2013), dos modelos de sistemas de purificação de água existentes no mercado, o de Osmose Reversa é considerado como sendo o mais ecologicamente correto, apresentando um baixíssimo consumo de água e de energia elétrica. E isso é possível pelo fato da Osmose Reversa por si só ser suficiente para produzir uma água de boa qualidade, ao passo que no outro sistema, para se obter o mesmo resultado, precisa-se de um destilador e um deionizador trabalhando juntos.

3.2.1 Osmose Reversa no tratamento de águas subterrâneas

Devido à má distribuição de água potável no país e a preocupante tendência de escassez de água no mundo, o sistema de osmose reversa é uma opção viável para a população. Com o sistema se pode obter água potável resultante do tratamento de águas pluviais ou águas salobras, com a separação dos minerais e poluentes presentes nessa água e com a obtenção de água pura, sendo possível a adição de quantidades adequadas de cálcio, flúor, cloro entre outros minerais essenciais para o consumo humano desta água, tratando-a para que seja insípida, inodora e incolor.

Segundo Da Silva e Dos Santos (2017) a Osmose Reversa encontra-se em uso no Nordeste do Brasil, para o tratamento da água salobra de poços tubulares profundos em Fernando de Noronha onde as dessalinizações transformam água do mar em água doce.

Em 1990, nos Estados Unidos, a água subterrânea forneceu 39% da água empregada para o abastecimento público e 96% daquela extraída por meio de sistemas domésticos individuais. Na Europa, a proporção de água potável pública extraída de aquíferos atinge quase 100%, na Dinamarca, Áustria e Itália, chegando a

cerca dos dois terços na Alemanha, Suíça e Países Baixos, e menos de um terço na Grã-Bretanha e Espanha. Cerca de um terço da população mundial vive em países que já apresentam alguma deficiência no suprimento de água doce; esta proporção atingirá provavelmente dois terços no ano de 2025, segundo relatório das Nações Unidas (GHANEM, 2009).

No Brasil, estima-se que há cerca de 111 trilhões e 661 milhões de metros cúbicos de água subterrânea, tornando o território brasileiro a maior reserva de água doce do planeta. Para tanto, quantifica-se que, apenas na região metropolitana de São Paulo, três milhões de habitantes são abastecidos por água de poços profundos. No Nordeste existem importantes plantações irrigadas com água de poços profundos como as culturas da uva e cítricos (GHANEM, 2009).

No Paraná, cerca de 46% do estado é abastecido por captação subterrânea. Estados que possuem extensas coberturas sedimentares como o Amazonas, Pará, Maranhão, Piauí, Tocantins, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Santa Catarina, Rio Grande do Sul e sul de Goiás têm na água subterrânea, a alternativa mais viável de abastecimento de suas comunidades (GHANEM, 2009).

O sistema de osmose reversa está sendo analisado e utilizado positivamente nos diversos setores: industrial, hospitalar, ambiental e social. A sua utilização visa a manutenção e conservação do bem mais precioso que o planeta possui, a água potável.

A quantidade de água doce existente no planeta, de acordo com a Organização das Nações Unidas (ONU), é de apenas 2,5%. O fato de o Brasil ter o maior reservatório do mundo não o redime de mal uso da água doce em todas as regiões do país. Do volume total de água doce, 70% concentram-se na Amazônia, região com menos de 7% da população nacional e apenas 3% de volume de água doce na região nordeste, com aproximadamente 55% da população (DA SILVA, 2010).

O sistema de osmose reversa, segundo Farrugia (2013), vem a ser uma opção pontual para sanar o problema do uso deficitário da distribuição de água no país para uso nas indústrias e instituições. O sistema de Osmose Reversa além de preservar os recursos naturais, ajuda a fortalecer a consciência sustentável da população.

Para que os sais presentes na água possam ser removidos com recurso à dessalinização é necessário o envolvimento de tratamentos e processos eficazes

para esse efeito. Para além do teor em sais, a água pode conter sólidos, contaminantes e organismos vivos. Dependendo da origem da água, as etapas e tecnologia de dessalinização podem variar e alterar todo o sistema de tratamento (FOGAÇA, 2017).

As unidades de dessalinização podem receber água de várias origens, sejam superficiais, como oceanos, mares, rios, entre outros, ou subterrâneas, como aquíferos, poços, ou outro tipo de galerias de infiltração, o que irá determinar o grau de salinidade presente (MOREIRA; BEZERRA, 2016).

A dessalinização também tem os seus impactos a nível socioeconômico, tais como, garantia ao acesso de água potável para abastecimento das comunidades, e conseqüentemente, o desenvolvimento industrial, agrícola e turístico da região onde o sistema está instalado (MOREIRA; BEZERRA, 2016).

As águas residuais são descarregadas de domicílios, estabelecimentos comerciais e indústrias por meio de esgotos sanitários.

Os materiais mais comuns encontrados em águas residuais domiciliares, que podem causar danos para os cursos de águas naturais ou criar problemas para a saúde humana são: materiais orgânicos, medidos pela DBO; nitrogênio (N); fósforo (P); sólidos suspensos (SS) e organismos patogênicos, estimados por coliformes.

A etapa preliminar consiste na remoção de sólidos de maior tamanho. Os demais sistemas de tratamento envolvem: processos físicos no primário e processos biológicos no secundário; já no tratamento terciário as etapas podem ser: físicos, biológicos ou químicos. O tratamento e descarte tratam da coleta, estabilização e descarte dos sólidos removidos por outros processos. É no tratamento terciário que se realiza a remoção de nutrientes (VESILIND; MORGAN, 2013).

O contaminante inorgânico de maior preocupação em águas subterrâneas é o íon nitrato, NO_3^- , que normalmente ocorre em aquíferos de zonas rurais e suburbanas. Aquíferos mais profundos são menos contaminados por causa de sua profundidade, porque sua localização está menos sujeita a grandes fontes de contaminação e porque a remediação natural pela desnitrificação nas condições de baixa quantidade de oxigênio pode ocorrer (VESILIND; MORGAN, 2013).

O nitrato em águas subterrâneas origina-se principalmente de quatro fontes: da aplicação de fertilizantes com nitrogênio, dos produtos inorgânicos e de esterco animal, em plantações; cultivo do solo; esgoto humano depositado em sistemas sépticos e deposição atmosférica (SILVA; BROTTTO, 2014).

As áreas agrícolas podem ter problemas de água associados com a aplicação generalizada de fertilizantes, herbicidas e pesticidas. Embora, já se tenha a algum tempo substituído os compostos orgânicos de vida longa, por aqueles que se decompõem com relativa rapidez no meio ambiente; alguns herbicidas e pesticidas ainda podem se acumular no subsolo, ameaçando os poços em áreas rurais (SILVA; BROTTTO, 2014).

Uma preocupação recente trata do aumento dos níveis de íon nitrato na água potável, particularmente em água de poços em localidades rurais, devido à lixiviação de terras cultivadas para os rios e correntes de água. Dezenas de milhões de toneladas de nitrogênio são aplicadas anualmente como fertilizantes na agricultura, e alguns outros milhões com a produção de esterco. Inicialmente o resíduo animal oxidado (esterco), o nitrato de amônio, NH_4NO_3 , não absorvido e outros fertilizantes com nitrogênio foram consideradas as fontes de contaminação, de nitrogênio em águas subterrâneas, já que o nitrogênio reduzido, não utilizado pelas plantas, é convertido naturalmente a nitrato, o qual é altamente solúvel em água e pode facilmente ser lixiviado para a água subterrânea (SILVA; BROTTTO, 2014).

A desnitrificação de nitrato para nitrogênio gasoso, N_2 , e o consumo de nitrato pelas plantas podem ocorrer em áreas florestadas que separam as fazendas de agricultura das correntes de água, portanto, baixando o risco de contaminação em áreas com significativa vegetação. Áreas rurais com alto aporte de nitrogênio, solos bem drenados e de pouca vegetação são um risco particular para a contaminação de nitrato em águas subterrâneas (SILVA; BROTTTO, 2014).

A deposição atmosférica de nitrato resulta de sua produção na atmosfera quando ocorrerem emissões de NO_x de veículos e de plantas de geração de energia, e de sua fonte natural a partir de tempestades, em que são oxidados no ar a ácido nítrico e então neutralizados a NH_4NO_3 (SILVA; BROTTTO, 2014).

Em áreas urbanas, o uso de fertilizantes de nitrogênio colocados sobre gramados domésticos, campos de golfe, parques, contribui para o nitrato na água subterrânea. Fossas sépticas e sistemas de fossa também contribuem significativamente nos locais onde estão presentes (SILVA; BROTTTO, 2014).

3.3 TORRES DE RESFRIAMENTO

Na torre de resfriamento, o resfriamento se dá através da evaporação de parte da água que recircula na torre. A evaporação da água, ou seja, a passagem do estado líquido para o estado gasoso ocasiona a redução da temperatura da água que escoar ao longo da torre de resfriamento. Isso porque a água para evaporar precisa de calor latente, e esse calor é fornecido pelo próprio ar em escoamento, sua temperatura diminui e a água em contato com o ar também tem a temperatura diminuída. A passagem da água do estado líquido para o estado gasoso ocorre acontece por que as duas fases em contato tendem a entrar em equilíbrio. A evaporação de parte da água é responsável por aproximadamente 80% do resfriamento da água. A diferença de temperatura entre o ar e a água é responsável pelos outros 20% do resfriamento (VIANA, 2010).

As indústrias necessitam, de processo de resfriamento por transferência de calor. Em geral, utiliza-se água para o resfriamento, em um circuito semi-aberto nas torres de resfriamento. Assim, se existe água o suficiente e temperatura adequada, não gerando problemas econômicos ou ecológicos, basta utiliza-la de maneira contínua, retirando-a de um rio, por exemplo (IOKAWA, 2012).

Para que isso ocorra, as torres de resfriamento apresentam as seguintes partes integrantes:



Figura 8 - Partes da Torre de Resfriamento.
 Fonte: Lima Junior, 2011.

Conforme pôde ser observado na Figura (8), a torre de resfriamento é constituída por várias partes, sendo que cada uma delas é responsável por uma etapa do trabalho com a água e o ar.

As variáveis de uso comum na especificação de uma torre são: carga térmica a ser retirada, vazão de circulação da água, diferença de temperatura da água na entrada e na saída da torre (*range*) e a diferença entre a temperatura da água que sai da torre e a temperatura de bulbo úmido do ar (*approach*) (IOKAWA, 2012).

De acordo com Treybal (1981, p. 88),

a transferência de massa pode acontecer simultaneamente com a transferência de calor, como resultado de uma diferença de temperatura imposta por fora ou devido à absorção ou evolução do calor, o que geralmente acontece quando uma substância é transferida de uma fase para outra. Nesses casos, dentro de uma fase, o calor transferido é o resultado da condução (convecção) devido à diferença de temperatura que ocorreria na ausência de transferência de massa, mas também inclui calor sensível levado pela matéria em difusão.

Os métodos para expor a água à corrente de ar são numerosos, tendo cada um suas vantagens específicas que devem ser consideradas de acordo com a aplicação e o rendimento requerido em cada caso.

As torres de resfriamento podem ser classificadas como torres diretas (torres abertas) e torres indiretas (torres fechadas), conforme o tipo de contato existente entre as correntes de água e o ar.

No caso das torres diretas, a troca de calor entre a água e o ar acontece no seu recheio, conforme pode ser observado na Figura (09). Neste tipo de torre a água é resfriada pelo ar em escoamento contra corrente através do recheio. Este tipo de contrato entre a água e o ar oferece uma alta eficiência de transferência de calor (SAMPAIO, 2013).

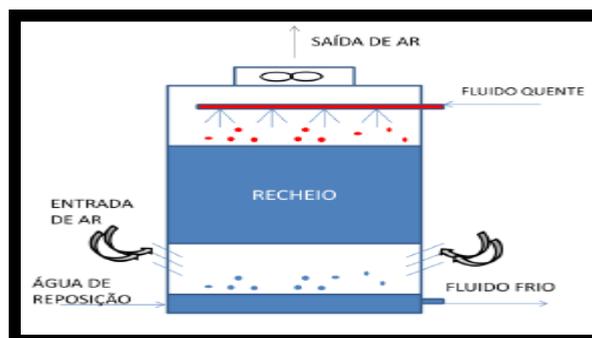


Figura 9 - Torre direta.
Fonte: Da Silva, 2015.

Sobre as torres Indiretas, elas podem possuir dois tipos de escoamentos (sem que haja a pulverização de água em torres hiperbólicas), ou três escoamentos diferentes (onde o fluido quente é transportado em um feixe de tubos para ser resfriado; o ar no sentido ascendente; e a água fria que escorre por um circuito fechado e molha o exterior de feixe de tudo, com o propósito de resfria-los (DA SILVA, 2015).

A Figura (10) mostra uma torre indireta com três escoamentos. Nota-se que devido a ausência de contato entre o fluido de trabalho e a atmosfera, torna-se possível fazer uso de diversos tipos de fluido, além de proporcionar uma significativa redução do consumo de água.

Conforme a forma de alimentação de ar, as torres de resfriamento podem ser denominadas de torres com ventilação natural e torres de tiragem mecânica.

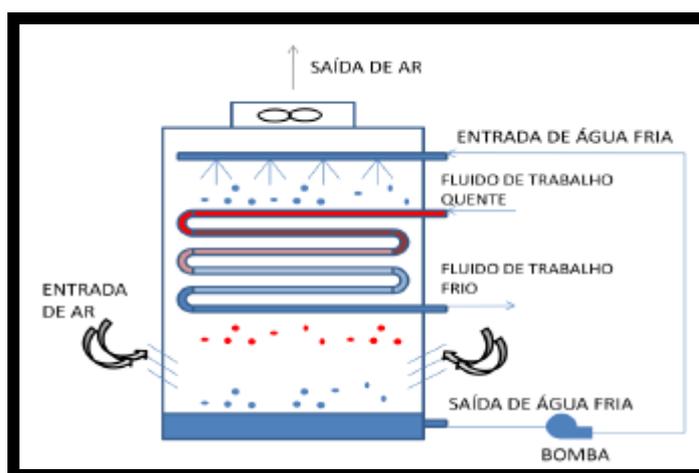


Figura 10 - Torre indireta.
Fonte: Da Silva, 2015.

No caso das torres com ventilação natural, o movimento do ar acontece conforme a direção do vento ou conforme a diferença de densidade do ar (LIMA JUNIOR, 2011).

As torres que fazem uso do vento, além do efeito dos bicos pulverizadores para o movimento do ar recebem o nome de torres atmosféricas. Sendo torres que, através de suas venezianas, facilitam a passagem do ar.

Nas torres atmosféricas, o equipamento destinado para promover o resfriamento da água permite que a água escoar em corrente cruzada em relação ao movimento horizontal do ar, o que produz efeito de contracorrente em virtude das

correntes de convecção produzidas pela água quente. As suas principais características são maior tempo de vida, não produz recirculação do ar e a torre precisa ser localizada em um espaço amplo (IOKAWA, 2012).

De acordo com Mancuso (2001), desde a Segunda Guerra Mundial, estes tipos de torres foram substituídas pelas torres de tiragem mecânica.

Há, também, as torres hiperbólicas, que utilizam a densidade do ar para realizar o movimento do ar. Neste sistema, com a entrada do ar quente, por possuir uma densidade menor, o ar tende a subir, e uma camada de baixa pressão é formada na base da torre, auxiliando na entrada de uma nova massa de ar frio, conforme pode ser observado na Figura (11).

Este tipo de torre apresenta algumas vantagens como: um elevado tempo de vida útil e a capacidade de resfriar uma grande quantidade de água. Mesmo tendo uma baixa eficiência e tendo um alto custo inicial, essas torres apresentam um baixo custo operacional (SAMPAIO, 2013).

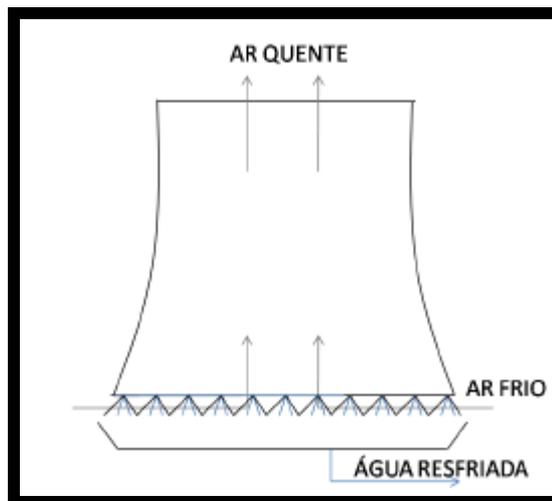


Figura 11 - Torre de tiragem hiperbólica.
Fonte: Da Silva, 2015.

Sobre as torres de tiragem mecânica possuem uma vazão de ar controlada por um ventilador, sendo que a aspiração do ar pode acontecer de forma induzida ou forçada. As torres de tiragem induzida são as que possuem um ventilador localizado na saída do ar. No caso das torres de tiragem forçada, estas recebem tal denominação pelo fato do ar ser aspirado por um ventilador localizado em sua base (LIMA JUNIOR, 2011).

A Figura (12) mostra as torres de tiragem mecânica induzida e forçada.

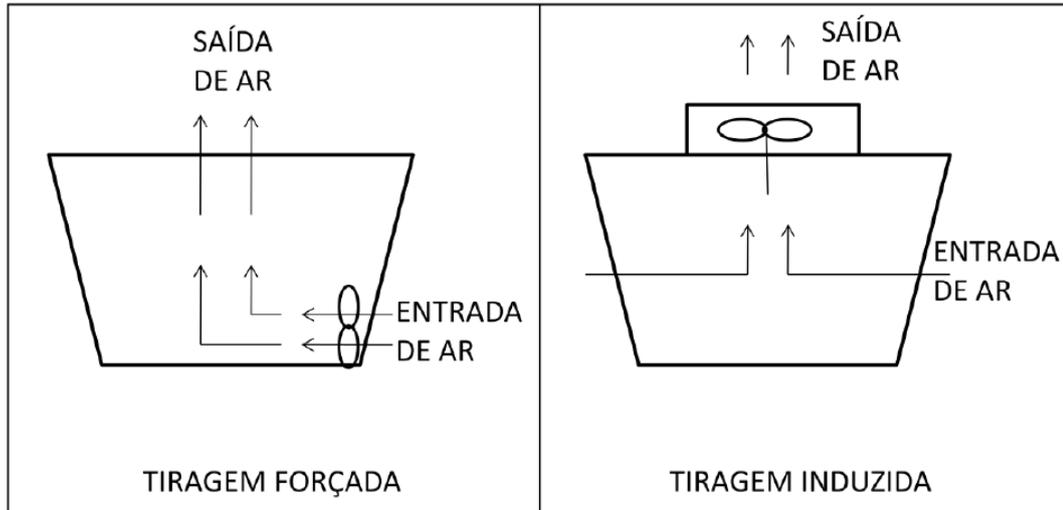


Figura 12 - Torre de tiragem mecânica.
Fonte: Da Silva, 2015.

Por sua vez, as torres de tiragem mecânica forçada, são aquelas em que os ventiladores são posicionados na entrada de ar, de modo que o forçam através do enchimento.

Nas torres de tiragem mecânica induzida os ventiladores são posicionados na saída de ar, na parte superior da torre, sendo possível instalar grandes ventiladores, de modo que sejam mantidos velocidades e níveis de ruídos muito baixos (SAMPAIO, 2013).

Quando comparadas com as torres com ventilação natural, nota-se que as torres de tiragem mecânica possuem características de serem mais compactas e mais eficientes. Além de necessitarem de ocuparem um espaço menor, elas apresentam maiores custos operacionais.

Na torre com escoamento cruzado (*cross-flow*), Figura (13), sua estrutura permite que haja um direcionamento do escoamento de ar de forma perpendicular ao escoamento da água. Oferece menos resistência ao ar, diminuindo a potência do ventilador para que houvesse a refrigeração. Além de possuírem os sistemas mecânicos e de distribuição de água mais acessíveis (SAMPAIO, 2013).

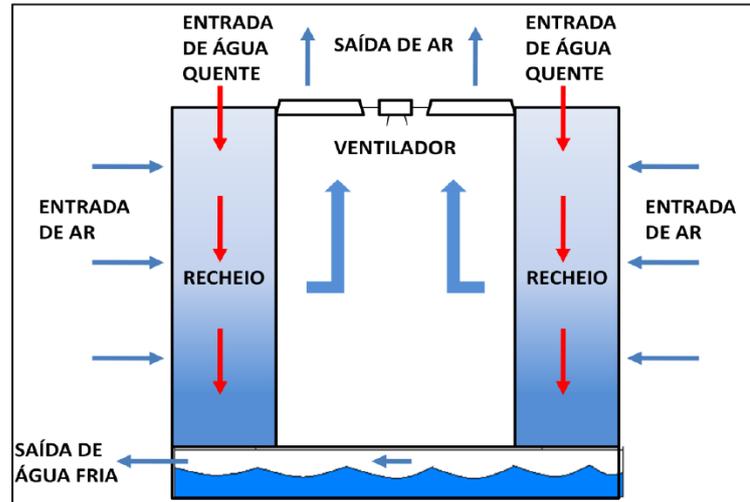


Figura 13 - Torre de resfriamento com fluxo cruzado.
Fonte: Da Silva, 2015.

Na torre com escoamento contracorrente (*counter-flow*), Figura (14), o ventilador proporciona um fluxo de ar ascendente no sentido contrário do escoamento da água. Proporciona uma alta eficiência no resfriamento por apresentar uma estrutura que permite com que a água fria entre em contato com o ar mais seco, enquanto que a água mais aquecida entra em contato com o ar mais úmido. Proporcionando menos recirculação de ar quando comparado com as torres com fluxo cruzado. No entanto, as torres com fluxo contracorrente apresentam um maior gasto de energia (IOKAWA, 2012).

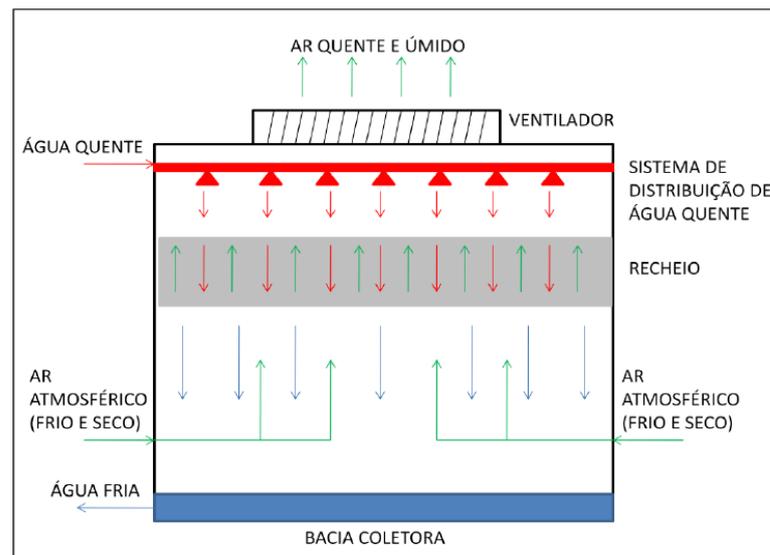


Figura 14 - Torre de resfriamento com fluxo contracorrente.
Fonte: Da Silva, 2015.

O sistema de distribuição de água das torres de resfriamento pode ser por

gravidade e/ou por bicos pulverizados (*sprays*) também conhecido como sendo por pressão.

No caso de distribuição de água por gravidade, é feito o recolhimento da água quente em uma bacia localizada no topo da torre. Nota-se que a bacia apresenta orifícios com estruturas de aspersão, que permite um melhor espalhamento da água (LIMA JUNIOR, 2011).

No sistema distribuição por pressão ou por bicos pulverizadores, a água quente desliza por um tubo principal que apresenta uma série de bicos pulverizadores. Este sistema permite uma distribuição uniforme da água por toda superfície do recheio da torre (LIMA JUNIOR, 2011).

Para que esses processos sejam eficientes deve-se planejar um espaço amplo para que haja contato entre a água e o ar. Nas torres de resfriamento este contato se dá através da formação de gotas, onde a água a ser resfriada é bombeada para o topo de uma plataforma horizontal cheia de furos por onde escorrem filetes de água. Estes filetes caem sobre outras plataformas, que podem ser de metal ou madeira, e escorre por meio de furos ou canaletas, que conduzem a água a outras plataformas abaixo, e assim de forma sucessiva, formando uma grande cachoeira artificial, resultando na formação e gotículas de água. Nas torres com tiragem induzida, o ar de resfriamento é succionado por ventiladores instalados no topo da torre, provocando um escoamento em contra-corrente. (VIANA, 2010).

A Figura (15) apresenta um modelo típico de um sistema de água de resfriamento composto por torre de resfriamento e trocadores de calor. Onde a água que sai dos resfriadores de processo é alimentada e distribuída na parte superior da torre de resfriamento, tendo o auxílio de um enchimento interno que propicia um melhor contato entre o ar e a água. Neste ocorre a entrada do ar ambiente e em sentido inverso o escoamento da água. Através do contato entre o líquido com o gás, parte da água evapora, ocasionando o resfriamento.

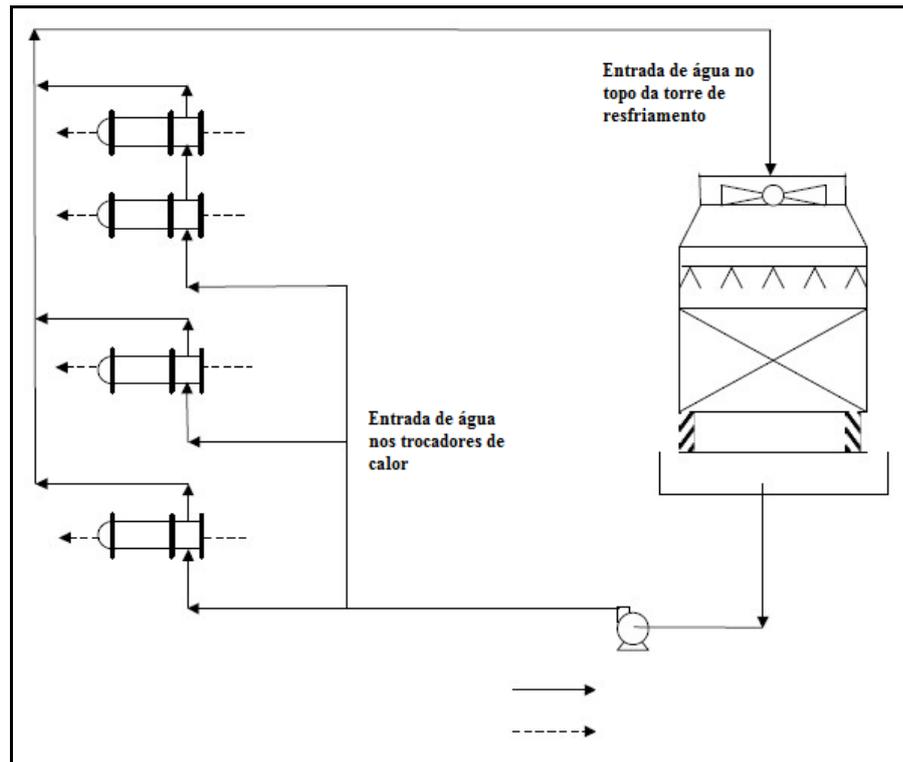


Figura 15 - Modelo de um sistema de água de resfriamento.
Fonte: Viana, 2010.

A temperatura de bulbo seco do ar se trata da temperatura do ar ambiente. Já a temperatura de bulbo úmido é menor ou no máximo igual em relação à temperatura de bulbo seco. Isso acontece porque a parte de água presente sendo exposta à corrente de ar não saturado evapora e com isso a temperatura diminui.

As vazões mais altas de ar e água provocam, até um determinado limite, uma convecção mais intensa, elevando os coeficientes globais de transferência de calor e massa. O aumento das vazões de ar e água causa um aumento da turbulência, o que favorece a transferência de calor e massa. No entanto, a partir de um determinado ponto, quando as vazões de água e ar tornam-se muito altas, o contato entre a água e o ar torna-se ineficiente, podendo ocorrer, por exemplo, excessivo arraste de água pela corrente de ar ou a dificuldade de se formar filmes na superfície do recheio que favorecem a transferência de massa. As vazões de água e ar da torre são limitadas pelo tipo de recheio empregado (VIANA, 2010).

O range de uma torre de resfriamento é definido como a diferença entre a temperatura da água quente (alimentação da torre) e a temperatura da água fria (saída da torre). O range de uma torre varia conforme as condições climáticas e a vazão da água de resfriamento na torre.

O approach de uma torre de resfriamento é a diferença entre a temperatura da água fria (saída da torre de resfriamento) e a temperatura de bulbo úmido do ar na entrada da torre.

Para torres de resfriamento industriais, o approach gira em torno de 5°C, sendo também um critério do projeto. Fazendo-se uma analogia com trocadores de calor, da mesma forma que seria necessária uma área infinita de troca térmica para que a temperatura do fluido quente seja a mesma do fluido frio na saída do trocador, seria necessária uma torre de resfriamento de altura infinita para que a água atinja a temperatura de bulbo úmido do ar (VIANA, 2010).

A vazão de água de resfriamento que recircula na torre, juntamente com o *range* e *approach*, são as variáveis de processo necessárias para o dimensionamento de uma torre de resfriamento. Outro dado necessário ao dimensionamento da torre é o parâmetro de desempenho da torre, definido como o produto entre o coeficiente global de transferência de massa e a área específica do recheio da torre. O parâmetro de desempenho da torre depende do tipo de recheio e das vazões de água e ar empregadas. Nos catálogos dos fabricantes de torres de resfriamento, o parâmetro de desempenho para o dimensionamento não é apresentado de forma explícita, sendo substituído por gráficos e ábacos que relacionam as demais variáveis necessárias (*range*, *approach* e vazão) (VIANA, 2010).

O desempenho de uma torre de resfriamento varia, entre outros fatores, conforme a temperatura do ar ambiente, umidade do ar, temperatura de bulbo úmido, ou seja, com as condições ambientais. No inverno, a temperatura do ar cai e a temperatura de saída da água também cai, caso a carga térmica seja mantida constante. Para manter a temperatura da água de saída constante, pode-se diminuir a vazão de água que recircula no sistema de refrigeração. No verão, ocorre o inverso; a temperatura de saída da água aumenta, comprometendo a operação de um condensador em uma coluna de destilação, por exemplo. Pode-se aumentar a vazão de água no sistema, visando compensar o aumento de temperatura. Em países de clima quente como o Brasil, os principais problemas de queda de desempenho na operação de torres de resfriamento ocorrem durante o verão (VIANA, 2010).

A direção dos ventos deve ser considerada durante o projeto e instalação de uma torre de resfriamento. Fontes de calor próximas às torres de resfriamento

podem influenciar sua operação. Problemas de recirculação e interferência são os mais comuns em torres de resfriamento. A recirculação ocorre quando o ar quente e úmido que deixa a torre contamina o ar que está entrando na torre. Esta situação pode ocorrer devido à direção dos ventos, dificuldades de dispersão do ar de saída e formação de neblina (fog). A interferência ocorre quando o ar que sai de uma torre contamina o ar de entrada de outra torre próxima; a direção dos ventos causa problemas de interferência. A formação de neblina (fog) ocorre quando parte do vapor de água que sai da torre condensa em pequenas gotas, devido ao contato com o ar ambiente mais frio, tornando-se o ar supersaturado. A formação de neblina ocorre com mais frequência no inverno, dificultando a dispersão do ar quente que sai da torre (VIANA, 2010).

A pressão na tubulação de distribuição de água de resfriamento é importante para que se garanta que todos os consumidores recebam a vazão de água necessária e também do ponto de vista de segurança operacional. Por exemplo, em um trocador de calor tipo casco-tubo a água de resfriamento (que geralmente passa nos tubos) está a uma pressão de 5 kfg/cm² manométrica e o fluido do processo, passa no casco a uma pressão de 2 kfg/cm² manométrica (VIANA, 2010).

Caso ocorra um furo em um dos tubos do trocador, a água (que está a uma pressão mais alta) vazará para o lado do casco, contaminando o fluido de processo. Caso a pressão do fluido de processo fosse mais alta que a da água de resfriamento, ocorreria o inverso, e todo o sistema de resfriamento estaria contaminado, o que implicaria em riscos maiores do ponto de vista de segurança operacional.

Os sais dissolvidos, sólidos e matéria orgânica em suspensão dissolvidos na água de resfriamento são fatores que contribuem para a formação de um meio favorável à proliferação de algas, bactérias e fungos, que por sua vez, prejudicam não só a operação da torre de resfriamento, mas também o desempenho térmico da rede de trocadores de calor. A formação de algas e fungos pode provocar a queda de eficiência, deformação e desprendimento do recheio da torre de resfriamento. O tratamento químico da água de resfriamento para o controle de dureza, sílica, pH, condutividade e DBO é importante não só para o desempenho da torre de resfriamento, mas também da rede de trocadores de calor.

Por outro lado, por se tratar de uma instalação não integrante do processo (a torre de resfriamento faz parte das “utilidades”) e porque em geral fica

topograficamente afastada das unidades produtivas da fábrica, o sistema de resfriamento, muitas vezes, tem sido relegado nos estudos. Porém, em face da importância das interações envolvidas com as unidades, a torre e o circuito da água de resfriamento merecem uma atenção especial na análise sistêmica de um processo industrial e, às vezes, a solução de alguns problemas operacionais pode ser encontrada ao ampliar o foco do seu estudo para as utilidades da fábrica (VIANA, 2010).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 PLANEJAMENTO DA PESQUISA

Apresenta-se neste tópico a descrição da método utilizado neste trabalho com o objetivo de expor as etapas que foram realizadas, não só no levantamento dos dados do estudo como também na forma de execução.

O presente trabalho foi realizado com utilização de pesquisa bibliográfica e um estudo de caso. O estudo de caso foi selecionado como exemplo por se tratar de uma situação real de indústria agroindustrial.

4.2 - PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O método utilizado para o desenvolvimento desta dissertação foi o estudo de caso, sendo utilizada também a pesquisa bibliográfica com o intuito de embasar a parte teórica da mesma. Assim, através da metodologia citada chegou-se à resposta do problema levantado nesta dissertação, bem como ao alcance dos objetivos traçados na mesma.

4.3 PLANEJAMENTO DE COLETA DE DADOS

Para a coleta de dados contou-se com uma quantificação dos dados experimentais na empresa em estudo, e para desenvolvimento deste trabalho.

O método de pesquisa foi elaborado com base nos dados obtidos das análises químicas da água obtida dos poços artesianos, da água de rejeito da osmose reversa e da água da bacia da torre de resfriamento, levando em consideração a preocupação com a sílica, devido seu alto poder de incrustação. Por meio dos resultados obtidos, verificou-se que a água de rejeito da osmose reversa deveria passar por um tratamento antes de ser utilizada para abastecer a torre de resfriamento da fábrica, sendo assim foi implantado um terceiro estágio de osmose, como a melhor opção para melhorar a qualidade da água que apresentava um alto teor de sólidos totais dissolvidos.

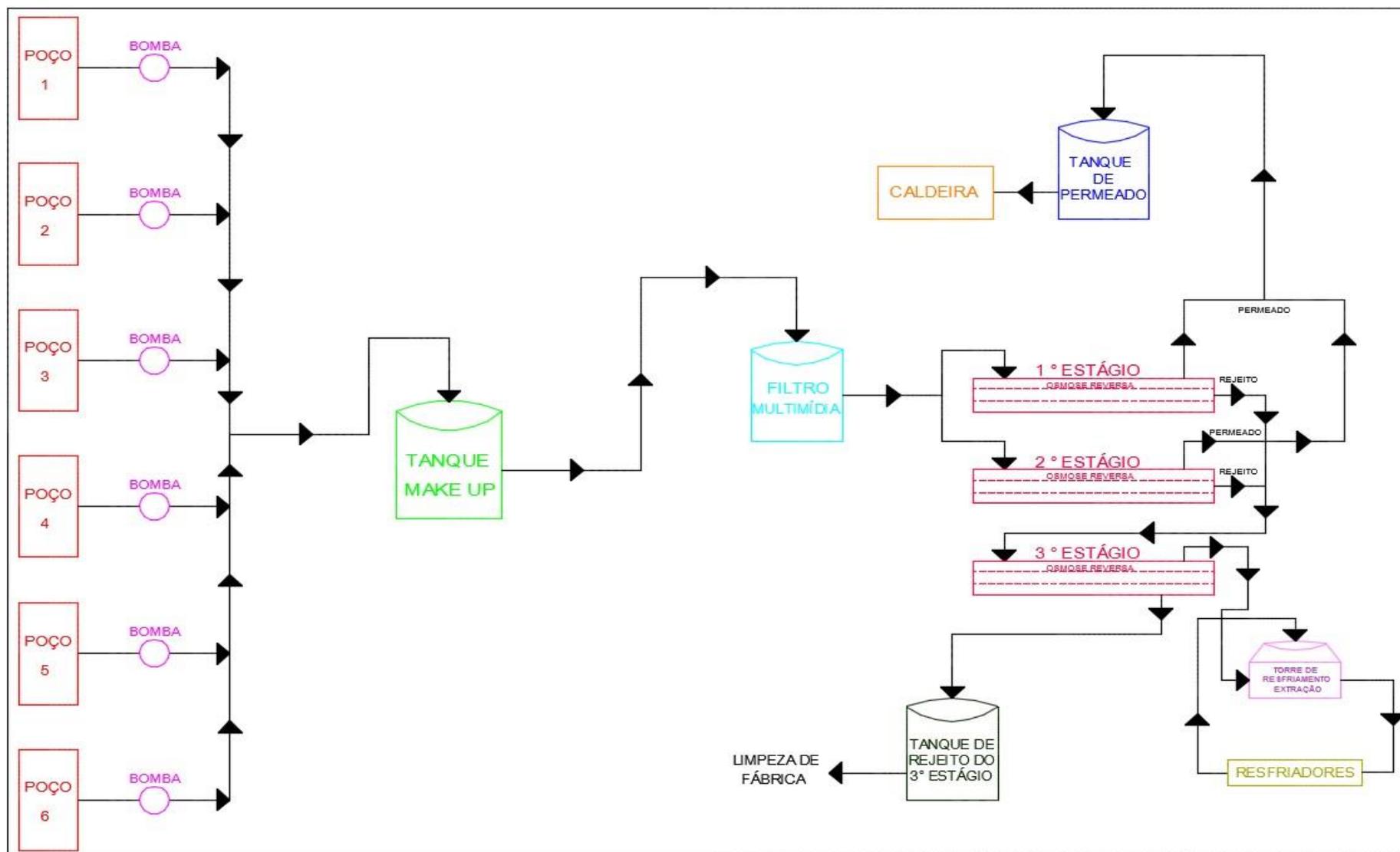


Figura 16 – Etapas do processo de osmose reversa e trocadores de calor.
 Fonte: Elaborado por Careta, 2017.

Na Figura (16) pode-se observar as etapas do processo, onde a água é captada dos poços, armazenada em um tanque de Make up, passando em seguida por um filtro multimídia e por dois estágios de osmose reversa. O permeado desses dois estágios de osmose segue até a caldeira para a geração de vapor e o seu rejeito com alto teor de sais é dissolvido e tratado por um terceiro estágio de osmose reversa, deixando assim sua água totalmente isenta de sais para abastecer a torre de resfriamento da extração, sendo essa água utilizada no processo para resfriar os trocadores de calor. O rejeito que sai desse terceiro estágio de osmose é utilizado para a limpeza de chão da fábrica.

A torre do processo apresenta as seguintes características, conforme pode ser observado na Tabela (10), que serviram de parâmetros para as intervenções necessárias:

Tabela 10 – Dados da torre do processo.

Identificação	Torre de Extração	Torre de Envase 1	Torre de Envase 2	Torre da Refinaria	Torre da Cogeração	Geral
Vazão total de Recirculação de água (m ³ /h)	2400	140	70	250	110	2970
Volume estático total da bacia (m ³)	200	15	10	25	10	260
Diferencial de Temperatura (°C)	7	3	5	8	10	3 a 10
Vazão total de Evaporação m ³ /h)	25,70	0,64	0,54	3,06	1,68	31,60
Ciclos Máximos de Concentração	7	7	7	7	7	7
Perda Líquida total (m ³ /h)	4,28	0,11	0,09	0,51	0,28	5,27
Vazão de Reposição (m ³ /h)	29,99	0,75	0,62	3,57	1,96	36,90
Regime de trabalho (horas/dia)	24	24	24	24	24	24
Regime de trabalho (dias/mês)	30	30	30	30	30	30

Fonte: Elaborado por Careta, 2017.

Cabe salientar que este estudo foi desenvolvido apenas com a torre de extração por apresentar maior vazão de recirculação, com uma vazão média utilizadas para os devidos cálculos de 1900m³/h, que tem como finalidade resfriar a água que sai dos trocadores de calor.

Para os devidos cálculos levou-se em consideração uma média da

temperatura de saída e entrada da água na torre de resfriamento de 23°C e 27,4°C respectivamente, e uma vazão de escoamento de água (Q) de 1900 m³/h. Com esses dados foi calculada a porcentagem de evaporação de água da torre (%E) utilizando a Equação (1) que consiste em um valor prático:

$$\%E = 0,18 \times \Delta T \quad (1)$$

Onde o ΔT é a variação de temperatura igual a 4,4°C e o valor encontrado para a porcentagem de evaporação foi de $\%E = 0,792$.

Após obtenção da porcentagem de evaporação, foi calculada a evaporação de água da torre (E) utilizando a Equação (2):

$$E = \left(\frac{\%E}{100} \right) \times Q \quad (2)$$

Onde Q é vazão de escoamento de água na torre e o resultado encontrado para a taxa de evaporação da torre foi de $E = 15,048$ m³/h.

O cálculo do arraste (A) foi efetuado pela Equação (3):

$$A = \left(\frac{\%A}{100} \right) \times Q \quad (3)$$

Onde a %A é expressa por $\%A = 0,1$ e o resultado encontrado para o arraste foi de $A = 1,9$ m³/h.

A sílica presente na água sempre foi a maior preocupação no processo devido aos problemas de incrustações que ela pode causar nas tubulações após atingir o seu limite máximo permitido para o processo. Dessa maneira, a operação era planejada em função de manter o teor de sílica abaixo do máximo permitido (150 ppm).

A água de rejeito proveniente do tratamento de água do primeiro e segundo estágio de osmose reversa era utilizada para reposição da água na torre de resfriamento, a qual chegava com um teor de sílica médio de 58,6 ppm. Esse teor é

consideravelmente alto, onde o teor máximo permitido (150 ppm) era atingido rapidamente na bacia da torre, devido a taxa de evaporação, ocorrendo assim a concentração e deposição da sílica como incrustação.

Para que a sílica não ultrapassasse o máximo permitido era preciso dar uma descarga de fundo (D), a qual pode ser quantificada pelo balanço de massa a seguir (TREYBAL,1981):

Balanço global de massa utilizando a Equação (4):

$$R = A + D + E \quad (4)$$

Onde R é a reposição da quantidade de água a ser abastecida na torre de resfriamento, A o arraste, D a descarga de fundo e E a evaporação de água da torre de resfriamento.

Balanço parcial para sílica utilizando a Equação (5):

$$X_m \times R = X_p [D + A] \quad (5)$$

Onde X_m é o valor de sílica expressa em (ppm) na entrada da torre de resfriamento e X_p o valor de sílica máxima permitida para o processo.

Substituindo Equação (4) na Equação (5), tem – se a Equação (6):

$$X_m \times [A + D + E] = X_p \times [D + A] \quad (6)$$

Simplificando a Equação (6) possibilita o cálculo da descarga de fundo através das Equações (7) e (8).

$$D = E / (X_p - X_m - 1) \times E - A \quad (7)$$

$$D = \frac{E}{(\text{Ciclo} - 1)} - A \quad (8)$$

O ciclo de concentração é calculado com o valor da sílica máxima permitida sobre o valor da sílica de entrada, ou seja, a sílica máxima permitida é de 150 ppm e

a sílica de entrada na torre 58,6 ppm, com isso ter-se-á um ciclo de concentração de 2,55. Assim, pela Equação (8) pode-se calcular a descarga de fundo, onde foi encontrado o valor de $D = 7,81 \text{ m}^3/\text{h}$.

Após o cálculo da descarga de fundo, foi calculada a perda líquida (PL), que consiste na perda por arraste (A) somado à descarga de fundo, conforme a Equação (9):

$$PL = A + D \quad (9)$$

O resultado encontrado para a perda líquida foi de $PL = 9,71 \text{ m}^3/\text{h}$. Assim sendo, após os cálculos realizados, foi calculada a reposição de água pela Equação (4) e chegando assim ao valor de reposição de água na torre de $R = 24,75 \text{ m}^3/\text{h}$, para manter-se assim a sílica no processo dentro do especificado (máximo permitido, 150 ppm).

5 RESULTADO E DISCUSSÃO

5.1 O ESTUDO DE CASO REAL

O objetivo da empresa, responsável pelo processo, era abastecer a torre com água de reposição apenas com água de rejeito que por sua vez tem uma vazão de 9 m³/h, portanto, não se tinha água o suficiente para repor a torre de resfriamento com apenas água de rejeito, era necessário utilizarmos água do poço como complemento, o que também se tornava um problema devido sua baixa vazão.

A empresa possui seis poços artesianos com vazão total de 64,2 m³/h aproximadamente, mas somente com 5 poços em funcionamento e um em descanso devido a outorga, podendo contar com uma vazão total para abastecimento da fábrica de aproximadamente 54 m³/h. O objetivo da fábrica que por sua vez é produzir vapor, ela necessita de uma quantidade de 45 m³/h de água sendo tratada por osmose reversa, para obter um permeado de 36 m³/h que será transformado em vapor e seu rejeito da osmose é de 9 m³/h. Como havia uma vazão total de 54 m³/h de água fornecida pelos poços e a fábrica utilizava 45 m³/h, sobrava uma vazão de 9 m³/h de água de poço para completar a demanda da torre de resfriamento, ou seja não dispunha de água o suficiente para repor a quantidade necessária uma vez que sua necessidade era de 24,75 m³/h.

Devido às análises que foram feitas antes e depois da implantação do processo foi possível se ter uma idéia do resultado alcançado.

5.2 ANÁLISE DA QUALIDADE DA ÁGUA DA BACIA DA TORRE DE RESFRIAMENTO

Para se ter um ponto de partida antes da implantação do projeto, retirou-se uma alíquota de água e foram realizadas as análises da qualidade da água. Em um primeiro momento, amostras da água da bacia da torre de resfriamento e, também da água de reposição foram analisadas, para que através das análises fosse possível ter uma base da composição química da água. A Tabela (11) descreve a composição química da água da bacia antes da alteração do projeto.

Tabela 11 – Análise diária da composição química da água da bacia da torre de resfriamento antes da implantação do projeto.

Composição/ Medida	Valor 1° dia	Valor 2° dia	Valor 3° dia	Valor 4° dia	Valor 5° dia	Valor 6° dia	Valor 7° dia	Média
Sílica – ppm	162,70	156,30	152,30	151,30	152,70	159,30	149,50	154,87
Ferro – ppm	0,12	0,11	0,11	0,09	0,12	0,14	0,21	0,13
Cloro – ppm	0,30	0,30	0,20	0,30	0,60	0,50	0,60	0,40
pH	7,05	7,09	6,99	7,02	7,39	7,29	7,26	6,22
Condutividade µS/cm ²	1770	1620	2160	1950	1750	1850	2070	1881,42
Dureza – ppm	20,20	18,80	18,20	16,80	14,80	12,20	25,20	18,02
Alcalinidade – PPM	40,00	44,00	48,00	32,00	64,00	56,00	40,00	46,28
Turbidez – NTU	2,90	3,20	3,10	2,60	9,20	8,90	11,30	5,88
Fosfato – ppm	33,45	29,36	38,17	28,34	27,19	36,19	31,14	31,97

Fonte: Elaborado por Careta, 2017.

Cabe salientar que o “problema” principal para o processo é o teor de sílica na água.

A água de rejeito do tratamento dos 45 m³/h também foi analisada e estão descritas na Tabela (12).

Tabela 12 – Análise realizada semanalmente na composição química da água de rejeito.

Composição/ Medida	Valor 1° semana	Valor 2° semana	Valor 3° semana	Valor 4° semana	Média
Sílica – ppm	58,40	69,30	64,70	65,30	64,42
Ferro – ppm	0,02	0,01	0,009	0,016	0,015
pH	7,53	7,43	7,79	7,84	7,65
Condutividade µs/cm ²	185,90	203,90	212,70	213,60	204,00
Dureza ppm	16,00	36,00	30,00	22,00	26,00

Fonte: Elaborado por Careta, 2017.

O sistema de osmose reversa começou a ser implantado na empresa no ano de 2013. Por ser um sistema complexo, praticamente todo este primeiro ano ficou reservado para realizações de testes e ajustes dos equipamentos. Somente a partir de 2014 foi que o sistema começou a funcionar a pleno vapor, sem mais necessidade de ajustes.

Com a entrada em vigor deste novo sistema ocorreu uma redução significativa dos resíduos sólidos na água, principalmente a sílica, que era a maior preocupação. Os resultados apresentados a partir de 2014 e que prevalecem até os dias atuais são, conforme Tabela (13) que corresponde a água do rejeito tratada no 3°estágio de osmose.

Tabela 13 – Características da água após o sistema de osmose reversa.

Composição/ Medida	Valor	Valor	Média
Sílica – ppm	0,00	0,40	0,20
Ferro – ppm	0,00	0,10	0,05
pH	7,30	7,50	7,40
Condutividade $\mu\text{S}/\text{cm}^2$	8,00	10,20	9,10
Dureza – ppm	0,00	0,00	0,0
Alcalinidade ppm	---	---	---
Turbidez NTU	---	---	---
Fosfato – ppm	1,20	2,50	1,85

Fonte: Elaborado por Careta, 2017.

Pode-se observar na Tabela (13), que a água tratada pelo uso da osmose reversa, faz com que diminua muito a quantidade de sílica na água, ficando assim uma qualidade da água melhor para o processo.

Tabela 14 – Composição da água recirculada após a implantação do sistema de osmose reversa.

Composição/ Medida	Valor 1º dia	Valor 2º dia	Valor 3º dia	Valor 4º dia	Valor 5º dia	Valor 6º dia	Média
Sílica – ppm	103,89	94,70	114,60	72,4	65,20	50,80	83,59
Ferro – ppm	0,11	0,093	0,09	0,214	0,10	0,042	0,10
Cloro – ppm	0,30	0,20	0,30	0,38	0,50	0,73	0,40
Ph	7,53	7,51	7,55	7,35	7,74	7,66	7,55
Condutividade $\mu\text{S}/\text{cm}^2$	1920	1392	1732	1480	1873	1377	1629
Dureza – ppm	58,00	40,00	66,00	38	62,00	24,00	48,00
Alcalinidade ppm	88,00	46,20	72,80	50,2	72,60	42,80	62,10
Turbidez NTU	6,40	2,20	7,30	15,8	26,70	28,00	14,40
Fosfato – ppm	15,54	36,10	24,95	37,81	15,60	11,02	23,50

Fonte: Elaborado por Careta, 2017.

Com a entrada no processo da água tratada com o terceiro estágio de osmose reversa, pode-se observar pela Tabela (14), uma redução bastante significativa do teor de sílica no processo.

Portanto, após a implantação do projeto, usando novamente a Equação (8) e considerando uma sílica média na água de rejeito tratada para repor a torre de resfriamento de 0,2 ppm, foi calculada novamente a descarga de fundo.

$$D = \left(\frac{E}{(\text{Ciclo} - 1)} \right) - A$$

$$D = \left(\frac{E}{\frac{150}{0,2} - 1} \right) - A \quad \rightarrow \quad D = \left(\frac{15.048}{750 - 1} \right) - 1,9 \quad \rightarrow$$

$$D = - 1,88 \text{ m}^3/\text{h}$$

Observa-se que o valor da descarga é negativo, significa que não é necessário efetuar a descarga contínua (purga), devido ao fato da água de reposição praticamente ser isenta de sílica.

QUANTIFICAÇÃO DA TAXA DE ESCOAMENTO DE AR

Cálculo da taxa de ar necessária para resfriamento da água, uma modelagem usando a transferência simultânea de calor, possibilitando a dedução da Equação (10), (TREYBAL,1981).

$$L \times \text{Cal} (T_{l2} - T_{l1}) = G_s \times (H_2 - H_1) \quad (10)$$

Sendo:

L e G são as taxas de escoamento de água e de ar; Cal é o calor específico da água e T_{l2} e T_{l1} as temperaturas de entrada e de saída de água de resfriamento.

A temperatura média na região do Mato Grosso é de 35°C e a umidade relativa do ar é de 33% (PEIXOTO; VASCONCELOS; THOME FILHO, 2012).

Usando a carta psicrométrica obtém-se a umidade absoluta do ar e entalpia (H_1) de 0,012 kJ H₂O/kg ar seco e 64 kJ/kg ar seco (FUJITA; TEZUKA, 1986).

O ar que abandona a torre no topo da mesma tende á saturação e a sua temperatura de entrada da água de 27,4°C. Na carta de psicrometria a entalpia do ar saturado é de 84,0 kJ/kg de ar seco.

Usando a Equação (10):

$$L \times \text{Cal} (T_{l2} - T_{l1}) = G_s \times (H_2 - H_1)$$

Obtém-se um valor da taxa de escoamento de $1,75 \times 10^6$ Kg/h.

6 CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos após a implantação do sistema de osmose reversa verifica-se que a empresa resolveu seu maior problema que era o de incrustações, e também passou a ter uma importante economia de água, devido à redução praticamente a zero do uso de descarga de fundo (purga).

Com a água isenta de sólidos dissolvidos, passou-se a usar a água recirculada por mais tempo, além de diminuir a incrustação dos equipamentos por onde a água passava.

A adoção deste sistema mostrou-se ser de grande importância, por contribuir diretamente com a diminuição do consumo de água e com isso, com o meio ambiente e, por proporcionar uma maior eficiência do trabalho do sistema, maior tempo de vida útil dos equipamentos e ganhos financeiros.

Os sais dissolvidos, sólidos e as matérias orgânicas presentes na água de resfriamento prejudicam não só a operação da torre de resfriamento, como também o desempenho térmico da rede de trocadores de calor. Ocasionalmente ocasionando queda de eficiência, deformação e desprendimento do recheio da torre de resfriamento

A pressão de operação nos condensadores das colunas de destilação ou nos evaporadores de sistemas de concentração ocorre com base na temperatura da água de resfriamento. Variações na temperatura da água de resfriamento influenciam diretamente na operação dos condensadores de topo de uma coluna de destilação e conseqüentemente a operação da própria coluna.

Como foi dito anteriormente, o permeado ocorrido nos dois estágios de osmose segue até a caldeira para a geração de vapor e o seu rejeito com alto teor de sais foram dissolvidos e tratados por um terceiro estágio de osmose reversa, deixando assim sua água totalmente isenta de sais para abastecer a torre de resfriamento da extração, sendo essa água utilizada no processo para resfriar os trocadores de calor.

Conforme pode ser observado na Figura (17), durante o período em que foi analisada a água antes do processo de osmose reversa, ela apresentou um nível médio de Sílica de 154,87 ppm. Após a aplicação do processo de osmose reversa, a média de Sílica na água diminuiu para 83,59 ppm.

A condutividade, com a osmose reversa, passou de 1881,42 $\mu\text{S}/\text{cm}^2$ para um

valor médio de $1629 \mu\text{S}/\text{cm}^2$.

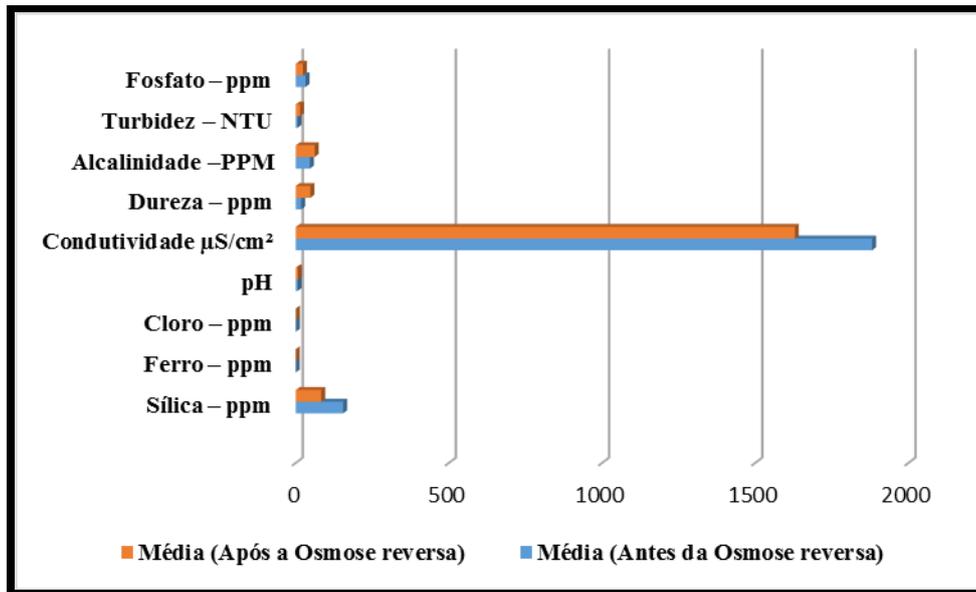


Figura 17 – Dados da torre do processo antes e depois da osmose reversa.
Fonte: Elaborado por Careta, 2017.

Nota-se que, através da Figura (18), a água de reuso, após a processo de osmose reversa, também apresentou uma significativa redução da Sílica, de 64,42 para 0,20 ppm em média, deixando a água com uma qualidade melhor para ser utilizada no processo.

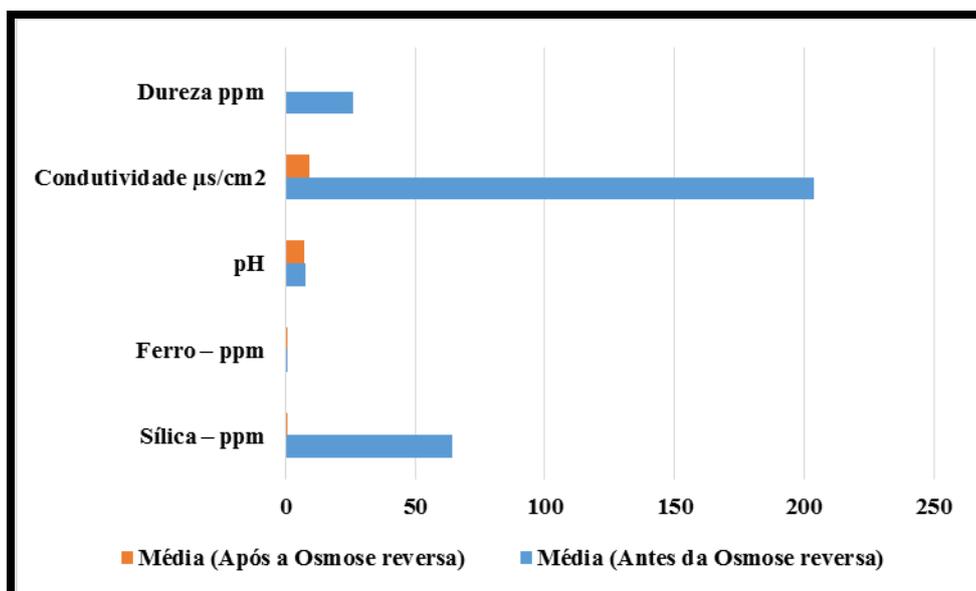


Figura 18 – Dados da torre de reuso antes e depois da osmose reversa.
Fonte: Elaborado por Careta, 2017.

Com a entrada em vigor deste novo sistema na empresa houve uma

significativa redução dos resíduos sólidos na água, principalmente a sílica, que era a maior preocupação até então. Através da osmose reversa evitou-se a oxidação nos tubos do trocador, que poderia ocasionar a contaminação do fluido de processo ou até mesmo riscos maiores relacionados à segurança operacional e ao meio ambiente.

REFERÊNCIAS

ALPINA. **Perda de água em torre de resfriamento**. Disponível em: <<http://www.alpinaequipamentos.com.br/artigos/6/perdas-de-agua-em-torre-de-resfriamento>>. Acesso em 08 de jun. 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Cadernos de recursos hídricos, 2005**. Disponível em: <<http://arquivos.ana.gov.br/planejamento/planos/pnrh/VF%20DisponibilidadeDemand a.pdf>>. Acesso em 14 de jun. 2017.

ANTUNES, P. de B. **Direito ambiental**. Rio de Janeiro: Lumen Juris, 2005.

BAPTISTA, A. P. M. **A efetividade do direito ambiental na preservação da água, 2015**. Disponível em: <<http://www.unimar.br/pos/trabalhos/arquivos/4E0EFCBF2DE0F290656C418A82487BFA.pdf>>. Acesso em: 07 fev. 2017.

BELLINELLO, L. C. **Osmose: Difusão, osmose, pressão osmótica**. Disponível em: <http://www.passeiweb.com/estudos/sala_de_aula/quimica/osmose>. Acesso em 08 jun. 2017.

BEUREN, I. M. **Como elaborar trabalhos monográficos em contabilidade**. Teoria e prática. São Paulo: Atlas, 2003.

BRAGA, B. **Introdução à engenharia ambiental**. Prentice Hall, 2002.

BRASIL. **Resolução CONAMA nº 20, de 18 de junho de 1986**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res86/res2086.html>>. Acesso em 04 fev. 2017.

_____. **Lei 6.938, de 31.08.81**. Dispõe sobre a política nacional do meio ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Código Civil. 18. ed. São Paulo: Saraiva, 2003 (Legislação brasileira).

_____. Constituição (1988). **Constituição da República Federativa do Brasil**. 20. ed. São Paulo: Atlas, 2003.

_____, **Resolução CONAMA nº 396**, de 03 de abril de 2008. Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências. Brasília, DF, 2008.

CASTRO, S. **Análise física-química da água do lençol freático do cemitério nossa senhora aparecida, manaus, am., 2006**. Disponível em: <https://www.google.com.br/search?q=CASTRO%2C+2006+%C3%81GUA+E+LEN%C3%87OL+FREATICO&rlz=1C1GGRV_enBR751&oq=CASTRO%2C+2006+%C3%81GUA+E+LEN%C3%87OL+FREATICO&aqs=chrome..69i57.21636j0j4&sourceid=chrome&ie=UTF-8>. Acesso em 08 jun. de 2017.

CINTRA, R. **Osmose reversa, 2016.** Disponível em: <<https://www.portalmaritimo.com/2016/10/21/osmose-reversa-conheca-este-processo-que-purifica-nossa-agua-a-bordo/>>. Acesso em: 22 abr. 2017.

CLEARY, R. W. **Hidrologias de água subterrâneas.** Rio de Janeiro: Editora URFJ, 1989.

COMISSÃO INTERNACIONAL PARA PREPARAÇÃO DA CONFERÊNCIA DAS NAÇÕES UNIDAS SOBRE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL (CIMA). **O desafio do desenvolvimento sustentável.** Brasília, Imprensa oficial, 1991. 204 p.

CONSUMO SUSTENTÁVEL. **Manual de educação.** Brasília: MMA/MEC/IDC, 2005.

CORREIA, M. D.; SOVIERZOSKI, H. H. **Ecosistemas marinhos: recifes, praias e manguezais.** Alagoas. Ed.: EDUFAL, 2005.

CUNHA, R. R. Mais água tratada para Goiânia, 2015. **O Popular.** Disponível em: <<http://www.seplan.go.gov.br/sepin/down/godados2012.pdf>>. Acesso em: 17 jul. 2017.

DA SILVA, E. de F. T. **Escassez e reuso da água, 2009.** Disponível em: <http://www.avm.edu.br/docpdf/monografias_publicadas/K215536.pdf>. Acesso em 08 jun. 2017.

DA SILVA, A. F. **Otimização de torres de resfriamento.** Disponível em: <<http://tpqb.eq.ufrj.br/download/otimizacao-de-torres-de-resfriamento.pdf>>. Acesso em 09 jul, 2017.

DA SILVA, D. A. C.; DOS SANTOS, E. B.; DUARTE, **Utilização da osmose reversa para tratamento de águas.** Disponível em: <http://www.fatecgarca.edu.br/revista/Volume3/artigos_vol3/Artigo_6.pdf>. Acesso em 08 mai. 2017.

FARRUGIA, B. Membranas de osmose reversa: aplicações e novidades do mercado. **Revista TAE – Especializada em tratamento de água e afluentes.** n. 15, Ano III, outubro/novembro de 2013.

FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J. **Hidrogeologia – Conceitos e Aplicações.** Fortaleza: LABHID-UFPE, 2000.

FERREIRA, D.F. et al. **Aproveitamento de águas pluviais e reuso de águas cinzas para fins não potáveis em um condomínio residencial localizado em Florianópolis-SC, 2009.** Florianópolis: UFSC, 2009.

FOGAÇA, J. R. V. **Dessalinização da água.** Disponível em: <<http://mundoeducacao.bol.uol.com.br/curiosidades/o-que-dessalinizacao-agua.htm>>. Acesso em: 06 jun. 2017.

FLUID BRASIL. **Produtos e tubulações.** Disponível em: <<http://www.fluidbrasil.com.br/produtos/filtracao/filtros/>>. Acesso em 09 jun. 2017.

FOSTER, S. et al. **Groundwater Quality Protection: A Guide for Water Service Companies, Municipal Authorities, and Environment Agencies.** 2006.

FUJITA, T.; TEZUKA, S. Calculations on thermal performance of draft cooling towers. **Ashrae Transactions**, v. 92, p. 274-287, 1986.

GHANEM, M. A. **Avaliação da qualidade da água subterrânea em Joinville, sc e seus riscos à saúde, 2009.** Disponível em: <http://univille.edu.br/community/mestrado_saude_meio_ambiente/VirtualDisk.html?action=downloadFile&file=Dissertacao_corrigida_v._outubro_2009.pdf¤t=%2FDissertacoes2008_2009%2FDissertacoes2010>. Acesso em 08 mar. 2017.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social.** São Paulo: Atlas, 2007.

GUERRA, A. T. **Novo dicionário geológico-geomorfológico.** Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2005.

IOKAWA, E. H. **Avaliação de um sistema industrial de resfriamento de água, 2012.** Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3137/tde-16112012-114140/publico/DissertacaoEduardoHiroshiOikawa.pdf>>. Acesso em 08 jul. 2017.

JOHN, L. **Água subterrânea, 2015.** Disponível em: <http://www.agua.bio.br/botao_d_h.htm>. Acesso em 19 mai. 2017.

HARADA, M. L.; RIBEIRO, E. O. R.; ASSIS, J. F. P. **Fundamentos de ciências e geociências para ensino fundamental.** Belém: Editora UFPA, 2008.

KOETZ, P. R.; FARIA, O. L.V.; NUNES, W. A. **Tratamento de efluentes homogêneos de curtume por digestão anaeróbia em reatores de fluxo ascendente.** Ciência e Tecnologia Agroindustrial - Campus Universitário. SANITEC - Consultoria em Controle de Poluição. - Pelotas/RS - Brasil. 1994.

KRAEMER, M. E. P. Gestão dos Custos da Qualidade Ambiental. **Pensar Contábil.** Ano VI, Maio/Jun., 2003.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo.** São Paulo: Editora de São Paulo, 2005.

LIMA JUNIOR, R. C. **Modelagem fenomenológica do desempenho de torres de resfriamento de água acopladas e estudo de casos.** São Paulo: EPUSP, 2011.

MACHADO, P. A. L. **Direito ambiental brasileiro.** 4. ed. revista e ampliada. São Paulo: Malheiros, 1992.

_____. **Direito ambiental brasileiro.** 16 ed. São Paulo: Malheiros: 2008.

MAJOP. **Osmose reversa.** Disponível em:

<https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiOqayxiMjUAhXEjZAKHfhSDwIQFggnMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.majop.com.br%2FARTIGO%2520T%25C3%2589CNICO%2520OSMOSE%2520REVERSA%2520ENTENDA%2520O%2520SEU%2520FUNCIONAMENTO%2520.pdf&usq=AFQjCNH856cMAMjhL3bhk5WpOd6rZ3wEvQ&sig2=khqW_HfmUPxz zptaTRdK4Q>. Acesso em 08 mai. 2017.

MANOEL FILHO, J. **Contaminação da água subterrânea**. Fortaleza: CPRM - UFPE, 2000.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Metodologia do trabalho científico**. São Paulo: Atlas, 2006.

MARQUES, L.; ZANDONA, M.; XAVIER, S. **As mais modernas tecnologias do saneamento ambiental, 2005**. Disponível em: <http://www.copasa.com.br/media/gota/gota_et2005.pdf>. Acesso em 08 jun. 2017.

MOREIRA, T. M.; BEZERRA, S. R. A. **Dessalinização: um recurso para o enfrentamento da escassez hídrica**, 2016. Disponível em: <http://www.abes-rs.org.br/centraldeeventos/_arqTrabalhos/trab_20160824145204000000786.pdf>. Acesso em 22 mai. 2017.

NAGALLI, A.; NEMES, P. D. Estudo da qualidade de água de corpo receptor de efluentes líquidos industriais e domésticos. **Revista Acadêmica Ciência Agrária Ambiental**, Curitiba, v. 7, n. 2, p. 131-144, abr./jun. 2009.

PEIXOTO, D. D.; VASCONCELOS, T. E.; THOME FILHO, J.J. **Projeto rede integrada de monitoramento das águas subterrâneas: relatório diagnóstico**, 2012. Disponível em: <http://rimasweb.cprm.gov.br/layout/pdf/PDF_RIMAS/VOLUME9_Aquiferos_Ronuro_Salto%20das%20Nuvens_Utiariti_MT.pdf>. Acesso em 22 mai. 2017.

PEREIRA, L. F. D. R. H. **Relações de consumo**. Caxias do Sul: EducS, 2008.

RICHARDSON, R. J. **Pesquisa social: métodos e técnicas**. São Paulo: Atlas, 1999.

ROSS, J. L. S. **Geomorfologia do Brasil**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2006.

_____. **Geomorfologia e meio ambiente**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2003.

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

SILVA, D. D.; PRUSKI, F. **Gestão de Recursos Hídricos**, Brasília: MEC, 2000.

SILVA, R. A. G. **Análise da viabilidade hidro-sedimentológica de um canal de maré projetado no oeste da lagoa de araruama - rj**. Rio de Janeiro: Ed. UFRJ, 2013.

SILVA, L. C. M.; BROTTTO, M. E. **Nitrato em água: ocorrência e consequências**, 2014. Disponível em: < <http://www.creasp.org.br/biblioteca/wp-content/uploads/2014/09/Nitrato-em-agua-1.doc>>. Acesso 07 jun. 2017.

SILVA, R. W. C.; MALAGUTTI FILHO, W. Cemitérios: fontes potenciais de contaminação. **Revista Ciência Hoje**. São Paulo, v.44, n. 263, p. 24-29, set. 2009.

SILVA, J. J. F. Da; MIGLIORINI, R. B. **Caracterização das águas subterrâneas do aquífero furnas na região sul do estado do mato grosso**, 2014. Disponível em: < http://www.revistageociencias.com.br/geociencias-arquivos/33/volume33_2_files/33-2-artigo-07.pdf>. Acesso em 08 jun. 2017.

SILVA, D. A. C. da; SANTOS, E. B. Dos. **Utilização de osmose reversa para tratamento de água**. Disponível em: < <https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwigypWE57nVAhVGvJAKHbWvAOMQFgggUAE&url=http%3A%2F%2Fwww.ibeas.org.br%2Fcongresso%2FTrabalhos2016%2FVII-045.pdf&usq=AFQjCNEQgvZxc-wak3pxhjSOqvisO7hdFw>>. Acesso em 14 jul. 2017.

SOARES, T. M. et al. Destinação de águas residuárias provenientes do processo de dessalinização por osmose reversa, 2006. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Disponível em: < http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662006000300028>. Acesso em 18 abr. 2017.

STRIEDER, A. C.; DELUQUE, M. Desenvolvimento sustentável: a responsabilidade dos futuros governantes municipais. **Revista de Administração**. v. 10, n. 17, 2012. Disponível em: < <http://revistas.fw.uri.br/index.php/revistadeadm/article/download/946/1399>>. Acesso em 08 mar. 2017.

TAVARES, L. C. et al. **Desenvolvimento de sementes de soja sob deficiência hídrica: rendimento e qualidade fisiológica da geração F1**, 2013. Disponível em: < http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-84782013000800003>. Acesso em 06 mai. 2017.

TREYBAL, R. E. **Man Transfer Operations**. New York. McGraw-Hill, 1981. 784p.

TUCCI, C. E. M. et al. **Hidrologia: Ciência e aplicação**. Porto Alegre: Editora da UFRS/ABRH, 2007.

_____; CABRAL, J. J. S. P. **Qualidade da água subterrânea**. 2003. Disponível em: < http://www.cgee.org.br/arquivos/a3b_agua_sub.pdf >. Acesso em: 10 mai. 2013.

TUNDISI, J. G. **Água no século XXI: enfrentando a escassez**. São Carlos: RiMa, IIE, 2003.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO (USP). **Torres de resfriamento**, 2017. Disponível em:

<http://sistemas.eel.usp.br/docentes/arquivos/5817712/LOQ4086/torres.de.resfriamento2.pdf>. Acesso em: 05 mar. 2017.

VESILIND, P. A.; MORGAN, S. M. **Introdução à engenharia ambiental**. Tradução da Editora Norte Americana. Boston: Editora Cengage Learning, 2013.

VIANA, S. T. **Análise de viabilidade técnica para a recuperação de água em torre de resfriamento**, 2010. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/94569/289241.pdf?sequence=1>>. Acesso em 08 jul. 2017.

WATANABE, S. **Glossário de ecologia**. São Paulo: Academia de Ciências do Estado de São Paulo, 1997. n. 103.

WENDLAND, E. **Modelos Matemáticos e Métodos Numéricos em Águas Subterrâneas**. São Carlos, SP: SBMAC, 2003.

YIN, R. K. **Estudo de caso – planejamento e métodos**. Porto Alegre: Bookman, 2001.

ZOBY, J. L. G.; OLIVEIRA, F. R. **Panorama da qualidade das águas subterrâneas no Brasil**. Brasília: ANA, 2005. Disponível em: <<http://www.ana.gov.br>>. Acesso em: 06 jun. 2017.

APÊNDICE

FORMULAS E CÁLCULOS QUE SERVIRAM DE BASE PARA O ESTUDO

Torre de Resfriamento Moagem

Temperatura de saída da Torre de Resfriamento = 23,0 °C

Temperatura de entrada da torre = 27,4 °C

Cálculo de Evaporação

Fórmula Simplificada:

$$\%E = 0,18 \times \Delta T$$

ΔT = Variação de Temperatura = 27,4 – 23,0 = 4,4 °C

Vazão da torre de resfriamento = 1.900 m³/h

%E porcentagem de evaporação da torre

$$\%E = 0,18 \times \Delta$$

$$\% = 0,18 \times 4,4 = 0,792\%$$

E – evaporação da torre

$$E = \%E \times Q \text{ (vazão da torre)}$$

$$E = \frac{0,792}{100 \cdot 1900} = 15,048 \text{ m}^3/\text{h}$$

Cálculo do Arraste

Fórmula: $A \text{ (m}^3/\text{h)} = \%A \times Q \text{ (m}^3/\text{h)}$

%A – porcentagem de arraste fórmula = 0,1/100

A – arraste de torre formula – $A = \%A \times Q \text{ (vazão da torre)}$

$$A = \frac{0,1}{100 \cdot 1900} = 1,9\text{m}^3/\text{h}$$

Ciclo de Concentração

Fórmula:

$$\text{Ciclo Real} = \frac{M+(\text{Rec.})}{M+(\text{Rep.})}$$

Onde: M+ pode ser: DT, Dca, SiO₂, Cl, SO₄, etc.

Ciclo de concentração da torre de resfriamento usando como reposição somente a água de rejeito da osmose ainda sem tratamento dessa água pelo 3º estágio de osmose que foi acrescentado após o projeto.

Ciclo de concentração = sílica atual da bacia/sílica da água de rejeito sem o tratamento (reposição da torre) – ciclo = 179,7 PPM / 58,6 PPM = 2,55

Sílica Máxima permitida na água da torre de resfriamento para não prejudicar o processo = 150 PPM

Descarga de fundo fórmula $D = E / (\text{ciclo} - 1) - A = 15,048 / (2,55 - 1) - 1,9 = 7,81$ m³/h

Perda líquida (PL) fórmula = arraste (A) + Purga (descarga de fundo) =

PL = 1,9 + 7,81 = 9,71 m³/h

Reposição de água na torre (R) = arraste (A) + descarga de fundo (D) + evaporação (E)

R = 1,9 + 7,81 + 15,048 = 24,75 m³/h

ANEXO

ANEXO 1 - PERDAS DE ÁGUA EM TORRE DE RESFRIAMENTO

As perdas de água em uma torre de resfriamento são pequenas e não superam, via de regra, 2% da vazão da água em circulação, supondo diferenciais térmicos e condições climáticas normais. As perdas se somam da evaporação G_{I0} , do arrastamento de gotas finíssimas pelos ventiladores e, ainda, da purga de desconcentração. Arraste e purga de desconcentração devem ser considerados juntos, como purga G_{Ia} , pois ambos não contribuem para o aumento da dureza da água em circulação.

PERDAS POR EVAPORAÇÃO

As perdas por evaporação estão sujeitas às leis físicas e dependem da carga térmica (Q), da vazão da água em circulação, do diferencial térmico entre as temperaturas da água na entrada e na saída da torre, das condições meteorológicas e da aproximação ao bulbo úmido, conhecido como approach (temperatura de saída da água menos a temperatura de bulbo úmido do ar ambiente). Os cálculos mostram que predomina a influência do diferencial térmico e das condições meteorológicas, enquanto que o approach pouca influência tem.

No clima (tropical, sub-tropical, temperado) predomina o resfriamento por evaporação (calor latente), enquanto na Europa e Estados Unidos, durante os meses frios de inverno, uma forte influência do resfriamento pela troca de calor sensível, com diminuição acentuada da perda de água por evaporação durante esse período.

A perda de água por evaporação pode ser calculada, no seu valor exato, pela seguinte fórmula:

$$G_{I^0} = \frac{G_I (t_1 - t_2)}{\frac{1000 (h_2 - h_1) - t_2}{(x_2 - x_1)}}$$

Onde:

G_l^0 = Perda de água por evaporação (m^3/h ou t/h);

G_l = vazão da água em circulação (m^3/h ou t/h);

$t_1 - t_2$ = Diferencial térmico entre as temperaturas da água na entrada (t_1) e na saída da torre (t_2);

$h_2 - h_1$ = Diferencial de entalpia do ar, na entrada e na saída da torre de resfriamento ($kcal/kg$ ar seco);

$x_2 - x_1$ = Diferencial de conteúdo de vapor do ar úmido, na entrada e na saída da torre de resfriamento (g/kg ar seco).

PERDAS POR ARRASTE

Admite-se que não deveria ultrapassar 0,1% da vazão da água em circulação. Nas torres de resfriamento ALPINA, onde são utilizados os eliminadores de gotas do tipo onda-dupla, construídos de perfis extrudados de PVC, a perda por arraste é de 0,01%.

As perdas por arraste são, portanto, controláveis por meios construtivos. As perdas por evaporação estão sujeitas às leis físicas, dependendo das cargas e das condições de clima, sem possibilidade de serem controladas pelo fabricante.

PURGA DE DESCONCENTRAÇÃO

A purga periódica ou contínua é necessária para evitar a concentração excessiva de sais que aumentam a dureza da água (incrustantes), ou ainda para a drenagem de óleos. Para a vazão da purga vide fórmula no próximo tópico.

CICLOS DE CONCENTRAÇÃO

O total da água perdida por evaporação, arraste e purga de desconcentração é substituído pela água de reposição. Enquanto a perda por evaporação tende a concentrar as impurezas, o arraste e a purga tendem a limitar esta concentração.

A água de circulação, em condições normais de equilíbrio de perdas,

conforme acima descrito, vai concentrando impurezas na medida que é adicionada água fresca de reposição, que nunca é totalmente livre de impurezas.

Para indicar o grau de impurezas da água de circulação, em relação ao grau de impurezas na água de reposição, usa-se o termo “Ciclos de Concentração”. Assim, um Ciclo de Concentração de 2,0 indica que a água em circulação tem o dobro de concentração de impurezas da água de reposição.

Com base na Figura (19), é mostrada a relação entre a perda de água por evaporação, a perda de água por arraste e os ciclos de concentração.

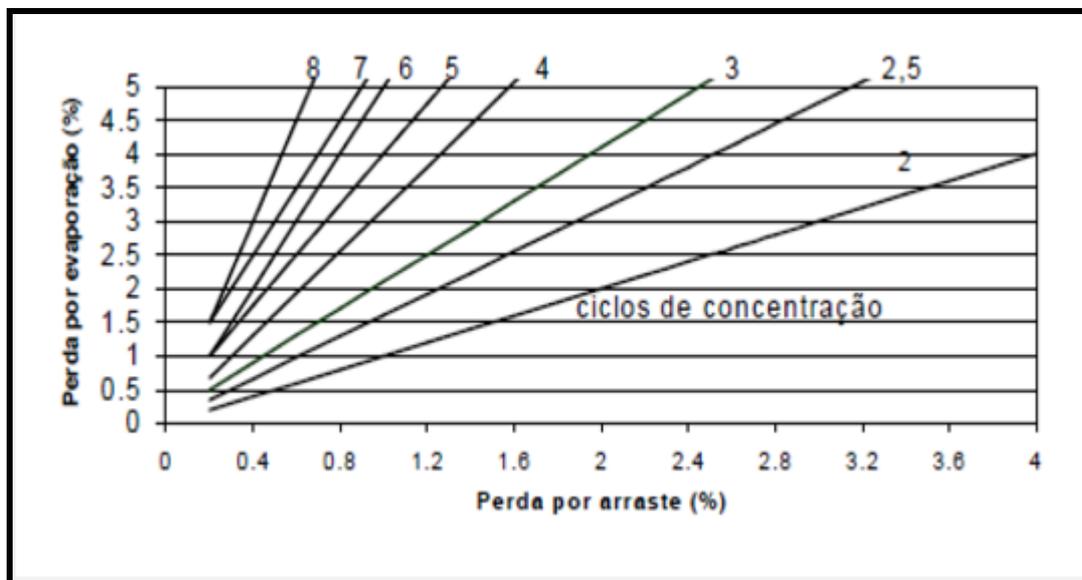


Figura 19 – Relação entre perda por evaporação, perda por arraste e ciclos de concentração.

Fonte: Alpina, 2017.

As características da água de reposição e dos aditivos anti-incrustantes e anti-corrosivos determinam os ciclos de concentração permissíveis, no limite dos quais haverá problemas de incrustação e/ou corrosão. Empresas especializadas em tratamento de água indicarão, com base em uma análise minuciosa das características da água de reposição, os ciclos de concentração máximos permitidos.

Com base nessa indicação calcula-se a purga contínua pela seguinte fórmula:

$$\text{Purga (\%)} = \frac{\text{Perda de água por evaporação (\%)} - \text{Perda por arraste (\%)}}{\text{Ciclos de conc. permitidos} - 1}$$

Os fabricantes de anti-incrustantes e anti corrosivos formulam também os aditivos biocidas, eventualmente necessários para inibir o crescimento de microrganismos, especialmente em águas contaminadas e com baixa vazão de purga.

ANEXO 2

Equação 01

$$\text{EQ1: } F_t = F_g + F_p + F_m + F_{os}$$

F_t = Potencial total

F_g = Potencial gravitacional

F_p = Potencial de pressão

F_m = Potencial mátrico

F_{os} = Potencial osmótico

Equação 02

$$\text{EQ2: } \%R = \frac{V_p}{V_a} \cdot 100$$

$\%R$ = Recuperação de água

V_p = Água potável

V_a = Volume de água de alimentação do sistema

Equação 03

$$\text{EQ3: } \%E = \left(\frac{C_p}{C_a} - 1 \right) \cdot 100$$

C_p = Concentração de sais na água dessalinizada

C_a = Concentração de sais na água a dessalinizar

$\%E$ = percentual ou rejeição de sais (a eficiência da membrana)

ANEXO 3

TERMINOLOGIA E DEFINIÇÕES RELACIONADAS À TORRE DE RESFRIAMENTO

- *Arraste (drift)*: perda de gotículas de água que são arrastadas pela corrente de ar para a atmosfera. Para reduzir o arraste, são utilizados alguns dispositivos, como as venezianas, as quais são alocadas na entrada de ar, e os eliminadores de gotas, os quais representam um conjunto de chicanas projetado para recolher as gotículas de água presentes no ar afluyente.
- *Purga (blowdown)*: parcela da água circulante removida de maneira contínua ou intermitente, com a finalidade de controlar a concentração dos sólidos dissolvidos e outras impurezas.
- *Make-up*: água de reposição adicionada continuamente ao sistema, para compensar as perdas por evaporação, arraste, purga e vazamentos.
- *Pluma*: o fluxo de ar saturado que sai da torre de resfriamento, com concentração salina praticamente nula. A pluma é visível quando o seu vapor d'água se condensa em contato com o ar ambiente à temperatura menor.
- *Approach*: diferença entre a temperatura da água fria e a temperatura de bulbo úmido do ar que entra na torre. Normalmente, as torres de resfriamento apresentam um valor mínimo de *approach* igual a 2,8 °C.
- *Range*: diferença entre a temperatura da água quente e a temperatura da água fria.
- *Carga térmica*: quantidade de calor removido da água que circula no

interior da torre.

- Recheio: estrutura interna da torre com a função de aumentar o tempo e a superfície de contato entre a água e o ar e, conseqüentemente, a transferência de massa e de calor. O recheio pode ser do tipo respingo (gotejamento) ou do tipo filme (liminar). O enchimento do tipo respingo consiste em uma série de barras com diversos arranjos a fim de gerar gotículas de água. O enchimento do tipo filme consiste em finas películas de diferentes formas com a finalidade de espalhar a água pela superfície da torre. Como não há geração de gotículas, o enchimento do tipo filme é mais eficiente, pois permite velocidade de ar superiores, maior transferência de calor, e menor perda de arraste. Entretanto, a chance de acúmulo de sujeiras entre as placas é maior.