

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
ENGENHARIA MECÂNICA

MAURÍCIO RIBEIRO MACIEL FILHO (DRE 111020098)

ANÁLISE DE PERFORMANCE DE EQUIPAMENTOS DE
DESSALINIZAÇÃO POR EBULIÇÃO EM MÚLTIPLOS EFEITOS

MACAÉ – RJ

2017

MAURÍCIO RIBEIRO MACIEL FILHO (DRE 111020098)

ANÁLISE DE PERFORMANCE DE EQUIPAMENTOS DE DESSALINIZAÇÃO POR EBULIÇÃO EM MÚLTIPLOS EFEITOS

Trabalho de conclusão de curso apresentada à Universidade Federal do Rio de Janeiro, Campus Macaé, como requisito parcial para obtenção do título de Graduação em Engenharia Mecânica, sob orientação do Prof. Diego Malagueta.

MACAÉ – RJ

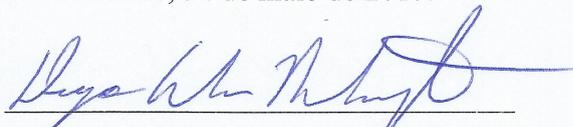
2017

MAURÍCIO RIBEIRO MACIEL FILHO (DRE 111020098)

ANÁLISE DE PERFORMANCE DE EQUIPAMENTOS DE
DESSALINIZAÇÃO POR EBULIÇÃO EM MÚLTIPLOS EFEITOS

Trabalho de conclusão de curso apresentada à
Universidade Federal do Rio de Janeiro,
Campus Macaé, como requisito parcial para
obtenção do título de Graduação em
Engenharia Mecânica, sob orientação do Prof.
Diego Cunha Malagueta.

Macaé, 31 de maio de 2017.



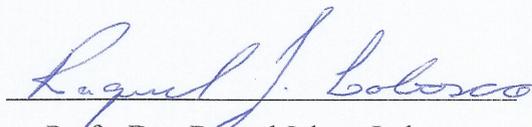
Prof. Dr. Diego Cunha Malagueta

Universidade Federal do Rio de Janeiro



Profa. Dra. Elisa Pinto da Rocha

Universidade Federal do Rio de Janeiro



Profa. Dra. Raquel Jahara Lobosco

Universidade Federal do Rio de Janeiro

MACAÉ – RJ

2017

RESUMO

A demanda mundial por água doce cresce ao mesmo tempo e velocidade que a disponibilidade de água doce prontamente disponível diminui. A sociedade necessita desse recurso natural tanto para consumo direto, quanto para utilização em processos industriais. Diversas técnicas já foram desenvolvidas para atender à crescente demanda de água doce. Um dos métodos em desenvolvimento é a dessalinização. Existem vários métodos de dessalinização que permitem gerar água doce independentemente do local, fonte de água e fonte de energia. Considerando este contexto, este trabalho almeja discutir o atual cenário e os principais desafios da dessalinização ao redor do mundo e apresenta uma visão geral do funcionamento dos principais métodos atualmente utilizados. Este documento também descreve o funcionamento dos componentes de um dessalinizador e inclui o desenvolvimento de um sistema de equações para o dimensionamento de um equipamento de dessalinização por ebulição em múltiplos efeitos (MEB), que utiliza trocadores de calor do tipo casco-serpentina como evaporador e trocadores de calor do tipo casco-tubo como pré-aquecedores e condensador final. Por fim, o sistema de equações é resolvido de diversas formas, alterando o valor dos parâmetros e número de efeitos do equipamento com o objetivo de fazer um estudo comparativo do dimensionamento de um dessalinizador por ebulição em múltiplos efeitos.

Palavras-chave: Dessalinização; ebulição; energia; água salgada; MEB; trocador de calor.

ABSTRACT

The world-wide demand of freshwater is growing at the same time and speed of the decreasing of its availability in the world. The society needs this natural resource to be used as direct consumption, and also to be used on industrial processes. Some techniques have already been developed to meet the growing demand of freshwater. One of these techniques is desalination. There are several desalination methods which allows freshwater to be generated regardless of location, water source and energy source. Considering the outlined, this document aims to discuss the current scenario and the main challenges of desalination worldwide, presenting an overview of the operation of the main methods currently used. This document also details the operation and the components of a desalination equipment, including the development of a system of equations for the design of a multiple effect boiling desalination equipment, which uses helical-coil heat exchangers as evaporator and shell-tube heat exchangers as pre-heaters and final condenser. Finally, the system of equations developed is solved in several ways, changing some parameters values and the number of effects of the equipment in order to carry out a comparative study of the design of a multiple effect boiling desalination equipment.

Key words: Desalination; boiling; energy; seawater; MEB; heat exchanger.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização da água no planeta.-----	13
Figura 2 - Capacidade instalada por tipo de fonte de água no mundo em 2010.-----	15
Figura 3 - Capacidade instalada no mundo por aplicação em 2010.-----	16
Figura 4 - Definição de dessalinização.-----	19
Figura 5 - Principais métodos de dessalinização.-----	20
Figura 6 - Princípio da dessalinização por eletrodialise. -----	21
Figura 7 - Princípio da dessalinização por osmose reversa -----	21
Figura 8 - Evaporação por ebulição.-----	22
Figura 9 - Evaporação por flashing.-----	23
Figura 10 - Dessalinização em efeito único. -----	24
Figura 11 - Esquemático de um dessalinizador por ebulição em três efeitos.-----	29
Figura 12 - Exemplo de trocador de calor do tipo casco-tubo. -----	30
Figura 13 - Exemplo de trocador de calor do tipo casco-serpentina. -----	31
Figura 14 - Exemplo de um desumidificador. -----	32
Figura 15 - Fluxograma do modelo de dimensionamento do dessalinizador MEB.---	35
Figura 16 - Dimensões de um trocador de calor casco-serpentina. -----	41
Figura 17 - Ilustração de um trocador de calor casco-tubo um passo.-----	44
Figura 18 - Algumas dimensões de um trocador de calor casco-tubo. -----	44
Figura 19 - Temperatura de ebulição e de saída do pré-aquecedor em cada efeito. ---	55
Figura 20 - Vazão mássica de destilado gerado por ebulição e por flashing em cada efeito. -----	57
Figura 21 - Área específica de transferência de calor em função do número de efeitos e da temperatura máxima de ebulição. -----	58
Figura 22 - Energia inicial por unidade de massa em função do número de efeitos do equipamento e da temperatura máxima de ebulição.-----	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros constantes em todos os dimensionamentos.-----	53
Tabela 2 - Dimensões do trocador de calor casco-serpentina.-----	54
Tabela 3 - Dimensões do trocador de calor casco-tubo.-----	54
Tabela 4 - Valor dos parâmetros de transferência de calor.-----	56

LISTA DE SÍMBOLOS

- \dot{m} – Vazão mássica (kg/s);
 X – Concentração de sal (g/kg);
 D – Vazão mássica de destilado gerado por ebulição (kg/s);
 d – Vazão mássica de destilado gerado por flashing (kg/s);
 T – Temperatura ($^{\circ}\text{C}$);
 BPE – Elevação do ponto de ebulição ($^{\circ}\text{C}$);
 Q – Carga térmica (kW);
 U – Coeficiente global de transferência de calor ($\text{W}/\text{m}^2\text{^{\circ}\text{C}}$);
 h – Coeficiente de transferência de calor ($\text{W}/\text{m}^2\text{^{\circ}\text{C}}$);
 Re – Número de Reynolds;
 Nu – Número de Nusselt;
 De – Número de Dean;
 Pr – Número de Prandtl;
 λ – Calor latente (kJ/kg);
 c_p – Calor específico (kJ/kg $^{\circ}\text{C}$);
 k – Condutividade térmica ($\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$);
 μ – Viscosidade dinâmica (kg/m*s);
 ν – Viscosidade cinemática (m^2/s);
 α – Difusividade térmica (m^2/s);
 ρ – Densidade (kg/m 3);
 A – Área de transferência de calor (m^2);
 d_i – Diâmetro interno da serpentina (m);
 d_e – Diâmetro externo da serpentina (m);
 P – Passo da serpentina (m);
 R_c – Raio de curvatura da serpentina (m);
 γ – Passo adimensional da serpentina;
 D_h – Diâmetro hidráulico do casco da serpentina (m);
 D_c – Diâmetro do casco (m);
 DI_t – Diâmetro interno dos tubos do casco-tubo (m);
 DE_t – Diâmetro externo dos tubos do casco-tubo (m);
 N_t – Número de tubos do casco-tubo;

N_p – Número de passes do casco-tubo;

N_d – Número de defletores do casco-tubo;

L_d – Distância entre defletores do casco-tubo (m);

P_t – Passo dos tubos do casco-tubo (m);

C – Distância entre tubos do casco-tubo (m);

L – Comprimento dos tubos do casco-tubo (m);

$D_{\text{equi,c}}$ – Diâmetro equivalente do casco do casco-tubo (m);

$LMDT$ – Média logarítmica das diferenças de temperatura ($^{\circ}\text{C}$);

F – Fator de correção;

E – Efetividade do trocador de calor casco-tubo;

C – Razão de capacitância;

S – Fator de temperatura;

N – Número de unidades de transferência;

R – Razão de temperatura;

RP – Razão de performance.

SUMÁRIO

RESUMO	4
ABSTRACT	5
LISTA DE FIGURAS	6
LISTA DE TABELAS	7
LISTA DE SÍMBOLOS	8
1. INTRODUÇÃO	12
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1. PROCESSOS DE DESSALINIZAÇÃO.....	19
2.2. DESSALINIZAÇÃO POR MEMBRANA.....	20
2.3. DESSALINIZAÇÃO TÉRMICA.....	22
2.4. DESSALINIZAÇÃO TÉRMICA EM EFEITO ÚNICO.....	23
2.5. DEMANDA DE ENERGIA.....	25
2.5.1. Energias renováveis.....	25
2.5.2. Reaproveitamento da energia.....	26
2.6. DESSALINIZAÇÃO POR EBULIÇÃO EM MÚLTIPLOS EFEITOS.....	28
3. METODOLOGIA	33
3.1. BALANÇO DE MASSA.....	35
3.2. BALANÇO DE ENERGIA.....	37
3.3. EQUAÇÕES DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	39
3.3.1. Trocador de calor casco-serpentina.....	40
3.3.2. Trocador de calor casco-tubo.....	43
3.4. PARÂMETROS DE PERFORMANCE.....	49
3.5. RESOLUÇÃO DO SISTEMA.....	50
4. ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DE DADOS	53
4.1. ANÁLISE INDIVIDUAL.....	55
4.1.1. Perfil de temperaturas.....	55
4.1.2. Perfil de vazão mássica de destilado.....	56

4.2.	ANÁLISE COMPARATIVA	57
4.2.1.	Área específica de transferência de calor por número de efeitos	57
4.2.2.	Energia inicial por unidade de massa	58
5.	CONCLUSÃO.....	61
	APÊNDICE A – PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS	63
	REFERÊNCIAS.....	69

1. INTRODUÇÃO

Este documento apresenta os componentes, explica o funcionamento e realiza um estudo do dimensionamento de um equipamento de dessalinização por ebulição em múltiplos efeitos (MEB). Inicia-se com uma discussão do atual cenário e os principais desafios da dessalinização ao redor do mundo, expondo uma visão geral do funcionamento dos principais métodos de dessalinização da água salgada utilizados atualmente.

Em seguida é apresentado o detalhamento do funcionamento de um equipamento de dessalinização por ebulição em múltiplos efeitos que utiliza trocadores de calor do tipo casco-serpentina como evaporadores e trocadores de calor do tipo casco-tubo como pré-aquecedores; exibindo também as principais características de seus principais componentes.

O sistema de equações para o dimensionamento do equipamento é desenvolvido e em seguida é resolvido de diversas formas, alterando o valor dos parâmetros e o número de efeitos do equipamento com o objetivo de fazer um estudo comparativo e entender a influência e a importância de cada parâmetro durante o projeto de uma planta de dessalinização.

Primeiramente, é necessário discutir qual a importância da dessalinização para combater o abuso da utilização das fontes naturais de água doce (rios, lagos e águas subterrâneas) e combater a escassez de água doce.

A água é uma substância química abundante na Terra, onde cobre grande parte de sua superfície. Além disso, é o maior constituinte dos fluidos dos seres vivos e por isso é essencial para que esses seres sobrevivam. A água também está presente em diversas atividades humanas como na indústria, agricultura e geração de energia. Estima-se que 97,5% de toda a água do planeta é água salgada dos oceanos, sendo que cerca de 80% da água restante está congelada nas calotas polares ou em forma de neve. Ou seja, apenas 0,5% de toda a água do planeta está disponível em rios, lagos e águas subterrâneas e podem ser quase que diretamente utilizadas por seres humanos. A Figura 1 ilustra a localização da água no planeta (KUCERA, 2014).

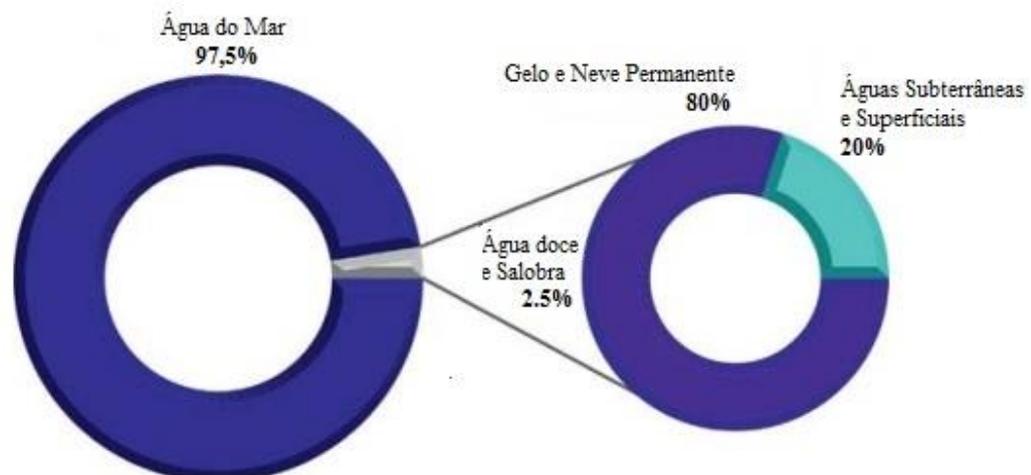


Figura 1 - Localização da água no planeta.

Fonte: Traduzido de KUCERA, 2014.

Enquanto algumas regiões do planeta possuem população pequena e fácil acesso a grandes quantidades de água fresca, outras regiões mais industrializadas e populosas enfrentam sérios riscos de estresse hídrico. É estimado que cerca de 40% da população mundial vive hoje sob a situação de estresse hídrico, em regiões onde a oferta anual de água é inferior a 1.700 metros cúbicos por habitante, limite mínimo considerado seguro pela Organização das Nações Unidas (ONU). As regiões que não são ricas em recursos hídricos e que apresentam crescimento populacional e industrial rápido e instável têm grande probabilidade de sofrer com estresse hídrico no futuro (ANA, 2015).

Outro fato que tende a agravar o problema de disponibilidade de água é que a demanda de água per capita tem aumentado consideravelmente, isto é, os padrões de vida das pessoas demandam que muita água seja utilizada nas indústrias, na agricultura, para uso próprio e outros. A Organização Mundial de Saúde (OMS) estima que até 2025, a demanda mundial por água doce será 56% maior do que a água doce disponível no planeta. Por todos os motivos mencionados, muitos países têm investido cada vez mais em campanhas e medidas de conservação e reutilização da água doce (KUCERA, 2014).

O Brasil possui um dos maiores potenciais hídricos do mundo, o país detém 12% das reservas de água doce superficiais e subterrâneas do planeta. A situação hídrica do país não é diferente do que acontece em todo o mundo, a população está concentrada nas áreas de menor disponibilidade de água doce superficial. O fato do Brasil possuir dimensões continentais e apresentar grande contraste em relação ao clima, distribuição populacional, distribuição da economia e desenvolvimento social faz com que diversos cenários relacionados aos recursos

hídricos estejam presentes no país. O potencial hídrico do Brasil não está igualmente distribuído no espaço geográfico do país. De toda a água doce, mais de 73% está localizada na bacia Amazônica, onde habitam apenas 5% da população. As regiões Sudeste e Nordeste, onde residem a maior parte da população, são os estados que possuem menos recursos hídricos e dessa forma apresentam maior histórico de secas e escassez de água (LIMA, 2001).

Historicamente, um dos métodos mais utilizadas para combater a escassez de água em algumas regiões é o transporte da água de outros lugares com maior disponibilidade, seja por bombeamento, veicular ou transposição de rios. Porém, esse método nem sempre é simples de ser aplicado devido a barreiras técnicas, políticas e sociais. Atualmente, métodos de utilização mais eficientes, reciclagem e reutilização da água tem ficado cada vez mais popular. É comum empresas, governo e a mídia divulgar e praticar medidas de sustentabilidade e conservação da água (KUCERA, 2014).

Outro método que será essencial para que a futura demanda de água doce do planeta seja atingida é a dessalinização da água. Dessalinização consiste em remover partículas sólidas de sal dissolvidas da água salgada ou da água salobra. Retirar a alta concentração de sal da água irá se tornar necessário não só para criar novas fontes de água, mas também para fazer parte dos processos de tratamento para reutilização de águas residuais. Tradicionalmente a água do mar é a principal fonte quando se fala em dessalinização, porém ela é apropriada apenas para ser implementada em regiões litorâneas. Outras fontes de água para dessalinização como aquíferas salinos, águas residuais e água salobra tem crescido na última década, principalmente em regiões localizadas no interior. Todas essas fontes apresentam características de alta composição de sal dissolvido, ou seja, inapropriado para uso potável e industrial. A Figura 2 compara a capacidade de dessalinização com diferentes fontes de água em funcionamento no ano de 2010 (KUCERA, 2014).

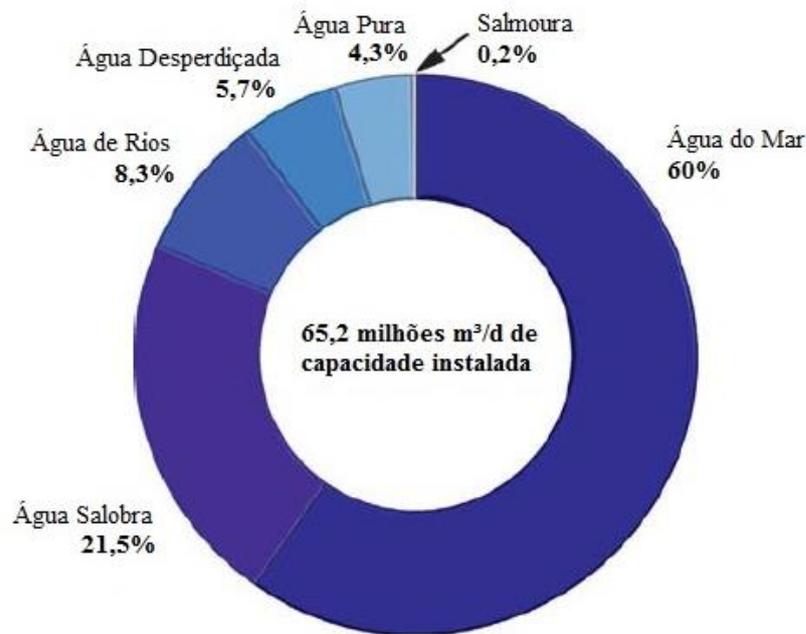


Figura 2 - Capacidade instalada por tipo de fonte de água no mundo em 2010.

Fonte: Traduzido de KUCERA, 2014.

Algumas regiões dos Estados Unidos e da Espanha vêm constantemente apresentando problemas com a escassez de água e novas discussões relacionadas a gestão hídrica são criadas. Entre outras medidas, ambos países têm investido no estudo e na pesquisa dos diversos processos de dessalinização da água. Em outras regiões que já apresentam baixa disponibilidade de água doce há muitos anos (Oriente Médio, Austrália e Caribe), a dessalinização da água do mar como fonte de água doce já é completamente desenvolvida em escala industrial. Além da necessidade, alguns desses países possuem os recursos financeiros necessários para investir nessa tecnologia de alto custo e que requer uma quantidade significativa de energia para funcionar (KALOGIROU, 2009).

Existiam em 2010 aproximadamente 15 mil estações de dessalinização de água pelo mundo com capacidade total de 65 milhões de metros cúbicos de água doce produzida por dia. Aproximadamente dois terços de toda água dessalinizada é utilizada como água potável para os municípios, enquanto aproximadamente um terço é utilizado na indústria e para geração de energia. Outros exemplos de aplicação da água dessalinizada são irrigação, turismo e militar. A Figura 3 apresenta a distribuição do uso da água dessalinizada para diferentes aplicações (KUCERA, 2014 apud PANKRATZ, 2010).

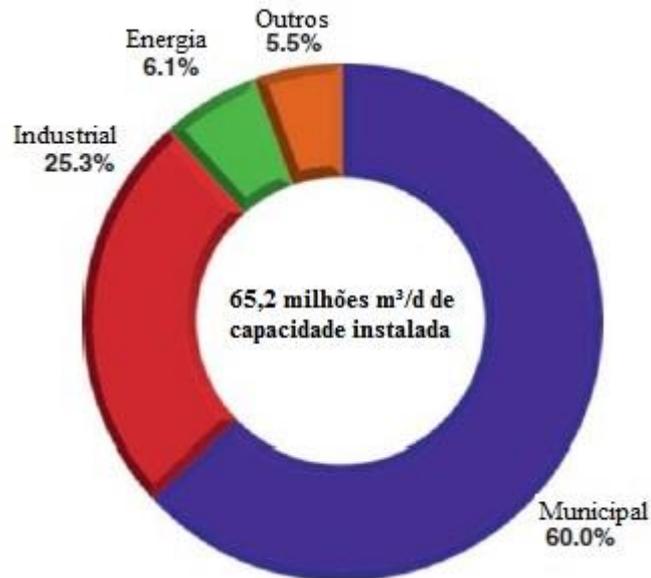


Figura 3 - Capacidade instalada no mundo por aplicação em 2010.

Fonte: Traduzido de KUCERA, 2014, apud PANKRATZ, 2010.

Vale ressaltar que além de fornecer água doce para processos industriais, agricultura, geração de energia e uso doméstico, a dessalinização é uma das formas de se obter a água utilizada em navios transatlânticos, submarinos e plataformas de exploração de petróleo.

A água potável obtida da dessalinização da água do mar antes de ser distribuída pela rede pública deve preencher todos os requisitos pré-estabelecidos por organizações que regulamentam a qualidade de água. A água que é destinada para consumo humano precisa ter um equilíbrio na concentração dos sais minerais dissolvidos. Uma água puramente dessalinizada é ácida e corrosiva, por isso, tem de ser feito algum tratamento para que esta seja mais apropriada para o consumo humano, antes de ser distribuída pela rede de abastecimento. A salinidade da água dos oceanos varia entre 35.000 partes por milhão (ppm) e 45.000ppm. Segundo a OMS, a salinidade da água adequada para consumo humano deve ser inferior a 500ppm. Os equipamentos de dessalinização mais eficientes utilizados atualmente atingem uma concentração de até 5ppm de sais na água (KALOGIROU, 2009).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esse capítulo apresenta os princípios de funcionamento dos principais métodos de dessalinização e suas diferenças, e descreve os principais desafios para o desenvolvimento da tecnologia. As características e o funcionamento dos componentes de alguns equipamentos de dessalinização são detalhados ao longo do capítulo, bem como os efeitos desses processos no meio ambiente.

Os principais elementos de um sistema de dessalinização são:

- a) Captação da água: a estrutura utilizada para extrair a fonte de água salgada e fornece-la para o processo;
- b) Pré-tratamento: remoção de sólidos em suspensão e controle de crescimento de indivíduos biológicos para preparar a água salgada para dessalinização;
- c) Dessalinização: processo de remoção de sólidos dissolvidos, principalmente o sal, da água salgada;
- d) Pós-tratamento: adição de químicos a água dessalinizada produzida para prevenir oxidação das tubulações seguintes;
- e) Controle da salmoura: é o manuseio e despejo ou reuso da salmoura gerada durante a dessalinização (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2008).

A importância de cada elemento sofre alterações dependendo do método de dessalinização utilizado e da qualidade da fonte de água salgada e de onde ela é retirada. Plantas de dessalinização requerem uma fonte confiável de água salgada de alimentação. A quantidade e a qualidade da água salgada de alimentação são características fundamentais para o projeto de um equipamento de dessalinização (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2008). As estruturas de captação de água salgada para plantas de dessalinização podem causar impactos adversos ao ambiente ao sugar peixes, mariscos e outros organismos presentes na água para dentro do sistema. Uma vez dentro do sistema, esses organismos podem morrer ou sofrer lesões devido a exposição ao calor, elementos químicos ou desgaste físico. Normalmente, telas são adicionadas as estruturas de captação para diminuir o número de organismos dentro do sistema (EPA, 2014).

Antes de entrar no equipamento de dessalinização, a água salgada precisa sofrer pré-tratamento para evitar incrustações, corrosão e descamação nas tubulações e carcaça do equipamento. Esses danos na tubulação causam redução da performance do equipamento. Além de evitar danos a tubulação, o pré-tratamento remove sólidos em suspensão e controla o crescimento de indivíduos biológicos. A qualidade da fonte de água salgada disponível vai determinar qual a extensão do pré-tratamento necessário.

O processo de dessalinização representa o passo no qual solutos dissolvidos são consideravelmente removidos da água salgada para produzir água dessalinizada. Os principais processos são discutidos ao longo deste capítulo.

A água destilada produzida pelos processos de dessalinização é quase que completamente livre de sólidos dissolvidos, isso resulta em uma água de baixa alcalinidade. Caso esse destilado não receba um pós-tratamento ela corrói as tubulações, inserindo metais na água que será posteriormente ingerida pelas pessoas e diminuindo o tempo de vida dos equipamentos (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2008). Além dos danos ao ambiente, a dessalinização da água também remove totalmente o iodo da água. Pesquisadores têm estudado uma possível ligação entre a utilização da água dessalinizada com a deficiência de iodo na população de países que dependem desta tecnologia como principal fonte de água (OVADIA; GEFEL; AHARONI; TURKOT; FYTLOVICH; TROEN, 2016).

A dessalinização produz grande quantidade de salmoura contendo alta concentração de sal, temperatura acima da temperatura ambiente, resíduos do pré-tratamento sofrido antes da dessalinização e até resíduos da corrosão dos componentes internos do equipamento. Para reduzir o impacto ambiental do despejo da salmoura no oceano, ela costuma ser diluída em outro fluxo de água. Outra forma de diluir a salmoura é através de uma tubulação com várias ramificações espalhadas pelo fundo do oceano, com cada ramificação contendo furos que liberam a salmoura gradualmente ao longo do comprimento dos tubos. A salmoura é mais densa do que a água do mar, portanto se aloja no fundo do oceano e pode gerar danos ao ecossistema. Apesar das condições do oceano permitir a diluição rápida, minimizando os danos, o despejo da salmoura deve ser estudado e realizado cautelosamente (LATTEMANN; HÖPNER, 2008).

2.1. Processos de dessalinização

Os principais métodos industriais de dessalinização da água consistem na aplicação de uma forma de energia (térmica, mecânica ou elétrica) em um volume de água salgada. O resultado desse processo é a obtenção de um volume de água praticamente livre de sal e um volume de rejeito extremamente concentrado, rejeito este definido como água salobra ou salmoura dependendo da concentração de sal (EL-DESSOUSKY; ETTOUNEY, 2002).

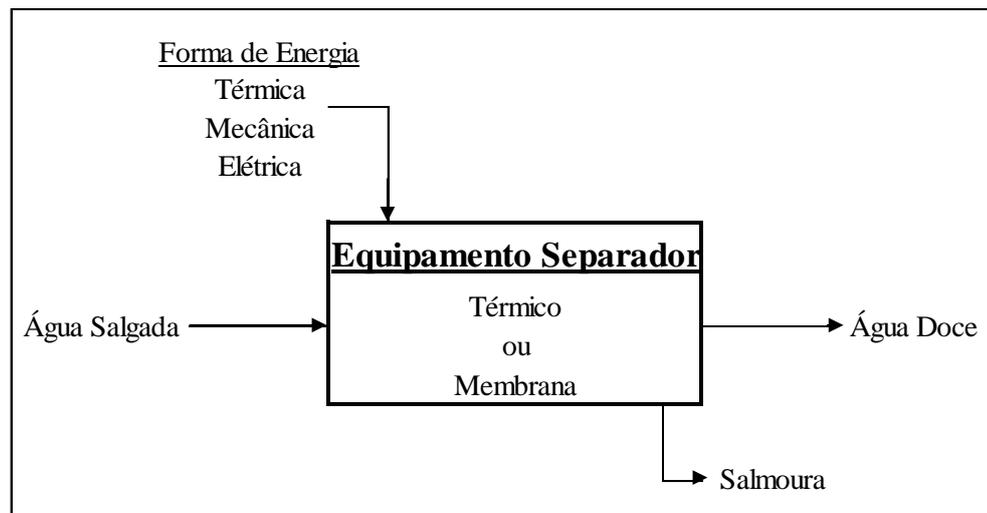


Figura 4 - Definição de dessalinização.

Fonte: Adaptado de EL-DESSOUSKY e ETTOUNEY, 2002.

Esses métodos normalmente envolvem a mudança de fase da água ou a utilização de membranas semipermeáveis para separar o soluto do solvente. Os que envolvem mudança de fase necessitam de energia na forma de calor, por isso, também são conhecidos como processos de dessalinização térmica. Os métodos que envolvem membranas semipermeáveis necessitam de que energia elétrica seja fornecida para operar as bombas ou para ionizar o sal (KALOGIROU, 2009). Os principais métodos de ambas categorias são apresentados na Figura 5.

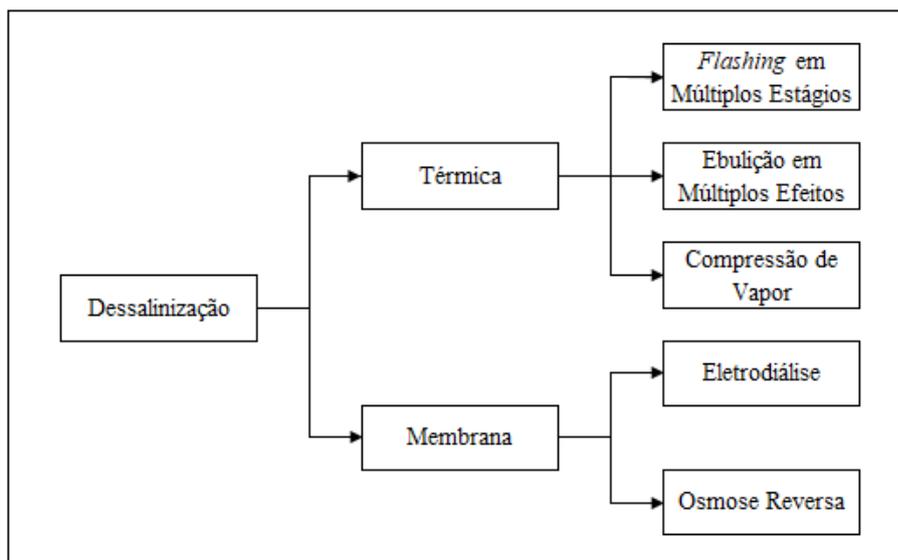


Figura 5 - Principais métodos de dessalinização.

Fonte: Elaboração própria.

Entre as plantas de dessalinização instaladas no mundo, o método por osmose reversa (RO) é o que apresenta a maior capacidade de água dessalinizada. Em 2010, os equipamentos de dessalinização por osmose reversa (RO) eram responsáveis por 60% de toda água dessalinizada no mundo, enquanto o processo por *flashing* em múltiplos estágios (MSF) representava 26,8% e por ebulição em múltiplos efeitos (MEB) representava 8% (KUCERA, 2014). O motivo da baixa utilização do método MEB é apresentado mais à frente no Tópico 2.6. Uma breve discussão do funcionamento destes métodos é apresentada a seguir.

2.2. Dessalinização por membrana

São dois os principais métodos de dessalinização por membrana: a eletrodiálise (ED) e a osmose reversa (RO). Ambos os processos geram água com alta concentração de sal (salmoura) de um lado da membrana e água dessalinizada de outro lado. O princípio de funcionamento da dessalinização por eletrodiálise (ED) é a aplicação de uma diferença de potencial elétrico entre duas placas para acelerar o processo de separação dos íons de sal da água salgada através de membranas. Água salgada contém sais dissolvidos separados em íons de sódio carregados positivamente (cátions) e íons de cloro carregados negativamente (ânions). Esses íons são atraídos pelo eletrodo opostamente carregado passando através de membranas. Ao final são criados fluxos de água dessalinizada e de água concentrada (EL-DESSOUSKY; ETTOUNEY, 2002).

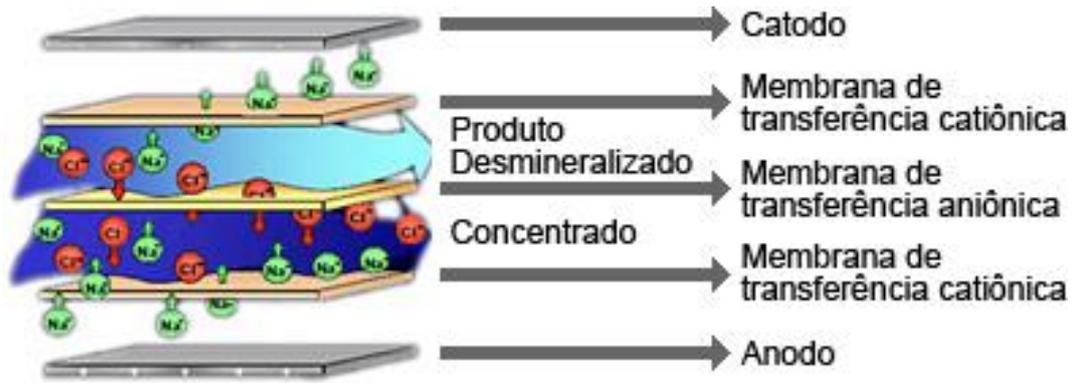


Figura 6 - Princípio da dessalinização por eletrodialise.

Fonte: Website da Hidrodex.

O princípio de funcionamento da dessalinização por osmose reversa (RO) é a separação do solvente de um soluto através de uma membrana permeável ao solvente e semipermeável ao soluto. Essa separação ocorre quando uma força de pressão é aplicada sobre a solução. Neste caso o solvente é a água, e o soluto é o sal (EL-DESSOUSKY; ETTOUNEY, 2002).

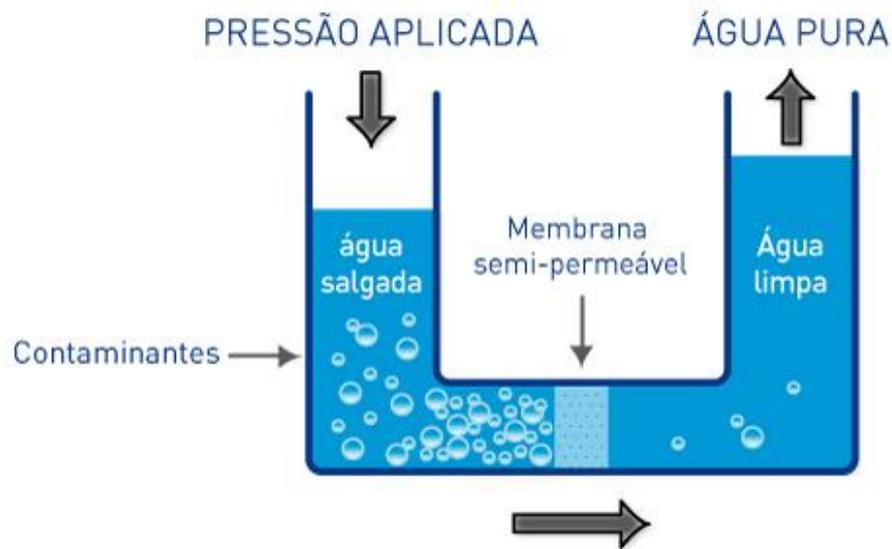


Figura 7 - Princípio da dessalinização por osmose reversa

Fonte: Website da Pentair.

2.3. Dessalinização térmica

Os métodos de dessalinização térmica baseiam-se principalmente em dois processos: o congelamento seguido de derretimento da água salgada, e a vaporização da água salgada seguido da condensação de um vapor livre de sal. Porém, neste documento vamos discutir apenas os processos que envolvem vaporização seguida de condensação. Esses processos imitam um fenômeno que ocorre naturalmente e é responsável por criar a maior fonte de água doce do planeta, as chuvas. A chuva é resultado de um processo natural de dessalinização através da energia solar. O calor da radiação solar que incide na superfície dos oceanos provoca a evaporação da água, gerando um vapor livre de sal. Esse vapor de água é transportado pelos ventos até que condensam e precipitam.

Uma diferença dos processos industriais de dessalinização, quando comparada ao fenômeno das chuvas, é a forma de como ocorre a vaporização da água salgada. São dois os princípios utilizados em equipamentos industriais para vaporizar a água salgada, a ebulição e o *flashing*. A ebulição de um fluido consiste na transformação do estado líquido para o de vapor através do seu aquecimento até que sua pressão de vapor seja maior que a pressão do ambiente na qual está submetido.



Figura 8 - Evaporação por ebulição.

Fonte: Elaboração própria.

O *flashing* ocorre ao forçar a passagem da água em sua temperatura de ebulição (saturada) através de um orifício ou válvula redutora de pressão. A pressão do fluido é reduzida e conseqüentemente a temperatura de ebulição reduz. Deste modo, parte da água que estava a uma temperatura mais alta do que sua atual temperatura de ebulição se transforma em vapor.

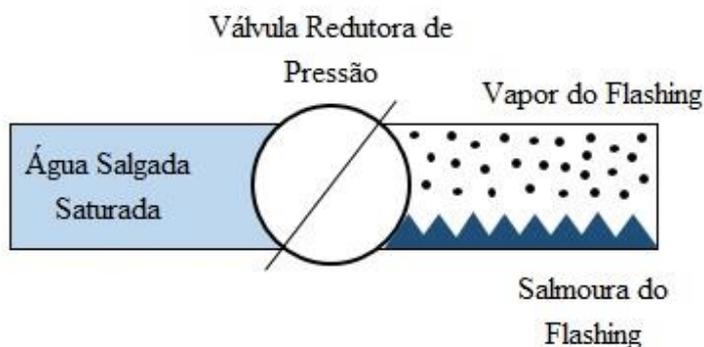


Figura 9 - Evaporação por flashing.

Fonte: Elaboração própria.

Os três principais métodos de dessalinização térmica são: destilação por *flashing* em múltiplos estágios (*Multi-Stage Flash* ou MSF), destilação por ebulição em múltiplos efeitos (*Multi Effect Boiling* ou MEB) e destilação por compressão de vapor (*Vapor Compression* ou VC) (KALOGIROU, 2009).

O funcionamento desses três métodos apresenta alguns pontos semelhantes e são apresentados no Tópico 2.5.2. Antes de entrar em detalhes relacionados ao funcionamento dos métodos que são mais utilizados na indústria, vamos entender como funciona o método de dessalinização por ebulição em efeito único.

2.4. Dessalinização térmica em efeito único

O método de dessalinização térmica em efeito único é um dos métodos mais simples e praticamente não existem aplicação a nível industrial, porém apresenta diversos elementos que também estão presentes nos métodos mais elaborados. Portanto, entender como esse método funciona é essencial para facilitar o entendimento dos principais métodos de dessalinização térmica. A Figura 10 apresenta um esquemático do dessalinizador térmico em efeito único que utilizar um trocador de calor do tipo casco-serpentina como evaporador. Existem dois fluxos (água salgada e vapor de fonte de calor) entrando no equipamento e três fluxos (condensado, vapor gerado e salmoura) deixando o equipamento.

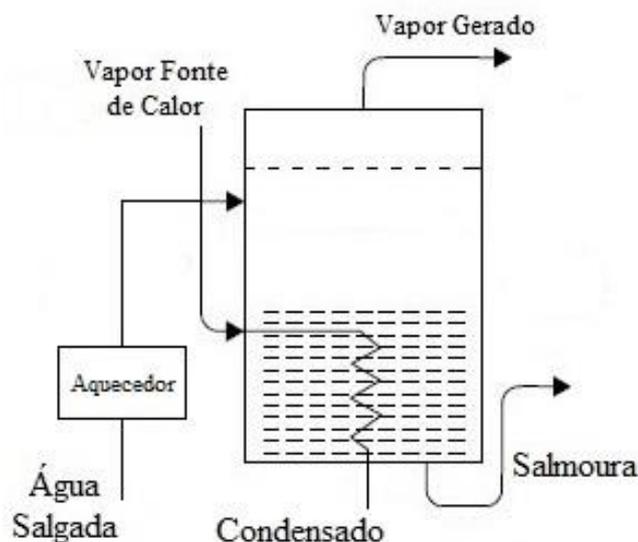


Figura 10 - Dessalinização em efeito único.

Fonte: Adaptado de KALOGIROU, 2009.

O vapor fonte de calor é utilizado para fornecer a energia necessária para realizar a mudança de fase da água. Esse vapor de fonte de calor pode ser proveniente de outros processos industriais ou pode ser gerado apenas para ser utilizado no equipamento. Antes de entrar no equipamento, a água salgada de alimentação é aquecida até o ponto de ebulição relativa a pressão na qual está submetida (KALOGIROU, 2009).

Quando a água salgada, em sua temperatura de ebulição, é forçada a entrar no equipamento através de um orifício, parte de sua massa é evaporada por *flashing*. O restante da água salgada de alimentação (mais concentrada) é alojada dentro do casco do evaporador e forma uma piscina. Parte desta água é então evaporada por ebulição ao trocar calor com o vapor da fonte de calor. O vapor gerado pelos dois fenômenos, *flashing* e ebulição, é um dos fluxos que deixam o equipamento. Esse vapor gerado é praticamente livre de sal e forma água dessalinizada após ser condensado. O vapor de fonte de calor é condensado à medida que troca calor com a água salgada, e deixa o equipamento a uma temperatura mais baixa. A parte da água salgada que não é transformada em vapor deixa o equipamento com alta concentração de sal, essa água é chamada de salmoura (EL-DESSOUSKY; ETTOUNEY, 2002).

2.5. Demanda de energia

Um dos obstáculos dos processos de dessalinização é a alta demanda de energia que eles requerem para separar o sal da água. Essa alta demanda de energia eleva consideravelmente os custos de operação de uma planta de dessalinização, e são poucos os países que possuem recursos financeiros para isso. Sendo assim, o investimento nos estudos de métodos e medidas que tem o objetivo de aumentar a eficiência do processo tem sido realizado e ainda são necessários para que a dessalinização da água salgada seja mais acessível para todo o mundo. Além disso, a maioria das plantas de dessalinização e funcionamento utilizam energia proveniente da queima de combustíveis fósseis, resultando em altas taxas de emissão de gases poluentes. Os dois principais meios para solucionar essas questões são a utilização de energias renováveis e limpas, e o reaproveitamento dessa energia utilizada, aumentando a eficiência do processo (KALOGIROU, 2009, p. 425).

2.5.1. Energias renováveis

Operar um dessalinizador a partir de fontes de energia renováveis e limpas é uma solução promissora e praticável, pois têm a capacidade de fornecer a energia necessária para retirar o sal da água produzindo menos gases de efeito estufa. As energias renováveis e limpas mais comuns aplicadas a dessalinização da água são as energias eólica, solar térmica, solar fotovoltaica, geotérmica e nuclear. O fornecimento de energia para a dessalinização pode ser feito de forma indireta, na qual ela é primeiramente transformada em energia elétrica para depois ser utilizada no processo; ou de forma direta, na qual a energia é diretamente utilizada para fornecer calor para o processo.

As energias solar térmica, nuclear e geotérmica são capazes de fornecer a energia diretamente, em forma de calor, para evaporar a água salgada. Outra alternativa para fornecer energia de forma direta é através da cogeração, na qual gases ou vapores provenientes de outros processos industriais e que possuem alta temperatura são utilizados como fonte de calor para a dessalinização. A energia quando é fornecida em forma de calor só pode ser utilizada diretamente quando aplicadas à equipamentos de dessalinização térmica (KUCERA, 2014 p. 29).

2.5.2. Reaproveitamento da energia

Na dessalinização térmica em efeito único três fluxos deixam o equipamento: o condensado, o vapor gerado e a salmoura. Analisando o processo é possível observar que todos os três fluxos deixam o equipamento com alta temperatura. Dessa forma, métodos que visam reaproveitar essa energia em forma de calor foram desenvolvidos.

A solução desenvolvida é conhecida como método de dessalinização em múltiplos estágios/efeitos. Sistemas de dessalinização em múltiplos estágios/efeitos são formados por uma sequência de dessalinizadores de efeito único, no qual o vapor gerado em um dos estágios/efeitos é condensado ao mesmo tempo que é utilizado como fonte de calor para o efeito seguinte e para pré-aquecer a água salgada de alimentação. A utilização de vários estágios/efeitos pode ocorrer de diferentes formas dependendo do método de dessalinização. O reaproveitamento do calor através da implementação de vários estágios/efeitos também resulta na redução do volume de salmoura rejeitada no ambiente, bem como rejeita-la a uma temperatura bem mais baixa quando comparada com a dessalinização por efeito único (EL-DESSOUSKY; ETTOUNEY, 2002, p. 148).

Como já informado anteriormente, os três principais métodos de dessalinização térmica são a destilação por *flashing* em múltiplos estágios (MSF), a destilação por ebulição em múltiplos efeitos (MEB) e a destilação por compressão de vapor (VC). Todos esses três métodos utilizam múltiplos estágios/efeitos como princípio de funcionamento. É importante ressaltar que sempre que ocorre a vaporização da água salgada o vapor gerado praticamente não contém sal. Portanto, a escolha pela dessalinização em múltiplos estágios/efeitos não afeta a qualidade da água dessalinizada produzida, e sim o volume de água dessalinizada produzida para uma mesma quantidade de energia fornecida para o processo.

A dessalinização por *flashing* em múltiplos estágios (MSF) consiste em uma série de estágios e que em cada um deles ocorre a vaporização da água apenas por *flashing*, não ocorre ebulição nesse método. O vapor gerado é condensado ao ser utilizado para pré-aquecer a água salgada de alimentação. A parte da água que não é vaporizada (salmoura) segue para o próximo estágio em uma concentração maior do que o estágio anterior. Esse processo é repetido ao longo dos estágios. A adição de múltiplos estágios resulta em menos energia fornecida diretamente para elevar a temperatura da água salgada até seu ponto de ebulição e permite que praticamente toda a energia fornecida seja reaproveitada. É importante ressaltar que esse processo requer que os estágios estejam submetidos a diferentes pressões. A salmoura precisa que sua pressão seja

reduzida ao entrar no estágio seguinte para sofrer *flashing* e gerar vapor (KALOGIROU, 2009, p. 441).

A dessalinização por ebulição em múltiplos efeitos (MEB) também consiste de uma série de estágios, porém nesse caso são chamados de efeitos. Nesse método, o vapor é gerado por *flashing* e por ebulição, porém o segundo fenômeno é responsável pela maior parte do vapor gerado. A ebulição ocorre através da transferência de calor entre um vapor de água e a água salgada através de um trocador de calor. O vapor gerado em um dos efeitos é condensado ao ser utilizado como fonte de calor para evaporar parte da água salgada do próximo efeito. A parte da água que não é vaporizada (salmoura) segue para o próximo efeito em uma concentração maior do que o efeito anterior. O vapor gerado em um efeito possui uma temperatura mais baixa do que a salmoura que segue para o efeito seguinte. Portanto, é necessário que os efeitos estejam submetidos a diferentes pressões para que a salmoura tenha sua pressão e temperatura de saturação reduzidos ao entrar no efeito seguinte e sofrer *flashing*. Essa redução possibilita que o vapor gerado em um efeito consiga evaporar por ebulição parte da salmoura (KALOGIROU, 2009, p. 444).

A dessalinização por compressão de vapor (VC) tem o princípio de funcionamento semelhante ao da destilação por ebulição em múltiplos efeitos, porém o reaproveitamento de energia é realizado através da compressão do vapor de um efeito. Esse aumento de pressão aumenta a temperatura de condensação e permite que o vapor seja utilizado para fornecer energia para o próprio efeito que o produziu, ou para o efeito seguinte. Este método de dessalinização caracteriza-se por ser frequentemente empregado na produção de água potável em estações de pequena e média escala, como em hotéis, barcos e pequenas comunidades. Existem duas formas mais comuns de comprimir o vapor gerado. A compressão do vapor pode ser feita por meio de um compressor mecânico ou compressão térmica. A compressão térmica consiste na adição de pequenas quantidades de vapor a alta pressão por meio de um ejetor. Apesar da destilação por compressão de vapor não necessitar de altas temperaturas para funcionar, seu uso vem se tornando obsoleto (KALOGIROU, 2009, p. 448).

Existem diversas variações dos três métodos de dessalinização térmica apresentados acima. Essas variações incluem a forma de que a energia é fornecida ao processo, os tipos de trocadores de calor utilizados, o sentido do fluxo de água salgada e do fluxo de vapor gerado, as formas de reaproveitar o calor e outras variações. Sendo assim, definir qual o processo ideal para uma certa aplicação e qual a fonte de energia ideal que deve ser utilizada pode ser um processo longo de estudo das características de cada processo e da análise da performance dos equipamentos e plantas de dessalinização já existentes em operação.

2.6. Dessalinização por ebulição em múltiplos efeitos

Apesar de ter sido o primeiro método de dessalinização a ser desenvolvido, o método por ebulição em múltiplos efeitos (MEB) apresentava alguns problemas como baixa taxa de transferência de calor e alta corrosão da tubulação. Devido a esses obstáculos, os outros métodos foram desenvolvidos e passaram a ser mais utilizados. Como informado no Capítulo 1, em 2010, apenas 8% de toda a água dessalinizada no mundo era produzida pelo método MEB. Porém, o método de dessalinização por ebulição em múltiplos estágios voltou a ser utilizado porque é adequado para ser aplicado com energia solar, visto que a variação das temperaturas e pressões de operação são menos prejudiciais ao desempenho do equipamento. Além disso, o avanço das técnicas de controle de corrosão de tubulações permite que a integridade do equipamento seja conservada.

Neste tópico o funcionamento de um equipamento de dessalinização por ebulição em múltiplos efeitos (MEB) é detalhado, apresentando as principais características de seus principais componentes. Entender como esse equipamento funciona é essencial para facilitar o entendimento da metodologia do dimensionamento que será apresentado no Capítulo 3.

Antes de entrar nos detalhes do funcionamento e dos componentes de um dessalinizador em múltiplos efeitos, vale lembrar e deixar claro que a escolha deste método não tem relação com o nível de pureza da água produzida. O objetivo deste método é reaproveitar e reduzir a energia necessária para dessalinizar a água. Ou seja, um equipamento de efeito único é capaz de fornecer água dessalinizada com a mesma qualidade de um equipamento de múltiplos efeitos, porém utilizando muito mais energia para produzir a mesma quantidade.

O MEB consiste em uma série de efeitos consecutivos mantidos a níveis de pressão e temperatura decrescentes desde o primeiro efeito (mais quente e com maior pressão) até o último (mais frio e com menor pressão). Antes de entrar no primeiro efeito, a água salgada de alimentação é aquecida até a temperatura de entrada no equipamento. Cada efeito contém um trocador de calor que é responsável por evaporar a água salgada ao mesmo tempo que condensa o vapor gerado no efeito anterior. Um condensador final é utilizado para condensar o vapor gerado no último efeito ao mesmo tempo que pré-aquece a água salgada de alimentação. O esquemático de dessalinizador por ebulição em três efeitos da Figura 11 é um exemplo apresentado para auxiliar na explicação e visualização de como funciona o equipamento.



Figura 12 - Exemplo de trocador de calor do tipo casco-tubo.

Fonte: Website da Extran.

Depois de passar pelos pré-aquecedores a água salgada de alimentação passa por um aquecedor que eleva sua temperatura até a temperatura de alimentação especificada durante o projeto do equipamento, e em seguida entra no primeiro efeito. Além da água salgada de alimentação, o primeiro efeito também é alimentado pelo vapor fonte de calor que é gerado por um equipamento externo. Esse vapor pode ser proveniente de diferentes processos que já foram mencionados anteriormente, o importante nesse caso é que o vapor fonte de calor possua energia suficiente para evaporar a água salgada de alimentação no primeiro efeito.

A água salgada de alimentação e o vapor fonte de calor trocam calor em um evaporador. Ao trocar calor, parte da água salgada é evaporada e gera um vapor praticamente livre de sal, deixando para trás uma água mais concentrada em sal (salmoura). Ao mesmo tempo que a água é evaporada, o vapor fonte de calor que escoar no evaporador é condensado. Existem diversos tipos de trocadores de calor que podem ser utilizados como evaporadores. Os mais comuns são trocadores de calor que trabalham com uma película fina de água salgada distribuída pela superfície de tubos horizontais ou verticais. O projeto desenvolvido neste documento irá considerar um trocador de calor do tipo casco-serpentina como evaporador, com o objetivo de avaliar a possibilidade de utilizá-lo para dessalinizar água. O dessalinizador projetado neste documento tem a finalidade de ser utilizado como material de estudo e experimentos em uma universidade. Desse modo, um dessalinizador com este trocador de calor possivelmente teria um custo menor, além de ser mais fácil de instrumentar e controlar as características do funcionamento do mesmo.

Da mesma forma que os pré-aquecedores, é comum que os trocadores de calor do tipo casco-serpentina sejam iguais em todos os efeitos, o que reduz custos com a construção do equipamento, peças sobressalentes e manutenção.



Figura 13 - Exemplo de trocador de calor do tipo casco-serpentina.

Fonte: Website da Maze.

Mesmo depois de escoar pela serpentina, o condensado do vapor fonte de calor ainda possui uma alta temperatura, então sua energia é reaproveitada ao trocar calor com a água salgada de alimentação através dos pré-aquecedores. O condensado gerado no primeiro efeito não é considerado água destilada pois este não sofreu os pré-tratamentos químicos necessários. Portanto, ele trabalha em um ciclo, retornando para ser convertido em vapor novamente.

Quando o vapor é gerado, alguma quantidade de sal é carregada junto com partículas líquidas de água. Desse modo, é comum utilizar desumidificadores (*demister*) que impedem que essas partículas líquidas com grãos de sal sejam carregadas junto com o vapor. Esse desumidificador geralmente é formado por fios metálicos entrelaçados, e um exemplo é apresentado na Figura 14.



Figura 14 - Exemplo de um desumidificador.

Fonte: Website da Web Wire Cloth.

A água salgada mais concentrada (salmoura) que não é evaporada no primeiro efeito segue para o próximo efeito para que seja gerado mais vapor. Ao entrar no efeito seguinte, que está submetido a uma pressão mais baixa, a salmoura sofre *flashing*, isto é, tem sua temperatura de ebulição reduzida e parte de sua massa vaporiza. A parte não evaporada por *flashing* troca calor com o vapor gerado no primeiro efeito através do trocador de calor casco-serpentina, evaporando mais uma parte de sua massa e tornando-se ainda mais concentrada. Ao trocar calor com a salmoura o vapor gerado no primeiro efeito é condensado, e gera o destilado. Da mesma forma que ocorre no primeiro efeito, a energia do destilado é reaproveitada ao trocar calor com a água salgada de alimentação através dos pré-aquecedores.

Esse mesmo processo se repete ao longo dos efeitos seguintes. O vapor gerado pelo último efeito é condensado por um condensador final. Após o último efeito, a salmoura é diluída e devolvida a fonte.

Segundo Porteous (1975), o método de dessalinização por ebulição em múltiplos efeitos possui algumas vantagens em relação a outros métodos de dessalinização. Uma das vantagens é o fato de que a medida que a água salgada de alimentação se torna mais concentrada na planta, mais baixa é sua temperatura. Dessa forma, os riscos de incrustações no equipamento são reduzidos. Outra vantagem é que além de ser adequado para aplicação com energia solar, o MEB possui baixa demanda de energia quando comparada a outros métodos. Por exemplo, o método por *flashing* em múltiplos estágios (MSF) necessita de um melhor controle da pressão dos estágios, portanto requer mais bombas.

3. METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentados os sistemas de equações necessários para o dimensionamento de um equipamento de dessalinização por ebulição em múltiplos efeitos. Um dessalinizador desse tipo possui três componentes básicos responsáveis pela transferência de calor: os evaporadores, os pré-aquecedores e o condensador final.

- Os evaporadores utilizados neste equipamento são trocadores de calor do tipo casco-serpentina. Apesar de ser chamado de evaporador, durante o processo de dessalinização esse trocador de calor possui a função não só de evaporar a água salgada, mas também de condensar o vapor gerado no efeito anterior. Neste trocador de calor, o vapor escoava pelo interior da serpentina e a água salgada pelo exterior (casco).
- Os pré-aquecedores utilizados neste equipamento são trocadores de calor do tipo casco-tubo de um passe no casco e dois passes nos tubos. Os pré-aquecedores são responsáveis por aquecer a água salgada de alimentação utilizando o calor da água destilada de cada efeito. Neste trocador de calor, a água salgada escoava pelo interior dos tubos e o condensado (destilado) pelo exterior (casco).
- O condensador final é um trocador de calor do tipo casco-tubo. Esse condensador é responsável por condensar o vapor gerado no último efeito do equipamento, ao mesmo tempo que pré-aquece a água salgada de alimentação.

Os sistemas de equações necessários para o dimensionamento de um equipamento de dessalinização por ebulição em múltiplos efeitos descrito neste capítulo foram desenvolvidos por Hisham T. El-Dessouky e Hisham M. Ettouney (2002, p. 152). O método desenvolvido pelos autores no livro *Fundamentals of Salt Water Desalination*, foi adaptado com o objetivo de atender as necessidades do projeto.

O modelo para o dimensionamento de dessalinizador por ebulição em múltiplos efeitos possui as seguintes premissas:

- 1) Água salgada é considerada uma mistura apenas de água e sal;
- 2) O vapor gerado não contém sal. Ou seja, a quantidade de sal que entra no sistema com a água salgada é conservada até o final do processo;
- 3) Perdas de calor para o ambiente através do casco são desconsideradas. Ou seja, assume-se que o casco é completamente isolado termicamente;
- 4) A eficiência de todos os trocadores de calor é considerada 100%.

Uma das principais características deste modelo é que as áreas de transferência de calor são iguais em todos os efeitos. Ou seja, os evaporadores (trocadores de calor do tipo casco-serpentina) têm as mesmas dimensões em todos os efeitos. Do mesmo modo, os pré-aquecedores (trocadores de calor do tipo casco-tubo) têm as mesmas dimensões em todos os efeitos. Esta prática é comum na indústria, e tem o objetivo de reduzir os custos com a construção do equipamento, peças sobressalentes e manutenção.

Outra característica importante deste modelo é que este leva em consideração perdas termodinâmicas no sistema, incluindo elevação do ponto de ebulição (BPE), perdas de pressão no desumidificador e perdas de pressão nas linhas nas quais escoam os vapores gerados em cada efeito. Além disso, o modelo leva em consideração a influência da temperatura e da salinidade nas propriedades físicas da água salgada como calor latente, calor específico, densidade, condutividade térmica e viscosidade dinâmica.

O modelo de dimensionamento possui um sistema de equações que inclui balanço de massa, balanço de energia e equações de transferência de calor para os dois tipos de trocadores de calor. Possui correlações para as propriedades termodinâmicas, considerando influência da temperatura e da salinidade. E possui também parâmetros de performance para análise do dimensionamento.

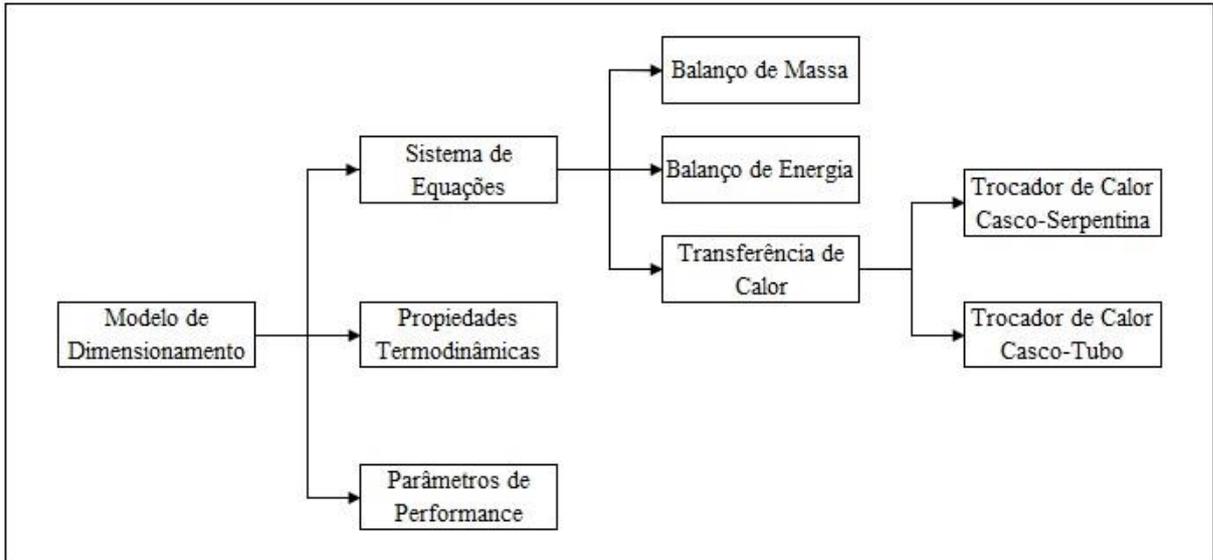


Figura 15 - Fluxograma do modelo de dimensionamento do dessalinizador MEB.

Fonte: Elaboração própria.

O modelo produz, para cada efeito, dados de vazão mássica de destilado, vazão mássica de água salobra, concentração da água salobra, coeficiente global de transferência de calor, temperatura de ebulição e temperatura da água salgada que sai do pré-aquecedor. Outros dados produzidos pelo modelo incluem a vazão mássica do vapor da fonte de calor, e as dimensões e a área de transferência de calor dos evaporadores e dos pré-aquecedores.

O modelo de dimensionamento é referente a um equipamento muito semelhante ao apresentado na Figura 11. A única diferença é a quantidade de efeitos, enquanto na figura o equipamento possui apenas três efeitos, o modelo de dimensionamento é utilizado para uma quantidade qualquer de efeitos. Todas as outras características, não relacionadas a quantidade de efeitos, são iguais ao da figura.

3.1. Balanço de massa

O balanço geral de massa é apresentado abaixo e inclui a vazão mássica de água salgada de alimentação, \dot{m}_a , a vazão mássica total de destilado, \dot{m}_d , e a vazão mássica da salmoura ao final do último efeito, $\dot{m}_{s,n}$.

$$\dot{m}_a = \dot{m}_d + \dot{m}_{s,n} \quad (1)$$

O balanço de sal é obtido através da premissa (2), na qual conclui-se que a mesma quantidade de sal que entra no sistema com a água salgada de alimentação é conservada na salmoura até o final do último efeito.

$$X_a * \dot{m}_a = X_j * \dot{m}_{s,j} \quad (2)$$

Em que $\dot{m}_{s,j}$ é a vazão da salmoura ao final do efeito j , X_a é a concentração de sal (soluto) na água salgada de alimentação (solução), e X_j é a concentração de sal na salmoura ao final do efeito j .

A massa total de destilado é definida como

$$\dot{m}_d = \sum_{k=1}^n D_k + \sum_{k=2}^n d_k \quad (3)$$

Em que D e d correspondem a massa de destilado gerada por ebulição e massa de destilado gerada por *flashing* em cada efeito, respectivamente. O índice n corresponde ao número total de efeitos e k é o número do efeito. Lembrando que no primeiro efeito não ocorre *flashing*, por isso o somatório da vazão mássica de destilado por *flashing*, d , começa do segundo efeito.

A vazão mássica da salmoura que deixa o primeiro efeito corresponde à diferença entre a massa total de água salgada de alimentação e a quantidade de destilado gerado por ebulição no primeiro efeito.

$$\dot{m}_{s,1} = \dot{m}_a - D_1 \quad (4)$$

A partir do segundo efeito, a vazão mássica da salmoura que deixa o efeito um efeito j corresponde à diferença entre a vazão mássica total de água salgada de alimentação e a vazão mássica de destilado gerado por ebulição e por *flashing* até o efeito j .

$$\dot{m}_{s,j} = \dot{m}_a - \sum_{k=1}^j D_k - \sum_{k=2}^j d_k \quad (5)$$

Substituindo as equações 4 e 5 na equação 2 e isolando a concentração da salmoura obtém-se respectivamente,

$$X_1 = \frac{X_a * \dot{m}_a}{\dot{m}_a - D_1} \quad (6)$$

$$X_j = \frac{X_a * \dot{m}_a}{\dot{m}_a - \sum_{k=1}^j D_k - \sum_{k=2}^j d_k} \quad (7)$$

3.2. Balanço de energia

No primeiro efeito, o calor latente de condensação do vapor fonte de calor é utilizado para elevar a temperatura da água salgada de alimentação, T_a , até a temperatura de ebulição do primeiro efeito, T_1 , e para fornecer o calor latente necessário para evaporar parte da água salgada de alimentação. Todas as temperaturas são em °C.

$$\dot{m}_f * \lambda_f = \dot{m}_a * c_p * (T_1 - T_a) + D_1 * \lambda_{v,1} \quad (8)$$

Em que,

- c_p é o calor específico da água salgada de alimentação a pressão constante (kJ/kg°C);
- \dot{m}_f é a vazão mássica do vapor da fonte de calor (kg/s);
- D_1 é a vazão mássica do vapor gerado (destilado) no primeiro efeito (kg/s);
- λ_f é o calor latente do vapor da fonte de calor (kJ/kg);
- $\lambda_{v,1}$ é o calor latente do vapor gerado no primeiro efeito (kJ/kg).

Todas as propriedades termodinâmicas dos fluidos que são necessárias estão apresentadas no Apêndice A.

A elevação do ponto de ebulição (*Boiling Point Elevation* ou BPE) é o fenômeno que descreve o aumento do ponto de ebulição de um líquido devido a presença de outros componentes. Nesse caso, a água salgada possui um ponto de ebulição maior do que a água pura devido a presença de sal em sua composição. Deste modo, para evaporar a água salgada é necessário que ela atinja sua temperatura de ebulição, T_j . Porém, o vapor gerado possui a temperatura de ebulição da água pura, $T_{v,j}$. Isto é,

$$T_{v,j} = T_j - BPE_j \quad (9)$$

A correlação para a elevação do ponto de ebulição da água salgada (BPE) é dada pela seguinte correlação

$$BPE_j = A_j * X_j + B_j * X_j^2 + C_j * X_j^3 \quad (10)$$

Em que,

$$A_j = 8,325 * 10^{-6} + 1,883 * 10^{-8} * T_j + 4,02 * 10^{-10} * T_j^2$$

$$B_j = -7,625 * 10^{-12} + 9,02 * 10^{-13} * T_j - 5,2 * 10^{-15} * T_j^2$$

$$C_j = 1,522 * 10^{-12} - 3,0 * 10^{-14} * T_j - 3,0 * 10^{-16} * T_j^2$$

O BPE é a elevação do ponto de ebulição da água salgada em °C, X é a salinidade da água salgada em ppm , T é a temperatura da água salgada em °C. A correlação da equação 10 é válida para os seguintes intervalos: $10000 < X < 160000 ppm$ e $10 < T < 180 °C$.

O vapor gerado em um efeito segue para o próximo efeito e sofre perdas termodinâmicas ao escoar pelo desumidificador e pelas tubulações. Essa perda de temperatura do vapor gerado é representada por $\Delta T_{perdida}$ e, de acordo com outras plantas de dessalinização, pode variar de $0,5°C$ à $3°C$. Dessa forma, o vapor que segue para o próximo efeito possui temperatura menor do que a temperatura de ebulição (temperatura do vapor gerado) deste efeito. Essa temperatura reduzida é chamada de temperatura condensação do vapor gerado, $T_{c,j}$.

$$T_{c,j} = T_j - \Delta T_{perdida,j} \quad (11)$$

A partir do segundo efeito, o calor latente do vapor gerado no efeito $j - 1$, é utilizado para evaporar parte da salmoura no efeito j . Assim,

$$D_j = \frac{D_{j-1} * \lambda_{c,j-1}}{\lambda_{v,j}} \quad (12)$$

A temperatura de ebulição de um efeito é sempre menor do que a temperatura de ebulição do efeito anterior e, conseqüentemente, o calor latente do vapor gerado em um efeito é maior do que o calor latente do vapor gerado no efeito anterior. Portanto, pela Equação 12, a vazão mássica do vapor gerado por ebulição em um efeito é sempre menor do que a vazão mássica do vapor gerado no efeito anterior.

Quando a salmoura entra em um efeito, que está submetido a uma pressão mais baixa do que o efeito anterior, ela sofre *flashing* e conseqüentemente sua temperatura é reduzida de T_{j-1} para T_j . Quando a salmoura sofre *flashing* uma pequena quantidade de vapor, d_j , é gerado. *Flashing* ocorre apenas a partir do segundo efeito pois a água salgada de alimentação não entra no primeiro efeito em sua temperatura de ebulição (saturação). A vazão mássica de vapor gerado por *flashing* é dado pelas seguintes equações:

$$d_2 = \frac{(\dot{m}_a - D_1) * c_p * (T_1 - T_2)}{\lambda_{v,2}} \quad (13)$$

$$d_j = \frac{(\dot{m}_a - \sum_{k=1}^j D_k - \sum_{k=2}^j d_k) * c_p * (T_{j-1} - T_j)}{\lambda_{v,j}} \quad (14)$$

Em que $\lambda_{v,j}$, é o calor latente do vapor gerado à temperatura T_j .

3.3. Equações de transferência de calor

A carga térmica no evaporador casco-serpentina em um efeito j é definida em função da área de transferência de calor do efeito, A_j , da temperatura de condensação do efeito anterior, $T_{c,j-1}$, da temperatura do vapor fonte de calor, T_f , da temperatura de ebulição do efeito, T_j , e do coeficiente global de transferência de calor do efeito, U_j .

$$Q_1 = A_1 * U_1 * (T_f - T_1) \quad (15)$$

$$Q_j = A_j * U_j * (T_{c,j-1} - T_j) \quad (16)$$

A carga térmica no evaporador casco-serpentina em um efeito j também pode ser definida de outra forma. As cargas térmicas do segundo efeito em diante são iguais e equivalentes ao calor latente de vaporização da salmoura multiplicado pela vazão mássica do

vapor gerado no efeito (destilado). A carga térmica no primeiro efeito é maior do que a dos outros efeitos devido a energia necessária para elevar a temperatura da água salgada de alimentação, T_a , até a temperatura de ebulição, T_1 .

$$Q_1 = \dot{m}_a * c_p * (T_1 - T_a) + D_1 * \lambda_{v,1} \quad (17)$$

$$Q_j = D_j * \lambda_{v,j} \quad (18)$$

Como já foi mencionado, os evaporadores casco-serpentina são iguais em todos os efeitos e, portanto, possuem a mesma área de transferência de calor. Sabendo que as áreas de transferência de calor de todos os efeitos são iguais e rearranjando as Equações 15, 16, 17 e 18, a área de transferência de calor de cada evaporador é dada pela seguinte equação.

$$A = \frac{\dot{m}_a * c_p * (T_1 - T_a) + D_1 * \lambda_{v,1}}{U_1 * (T_f - T_1)} = \frac{D_j * \lambda_{v,j}}{U_j * (T_{c,j-1} - T_j)} \quad (19)$$

O coeficiente global de transferência de calor de cada efeito, U_j , é obtido através do estudo do escoamento e das características de transferência de calor no trocador do tipo casco-serpentina.

3.3.1. Trocador de calor casco-serpentina

Trocadores de calor do tipo casco-serpentina foram escolhidos como evaporadores. Como seu nome sugere, este tipo de trocador de calor consiste em um casco no formato de um cilindro com uma serpentina em seu interior. Um fluido escoo pelo casco (exterior da serpentina) e o outro pelo interior da serpentina.

A principais características que afetam a performance de um trocador de calor são os materiais dos seus componentes, a geometria, as características do escoamento e as propriedades dos fluidos envolvidos. A ilustração de um trocador de calor casco-serpentina é mostrada na Figura 16.

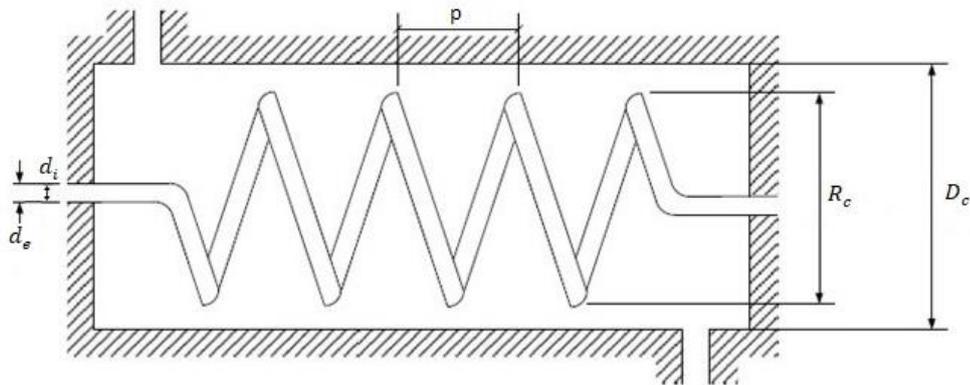


Figura 16 - Dimensões de um trocador de calor casco-serpentina.

Fonte: Adaptado de SALIMPOUR, 2008.

As principais características geométricas para análise da transferência de calor são as seguintes dimensões:

- d_i é o diâmetro interno (m);
- d_e é o diâmetro externo (m);
- p é o passo da serpentina (m);
- R_c e o raio de curvatura da serpentina (m);
- D_c é o diâmetro interno do casco (m).

Dois parâmetros adimensionais característicos de uma serpentina são a razão de curvatura, δ , que é definida como, $d_e/2R_c$, e o passo adimensional, γ , que é definido como, $p/2\pi R_c$. As principais características do escoamento para análise da transferência de calor são os seguintes parâmetros adimensionais: número de Reynolds, Re , número de Nusselt, Nu , número de Dean, De , e o número de Prandtl, Pr .

Fisicamente, o número de Reynolds, Re , representa a razão de forças de inércia pelas forças de viscosidade. O número de Nusselt, Nu , representa a razão entre a transferência de calor de um fluido por convecção pela transferência de calor de um fluido por condução. O número de Dean, De , representa a razão de forças de viscosidade pela força centrífuga atuando em escoamentos em tubulações curvadas. O número de Prandtl, Pr , representa a relação entre a ação das forças viscosas e das forças de inércia no escoamento de um fluido.

O número de Prandt é definido pela equação:

$$Pr = \frac{c_p * \mu}{k_{\text{fluido}}} = \frac{v}{\alpha} \quad (20)$$

Os números de Reynolds, Nusselt e Dean são definidos pelas equações 21, 22 e 23, respectivamente, para o escoamento na parte interna da serpentina:

$$Re_i = \frac{4 * \dot{m}_i}{\pi * \mu * d_i} \quad (21)$$

$$Nu_i = \frac{h_i * d_i}{k_{i,\text{fluido}}} \quad (22)$$

$$De = Re_i * \left(\frac{d_i}{2R_c} \right)^{0,5} \quad (23)$$

Os números de Reynolds e Nusselt são definidos pelas equações 24, 25 e 26, respectivamente, para o escoamento na parte externa da serpentina (casco):

$$Re_e = \frac{4 * \dot{m}_e}{\pi * \mu * D_h} \quad (24)$$

$$Nu_e = \frac{h_e * D_h}{k_{e,\text{fluido}}} \quad (25)$$

Onde D_h é o diâmetro hidráulico e é definido por

$$D_h = \frac{D_c^2 - 2\pi * R_c * d_e^2 * \gamma^{-1}}{D_c + 2\pi * R_c * d_e * \gamma^{-1}} \quad (26)$$

Nas equações acima, k_{fluido} é a condutividade térmica do fluido escoando, \dot{m} é a vazão mássica, h é o coeficiente de transferência de calor, c_p é o calor específico do fluido, v é a viscosidade cinemática, μ é a viscosidade dinâmica e α é a difusividade térmica do fluido. Os índices i e e indicam interior e exterior da serpentina respectivamente.

O artigo publicado por Mohammad R. Salimpour (2008) descreve um experimento realizado para investigar os coeficientes de transferência de calor de um trocador de calor do

tipo casco-serpentina posicionado horizontalmente. Ao final do experimento, foram definidas correlações empíricas para o escoamento no interior e no exterior do trocador de calor. Essas correlações são utilizadas para obter o coeficiente global de transferência de calor para o evaporador do dessalinizador.

$$Nu_i = 0,152 * De^{0,431} * Pr^{1,06} * \gamma^{-0,277} \quad (27)$$

$$Nu_e = 19,64 * Re_e^{0,513} * Pr^{0,129} * \gamma^{0,938} \quad (28)$$

Os coeficientes de transferência de calor interno e externo, h_i e h_e , são calculados a partir das Equações 22 e 25 respectivamente. Em seguida esses coeficientes são aplicados à seguinte equação para determinar o coeficiente global de transferência de calor.

$$\frac{1}{U} = \frac{d_e}{d_i * h_i} + \frac{d_e * \ln(d_e/d_i)}{2k} + \frac{1}{h_e} \quad (29)$$

O coeficiente global de transferência de calor faz parte do processo para determinar a área de transferência de calor necessária para dessalinização.

3.3.2. Trocador de calor casco-tubo

Trocadores de calor do tipo casco-tubo de um passo foram selecionados como pré-aquecedores. Como seu nome sugere, este tipo de trocador de calor consiste de um casco no formato de um cilindro com um feixe de tubos (vários tubos) em seu interior. Um fluido escoar por dentro dos tubos, e outro fluido escoar pelo casco. Os pré-aquecedores esquentam a água salgada de alimentação a partir do calor disponível no destilado (vapor gerado que foi condensado) ao final de cada efeito.

Os materiais dos seus componentes, a geometria, as características do escoamento e as propriedades dos fluidos envolvidos são as principais características de um trocador de calor. A ilustração de um trocador de calor casco-tubo é mostrada na Figura 17.

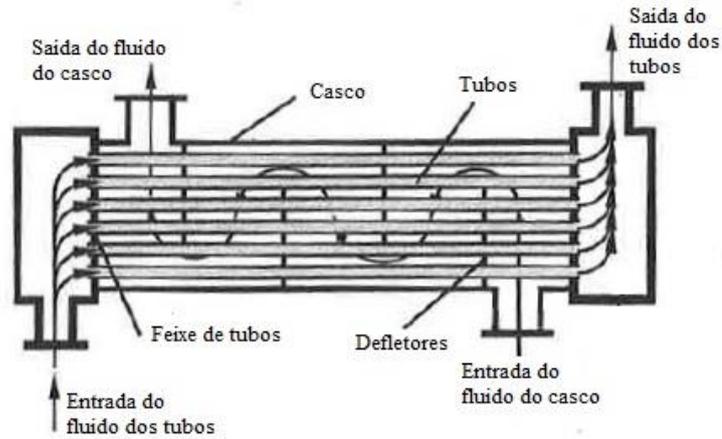


Figura 17 - Ilustração de um trocador de calor casco-tubo um passo.

Fonte: Adaptado de JANNA, 2010.

As principais características geométricas para análise da transferência de calor em um trocador do tipo casco-tubo são as seguintes dimensões:

- DI_t é o diâmetro interno dos tubos (m);
- DE_t é o diâmetro externo dos tubos (m);
- N_t é o número de tubos;
- N_p é o número de passes;
- D_c é o diâmetro interno do casco (m);
- N_d é o número de defletores;
- L_d é a distância entre defletores (m);
- P_t é o passo dos tubos (m);
- C é a distância entre tubos (m).

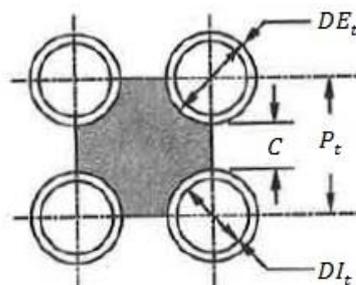


Figura 18 - Algumas dimensões de um trocador de calor casco-tubo.

Fonte: Adaptado de JANNA, 2010.

De maneira semelhante ao trocador de calor casco-serpentina, as principais características do escoamento para análise da troca térmica em um trocador de calor casco-tubo são os seguintes parâmetros adimensionais: número de Reynolds, Re , número de Nusselt, Nu , e o número de Prandtl, Pr . O número de Prandtl é calculado através da equação (28).

Os números de Reynolds e Nusselt são definidos pelas seguintes equações para o escoamento no interior dos tubos:

$$Re_t = \frac{V_t * DI_t}{\nu} \quad (30)$$

$$Nu_t = \frac{h_t * DI_t}{k_{fluido}} \quad (31)$$

Os números de Reynolds e Nusselt são definidos pelas seguintes equações para o escoamento pelo casco:

$$Re_c = \frac{V_c * D_{equi,c}}{\nu} \quad (32)$$

$$Nu_c = \frac{h_c * D_{equi,c}}{k_{fluido}} \quad (33)$$

Em que $D_{equi,c}$ é o diâmetro equivalente do casco e, para trocadores de calor com passo quadrado, é definido por

$$D_{equi,c} = \frac{4 * P_t^2 - \pi * DE_t^2}{\pi * DE_t} \quad (34)$$

Nas equações acima, k_{fluido} é a condutividade do fluido escoando, V é velocidade do fluido escoando, h é o coeficiente de transferência de calor e ν é a viscosidade cinemática do fluido. Os índices t e c indicam o escoamento pelos tubos e pelo casco respectivamente.

As correlações empíricas para o escoamento pelos tubos e pelo casco de um trocador de calor casco-tubo são utilizadas para obter o coeficiente global de transferência de calor dos pré-aquecedores. O escoamento pelos tubos pode ocorrer de forma laminar ou turbulenta. Para o escoamento laminar pelos tubos utiliza-se a seguinte equação de Sieder-Tate:

$$Nu_t = 1,86 * \left(\frac{DI_t * Re_t * Pr}{L} \right)^{1/3} \quad (35)$$

Em que

$$\begin{cases} Re_t < 2200 \\ 0,48 < Pr < 16700 \end{cases}$$

Para o escoamento turbulento pelos tubos utiliza-se a seguinte equação de Dittus-Boelter:

$$Nu_t = 0,023 * Re_t^{4/5} * Pr^n \quad (36)$$

Em que

$n = 0,3$, se o fluido está sendo aquecido

$n = 0,4$, se o fluido está sendo resfriado

e

$$\begin{cases} Re_t > 10000 \\ 0,7 < Pr < 160 \\ L/DE_t > 60 \end{cases}$$

Para o escoamento pelo casco utiliza-se a seguinte equação:

$$Nu_c = 0,36 * Re_c^{0,55} * Pr^{1/3} \quad (37)$$

Em que,

$$\begin{cases} 2 * 10^3 < Re_t < 1 * 10^6 \\ Pr > 0 \end{cases}$$

Os coeficientes de transferência de calor do escoamento nos tubos e no casco, h_t e h_c , devem ser calculados a partir das equações 31 e 33, respectivamente. Em seguida esses coeficientes são aplicados à seguinte equação para determinar o coeficiente global de transferência de calor, U .

$$\frac{1}{U} = \frac{DE_t}{h_t * DI_t} + \frac{1}{h_c} \quad (38)$$

Assumindo que a energia perdida pelo fluido que escoo pelo casco (destilado) é totalmente transferida para o fluido que escoo pelos tubos (água salgada de alimentação), a quantidade de calor trocada entre os fluidos é dada pela seguinte equação:

$$q = U * A * \Delta t = \dot{m}_c * c_{p,c} * (T_{e,c} - T_{s,c}) = \dot{m}_t * c_{p,t} * (T_{s,t} - T_{e,t}) \quad (39)$$

Em que A é a área de transferência de calor do trocador de calor casco-tubo e Δt é a diferença de temperatura no trocador de calor. Os índices e e s indicam a entrada e saída do trocador de calor, respectivamente.

A área de transferência de calor do trocador de calor casco-tubo é definida por,

$$A = N_p * \pi * DE_t * L \quad (40)$$

A diferença de temperatura no trocador de calor em contracorrente é representada pela multiplicação da média log das diferenças de temperatura (*Log Mean Temperature Difference*), $LMTD$, por um fator de correção, F .

$$\Delta t = F * LMTD_{cc} \quad (41)$$

A média log das diferenças de temperatura para escoamento em contracorrente, $LMTD_{cc}$, é definida por,

$$LMTD_{cc} = \frac{(T_{e,c} - T_{s,t}) - (T_{s,c} - T_{e,t})}{\ln \left[\frac{(T_{e,c} - T_{s,t})}{(T_{s,c} - T_{e,t})} \right]} \quad (42)$$

A temperatura de entrada no casco é a temperatura de condensação definida pela Equação 11. As temperaturas de saída do casco e dos tubos são definidas por,

$$\text{Caso, } \dot{m}_c * c_{p,c} > \dot{m}_t * c_{p,t} \rightarrow \begin{cases} T_{s,t} = T_{e,t} + E * (T_{e,c} - T_{e,t}) \\ T_{s,c} = T_{e,c} - C * (T_{s,t} - T_{e,t}) \end{cases}$$

Ou

$$\text{Caso, } \dot{m}_c * c_{p,c} < \dot{m}_t * c_{p,t} \rightarrow \begin{cases} T_{s,c} = T_{e,c} - E * (T_{e,c} - T_{e,t}) \\ T_{s,t} = T_{e,t} + C * (T_{e,c} - T_{s,c}) \end{cases}$$

A razão de capacitância, C , é definida por,

$$C = \frac{(\dot{m} * C_p)_{\min}}{(\dot{m} * C_p)_{\max}} < 1 \quad (43)$$

A efetividade de um trocador de calor casco-tubo com dois passos nos tubos, E , é definida por,

$$E = 2 * \left\{ 1 + C + \frac{1 + e^{[-N * \sqrt{(1+C^2)}]}}{1 - e^{[-N * \sqrt{(1+C^2)}]}} \right\}^{-1} \quad (44)$$

Em que N é o número de unidades de transferência e é definido por,

$$N = \frac{U * A}{(\dot{m} * C_p)_{\min}} \quad (45)$$

Através das equações 43, 44, 45 e 46 encontra-se o valor da média log das diferenças de temperatura para escoamento em contracorrente. Para utilizar a Equação 41 e calcular a diferença de temperatura no trocador de calor em contracorrente, Δt , ainda é necessário encontrar o valor do fator de correção, F . O fator de correção é definido por,

$$F = \frac{\sqrt{R^2 + 1} * \ln \left[\frac{1 - S}{1 - R * S} \right]}{(R - 1) * \left[\frac{2 - S * (R + 1 - \sqrt{R^2 + 1})}{2 - S * (R + 1 + \sqrt{R^2 + 1})} \right]} \quad (46)$$

Em que S é o fator de temperatura e é definido por,

$$S = \frac{(T_{s,t} - T_{e,t})}{(T_{e,c} - T_{e,t})} \quad (47)$$

E R é a razão de temperatura e é definida por,

$$R = \frac{\dot{m}_t * c_{p,t}}{\dot{m}_c * c_{p,c}} = \frac{(T_{e,c} - T_{s,c})}{(T_{s,t} - T_{e,t})} \quad (48)$$

Através das equações apresentadas é possível dimensionar e determinar a temperatura na qual a água salgada de alimentação chega ao aquecedor antes de entrar no primeiro efeito.

3.4. Parâmetros de performance

Alguns parâmetros de performance do sistema são calculados ao final do dimensionamento: razão de performance, área específica de transferência de calor e a vazão específica de água salgada de resfriamento. A razão de performance, RP , é definida pela razão entre a vazão mássica total de destilado, \dot{m}_d , e a vazão mássica do vapor fonte de calor, \dot{m}_f .

$$RP = \frac{\dot{m}_d}{\dot{m}_f} \quad (49)$$

A área específica de transferência de calor é definida por,

$$sA = \frac{\sum_{i=1}^n A_i + A_{cond}}{\dot{m}_d} \quad (50)$$

Em que A_{cond} , é a área de transferência de calor do condensador final e é obtido pela seguinte equação:

$$A_{cond} = \frac{Q_{cond}}{U_{cond} * LMTD_{cond}} \quad (51)$$

A média log das diferenças de temperatura do condensador final, $LMTD_{cond}$, é definido por,

$$LMTD_{cond} = \frac{(T_{p,n} - T_{inicial})}{\ln \left[\frac{(T_{c,n} - T_{inicial})}{(T_{c,n} - T_{p,n})} \right]} \quad (52)$$

Onde $T_{inicial}$ é a temperatura inicial da água salgada, ou seja, a temperatura que ela é retirada da fonte, $T_{p,n}$ é a temperatura na qual a água salgada de alimentação entra no pré-aquecedor referente ao último efeito e $T_{c,n}$ é a temperatura de condensação do vapor gerado no último efeito.

O coeficiente global de transferência de calor do condensador, U_{cond} , é encontrado através das equações do Tópico 3.3.2, referente ao dimensionamento de um trocador de calor do tipo casco-tubo.

A taxa de transferência de calor no condensador é definida por,

$$Q_{cond} = (D_n + d_n) * \lambda_{v,n} = (\dot{m}_a + \dot{m}_{arref}) * c_p * (T_{e,n} - T_{inicial}) \quad (53)$$

A vazão mássica de água salgada de arrefecimento é definida por,

$$\dot{m}_{arref} = \frac{Q_{cond}}{c_p * (T_{e,n} - T_{inicial})} - \dot{m}_a \quad (54)$$

A vazão mássica específica de água salgada de arrefecimento é definida por,

$$sm_{arref} = \frac{\dot{m}_d}{\dot{m}_a} \quad (55)$$

Outro parâmetro de performance importante para análise do equipamento é a energia inicial necessária para produzir certa quantidade de vazão mássica de destilado.

$$E_{inic} = \frac{\dot{m}_a * c_p * (T_a - T_{pré,1}) + D_1 * \lambda_{v,1}}{\dot{m}_d} \quad (56)$$

Em que, E_{inic} é a energia inicial por unidade de massa e o índice, $pré, 1$, representa o pré-aquecedor do efeito 1.

3.5. Resolução do sistema

O dimensionamento de um dessalinizador por ebulição em múltiplos efeitos envolve a resolução do sistema de equações através de um processo iterativo, até que todas as considerações estejam sendo obedecidas e os valores dos parâmetros converjam. Para facilitar a resolução do modelo é necessário que esse sistema de equações seja implementado e solucionado através de códigos numéricos. A utilização de *softwares*, além de agilizar o dimensionamento, permite projetar diferentes dessalinizadores com diferentes valores de

entrada. Foi escolhido o programa Excel, porque entre suas características está uma interface simples, intuitiva e além de avançadas ferramentas de cálculo e de construção de gráficos e planilhas.

O *solver* faz parte de um conjunto de ferramentas de análise hipotética do programa Excel, e foi utilizado para realizar os cálculos iterativos. Com o *solver* é possível encontrar um resultado específico (de máximo, mínimo, ou um valor específico) para uma fórmula em uma célula de uma planilha (célula de destino). O usuário define um grupo de células variáveis que são relacionadas direta ou indiretamente com a fórmula da célula de destino, e o *solver* trabalha ajustando os valores dessas células variáveis para produzir o resultado especificado na fórmula da célula de destino. O usuário também define quais as restrições que determinadas células devem atender (JUNIOR; SOUZA, 2004).

A escolha de quais parâmetros serão definidos como célula destino, célula variável e quais restrições estão submetidos depende do objetivo do dimensionamento. Por exemplo, pode-se definir uma geometria específica para os trocadores de calor e variar a vazão mássica da fonte de calor e as temperaturas de ebulição de cada efeito com o objetivo de maximizar a vazão mássica de destilado do equipamento. Pode-se também definir uma vazão mássica de destilado e variar a vazão mássica da fonte de calor, as temperaturas de ebulição de cada efeito e as dimensões dos trocadores de calor com o objetivo de minimizar a área de transferência de calor requerida para obter a quantidade de água destilada desejada. Essa variedade de possibilidades permite o dimensionamento de diferentes equipamentos, que por sua vez permite realizar uma completa análise do projeto de um dessalinizador.

Apesar da flexibilidade na escolha dos parâmetros que podem variar, a resolução do sistema de equações exige a definição do valor de alguns parâmetros do sistema. Os seguintes parâmetros devem ser definidos:

- Temperatura inicial da água salgada (retirada da fonte), $T_{inicial}$;
- Concentração de sal na água de alimentação, X_a ;
- Concentração de sal na salmoura que deixa o último efeito, X_n ;
- Temperatura da água salgada de alimentação que sai do condensador e entra no pré-aquecedor referente ao último efeito, $T_{e,n}$;
- Temperatura do vapor gerado no último efeito, T_n .

Para facilitar a análise de sensibilidade do projeto do dessalinizador, as dimensões dos evaporadores e dos pré-aquecedores também foram definidas. Além de definir esses parâmetros citados, os seguintes parâmetros devem ser estimados:

- Vazão mássica de destilado, \dot{m}_d ;
- Vazão mássica do vapor fonte de calor, \dot{m}_f ;
- Temperatura do vapor fonte de calor, T_f ;
- Temperatura do vapor gerado em cada efeito, T_j (exceto do último);
- Temperatura de entrada da água salgada de alimentação, T_a .

Ao final do processo iterativo os valores dos parâmetros estimados convergem e obtém-se, para cada efeito do equipamento, as temperaturas de ebulição, as concentrações de sal e as vazões mássicas da salmoura, e as vazões mássicas de destilado.

4. ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DE DADOS

O sistema de equações para o dimensionamento de um dessalinizador por ebulição em múltiplos efeitos apresentado no Capítulo 3 foi solucionado de diversas formas, simulando diferentes condições de entrada, objetivos da iteração e número de efeitos.

Alguns parâmetros foram definidos e utilizados em todos os dimensionamentos realizados. Por exemplo, baseado nos valores comuns apresentado no Tópico 3.2, foi definido um valor de 2°C para as perdas de calor do vapor gerado ao escoar pelo desumidificador e pelas tubulações, $\Delta T_{perdida}$. Outros parâmetros e seus respectivos valores estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros constantes em todos os dimensionamentos.

Parâmetro	Valor
Temperatura Inicial da Água Salgada (°C)	25,00
Concentração Inicial de Sal na Água Salgada (g/kg)	38,00
Concentração de Sal na Salmoura no Último Efeito (g/kg)	60,00
Temperatura da Água Salgada na Saída do Cond. (°C)	35,00
Temperatura do Vapor Gerado no Último Efeito (°C)	40,00

Fonte: Elaboração própria.

A água salgada a ser dessalinizada foi considerada como sendo água do mar, na qual sua temperatura e concentração foram definidas a partir de um valor médio dessas características para o oceano atlântico sul em regiões próximas a costa (BERNARDO, 2016). A concentração final da salmoura rejeitada e a temperatura do vapor gerado no último efeito foram definidas a partir de outros exemplos de plantas de dessalinização. A temperatura da água salgada rejeitada foi definida a partir dos limites permitidos pelo CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) para despejo de água (CONAMA, 2011).

Além de definir os parâmetros da Tabela 1, as dimensões dos trocadores de calor do tipo casco-serpentina e tipo casco-tubo também foram definidas. O objetivo ao definir essas dimensões é realizar a análise de sensibilidade do projeto do equipamento. A Tabela 2 apresenta as dimensões dos trocadores de calor do tipo casco-serpentina que foram utilizados como evaporadores em todos os equipamentos dimensionados e analisados.

Tabela 2 - Dimensões do trocador de calor casco-serpentina.

Parâmetro	Valor
Diâmetro Interno (m)	0,013
Diâmetro Externo (m)	0,015
Raio de Curvatura Externo (m)	0,500
Diâmetro da Câmara (m)	1,100
Passo (m)	0,025
Número de Voltas	80,000
Comprimento (m)	2,000
Área de Transferência de Calor (m ²)	11,844

Fonte: Elaboração própria.

A Tabela 3 apresenta as dimensões dos trocadores de calor do tipo casco-tubo que foram utilizados como pré-aquecedores em todos os equipamentos dimensionados e analisados.

Tabela 3 - Dimensões do trocador de calor casco-tubo.

Parâmetro	Valor
Diâmetro Interno (m)	0,004
Diâmetro Externo (m)	0,005
Passo dos Tubos (m)	0,010
Espaçamento dos Tubos (m)	0,005
Número de Tubos	68,000
Número de Passes	1,000
Comprimento do Passe (m)	0,250
Número de Defletores	1,000
Espaçamento dos Defletores (m)	0,125
Área de Transferência de Calor (m ²)	0,267

Fonte: Elaboração própria.

A análise e a interpretação dos dados obtidos são separadas em duas seções. A primeira é a análise dos dados obtidos de um equipamento individualmente, comparando as características e os parâmetros de cada efeito do mesmo. A outra seção é a análise comparativa, de sensibilidade, do dimensionamento de equipamentos em função do número de efeitos e da temperatura máxima de ebulição.

4.1. Análise individual

As análises a seguir são referentes aos dados obtidos do dimensionamento de um equipamento de dessalinização por ebulição de oito efeitos, comparando as características e os parâmetros de cada um deles. Os dados apresentados foram obtidos utilizando o *solver* para variar a temperatura de entrada da água salgada de alimentação no primeiro efeito, a temperatura e a vazão mássica do vapor fonte de calor, e as temperaturas de ebulição, e maximizar a vazão mássica de destilado.

4.1.1. Perfil de temperaturas

As temperaturas de ebulição e as temperaturas de saída da água salgada dos pré-aquecedores de cada efeito são apresentadas na Figura 19.

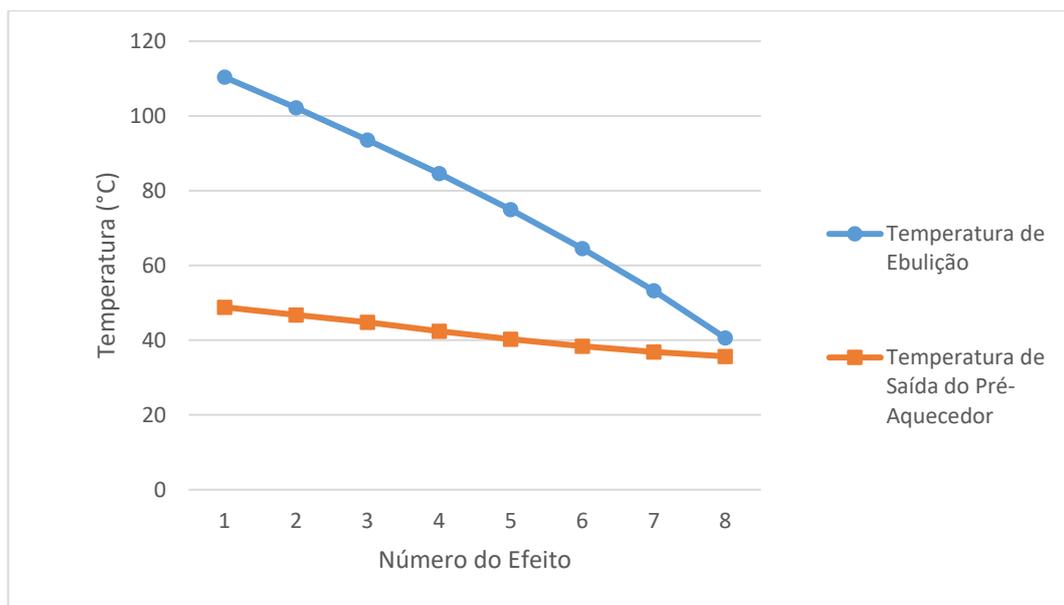


Figura 19 - Temperatura de ebulição e de saída do pré-aquecedor em cada efeito.

Fonte: Elaboração própria.

O formato não linear do perfil de temperaturas de ebulição através dos evaporadores indica que a diferença de temperatura entre o vapor utilizado como fonte de calor e a temperatura de ebulição em cada efeito é maior quando este está mais próximo do último efeito, que possui temperatura mais baixa. Este comportamento das temperaturas de ebulição é explicado pelas das Equações 15 e 16. A área de transferência de calor é constante em todos os

efeitos, as taxas de transferência de calor são semelhantes em todos os efeitos, e o coeficiente global de transferência de calor é maior em temperaturas mais altas. Desse modo, a diferença de temperatura é maior nos efeitos com temperatura mais baixa. Na Tabela 2 estão apresentados os resultados obtidos para esses parâmetros em cada um dos oito efeitos do equipamento.

Tabela 4 - Valor dos parâmetros de transferência de calor.

Parâmetro	1	2	3	4	5	6	7	8
Coef. Glob. de Transf. de Calor ($W/m^2\text{°C}$)	20,67	19,49	18,25	16,95	15,59	14,15	12,63	11,00
Fluxo de Energia no Evaporador (kW)	1,29	1,29	1,29	1,30	1,30	1,30	1,30	1,31
Diferença de Temperatura (°C)	7,85	8,18	8,58	9,05	9,64	10,37	11,32	12,64

Fonte: Elaboração própria.

O perfil de temperaturas de saída da água salgada dos pré-aquecedores da Figura 19 é resultado do reaproveitamento da energia do condensado de cada efeito. Os oito pré-aquecedores elevaram a temperatura da água salgada de alimentação de 35°C (saída do condensador) até aproximadamente $49,22\text{°C}$. Caso não existissem pré-aquecedores, o aquecedor instalado antes do primeiro efeito seria o único responsável por fornecer a energia para elevar a temperatura da água salgada até a temperatura de alimentação definida no projeto.

4.1.2. Perfil de vazão mássica de destilado

A vazão mássica de destilado por ebulição e por flashing de cada efeito são apresentadas na Figura 20. Os resultados mostram que a maior parte do total de destilado de cada efeito é gerado por ebulição. A vazão mássica de destilado gerado por flashing, apesar de mais baixa que a gerada por ebulição, representa uma porcentagem de 20% do total de destilado gerado por este equipamento.

É possível observar também que o primeiro efeito é o que tem a maior produção de destilado. Isso é explicado pela Equação 12, porque o calor latente do vapor gerado em um efeito é menor do que o calor latente gerado em um efeito anterior.

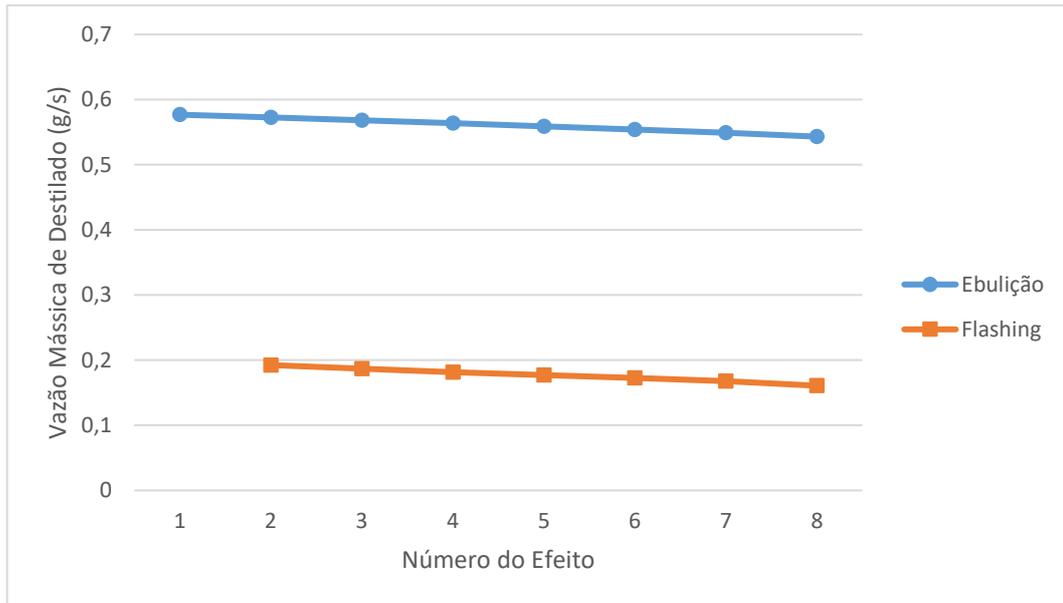


Figura 20 - Vazão mássica de destilado gerado por ebulição e por flashing em cada efeito.

Fonte: Elaboração própria.

4.2. Análise comparativa

As análises a seguir são referentes aos dados obtidos para o dimensionamento de diferentes equipamentos em função do número de efeitos e da temperatura máxima de ebulição. Comparando a influência da variação de alguns parâmetros nas características do equipamento.

Os dados abaixo foram obtidos definindo a temperatura máxima de ebulição (temperatura de ebulição do primeiro efeito) e foi utilizado o *solver* para variar a vazão mássica do vapor fonte de calor, a temperatura de entrada da água salgada de alimentação no primeiro efeito, a temperatura do vapor fonte de calor e as temperaturas de ebulição do segundo efeito em diante, com o objetivo de maximizar a vazão mássica de destilado.

4.2.1. Área específica de transferência de calor por número de efeitos

A variação da área específica de transferência de calor em função da temperatura máxima de ebulição (temperatura de ebulição do primeiro efeito) e do número de efeitos do equipamento é apresentado na Figura 21. A área de transferência de calor necessária por unidade de massa de água destilada aumenta com o aumento do número de efeitos e com a redução da temperatura máxima de ebulição do equipamento. Pelas Equações 15 e 16, se manter a temperatura máxima de ebulição constante e aumentar o número de efeitos, a diferença de

temperatura de cada efeito irá reduzir; conseqüentemente, a área necessária para transferência de calor irá aumentar. Também pelas Equações 15 e 16, manter o número de efeitos constante e aumentar a temperatura máxima de ebulição, resulta no aumento do coeficiente global de transferência de calor e da diferença de temperatura de cada efeito. Conseqüentemente, a área necessária para transferência de calor irá reduzir.

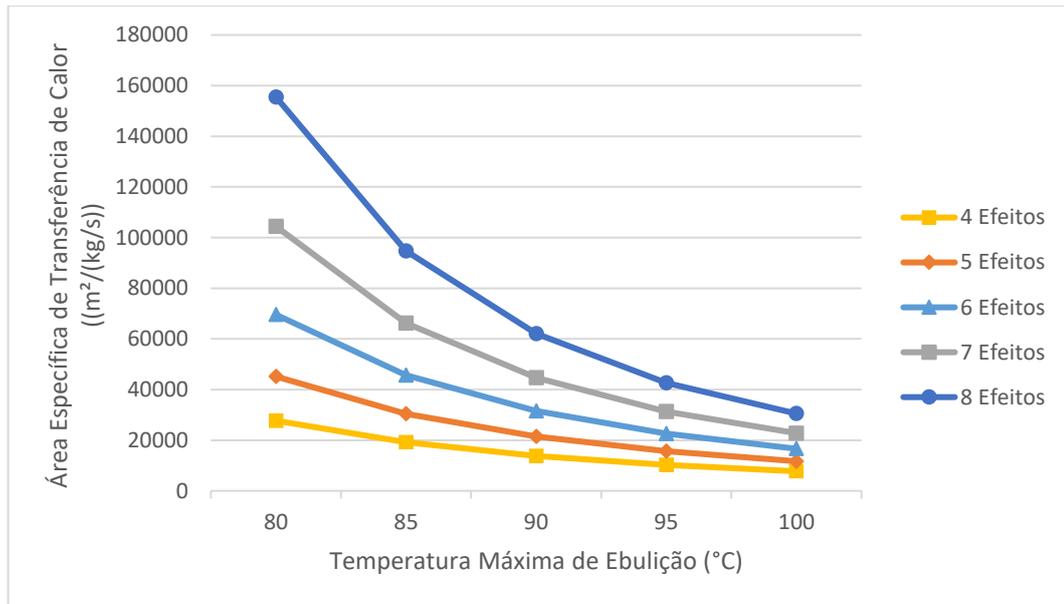


Figura 21 - Área específica de transferência de calor em função do número de efeitos e da temperatura máxima de ebulição.

Fonte: Elaboração própria.

Observe também que em temperaturas máximas de ebulição mais altas, o número de efeitos quase não influencia na área específica de transferência de calor. Por outro lado, a utilização de temperaturas mais altas aumenta a probabilidade de incrustações, corrosão e descamação nas tubulações e carcaça do equipamento.

4.2.2. Energia inicial por unidade de massa

Visto que o objetivo da escolha de um equipamento de dessalinização em múltiplos efeitos é reaproveitar a energia fornecida e conseqüentemente reduzir a energia necessária para dessalinizar uma certa quantidade de água, é válido comparar a razão entre a energia inicial necessária e a vazão mássica de destilado produzida para equipamentos com diferentes números de efeitos e em diferentes temperaturas máximas de ebulição. A Figura 22 apresenta os dados obtidos.

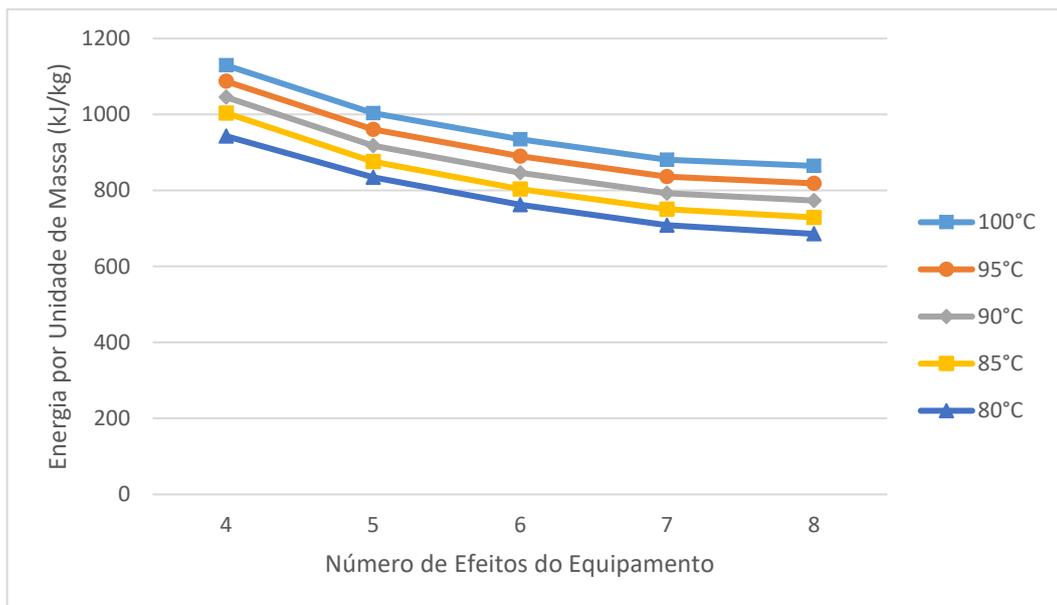


Figura 22 - Energia inicial por unidade de massa em função do número de efeitos do equipamento e da temperatura máxima de ebulição.

Fonte: Elaboração própria.

Observe que a medida que o número de efeitos aumenta, menor é a energia inicial necessária para dessalinizar certa quantidade de água (independente da temperatura máxima de ebulição). A princípio, analisando do ponto de vista da economia de energia, parece valer a pena utilizar a maior quantidade de efeitos possível. Porém, repare que a medida que o número de efeitos aumenta, menor é a porcentagem de energia economizada. Portanto, conclui-se que nem sempre é mais vantajoso ter o maior número de efeitos possível em um equipamento.

A partir da Figura 21 vimos que quanto maior a temperatura máxima de ebulição, menor é a área específica de transferência de calor. Porém, pela Figura 22, é possível perceber que quanto maior a temperatura máxima de ebulição, maior é a energia inicial necessária para dessalinizar certa quantidade de água. Portanto, conclui-se que nem sempre é mais vantajoso utilizar uma alta temperatura de ebulição máxima.

Considerando o discutido nos Tópicos 4.2.1 e 4.2.2, existem diversos fatores que devem ser levados em consideração quando definindo a quantidade de efeitos ideal de um projeto. Alguns exemplos são:

- Qualidade da água salgada que é utilizada;
- Temperatura e vazão do vapor fonte de calor;
- Custos relacionados aos componentes de um efeito extra;
- Manutenção de um equipamento com um efeito extra.

Não faz parte do escopo desse documento realizar a análise de custos de uma planta de dessalinização.

5. CONCLUSÃO

O estudo e desenvolvimento de técnicas de dessalinização da água salgada é fundamental para atender futura demanda mundial por água doce. Um dos métodos que já foi bastante utilizado no passado e voltou a receber atenção é a dessalinização por ebulição em múltiplos efeitos (MEB). Entre as características deste método se destacam a eficiência no reaproveitamento da energia fornecida e a facilidade de aplicação utilizando energias renováveis.

O sistema de equações para o dimensionamento de um equipamento de dessalinização por ebulição em múltiplos efeitos, que utiliza trocadores de calor do tipo casco-serpentina como evaporador e trocadores de calor do tipo casco-tubo como pré-aquecedores e condensador final foi modelado no programa Excel e solucionado através da ferramenta *solver*. Foram dimensionados vários equipamentos, variando diversos parâmetros e a partir dos dados obtidos foi possível tirar conclusões e entender como estes parâmetros influenciam no projeto de um dessalinizador.

Primeiramente, a utilização dos pré-aquecedores, mesmo não elevando a temperatura da água salgada próximo da temperatura de alimentação, representou uma economia de energia considerável no aquecedor. Outro ponto importante é que a vazão mássica de água destilada gerado por ebulição é maior no primeiro efeito e decresce nos efeitos seguintes devido redução da temperatura de um efeito para o outro. A vazão mássica de água destilada gerada por flashing, apesar de mais baixa que a gerada por ebulição, representa uma porcentagem significativa do total de destilado gerado pelo equipamento e é essencial no dimensionamento dos evaporadores, pré-aquecedores e condensador final.

Comparando equipamentos com diferentes números de efeitos foi concluído que mesmo que o aumento do número de efeitos ao máximo indique uma economia de energia, isto exige um custo maior com os componentes e a manutenção. Do mesmo modo, operar com alta temperatura máxima de ebulição resulta em uma redução da área específica de transferência de calor, porém exige maior custo com energia para dessalinizar certa quantidade de água. Deste modo, a definição do projeto ideal exige que muitos outros fatores sejam levados em consideração.

Utilizar trocadores de calor do tipo casco-serpentina como evaporadores foi uma escolha arbitrária no início do projeto e uma possibilidade de melhoria do projeto seria utilizar outros tipos de trocadores de calor como evaporadores, avaliando o desempenho e o impacto dessa alteração no dimensionamento do dessalinizador como um todo. Por exemplo, utilizar trocadores de calor que trabalham com uma película fina distribuída pela superfície de tubos horizontais ou verticais.

Outras pesquisas relacionadas que dariam continuidade ao tema e aos estudos realizados neste projeto incluem:

- Analisar a aplicação de outros tipos de trocadores de calor como evaporadores;
- Analisar os custos dos equipamentos desenvolvidos neste documento;
- Analisar os resultados da implementação do método por compressão de vapor aos equipamentos desenvolvidos neste documento;
- Analisar outros métodos de dessalinização, utilizando parâmetros de entrada semelhantes para comparar com os resultados obtidos neste documento.

APÊNDICE A – Propriedades termodinâmicas

A.1. Densidade da água salgada

A correlação para a densidade da água salgada é dada pela seguinte correlação

$$\rho = 10^3 * (A_1 * F_1 + A_2 * F_2 + A_3 * F_3 + A_4 * F_4) \quad (57)$$

Em que,

$$B = \frac{\left(\frac{2 * X}{1000} - 150\right)}{150}$$

$$G_1 = 0,5; G_2 = B; G_3 = 2 * B^2 - 1$$

$$A_1 = 4,032219 * G_1 + 0,115313 * G_2 + 3,26 * 10^{-4} * G_3$$

$$A_2 = -0,108199 * G_1 + 1,571 * 10^{-3} * G_2 - 4,23 * 10^{-4} * G_3$$

$$A_3 = -0,012247 * G_1 + 1,74 * 10^{-3} * G_2 - 9 * 10^{-6} * G_3$$

$$A_4 = 6,92 * 10^{-4} * G_1 - 8,7 * 10^{-5} * G_2 - 5,3 * 10^{-5} * G_3$$

$$A = \frac{(2 * T - 200)}{160}$$

$$F_1 = 0,5; F_2 = A; F_3 = 2 * A^2; F_4 = 4 * A^3 - 3 * A$$

Nas equações acima, ρ é a densidade da água salgada em kg/m^3 , X é a salinidade da água salgada em partes por milhão (ppm), T é a temperatura da água salgada em $^{\circ}\text{C}$. Essa correlação é válida para os seguintes intervalos: $0 < X < 160000 \text{ ppm}$ e $10 < T < 180 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

A.2. Calor específico da água salgada à pressão constante

A correlação para o calor específico da água salgada à pressão constante é dada pela seguinte correlação

$$c_p = (A + B * T + C * T^2 + D * T^3) * 10^{-3} \quad (58)$$

Em que,

$$A = 4206,8 - 6,6197 * 10^{-3} * X + 1,2288 * 10^{-8} * X^2$$

$$B = -1,1262 + 5,4178 * 10^{-5} * X - 2,2719 * 10^{-10} * X^2$$

$$C = 1,2026 * 10^{-2} - 5,3566 * 10^{-7} * X + 1,8906 * 10^{-12} * X^2$$

$$D = 6,8777 * 10^{-7} + 1,517 * 10^{-9} * X - 4,4268 * 10^{-15} * X^2$$

Nas equações acima, c_p é o calor específico da água salgada à pressão constante em $kJ/kg^{\circ}C$, X é a salinidade da água salgada em ppm , T é a temperatura da água salgada em $^{\circ}C$. Essa correlação é válida para os seguintes intervalos: $20000 < X < 160000 ppm$ e $20 < T < 180 ^{\circ}C$.

A.3. Viscosidade dinâmica da água salgada

A correlação para a viscosidade dinâmica da água salgada é dada pela seguinte correlação

$$\mu = \mu_W * \mu_R * 10^{-3} \quad (59)$$

Em que,

$$\mu_W = e^{\left(-3,79418 + \frac{604,129}{139,18+T}\right)}$$

$$\mu_R = 1 + A * X + B * X^2$$

$$A = 1,474 * 10^{-6} + 1,5 * 10^{-8} * T - 3,927 * 10^{-11} * T^2$$

$$B = 1,0734 * 10^{-11} - 8,5 * 10^{-14} * T - 2,23 * 10^{-16} * T^2$$

Nas equações acima, μ é a viscosidade dinâmica da água salgada em kg/ms , X é a salinidade da água salgada em ppm , T é a temperatura da água salgada em $^{\circ}C$. Essa correlação é válida para os seguintes intervalos: $0 < X < 130000 ppm$ e $10 < T < 180 ^{\circ}C$.

A.4. Condutividade térmica da água salgada

A correlação para a condutividade térmica da água salgada é dada pela seguinte correlação

$$\log_{10} k = \log_{10}(240 + A * X) + 0,434 * \left(2,3 - \frac{343,5 + B * X}{273,15 + T}\right) * \left(1 - \frac{273,15 + T}{647,3 + C * X}\right)^{1/3} \quad (60)$$

Em que,

$$A = 2 * 10^{-7}; B = 3,7 * 10^{-5}; C = 3 * 10^{-5}$$

Na equação acima, k é a viscosidade dinâmica da água salgada em $W/m^{\circ}C$, X é a salinidade da água salgada em ppm , T é a temperatura da água salgada em $^{\circ}C$. Essa correlação é válida para os seguintes intervalos: $0 < X < 160000 ppm$ e $20 < T < 180 ^{\circ}C$.

A.5. Calor latente de evaporação da água

A correlação para o calor latente de evaporação da água é dada pela seguinte correlação

$$\lambda = 2501,89715 - 2,40706404 * T + 1,19222 * 10^{-3} * T^2 - 1,5863 * 10^{-5} * T^3 \quad (61)$$

Na equação acima, λ é o calor latente de evaporação da água em kJ/kg , T é a temperatura de saturação em $^{\circ}C$.

A.6. Densidade da água pura

A correlação para a densidade da água pura é dada pela seguinte correlação

$$\rho = A_1 + A_2 * T + A_3 * T^2 + A_4 * T^3 + A_5 * T^4 \quad (62)$$

Em que,

$$A_1 = 999,9; A_2 = 2,034 * 10^{-2}; A_3 = -6,162 * 10^{-3} \\ A_4 = 2,261 * 10^{-5}; A_5 = -4,657 * 10^{-8}$$

Na equação acima, ρ é a densidade da água pura em kg/m^3 , T é a temperatura da água pura em $^{\circ}C$. Essa correlação é válida para o intervalo de $0 < T < 180 ^{\circ}C$.

A.7. Pressão de vapor da água pura

A correlação para a pressão de vapor da água pura é dada pela seguinte correlação

$$\ln p = \frac{A_1}{T + 273,15} + A_2 + A_3 * (T + 273,15) + A_4 * (T + 273,15)^2 + A_5 * (T + 273,15)^3 + A_6 * \ln(T + 273,15) \quad (63)$$

Em que,

$$A_1 = -5800; A_2 = 1,391; A_3 = -4,846 * 10^{-2}; A_4 = 4,176 * 10^{-5} \\ A_5 = -1,445 * 10^{-8}; A_6 = 6,545$$

Na equação acima, p é a pressão de vapor da água pura em Pa , T é a temperatura da água pura em $^{\circ}C$. Essa correlação é válida para o intervalo de $0 < T < 200$ $^{\circ}C$.

A.8. Calor específico da água pura à pressão constante

A correlação para o calor específico da água pura à pressão constante é dada pela seguinte correlação

$$c_p = A_1 + A_2 * T + A_3 * T^2 + A_4 * T^4 + A_5 * p + A_6 * p * T + A_7 * p * T^3 \\ + A_8 * p^2 + A_9 * p^2 * T + A_{10} * p^2 * T^2 \quad (64)$$

Em que,

$$A_1 = 4,193; A_2 = -2,273 * 10^{-4}; A_3 = 2,369 * 10^{-6}; A_4 = 1,670 * 10^{-10} \\ A_5 = -3,978 * 10^{-3}; A_6 = 3,229 * 10^{-5}; A_7 = -1,073 * 10^{-9} \\ A_8 = 1,913 * 10^{-5}; A_9 = -4,176 * 10^{-7}; A_{10} = 2,306 * 10^{-9}$$

Na equação acima, c_p é o calor específico da água pura à pressão constante em $kJ/kg^{\circ}C$, p é a pressão de vapor da água pura em Pa , T é a temperatura da água pura em $^{\circ}C$. Essa correlação é válida para os seguintes intervalos: $0,1 < p < 100$ MPa e $0 < T < 374$ $^{\circ}C$.

A.9. Viscosidade dinâmica da água pura

A correlação para a viscosidade dinâmica da água pura é dada pela seguinte correlação

$$\mu = \frac{e^{\left(-3,79418 + \frac{604,129}{139,18+T}\right)}}{1000} \quad (65)$$

Na equação acima, μ é a viscosidade dinâmica da água pura em kg/ms , T é a temperatura da água pura em °C. Essa correlação é válida para o intervalo de $10 < T < 115$ °C.

A.10. Condutividade térmica da água pura

A correlação para a condutividade térmica da água pura é dada pela seguinte correlação

$$k = \sum_{i=1}^4 A_i * \left(\frac{T + 273,15}{300}\right)^{B_i} \quad (66)$$

Em que,

$$A_1 = 0,80201; A_2 = -0,25992; A_3 = 0,10024; A_4 = -0,032005$$

$$B_1 = -0,32; B_2 = -5,7; B_3 = -12,0; B_4 = -15,0$$

Na equação acima, k é a viscosidade dinâmica da água pura em $W/m^\circ C$, T é a temperatura da água pura em °C. Essa correlação é válida para o intervalo de $0 < T < 110$ °C.

A.11. Viscosidade dinâmica do vapor de água saturado

A correlação para a viscosidade dinâmica do vapor de água saturado é dada pela seguinte correlação

$$\mu = \frac{e^{\left(-3,609417664 + \frac{275,928958}{-227,0446083 - 0,896081232*T - 0,002291383*T^2}\right)}}{1000} \quad (67)$$

Na equação acima, μ é a viscosidade dinâmica do vapor de água saturado em kg/ms , T é a temperatura do vapor em $^{\circ}C$. Essa correlação é válida para o intervalo de $10 < T < 180$ $^{\circ}C$.

REFERÊNCIAS

BERGMAN, Theodore L.; LAVINE, Adrienne S.; INCROPERA, Frank P.; DEWITT, David P. *Fundamentos de transferência de calor e de massa*. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

BERNARDO, Piero S. *Estudo da variação espaço-temporal da Água Modal Subtropical do Atlântico Sul*. São Paulo: Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, 2016.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. *Resolução n° 430, de 13 de maio de 2011*. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução n° 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA.

EL-DESSOUKY, Hisham T; ETTOUNEY, Hisham M. *Fundamentals of salt water desalination*. Amsterdam: Elsevier Inc., 2002.

EXTRAN. *Shell and tube heat exchangers*. Disponível em:
<<http://www.extranheattransfer.com.au/products/shell-and-tube-heat-exchangers/>> Acesso em: abril de 2017.

HIDRODEX. *Desmineralizadores*. Disponível em:
<<http://www.hidrodex.com.br/desmineralizadores/>> Acesso em: abril de 2017.

JANNA, William S. *Design of fluid thermal systems*. Stamford: Cengage Learning, 2010.

JUNIOR, Aloísio de C. G.; SOUZA, Marcone J. F. *Solver (Excel): Manual de referência*. Ouro Preto: Departamento de Computação da Universidade Federal de Ouro Preto, 2004.

KALOGIROU, Soteris A. *Solar Energy Engineering: processes and systems*. San Diego: Elsevier Inc., 2009.

KUCERA, Jane. *Desalination: water from water*. Beverly: Scrivener Publishing LLC, 2014.

LATTEMANN, Sabine; HÖPNER, Thomas. *Environmental impact and impact assessment of seawater Desalination*. Oldenburg: Elsevier Inc., 2008.

LIMA, Jorge E. F. W. *Recursos hídricos no Brasil e no mundo*. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2001.

MAZE. *Serpentinas: Trocadores de calor*. Disponível em: <<http://www.maze.ind.br/imagens/informacoes/serpentinhas-trocadores-calor-03.jpg>> Acesso em: abril de 2017.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL. *Desalination: a national perspective*. Washington: National Academy of Sciences, 2008.

OVADIA, Y.S.; GEFEL, D.; AHARONI, D.; TURKOT, S.; FYTLOVICH, S. and TROEN, A.M. *Can desalinated seawater contribute to iodine-deficiency disorders? An observation and hypothesis*. Public Health Nutrition, 2016.

PENTAIR. *Osmose reversa*. Disponível em: <<http://xflow.pentair.com/pt-pt/technologies/reverse-osmosis>> Acesso em: abril de 2017.

SALIMPOUR, Mohammad R. *Heat transfer coefficients of shell and coiled tube heat exchangers*. Isfahan: Elsevier Inc., 2008.

SHARQAWY, Mostafa H.; JOHN H. Lienhard V.; SYED M. Zubair. *The thermophysical properties of seawater: A review of existing correlations and data*. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2010.

SPIEGLER, K. S. *Principles of desalination*. Berkeley: Academic Press Inc., 1966.

WIRE MESH. *DN1500 wire mesh demister*. Disponível em: <<http://www.webwirecloth.com/showcp.php?id=596>> Acesso em: abril de 2017.