UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

FRANCISCO NASCELIO PINHEIRO

DESENVOLVIMENTO DE UM NOVO PROTÓTIPO DE DESSALINIZADOR TÉRMICO COM RECUPERAÇÃO DE CALOR ACIONADO POR FONTE CONTROLADA DE ENERGIA ELÉTRICA

FORTALEZA
2013

FRANCISCO NASCELIO PINHEIRO

DESENVOLVIMENTO DE UM NOVO PROTÓTIPO DE DESSALINIZADOR TÉRMICO COM RECUPERAÇÃO DE CALOR ACIONADO POR FONTE CONTROLADA DE ENERGIA ELÉTRICA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecâncica.Área de Concentração: Processos, Equipamentos e Sistemas para Energias Renováveis.

Orientadora: Profª. Dra. Maria Eugênia Vieira da Silva.

FORTALEZA

2013

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca de Pós-Graduação em Engenharia - BPGE

P719d Pinheiro, Francisco Nascelio.
Desenvolvimento de um novo protótipo de dessalinizador térmico com recuperação de calor acionado por fonte controlada de energia elétrica. / Francisco Nascelio Pinheiro. – 2013
70 f. : il. color., enc. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica e de Produção. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Fortaleza, 2013.
Área de Concentração: Processos, Equipamentos e Sistemas para Energias Renováveis.
Orientação: Profa. Dra. Maria Eugênia Vieira da Silva.

1. Engenharia Mecânica. 2. Energia elétrica – Resistência. 3. Transferência de calor. I. Título.

CDD 620.1

FRANCISCO NASCELIO PINHEIRO

DESENVOLVIMENTO DE UM NOVO PROTÓTIPO DE DESSALINIZADOR TÉRMICO COM RECUPERAÇÃO DE CALOR ACIONADO POR FONTE CONTROLADA DE ENERGIA ELÉTRICA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica. Área de Concentração: Processos, Equipamentos e Sistemas para Energias Renováveis.

Aprovada em _____/_____/_____

BANCA EXAMINADORA

_____

Prof.ª Dra. Maria Eugenia Vieira de Silva (Orientadora)

Universidade Federal do Ceará

_____

Prof. Dr. Paulo Alexandre Costa Rocha

Universidade Federal do Ceará

_____

Prof. Dr. Pierre Basílio Almeida Fechine

Universidade Federal do Ceará

À minha família, meu pai, minha mãe e meu irmão que sempre me apoiaram, moldaram meu caráter e me fizeram a pessoa que sou hoje.

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter sempre me guiado pelo melhor caminho.

À professora Maria Eugenia Vieira da Silva, por sua dedicação, preocupação e competência a frente do LESGN.

Aos meus Pais, Francisco Tarcísio Pinheiro e Francisca Edvaneide Pinheiro, pelo apoio e incentivo em todas as horas.

Aos meus irmãos, Celso Gomes Pinheiro, Antônio Narcisio Pinheiro, Tarcio Gledson Pinheiro, José Valcélio Pinheiro e Paulo Victor Pinheiro da Silva, pela força de cada dia.

Aos colegas Maria Elieneide Araújo, Erilson Barbosa, Dona Francisca, Sávio Bezerra de Aguiar, Osvaldo Assunção Mendonça, João Vitor Goes Pinheiro, Oseas Carlos Silva, Jardel de Queiroz Juvêncio, Paulo Candeira da Cunha Filho, Mateus Souza Magalhães e José Victor Girão Gomes, Larissa Colares Maia e as pessoas que trabalharam no LESGN que foram fundamentais para a conclusão dessa dissertação.

A todos os meus amigos do mestrado, em especial Isaias Silva da Costa, Francisco de Assis Leandro Filho e Maurício Soares de Almeida, por ter me acompanhado e ajudado em todo o trabalho desde o início.

Ao Laboratório de Engenharia Mecânica e de Produção Metrologia Dimensional (LAMETRO), pela contribuição e apoio.

À CAPES, CNPq e PETROBRAS, pela concessão de bolsa e apoio financeiro.

Aos professores do programa de pós-graduação Nivaldo, Paulo e todos os demais que de várias formas contribuíram com o trabalho.

Aos secretários Valdi Matos de Almeida Júnior e Juliana Arruda Lima pela ajuda e amizade.

A todos os meus amigos que contribuíram de forma direta ou indireta para a concretização deste trabalho, em especial Antonio Deives Renan Moreira, Luis Clenio Jário Moreira, Maria Lidiane Pinheiro, Aglailson da Silva Pinheiro, Ana Karla Dantas Pinheiro, Francisco Clair Moreira e Maria Rizoleta Pinheiro Moreira.

“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão uma gota de água no mar. Mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota.”
(Madre Teresa de Calcutá)

RESUMO

Dessalinizadores solares térmicos operam com fonte variável de calor, a radiação solar, o que dificulta a identificação da influência das variáveis de processo e dos parâmetros geométricos construtivos. Em seu funcionamento, água salobra ou salgada é aquecida em um tanque de armazenamento, onde evapora e condensa nas paredes inferiores de uma bandeja metálica (primeiro estágio) instalada acima do tanque. Ao condensar, o vapor transfere calor para a água salgada desse primeiro estágio e o condensado é coletado no exterior do tanque. O presente trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um novo protótipo de dessalinizador térmico com parâmetros operacionais controláveis para funcionamento em regimes transiente e permanente. No protótipo, o aquecimento da água a ser dessalinizada é feito por resistência elétrica com fonte de tensão controlável, permitindo a variação desejável da potência de aquecimento. Foram instalados sensores do tipo PT-100, especialmente especificados para as dimensões do tanque de armazenamento, para medições de temperaturas da água em diferentes posições no tanque. A massa de água no tanque é medida por balança de precisão. Com as medições realizadas, foram construídos gráficos de temperatura da água do tanque durante os regimes constante de aquecimento e resfriamento. Foi também medido o Coeficiente Global de Transferência de Calor para as fases de aquecimento, regime permanente e resfriamento. Por fim, foi constatada a dessalinização por medidas de condutividade elétrica da água utilizada.

Palavras chaves: Dessalinizador, resistência elétrica, Coeficiente Global de Transferência de Calor.

ABSTRACT

Solar thermal desalination plants operate with variable heat source, solar radiation, which complicates the identification of the influence of process variables and of the constructive geometric parameters. In operation, brackish or salt water is heated in a storage tank, where it evaporates and condenses on the walls of a lower metal tray (first stage) installed above the tank. By condensing, the steam transfers heat to the salt water of this first stage and the condensate is collected on the outside of the tank. This work aims to develop a new prototype desalination unit with thermal controllable operating parameters for operation in transient and steady states. In the prototype, the heating of the water to be desalinated is done by electrical resistance with controllable source, allowing the variation of the desired heating power. Sensors of the type PT-100 were installed, especially specified for the dimensions of the storage tank for measuring water temperature at different positions in the tank. The mass of water in the tank is measured by a precision balance. With the measurements, graphics of water temperature of the tank during the heating, the cooling and the steady state were constructed. Also, the Global Coefficient of Heat Transfer was measured for phases of heating, cooling and steady state. Finally, desalination was found by the electrical conductivity of the used water.

Keywords: Desalinator, electrical resistance, Global Coefficient of Heat Transfer.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Disponibilidade e distribuição de água no planeta. 14
Figura 2 - Princípio de funcionamento MSF 24
Figura 3 - Princípio de Funcionamento MED 25
Figura 4 - Mostra uma comparação entre osmose e osmose reversa 26
Figura 5 - Princípio de Funcionamento Eletrodiálise 27
Figura 6- Princípio de Funcionamento Dessalinizador Solar 28
Figura 7 - Diagrama com um único fasor. A projeção do vetor girante (fasor) sobre o eixo horizontal representa a corrente instantânea. 30
Figura 8 - Um resistor R conectado aos terminais de uma fonte ac 32
Figura 9 - Gráfico da voltagem, da corrente e da potência em função do tempo para diversos circuitos. Potência instantânea para um resistor puro. A potência média é dada por $12VI = VfIf$ 32
Figura 10 - Dessalinizador térmico com recuperação de calor e aquecimento direto com resistência elétrica 34
Figura 11 - (a) Resistência Circular; (b) Resistência em formato de "W" 35
Figura 12 - Tanque de Aquecimento 37
Figura 13 - (a) Corte dos perfis; (b) geometria do corte transversal dos perfis 38
Figura 14 - Desenho esquemático do trocador de calor 39
Figura 15 - Volume de controle do tanque de aquecimento 41
Figura 16 - Corte da chapa na face 1 46
Figura 17 - (a) Primeira dobra na face 1; (b) Segunda e Terceira dobra na face 2 46
Figura 18- Gráfico de Temperatura em função do tempo para as temperaturas da água no tanque e no primeiro estágio utilizando a bandeja de alumínio e a diferença de potencial de 165 V. 50
Figura 19 - Gráfico de Temperatura em função do tempo para as temperaturas da água no tanque e no primeiro estágio utilizando a bandeja de alumínio e a diferença de potencial de 200 V. 51
Figura 20 - Gráfico de Temperatura em função do tempo para as temperaturas da água no tanque e no primeiro estágio utilizando a bandeja de aço polido e a diferença de potencial de 165 V. 52

Figura 21 - Gráfico de Temperatura em função do tempo para as temperaturas da água no tanque e no primeiro estágio utilizando a bandeja de aço polido e a diferença de potencial de 200 V. 53
Figura 22 - Gráfico de Temperatura em função do tempo para as temperaturas da água no tanque e no primeiro estágio utilizando a bandeja de aço inoxidável e a diferença de potencial de 165 V. 54
Figura 23 - Gráfico de Temperatura em função do tempo para as temperaturas da água no tanque e no primeiro estágio utilizando a bandeja de aço inoxidável e a diferença de potencial de 200 V. 55
Figura 24 - Gráfico de Temperatura em função do tempo para as temperaturas da água no tanque e no primeiro estágio utilizando a bandeja de aço cromado e a diferença de potencial de 165 V. 56
Figura 25 - Gráfico de Temperatura em função do tempo para as temperaturas da água no tanque e no primeiro estágio utilizando a bandeja de aço cromado e a diferença de potencial de 200 V. 57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados das análises da condutividade elétrica e a solução dos sólidos dissolvidos em parte por milhão (PPM) das amostras de água bruta e dessalinizada 58
Tabela 2 - Parâmetros de Rugosidade 60
Tabela 3 - Coeficiente Global de Transferência de Calor (K_1) 61

LISTA DE SÍMBOLOS

A Área da Superfície Horizontal da Massa de Água no Tanque, [m²]

A_p Área da Superfície Interna do Tanque em Contato com o Isolamento, [m²]

c_p Calor Específico da Água, [cal/g.°C]

$\dot{E}$ Taxa da Energia, [W]

f Frequência, [Hz]

$\dot{Q}$ Taxa de Transferência de Calor, [W]

h Coeficiente de Transferência de Calor, [W/m^{2}k]

h_{fg} Calor Latente de Vaporização, [J/Kg]

i Corrente Instantânea, [A]

I Corrente Máxima (ou Amplitude da Corrente), [A]

I_f Corrente Quadrática Média (ou Valor Eficaz), [A]

K_1 Coeficiente Global de Transferência de Calor, [W/m²K]

K_2 Coeficiente de Perda de Calor Por Condução Para o Ambiente, [W/m²K]

$\dot{m}$ Taxa de Transferência de Massa, [g/s]

m Massa de Água, [g]

p Potência Instantânea, [W]

$P_{méd}$ Potência Média, [W]

t Tempo, [s]

T_1 Temperatura, [°C]

v Diferença de Potencial Instantânea, [V]

V Diferença de Potencial Máxima, [V]

V_f Diferença de Potencial Quadrática Média (ou Valor Eficaz da Diferença de Potência), [V]

w Frequência Angular, [$rad\ /\ s$]

SUBSCRITOS

1 Água na Primeira Bandeja

∞ Ambiente

a	Acumulada, Água do Tanque
c	Condução
cond	Condensação
conv	Convecção
e	Entrada
ele	Resistência Elétrica
evap	Evaporação
g	Gerada
j	Água Dessalinizada Produzida em Cada Estágio *j*
rad	Radiação
s	Saída

GREGOS

ε	Emissividade, [Adimensional]
σ	Constante de Stefan Boltzmann, [5,67x10^{-8} W/m^{2}K^4]
ω	Velocidade Angular, [rad/s]

SUMÁRIO

1 INTODUÇÃO 14

2 OBJETIVOS 17

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 18

4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 23

4.1 Principais Tipos de Tecnologias de Dessalinização 23

4.1.1 *Dessalinização de Múltiplos Estágios –Flash (Multistage Flash – MSF)* 23

4.1.2 *Destilação de Múltiplo Efeito (MED)* 24

4.1.3 *Congelamento (Freezing)* 25

4.1.4 *Osmose Reversa (Reverse Osmosis – RO)* 25

4.1.5 *Eletrodiálise (Electrodialysis – ED)* 27

4.1.6 *Destilação Solar Térmica* 27

4.2 Aquecimento Elétrico 28

5 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO DESSALINIZADOR 33

6 MATERIAIS E MÉTODOS 36

6.1 Componentes do Dessalinizador 36

6.2 Desempenho do Dessalinizador 40

6.3 Métodos 45

7 RESULTADOS 49

7.1 Resultados das Bandejas 49

7.2 Análise da Condutividade Elétrica e de Salinidade 57

7.3 Teste de Rugosidade 58

7.4 Coeficiente Global de Transferência de Calor (K_1) 60

8 CONCLUSÃO 62

REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFIAS 63

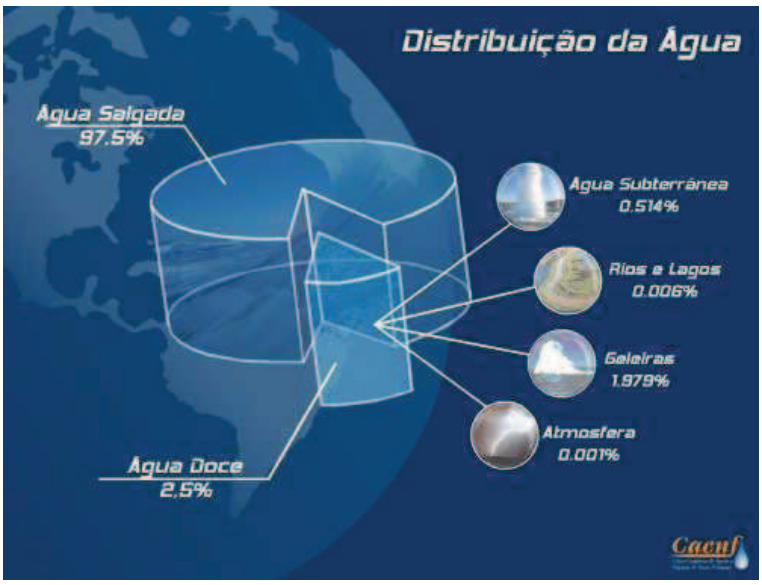
ANEXO A - Processos de Transferência de Calor e Massa 67

1 INTODUÇÃO

Com o aumento do crescimento populacional e industrial cresce também a necessidade de recursos básicos como a água. Vários procedimentos têm surgido para resolver este problema de escassez de água potável e dentre eles está a dessalinização de águas salobras, salgadas ou poluídas.

A estimativa de água na Terra é de $1{,}386 \times 10^9 Km^3$, mas a maioria, ou seja, 97,5% desse recurso são águas salgadas, imprópria para o consumo humano, pertencente aos mares e oceanos. A água doce representa 2,5%, das quais 69,0% destas estão nas geleiras, 0,9% estão na umidade do solo, atmosfera e lagos e rios poluídos ou salgados e, somente, 0,3% está pronta para o consumo humano. Entretanto, este 0,3% não está distribuído uniformemente, como é o caso do nordeste do Brasil. A Figura 1 ilustra bem essa distribuição para referencial global (CAENF, 2009).

Figura 1 - Disponibilidade e distribuição de água no planeta.



Fonte: Companhia de água e esgoto de Nova Friburgo (2009)

Em 1991 encontravam-se distribuídas por 120 países cerca de 8.800 usinas de dessalinização em plena operação, produzindo mais de 15 milhões de m³ diários de água dessalinizada, chegando a uma média nominal de 25 L/s. Dois terços desta produção decorriam da água do mar e eram usados para o consumo humano e principalmente indústria (INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS, 2007).

A Arábia Saudita é responsável por aproximadamente 27% da produção mundial de água dessalinizada. A maior parte de sua produção provém do processo de dessalinização que tem como fonte de energia o petróleo e gás, utilizando quase que exclusivamente a água do mar. Os Estados Unidos da América vêm em seguida com 12% do total produzido no mundo com usinas de Osmose Reversa (RO), tendo como matéria prima a água salobra. Segundo a Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente Nº20, a água é salobra quando seu total de sólidos dissolvidos estiver entre 500 e 30.000 ppm e é salgada quando seu total de sólidos dissolvidos for igual ou superior a 30.000 ppm (INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS, 2007).

A tendência mundial tem sido o crescimento anual de 7 a 10% na produção de água dessalinizada. A China prevê que até 2020 terá quadruplicado a sua produção de água dessalinizada, passando de $680 \times 10^3 m^3$ para três milhões de metros cúbicos diários, o equivalente a 12 usinas de $200 \times 10^3 m^3$. O investimento chinês será de US$ 31 bilhões contudo especialistas neste assunto especulam ser insuficiente, uma vez que estudos afirmam que a demanda de água na China deverá crescer 63% até 2030 (WINES, 2011).

O Brasil é um país rico em recursos hídricos, pois possui 11,6% de toda a água doce do planeta. No entanto, esta água é mal distribuída, com 70% das águas na região Norte, onde se encontra a maior bacia hidrográfica do mundo (Bacia Amazônica). Apenas 3% das águas no Brasil estão na região Nordeste, que enfrenta variações climáticas ao longo do ano, responsáveis pela má distribuição de chuvas e as estiagens principalmente no sertão do Ceará, causando a falta de água para o consumo humano e problemas sociais e econômicos (LOPES, 2004).

Umas das soluções mais utilizadas pelo governo cearense é a construção de barragens de rios e perfuração de poços para a extração de água. No entanto, com o passar dos tempos os açudes vão acumulando sais minerais devido ao processo de evaporação o que torna a água salobra. Também devido ao solo cristalino do Ceará, os poços muitas vezes possuem uma taxa elevada de sais minerais. Uma das alternativas para resolver este problema está na dessalinização de água salobra.

O governo do Ceará instalou dessalinizadores de Osmose Reversa, perto dos centos urbanos onde chega eletricidade, contudo muitas famílias ficaram sem dessalinizadores, pelo fato de serem de difícil acesso e não possuírem rede elétrica.

Uma opção é a dessalinização solar térmica, pois o Nordeste é bastante favorecido com a radiação solar e dessalinizadores solares térmicos não precisam de mão de obra especializada para garantir a manutenção dos equipamentos.

Nas áreas de baixa densidade populacional onde não há disponibilidade de água doce e nem ligação à rede elétrica, bem como qualquer outra fonte convencional de energia, a dessalinização solar térmica é uma solução moderada para as suas necessidades.

A melhoria da qualidade de vida dos brasileiros, bem como o avanço tecnológico na área de energias renováveis, como a solar, devem sevir como justificativas para o investimento em pesquisas em dessalinização a partir do aproveitamento dessa fonte de energia.

Os dessalinizadores solares térmicos operam com uma fonte de calor variável, a radiação solar, o que dificulta a identificação da influência das variáveis de temperatura e dos seus parâmetros geométricos construtivos. Dessa forma, a motivação deste trabalho é o estudo dos parâmetros operacionais que influenciam na produção de água dessalinizada em uma torre de dessalinização térmica com recuperação de calor. Foi necessário para isso a instalação de um sistema com fonte de calor constante para que sua operação acontecesse em regime permanente, possibilitado o estudo dos parâmetros operacionais. A fonte de calor usada foi de uma resistência elétrica, a quantidade da energia que entra o sistema é controlada por um sistema contendo um mecanismo de variação da diferença de potencial elétrico, um multímetro e a própria resistência.

As campanhas experimentais foram feitas no Laboratório de Energia Solar e Gás Natural (LESGN) da Universidade Federal do Ceará (UFC), na cidade de Fortaleza.

2 OBJETIVOS

O protótipo do dessalinizador térmico com recuperação de calor operando com aquecimento pela combustão de gás natural foi testado com bandejas de aço inoxidável por Rodrigues (2011). O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um novo sistema de aquecimento, de forma controlada, para permitir a operação nos regimes transiente e permanente. São também fabricadas e testadas novas bandejas com os materiais e alumínio, aço polido, aço inoxidável e aço inoxidável cromado.

As metas do trabalho são: A otimização dos parâmetros operacionais que influenciam na produção de água dessalinizada na torre do equipamento como o material das bandejas, o tipo e modelo de resistências elétricas; a caracterização térmica da torre pela determinação experimental do coeficiente de transferência de calor dos processos simultâneos de evaporação, radiação, convecção da superfície da água no tanque e de condensação nas paredes do estágio imediatamente superior ao tanque.

As etapas para a realização do trabalho são:

a) Utilizar os desenhos técnicos para fabricação de novas bandejas de alumínio, aço polido e aço inoxidável cromado;

b) Fabricar as novas bandejas e montá-las no dessalinizador para testes;

c) Instalar um novo sistema de aquisição de dados;

d) Realizar medições experimentais;

e) Analisar os dados obtidos para avaliar a influência dos parâmetros operacionais na produção de água dessalinizada.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Devido à importância do problema da falta de água no mundo, principalmente no Oriente Médio, muito estudos foram feitos sobre dessalinização. A quantidade de trabalhos disponíveis na literatura é vasta e somente alguns dos trabalhos mais relacionados à dessalinização solar térmica estão apresentados a seguir.

Löf *et al*. (1961) estabeleceram as relações de transferência de massa e energia para determinar a performance de um destilador solar de tanque em regime permanente. Eles relacionaram a produtividade do destilador em função da temperatura ambiente, da inclinação da coberta transparente de vidro, da velocidade do vento e da quantidade de radiação solar incidente. Os resultados de cálculo mostraram que a taxa de destilado era tão maior quanto maior fosse a diferença entre as temperaturas do vidro e da água salobra no tanque. A produtividade e a temperatura ambiente da água salobra aumentavam com a diminuição da velocidade do vento, da reflexibilidade do sistema e da taxa de re-evaporação.

Mota e Andrade (1985) projetaram um destilador solar para constatar o efeito da destilação solar sobre microrganismos patogênicos presentes na água, e as mudanças das características físico-químicas da água. Eles observaram que a destilação solar resultou no extermínio de microrganismos e na alteração dos parâmetros físico-químicos da água, tais como: Redução sensível na condutividade elétrica, diminuição da turbidez, redução da dureza, do teor de cloretos e da alcalinidade.

Adhikari *et al*. (1995) apresentaram um estudo teórico e desenvolveram um sistema de três estágios para analisar o aumento da produção de água dessalinizada com o aumento do número de estágios num dessalinizador com recuperação de calor. Ele concluiu que para sistemas com número de estágios superiores a oito não ocorre um ganho significativo na produção do destilado bem como no valor da razão de ganho de saída da torre de recuperação de calor.

Pinheiro e Silva (2000) fizeram um levantamento da qualidade e distribuição da água em poços subterrâneos no Ceará. Observaram que o grau de desigualdade na distribuição da água subterrânea, segundo o teor de salinidade, é elevado, o que permitiu concluir que a maioria da população do estado do Ceará consome água com baixo teor de sólidos solúveis dissolvidos. Os autores ainda salientam a importância de investir em melhorias da qualidade da água para consumo humano no meio rural do Ceará.

No ano seguinte, Pinheiro e Silva (2001) fizeram uma estratégia para formação e implantação de um programa de dessalinização da água salobra no Ceará. Concluíram que a escolha de comunidade pelo critério de salinidade para instalação de dessalinizador não é uma estratégia adequada para enfrentar o desafio de suprir a população com água potável.

Schwarzer *et al.* (2001) fizeram um dessalinizador solar térmico com recuperação de calor. Era um dessalinizador composto de um ou mais coletores solares e uma torre de dessalinização. Os coletores tinham área de 2 m², a torre de dessalinização tinha seis estágios com bandejas de dimensão 0,8m X 0,8m e a distância entre as fases de 0,1m. Foi utilizado um fluxo de óleo térmico para transferência de calor dos coletores para a torre. O abastecimento do experimento foi com água salgada do mar, água salobra de poços e água poluída. Obtiveram-se resultados experimentais que foram comparados com resultados de simulações numéricas para a produção de água potável. Os resultados mostraram que o equipamento apresentou eficiência térmica média de 0,5 e alcançou uma taxa de produção de água de 25 L/m²/dia para um valor de 4,8 kWh/m²/dia de radiação solar. Testes em laboratórios mostraram a dessalinização da água pelos valores medidos de condutividade elétrica após o processo, como também a pureza pela eliminação de coliformes fecais.

Delyannis (2003) apresenta uma completa revisão histórica do uso da dessalinização utilizando energias renováveis e dando atenção especial ao uso da energia solar. Foi apresentado um histórico iniciando com passagens bíblicas, relatos das civilizações antigas, da era medieval, dos árabes, dos primeiros registros de experimentos de dessalinização solar e dos primeiros livros tratando do assunto, escritos por Giovani Batista Della Porta. O trabalho descreve a primeira grande planta de dessalinização dessenvolvida no Chile e o avanço que esta área teve durante a Segunda Guerra Mundial. O artigo cita ainda a evolução da utilização da energia solar direta e indireta, na forma de energia eólica.

Alves (2009) apresentou um sistema de captação de energia solar fabricado para o aquecimento da torre térmica de dessalinização com recuperação de calor de Schwarzer *et al*. (2001). O sistema consistia na captação de energia solar por coletores solares térmicos de placa plana, transformando energia solar em térmica para aquecer água nos coletores e por sua vez na torre de dessalinização. O dessalinizador era formado por duas unidades: dois coletores solares de alto desempenho e uma torre de dessalinização com um tanque e sete estágios. O trabalho consistiu em uma adaptação que possibilita uma melhor na distribuição, escoamento, de água no tanque de armazenamento de calor. Os resultados mostraram uma temperatura de aproximadamente 100°C no tanque, 80°C no primeiro estágio e uma média de 31 L/m²/dia.

Sua eficiência experimental global foi de 0,62 e o valor de razão de ganha na saída foi de 1,54.

Lopes (2004) apresentou em seu trabalho o dimensionamento e análise de um dessalinizador solar híbrido, constituído de um coletor solar plano para aquecimento de água salobra ou salgada e um trocador de calor (evaporador + condensador) que recebe a água pré-aquecida do coletor solar. A temperatura da água é elevada para temperatura no ponto de ebulição, devido à quantidade de calor emitido por uma resistência elétrica de 3.0 Ohms, alimentado por 20 (vinte) módulos fotovoltaicos ligados em série e paralelo (associação mista), responsáveis por 1200 W de potência. A água no estado de vapor era condensada, produzindo 14 L/m²/dia de água destilada por dia de 8 horas de radiação solar.

Bacha *et al*. (2007) fizeram um estudo numérico usando os dados experimentais disponíveis na literatura dos principais componentes de dessalinizadores solares térmicos. Os modelos matemáticos e simulações permitiram prever o comportamento e o balanço energético dos coletores solares utilizados. Para tanto, foram feitos testes com as configurações dos modelos de destilação em conjunto com diferentes tamanhos e tipos de reservatórios de armazenamento de água quente, como também, o efeito do dispositivo de armazenamento para a unidade de produção. Foram estudados três diferentes configurações dos sistemas de água: um tanque de armazenamento de água quente com dois trocadores de calor interno (modo 1), um tanque de armazenamento de água quente com um permutador de calor interno (modo 2) e um tanque de água dividido tanque de água quente com permutador de calor interno (modo 3). Os resultados mostraram que o terceiro modo tem uma produção consideravelmente significativa em relação a os outros dois modos.

Campos (2007) desenvolveu uma pesquisa no estado do Ceará com o intuito de identificar a viabilidade econômica de cinco sistemas de dessalinização por osmose reversa para o suprimento de água dessalinizada, para consumo humano, em comunidades rurais cearenses. Concluiu que a inexistência da boa prática de gestão dos sistemas resulta na inviabilidade econômica de alguns dessalinizadores, quando avaliados pelo consumo efetivo, principalmente daqueles com capacidade de 400 e 600 L/h. Observou-se a ineficiência no acompanhamento técnico, que impossibilitou uma melhor análise da performance dos sistemas e acarretou em oferta descontínua de água e desconforto das famílias beneficiadas.

Mathioulaki, Belessiotis e Delyannis (2007) fizeram um trabalho sobre a dessalinização vinculada às energias alternativas. Eles analisaram o processo de dessalinização solares térmica para os dessalinizadores alimentados por energia solar térmica, umidificação e desumidificação, destiladores solar e destilação por membrana. Eles também

abordaram as tecnologias de dessalinização por processos eletromecânicos e alimentados por energia geotérmica. Concluíram que o uso de energias renováveis para a dessalinização apareceu com uma opção razoável e tecnicamente madura para problemas emergentes no abastecimento de energias e água. No entanto, apesar dos investimentos em pesquisas, as instalações de dessalinização com energias alternativas têm baixa potência instalada no mundo. Os autores ressaltaram o interesse cresente para o desenvolvimento de dessalinizadores de pequena escala para as populações de baixa densidade (sítios, chácaras, pequenas ilhas) que vivem longe dos grandes centros urbanos como solução para problema de água e energia nestas comunidades.

Schwarzer *et al*. (2009) aperfeiçoaram o sistema de dessalinização solar com recuperação de calor, com múltiplos estágios e uma bandeja por estágio, usando canais de material sintético para o escoamento de condensado e coletores de tubo evacuado. Os resultados obtidos mostraram uma produção de 15 a 18 L/m² por dia, que representa de 5 a 6 vezes mais que o dessalinizador tipo tanque. A vantagem desse sistema estava no menor custo dos coletores solares e canais sintéticos.

Khafifa e Hamood (2009) fizeram um trabalho que relacionava a altura da lâmina de água salgada a ser dessalinizada com a produção da unidade de dessalinização. Após terem analisado os resultados experimentais e teóricos de outros autores com produção variando de 1,5 e 3,5 $L\ /m^2 dia$, concluíram que o aumento na altura da lâmina de água dessalinizada pode gerar uma redução de produção de até 48%

Rodrigues (2010) apresentou um estudo do desempenho de uma torre de recuperação de calor que operava com novos canais sintéticos (alterações na geometria), dando continuidade nos trabalhos de Schwarzer et al (2009). Seu dessalinizador solar possui duas unidades básicas: a unidade de aquecimento (coletores solares planos de alta eficiência) e a unidade de dessalinização (torre de poliuretano). Os resultados mostraram uma produção de 35 litros de água dessalinizada por dia e os parâmetros de desempenho alcançaram os valores de 1,26 para a razão de ganho na saída (GOR) do dessalinizador e 4,78 para o coeficiente de desempenho (COP).

Rodrigues (2011) apresentou um estudo experimental de um protótipo de dessalinizador térmico com recuperação de calor usando gás natural como fonte controlada de calor. Ele avaliou os parâmetros operacionais que influenciaram na produção de água dessalinizada em regime transiente e permanente e a utilização de nanopelículas para otimização do dessalinizador. O seu dessalinizador era composto de uma torre de múltiplos estágios, um tanque de armazenamento e os queimadores de gás natural: linear, circular e

circular duplo. Rodrigues teve melhor resultado com o queimador linear e usando 6 e 7 estágios. Observou também um aumento de mais de 65% na produção de água dessalinizada com o uso de nanopelículas, embora testes químicos não tenha sido apresentados.

Mezher *et al.* (2011), fizeram uma avaliação das tecnologias de dessalinização, como térmica que inclui Multi-estágio flash (MSF) e Destilação de Múltiplo Efeito (MED), membranas de Osmose Reversa (RO), e híbridos (MSF/MED-RO). A avaliação inclui exigências de energia, custo de produção de água, tendências de crescimento da tecnologia, impacto ambiental e potencial para as melhorias tecnológicas.

4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta uma revisão sobre os principais temas necessários para a compreensão de um dessalinizador térmico com fonte controlável de energia. O capítulo está dividido em duas seções. Na primeira seção estão apresentados as principais tecnologias utilizadas para a dessalinização. A segunda seção apresenta uma demonstração do cálculo de potência elétrica em corrente alternada.

4.1 Principais Tipos de Tecnologias de Dessalinização

Existem vários processos para dessalinizar a água. Geralmente esses processos são classificados de acordo com o tipo de fonte de energia utilizada e pela utilização ou não de membranas especiais. Como exemplo de algumas tecnologias de dessalinização podem-se citar:

a) Processos Térmicos: Destilação Flash de Múltiplos Estágios [MSF]; Destilação de Múltiplo Efeito [MED]; Destilação Solar Térmica [DS]; Congelamento.
b) Processos por Membrana: Eletrodiálise [ED]; Osmose Reversa [RO].

A seguir está apresentada uma descrição das tecnologias mais aplicadas em dessalinização.

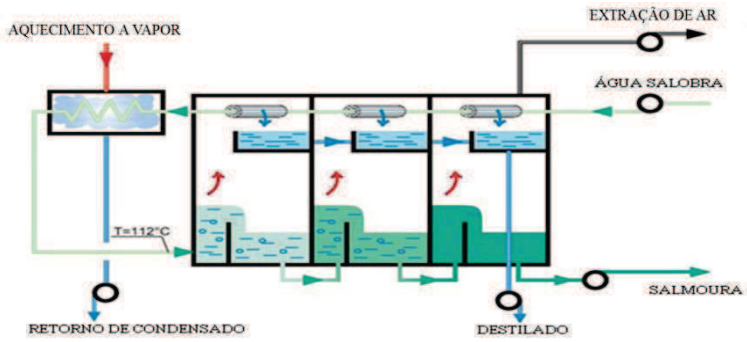
4.1.1 Dessalinização de Múltiplos Estágios –Flash (Multistage Flash – MSF)

No processo de Destilação Flash de Múltiplos Estágios (*Multistage Flash-MSF*) ilustrado na Figura (2) a água salgada é aquecida em um aquecedor. Isto é feito geralmente condensando-se o vapor em uma série de tubos que passam por estágios chamados de recipientes, que por sua vez aquecem a água salgada. Esta água aquecida flui para os estágios, onde a pressão é tal que á água ferve imediatamente, quase explodindo ou transformando-se rapidamente em vapor. No entanto, apenas uma pequena parcela desta água é convertida em vapor de água, dependendo da pressão mantida neste estágio a ebulição irá continuar apenas até o ponto em que a água resfria (SOUZA, 2002).

O vapor gerado pelo *flashing* é convertido em água potável através da condensação em tubos de calor que correm através de cada estágio. Os tubos são resfriados

pela água que vai para o aquecedor. Esta troca de calor aquece um pouco a água antes de chegar no aquecedor, o que reduz a quantidade de energia para aquecê-la (SOUZA, 2002).

Figura 2 - Princípio de funcionamento MSF



Fonte: adaptada de SIDEM (2011)

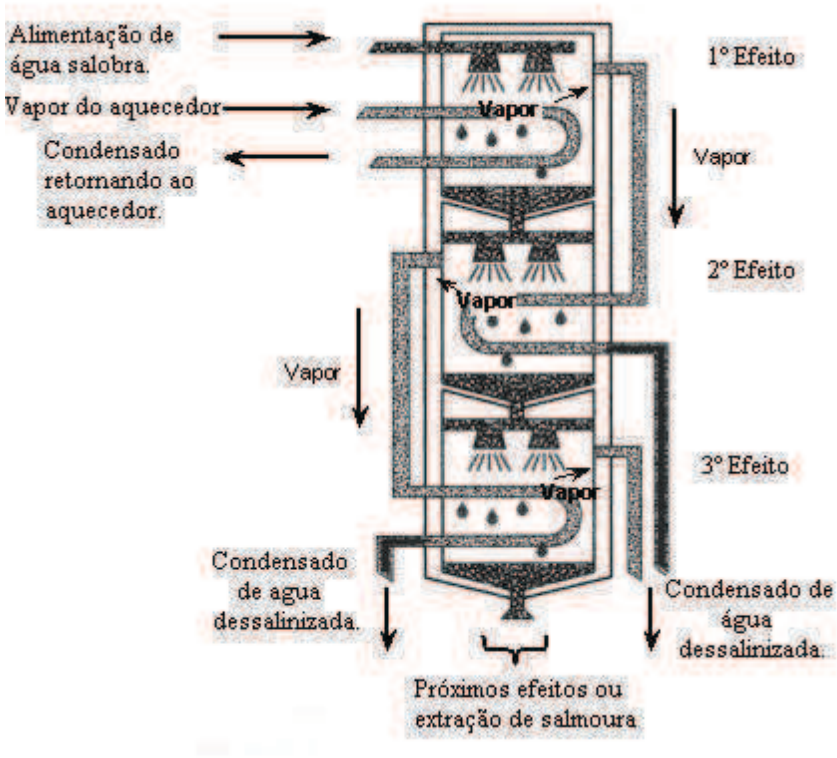
4.1.2 Destilação de Múltiplo Efeito (MED)

O processo de Destilação de Múltiplo Efeito (MED) acontece em vários recipientes como no MSF (FIGURA 3), mas o seu aquecimento é feito apenas no primeiro estágio. A água salgada chega ao primeiro recipiente após ter trocado calor com a tubulação de outros estágios, ou seja, ela chega pré-aquecida. A água salgada é então vaporizada sobre uma superfície dos tubos evaporadores numa película fina para promover a ebulição e evaporação mais rápida.

A água salgada remanescente é levada para o segundo estágio onde novamente é aplicada às tubulações, porém com uma pressão inferior ao estágio anterior.

O vapor proveniente da água salgada é condensado torna-se água dessalinizada, enquanto libera calor para evaporar uma a água salgada remanescente do estágio seguinte. Nas grandes instalações de destilação de múltiplos efeitos são encontrados de 8 a 16 estágios.

Figura 3 - Princípio de Funcionamento MED



Fonte: adaptado de UNPE (2011)

4.1.3 Congelamento (Freezing)

Existem dois processos de congelamento para dessalinização da água salgada. No processo de congelamento indireto insere-se uma substância como n-butano na água do mar pré-resfriada. Ocorre então a troca de calor, congelando a água e esquentando o hidrocarboneto. O n-butano evapora devido à baixa pressão no sistema.

A solução salina absorvida nos cristais de gelo é retirada através de lavagem do gelo com água doce. Com a separação do sal, os cristais de gelo (água doce) são levados para outro recipiente onde são descongelados. A vantagem deste processo está na pouca energia utilizada para a formação de grande quantidade de gelo, ou seja, a ampla produção de água. A desvantagem do processo indireto é a dispendiosa separação e lavagem do gelo.

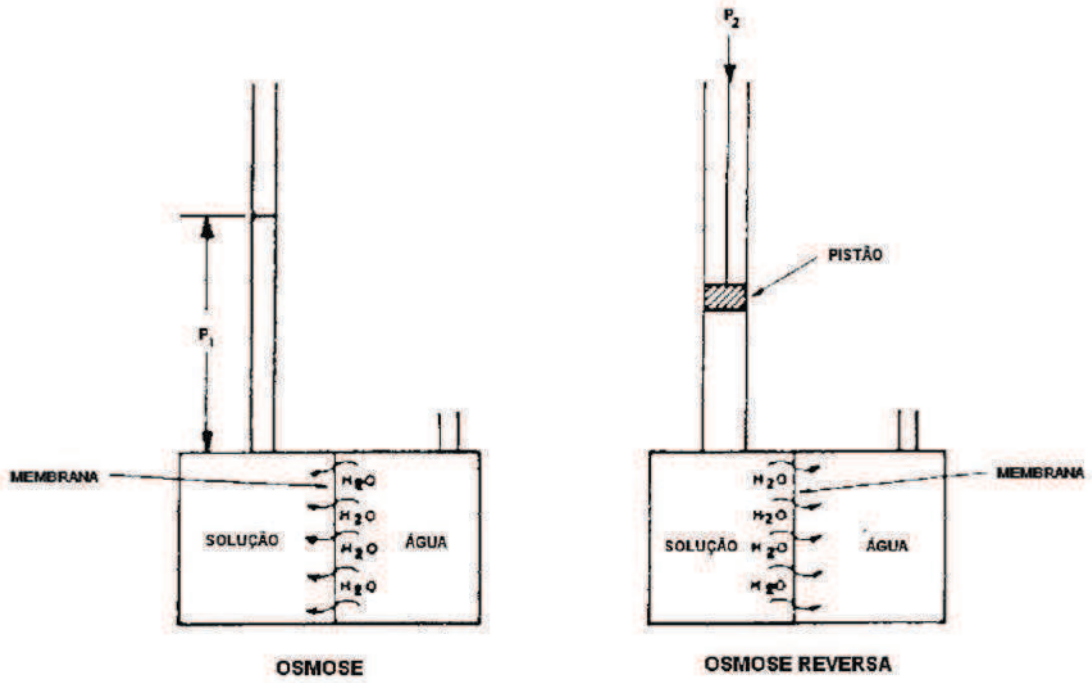
4.1.4 Osmose Reversa (Reverse Osmosis – RO)

O processo de osmose ocorre quando duas soluções de concentração diferentes encontram-se separadas por uma membrana semipermeável. Neste caso, existe uma

disposição do solvente (água), da solução menos concentrada, migrar para o ambiente onde se encontra a solução de maior concentração de sais, a qual sofre uma divisão progressiva até que as duas soluções atinjam as mesmas concentrações.

Na Osmose Reversa (RO), a água faz um caminho contrário ao sentido natural da osmose. Para que ocorra separação de sais, a água bruta passa por membranas permeáveis apenas para as moléculas de água. Um sistema de bombas de alta pressão empurra o fluido por estas membranas diminuindo, assim, a concentração de sais na água dessalinizada, ou seja, produzindo água dessalinizada (FIGURA 4). A bomba de alta pressão fornece a pressão necessária para permitir que a água passe pela membrana e tenha os sais rejeitados. Esta pressão varia de 1,7 a 2,7 N/m² para a água salobra e de 5,4 a 8,0 N/m² para a água salgada (SOUSA, 2006). Para evitar uma alta concentração nos rejeitos é mantido um fluxo constante desses rejeitos. Sem este escoamento controlado, a água pressurizada continuaria a aumentar a concentração de sal, criando problemas como precipitação de sais supersaturados e aumentando a pressão osmótica através das membranas. As maiores vantagens deste processo são as altas taxas de produção e a boa qualidade da água. As desvantagens são os altos custos de instalação e manutenção, a necessidade de pós e pré-tratamento mais rigoroso. Esses tratamentos são variáveis com o tipo de água a ser dessalinizada, devido às características e fragilidades das bombas e membranas.

Figura 4 - Mostra uma comparação entre osmose e osmose reversa

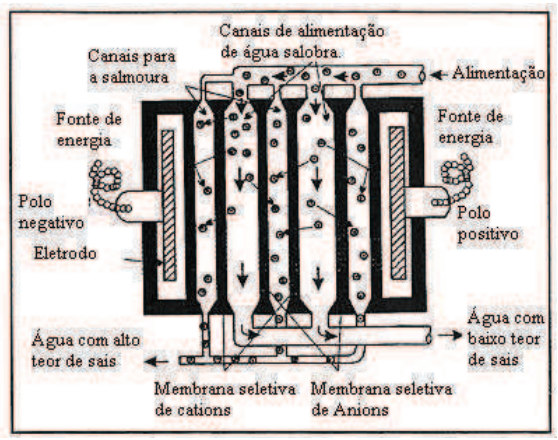


Fonte: adaptada de LORCH (1987)

4.1.5 Eletrodiálise (Electrodialysis – ED)

No processo de eletrodiálise a solução salobra ou salgada é inserida através de um recipiente contendo em lados opostos eletrodos e membranas seletivas que retêm cátions e ânions (em lados opostos). Os eletrodos são submetidos a uma corrente contínua de eletricidade. A corrente elétrica passa pela água salgada e os íons tendem a migrar para o eletrodo de carga oposta, anodo ou catodo. As membranas seletivas são posicionadas alternadamente entre os eletrodos para reter os íons em um determinado fluxo, tornando assim o outro fluxo com a concentração bem mais baixa de sais ou íons (FIGURA 5). Em um lado os cátions são atraídos pelo catodo, passam pela membrana seletiva de cátions e são posteriormente retidos na membrana seletiva de ânions. Do lado oposto, os íons são atraídos pelo anodo, passam pela membrana seletiva de ânions e são posteriormente retidos na membrana seletiva de cátions. Os espaços entre membranas são chamados de células, os pares de células possuem uma célula na qual os íons migram tornando o fluxo diluído e outra na qual os íons se concentram. Por este processo ocorre o fenômeno de dessalinização (RODRIGUES, 2010).

Figura 5 - Princípio de Funcionamento Eletrodiálise



Fonte: adaptada de UNEP (2009)

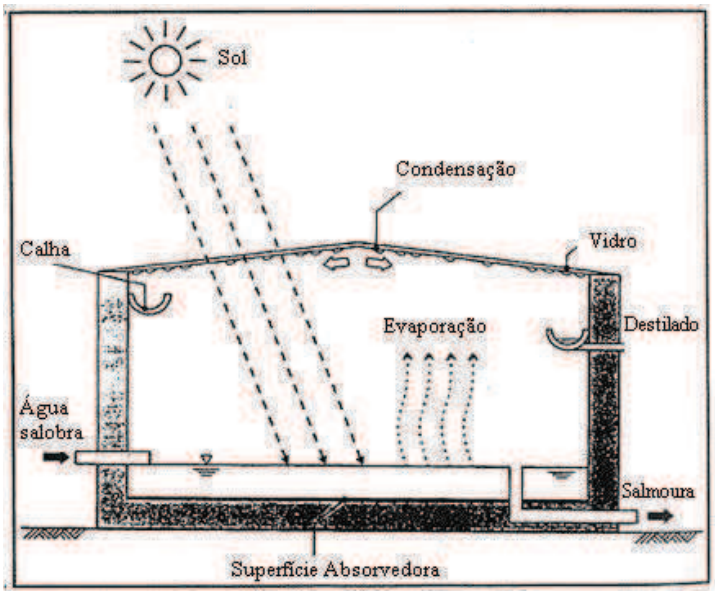
4.1.6 Destilação Solar Térmica

A destilação Solar térmica ocorre quando utiliza a energia solar é utilizada como forma de aquecimento de um fluido para a dessalinização. O dessalinizador pode ser de forma direta, quando a radiação solar é usada diretamente para aquecer a água salobra ou salgada, ou

de forma indireta, quando um fluído térmico transporta o calor absolvido em um coletor para uma unidade de dessalinização.

O dessalinizador tipo tanque é um exemplo da dessalinização direta. Geralmente, Ele é feito com alvenaria e uma cobertura transparente (vidro ou plástico). As paredes são isoladas e pintadas de preto para uma melhor absorção da radiação solar transmitida através da cobertura transparente. A água evapora e depois condensa na superfície transparente acima e depois escorre para as calhas laterais onde é coletada como água doce (FIGURA 6).

Figura 6- Princípio de Funcionamento Dessalinizador Solar



Fonte: adaptada de UNEP (2009)

Os dessalinizadores com acionamento indireto apresentam, geralmente, dois componentes: o sistema de dessalinização (torre de dessalinização) e uma unidade de aquecimento. Neste casso o fluído é aquecido pelo sol via coletores térmicos de dessalinização. O fluído utilizado pode ser a própria água salgada ou algum óleo térmico.

4.2 Aquecimento Elétrico

Este capítulo tem o objetivo de apresentar os conceitos fundamentais da corrente alternada e o procedimento de cálculo da potência em um circuito com corrente alternada para uma única resistência elétrica. O capítulo tem com fundamento teórico o livro de Física III (eletricidade e magnetismo) de Young e Freedman (2008).

A corrente alternada surge em um circuito a partir de uma fonte alternada de diferença de potencial ou uma força eletromotriz (*fem*). Uma espiral girando com velocidade

angular constante em um campo magnético é um exemplo de fonte de corrente alternada. A rotação produz uma *fem* senoidal.

Adota-se a expressão **fonte ac** para qualquer dispositivo que aplique uma diferença de potencial que varia senoidalmente v (diferença de potencial) e que forneça uma corrente i.

Uma tensão senoidal é representada por uma função do tipo:

$$v = V \cos wt \tag{1}$$

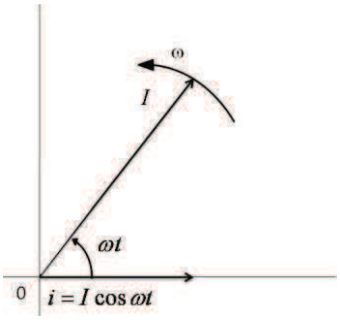
na qual v é a diferença de potencial instantânea; V é a diferença de potencial máxima, que é chamada de amplitude da voltagem; w é a frequência angular, que é igual a 2π vezes a frequência f. No Brasil os sistemas de distribuição de energia elétrica usam a frequência $f = 60\,Hz$, que corresponde a uma frequência angular de $w = (2\pi\,rad)(60\,s^{-1}) = 377\,rad/s$. De modo análogo uma corrente senoidal pode ser escrita na forma

$$i = I \cos wt \tag{2}$$

na qual i é a corrente instantânea e I é a corrente máxima ou **amplitude da corrente**.

A Figura 7 representa o diagrama da corrente e tensão que varia senoidalmente. Nesse diagrama, o valor instantâneo de uma grandeza que varia senoidalmente com o tempo é representada pela projeção sobre o eixo horizontal do vetor cujo comprimento fornece a amplitude da grandeza considerada. O vetor gira no sentido anti-horário com a velocidade angular constante ω. Esses vetores girantes são chamados de fasores, e um desenho com essas grandezas é chamado de diagrama de fasores. A projeção do fasor sobre o eixo horizontal no instante t é igual a $I = \cos \omega t$; essa é a razão pela qual preferimos usar a função co-seno na equação $I = \cos \omega t$, em vez de uma função seno.

Figura 7 - Diagrama com um único fasor. A projeção do vetor girante (fasor) sobre o eixo horizontal representa a corrente instantânea.



Fonte: adaptada de Young e Freedman (2008).

Para medir uma corrente que varia senoidalmente utiliza-se o método do valor quadrático médio (também chamado de valor eficaz). Eleva-se ao quadrado a corrente instantânea i, utiliza-se o valor médio (média) de i^2 e faz-se a extração da raiz quadrada dessa média. Esse procedimento define a **corrente quadrática média (**ou **valor eficaz)**, que é designada por I_f. Mesmo quando i for negativo, i^2 sempre será positivo, de modo que I_f nunca será igual a zero (a menos que i seja nulo em todos os instantes).

Para obter a corrente quadrática média I_f, se a corrente instantânea for dada por $i = Icos\omega t$, elevando ao quadrado tem-se

$$i^2 = I^2 cos^2 \omega t. \tag{3}$$

Usando-se a identidade trigonométrica que relaciona o dobro de um ângulo, obtém-se

$$cos^2 a = \frac{1}{2}(1 + cos2a), \tag{4}$$

Aplicando-se a identidade trigonométrica da equação (4) na equação (3), obtem-se

$$i^2 = I^2 \frac{1}{2}(1 + cos2\omega t) = \frac{1}{2}I^2 + \frac{1}{2}I^2 cos2\omega t. \tag{5}$$

O valor médio de $cos2\omega t$ é igual a zero, porque a função é positiva na metade do tempo e negativa na outra metade. Portanto, o valor médio de i^2 é simplesmente igual a $I^2/2$. A raiz quadrada desse valor fornece o valor quadrático médio ou valor eficaz I_f, isto é,

$$I_f = \frac{I}{\sqrt{2}} \tag{6}$$

De modo análogo, o valor quadrático médio de uma voltagem senoidal de amplitude V (valor máximo) é dado por

$$V_f = \frac{V}{\sqrt{2}} \tag{7}$$

na qual V_f é diferença de potencial quadrática média (ou valor eficaz da diferença de potência).

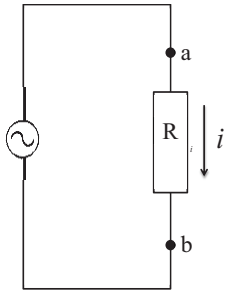
O multímetro usado nos experimentos media as correntes e as voltagens eficazes.

Para um circuito com uma corrente instantânea i e amplitude de corrente I, considerando um elemento desse circuito através do qual existe uma diferença de potencial instantânea v com amplitude de voltagem V, a potência instantânea p fornecida do circuito é dada por

$$p = vi \tag{8}$$

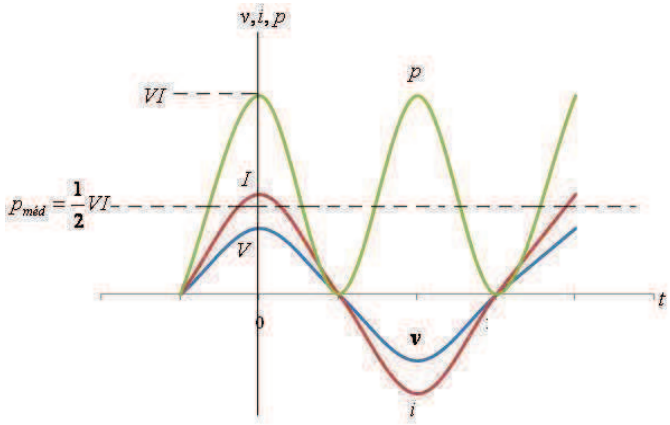
Um circuito com apenas um resistor é considerado como sistema de Resistor Puro, como indicado na Figura 8. Obtém-se o gráfico que representa a potência p multiplicando-se as alturas do gráfico de v e de i (FIGURA 9). O produto vi é sempre positivo porque v e i estão em fase, ou seja, ambos são positivos ou ambos são negativos. Portanto, a energia é fornecida para o resistor em cada instante nos dois sentidos de i, embora a potência não seja constante.

Figura 8 - Um resistor R conectado aos terminais de uma fonte ac



Fonte: adaptada de Young e Freedman (2008).

Figura 9 - Gráfico da voltagem, da corrente e da potência em função do tempo para diversos circuitos. Potência instantânea para um resistor puro. A potência média é dada por $\frac{1}{2}VI = V_f I_f$.



Fonte: adaptada de Young e Freedman (2008).

A curva da potência para um resistor puro é simétrica em torno de um valor igual à metade de seu valor máximo VI; logo , a potência média $P_{méd}$ é dada por

$$P_{méd} = \frac{1}{2}VI \tag{9}$$

e substituindo as equações (6) e (7) em (9), obtém-se

$$P_{méd} = V_f I_f \tag{10}$$

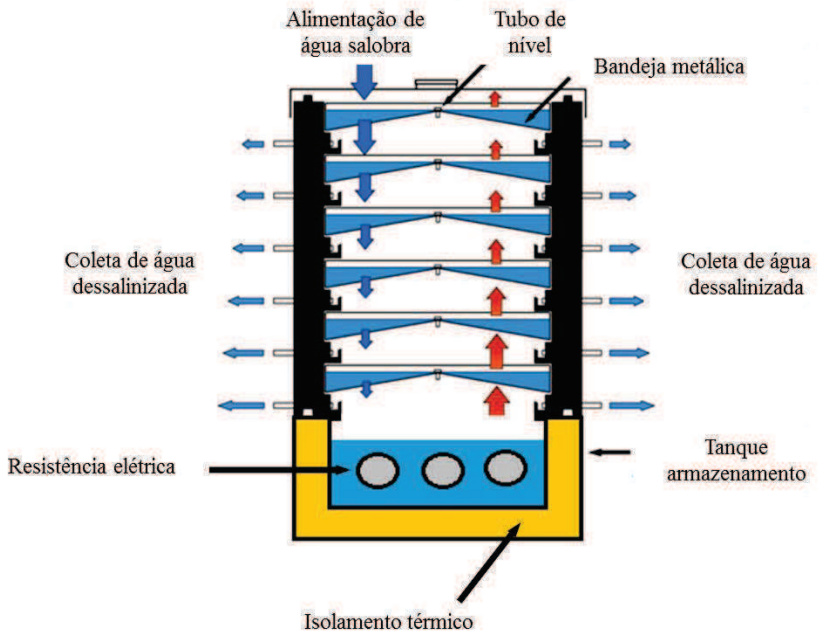
5 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO DESSALINIZADOR

A dessalinização tem como finalidade a desmineralização parcial ou completa da água salgada como a água do mar, que apresenta uma concentração aproximada de 35.000 ppm de sais dissolvidos, ou as águas salobras, que apresentam uma concentração entre 35.000 ppm e 500 ppm de sais dissolvidos. O objetivo do processo de dessalinização é diminuir a quantidade de sal da água tornando-a apropriada para o consumo humano (abaixo de 500 ppm para o total de sólidos dissolvidos, segundo Resolução CONAMA Nº 20). Quanto ao processo da desmineralização, visa fornecer água apropriada para aplicações industriais como a utilização em caldeiras de alta pressão.

O dessalinizador térmico com recuperação de calor é composto por dois sistemas: a torre de dessalinização feita de poliuretano, por onde a água dessalinizada é coletada fora do sistema, e bandejas metálicas; o tanque aquecimento no qual a água salobra é aquecida, fabricado em aço inoxidável e revestido com isolamento. O tanque possui uma resistência elétrica para aquecer a água bruta (FIGURA 10).

A dessalinização térmica é um processo que utiliza calor como fonte de energia para separação da molécula de água da mistura salgada/salobra. A água salobra é aquecida no tanque e ocorre o processo de evaporação, que separa o H_2O da água salobra. No estado de vapor, a água evaporada entra em contato com a superfície do estágio imediatamente superior, que está em menor temperatura, transferindo calor para esse estágio. A água salobra deste estágio é aquecida e o processo é repetido nos demais estágios da torre (FIGURA 10).

Figura 10 - Dessalinizador térmico com recuperação de calor e aquecimento direto com resistência elétrica



Fonte: Adaptada de Rodrigues (2011).

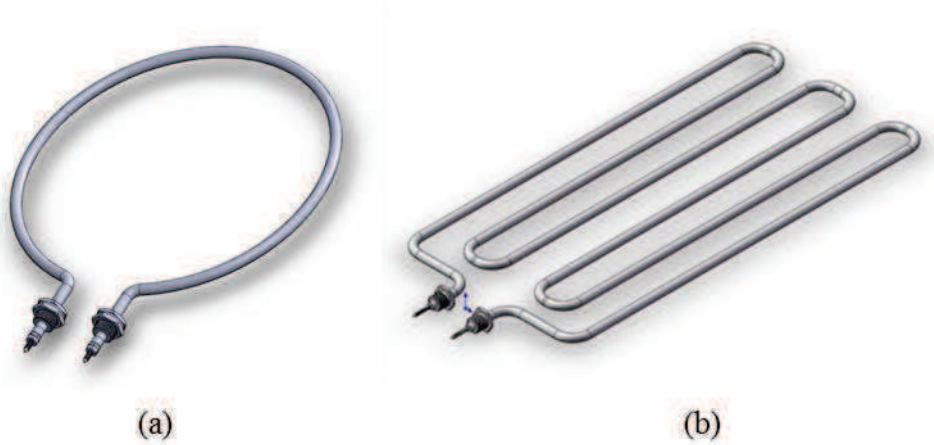
Para realização dos trabalhos experimentais, foi desenvolvido um sistema de aquecimento da água salobra com controle de temperatura. O sistema é formado por um tanque, no qual está imerso uma resistência elétrica ligada a um dispositivo controlador de diferença de potencial *(varivolt)* e a um multímetro.

Em seu funcionamento, a resistência elétrica recebe eletricidade pré-definida pelo controlador de diferença de potencial e transforma em calor para o aquecimento da água. Parte da água aquecida evapora e há também transferência de calor por convecção e radiação para a bandeja no primeiro estágio. O vapor de água condensa na parede inferior da bandeja do primeiro estágio e seu condensado escorre para calhas laterais para fora. Ao condensar o vapor transfere calor para a água salobra do primeiro estágio, que por sua vez evapora e condensa transferindo calor para o segundo estágio. Esse processo de recuperação de calor se repete para os demais estágios.

Foram testadas duas resistências, uma circular (FIGURA 11a) e outra em forma de “w” (FIGURA 11b). A resistência circular apresentou um desempenho aceitável no aquecimento da água, mas testes mostraram uma variação de temperatura de até 3°C no interior do tanque, ou seja, um aquecimento não uniforme. Para melhorar a uniformidade na temperatura, foi fabricada uma resistência específica para o tanque em formato de “W”. Essa

resistência demostrou-se eficiente tanto no aquecimento da água quanto na distribuição uniforme de calor, tendo sido observadas variações de temperatura inferiores a 1,5 °C.

Figura 11 - (a) Resistência Circular; (b) Resistência em formato de "W"



Fonte: Elaborada pelo autor

6 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta os materiais e métodos usados na construção do protótipo do dessalinizador térmico com fonte controlada de calor. Apresenta também as equações usadas na determinação do coeficiente global de transferência de calor da superfície da água no tanque de aquecimento (K_1). Essas equações são necessárias à caracterização do desempenho térmico do dessalinizador.

6.1 Componentes do Dessalinizador

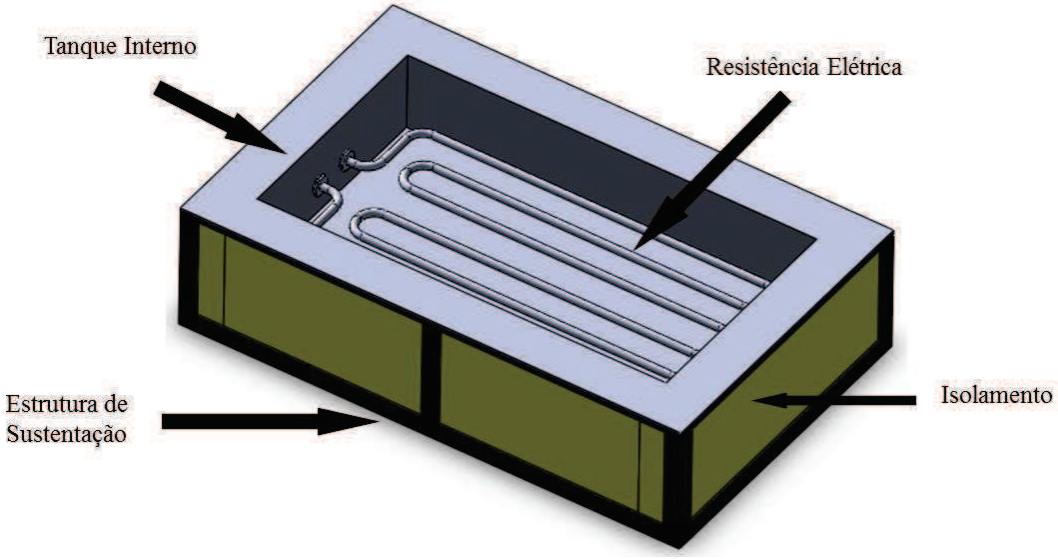
O dessalinizador pode ser dividido em dois componentes: A torre de dessalinização, responsável pela produção e coleta de água; o sistema de aquecimento, responsável por fornecer calor para o processo de dessalinização. Um sistema de medição e coleta de dados foi desenvolvido para armazenar a massa de água e as temperaturas no dessalinizador.

A torre de dessalinização é composta por um conjunto de bandeja, estágio e canais de escoamento. Os estágios são de poliuretano com uma bandeja metálica de aço inoxidável AISI 304, o poliuretano funciona também como isolante térmico e sua espessura é de 50 mm. Os estágios possuem em seu formato canais de coleta de água. A água condensada escorre pelas paredes inclinadas das bandejas metálicas e fluem por esses canais para fora da torre por tubulações de cobre de diâmetro 11 mm, instalados na parede lateral dos estágios. O condensado é coletado em garrafas conectadas por torsais aos tubos de cobres. Existe uma garrafa de coleta para cada estágio da torre de dessalinização.

O sistema de aquecimento de água é formado por um tanque metálico, uma resistência elétrica e uma fonte elétrica controlada. O tanque de armazenamento (FIGURA 12) é formado por: Um tanque interno, de chapa de aço inoxidável AISI 304 com 1,2 mm de espessura e dimensões de 280 mm de largura, 520 mm de comprimento e 100 mm de profundidade; o isolamento é formado por placas de poliuretano revestido de alumínio de 50 mm, caracterizado por sua boa resistência a compressão, baixo coeficiente de condutividade térmica ($2{,}0 \times 10^{-5}\, kW/mK$) e baixo peso específico (1,25 g/cm³). A estrutura de sustentação foi feita com canaletas de ferro soldada. A resistência elétrica tem formato de “W” com uma potência de 2000 W. Esta resistência está conectada a um variador

de diferença de potencial (*varivolt*) com multímetro, que permitia a variação da potência dissipada de zero a 2000 W.

Figura 12 - Tanque de Aquecimento



Fonte: Elaborada pelo autor

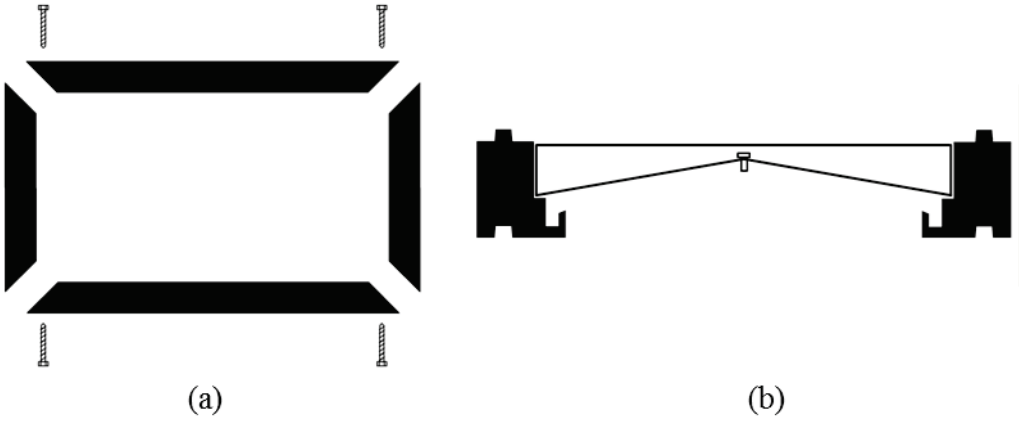
A coleta de dados foi realizada utilizando-se dois subsistemas, sendo um para os dados da vazão mássica e um para os dados de temperatura. Para o monitoramento da vazão mássica utilizou-se uma balança de precisão (modelo *GP 100K da A&D Company Ltd*) com o programa *Windows Communication Tools* 4.01 (desenvolvido pelo fabricante *A&D Company Ltd*) instalado em um computador. Para o monitoramento da temperatura utilizaram-se cinco sensores de temperatura (modelo, PT 100) instalados entre o tanque de aquecimento e os estágios, ligados a um coletor de dados (*datalogger)* OPUS 208, conectado a outro computador. O coletor de dados utilizou o programa *SmartControl 1.4* (desenvolvido pelo fabricante *K-soft Haustechnik-Management*). Utilizaram-se dois computadores por causa de conflito entre os softwares, mas os dois softwares foram ligados simultaneamente e ambos coletavam dados de média a cada 30s. Os dados das temperaturas e da vazão mássica foram necessários para o cálculo do coeficiente global de perdas (K_1).

Perfis de Poliuretano

A geometria dos perfis de poliuretano tem o intuito de facilitar o escoamento de condensado e diminuir as perdas por vazamento de vapor de água. Eles possuem 62 cm de comprimento por 37 cm de largura e são unidos por parafusos, cola e silicone (Figura 13a).

Os perfis formam a estrutura de suporte das bandejas da torre de dessalinização e funcionam como canais de coleta do condensado e como isolamento térmico. As propriedades isolantes do poliuretano ajudam na redução de perdas de energia interna da torre por estágio. Há duas calhas no perfil, uma onde é apoiada a bandeja do estágio e outra para coletar o condensado que escorre por tubos de cobre para fora dos estágios (Figura 13b).

Figura 13 - (a) Corte dos perfis; (b) geometria do corte transversal dos perfis



Fonte: adaptado de Rodrigues (2011)

Tipos de Bandejas

As bandejas são partes fundamentais para o funcionamento da torre de dessalinização. Elas influenciam diretamente na produção do condensado em função do formato e de sua condutividade térmica.

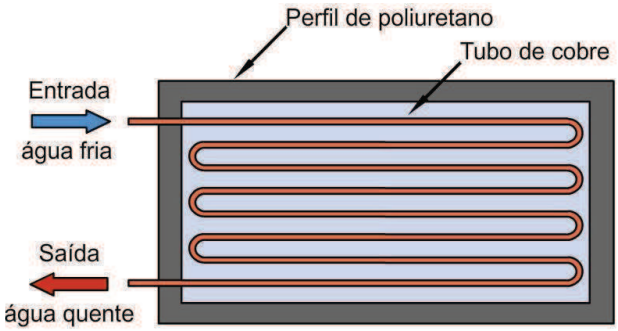
Na seleção do material para fabricação das bandejas, precisa-se ter as seguintes características: boa condutividade térmica, para que o calor possa ser transferido através de suas paredes; ser de rugosidade adequada para facilitar a formação e escoamento do condensado pelas calhas de coleta; boa resistência mecânica, para suportar o peso da água e o calor sem se deformae; ser de custo razoável para não elevar o custo de fabricação.

Foram testados três materiais diferentes. Foram fabricadas bandejas em alumínio, aço polido e aço inoxidável. A bandeja de aço polido com espessura de 0,5 mm e as demais bandejas com espessura de 1,2 mm. Como a quarta opção de superfície, uma bandeja de aço inoxidável passou por um processo de cromação da parte inferior. Foram feitos experimentos como mostrado na seção 7 dos resultados.

Trocador de Calor

O trocador de calor utilizado nos experimentos foi o mesmo de Rodrigues (2011). O trocador foi construído com oito tubos de cobre de 152 cm de comprimento, 10 mm de diâmetro, 0,6 mm de espessura e com sete curvas de 10 cm de raio de curvatura. A Figura 14 mostra um desenho esquemático do trocador de calor utilizado nos experimentos.

Figura 14 - Desenho esquemático do trocador de calor



Fonte: adaptado de Rodrigues (2011)

O objetivo do trocador de calor foi o controle e manutenção da temperatura pré-estabelecida na bandeja do primeiro estágio. Com o seu uso foi possível realizar experimentos para a determinação do volume de água no tanque de aquecimento e na bandeja do primeiro estágio, para o cálculo do coeficiente global de transferência de calor do tanque com diferentes tipos (alumínio, aço polido, aço inoxidável AISI, aço polido) de bandejas.

A vazão no trocador de calor era fornecida pela rede de distribuição de água com vazões que variaram de 53,20 a 55,55 mL/s. O trocador foi instalado na bandeja do primeiro estágio de forma a proporcionar temperaturas aproximadamente uniformes na superfície da condensação.

Medições de Salinidade

A salinidade da água produzida foi determinada a partir da medição da condutividade elétrica da água. A condutividade elétrica é uma medida da habilidade de uma solução aquosa de conduzir uma corrente elétrica devido à presença de íons. Essa propriedade varia com a concentração total de substâncias ionizadas dissolvidas na água, com a

temperatura, com a mobilidade dos íons, com a valência dos íons e com as concentrações real e relativa de cada íon (PINTO, 2007).

A unidade de condutividade elétrica no Sistema Internacional de Unidade (SI) é reportada como Siemens por metro (S/m). Entretanto, em medições realizadas em amostras de água, utiliza-se preferencialmente microSiemens (µS/cm) ou miliSiemens por centímetro (mS/cm).

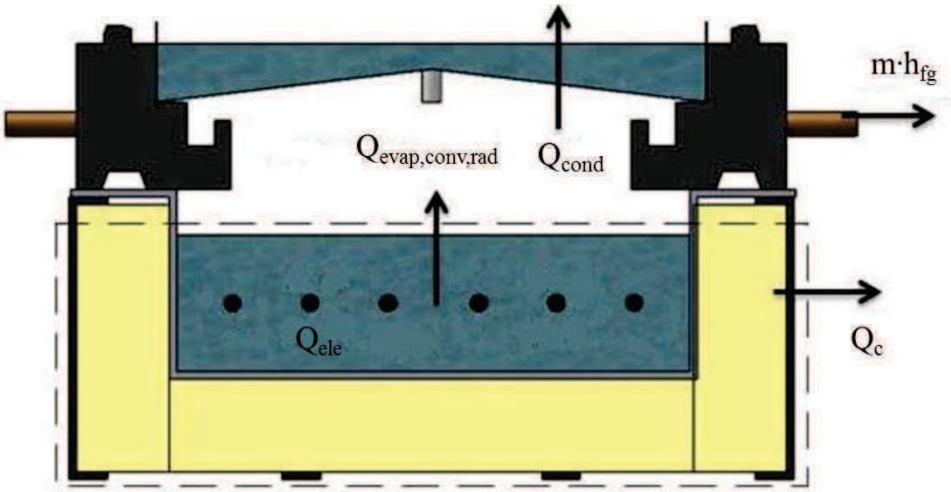
A condutividade eletrica da água dessalinizada foi medida utilizando o condutivímetro de bancada CDB-70 da OMEGA. O equipamento possui cinco possibilidades de ajuste da faixa de medição que são: até 20 µS/cm², até 200 µS/cm², até 2000 µS/cm², até 20 mS/cm² e até 200 mS/cm². Foram medidas as condutividades para cada experimento da água bruta e posteriormente da água dessalinizada. O Condutivímetro media a condutividade elétrica junto com a temperatura da água.

Para as medições de salinidade, foram coletadas amostras de 300 mL de água antes e depois do experimento. Quando as amostras entravam em equilíbrio térmico, os sensores de condutividade e temperatura eram introduzidos nas amostras. Após a estabilidade das medições os valores eram registrados. O sensor de condutividade era lavado com água destilada entre as medições da condutividade da água dos estágios. Realizava-se esse procedimento para não contaminar a água, uma vez que tal contaminação poderia alterar a medição seguinte.

6.2 Desempenho do Dessalinizador

A Figura 15 é um desenho esquemático do tanque de armazenamento do dessalinizador com um estágio. Estão identificados os processos das taxas de transferência de calor: radiação térmica ($\dot{Q}_{rad}$), condução ($\dot{Q}_{c}$), convecção ($\dot{Q}_{conv}$), evaporação ($\dot{Q}_{evap}$) e condensação ($\dot{Q}_{cond}$).

Figura 15 - Volume de controle do tanque de aquecimento



Fonte: Elaborada pelo autor

Nesta figura, $\dot{Q}_{ele}$ reprsenta a taxa da energia transformada em calor pela resistência elétrica, m é a massa do condensado e h_{fg} é o calor latente da água.

A expressão da conservação de energia em um sistema pode se expressa por:

$$\dot{E}_e - \dot{E}_s + \dot{E}_g = \dot{E}_a \tag{11}$$

na qual $\dot{E}_e$ é a taxa da energia que entra, $\dot{E}_s$ é a taxa da energia que sai, $\dot{E}_g$ é a taxa da energia gerada e $\dot{E}_a$ é a taxa da energia acumulada.

Para o volume de controle do tanque de aquecimento não existe energia de entrada, assim a equação da conservação de energia é expressa por,

$$\dot{E}_g - \dot{E}_s = \dot{E}_a \tag{12}$$

Os termos da Equação (12) representam a energia gerada pela resistência elétrica, a energia que sai pelos processos de transferência de calor e massa e a energia sensível acumulada na água do tanque. Esses termos podem ser escritos como,

$$E_g = V_f I_f \tag{13}$$

$$E_s = [K_1 A(T_a - T_1)\Delta t] + \left[K_2 A_p (T_a - T_\infty)\Delta t\right] \tag{14}$$

$$E_a = \left[m_a c_p \frac{dT_a}{dt}\right]_{tanque} \Delta t \tag{15}$$

Na equação (13) os termos V_f representa a voltagem eficaz coletada em volts e I_f representa a corrente eficaz coletada em Amperes.

Na equação (14) o termo K_2 representa o coeficiente de perda de calor para o ambiente. Como essa perda é principalmente por condução, K_2 é expresso como a razão entre a condutividade térmica do material isolante por sua espessura. Os demais termos são: T_a a temperatura da água no tanque, T_1 a temperatura da água na primeira bandeja, T_∞ temperatura ambiente, A_p a área da superfície interna do tanque em contato com o isolamento, A área da superfície horizontal da massa de água no tanque, onde ocorrem os processos de transferência de calor e massa (evaporação) e Δt o intervalo de tempo.

Na equação (15), o termo m_a representa a massa de água no tanque, c_p representa o calor específico da água em pressão constante, o termo $\frac{dT_a}{dt}$ representa a taxa de variação da temperatura da água no tanque e, por fim, Δt representa a variação do tempo.

Também na Equação (14), o termo K_1 representa o coeficiente global de transferência de calor da superfície da água no tanque para a parede inferior da bandeja. Esse coeficiente inclui os processos de transferência de calor por evaporação, radiação e convecção da superfície da água e de condensação na bandeja do primeiro estágio. K_1 Pode ser determinado usando-se a equação:

$$K_1 A(T_a - T_1) = \left[\dot{m} h_{fg}\right]_{evap} + h_{conv} A(T_a - T_1) + \varepsilon \sigma A(T_a^4 - T_1^4) \tag{16}$$

na qual A é a área horizontal da superfície da água no tanque, T_a é a temperatura da água no tanque, T_1 é a temperatura da água no primeiro estágio, $\dot{m}$ é a taxa de transferência de massa, h_{fg} é o calor latente de vaporização, h_{conv} é o coeficiente de transferência de calor por convecção da parede lateral para o ambiente, ε é a emissividade da água e σ é a constante de Stefan Boltzmann.

A operação do dessalinizador possui as fases de aquecimento, de temperatura da água constante (regime permanente) e de resfriamento. No aquecimento, o calor gerado pela

resistência elétrica é usado também para aumentar a temperatura da água no tanque até a temperatura de regime permanente, que é caracterizado por esta temperatura permanecer constante. Nesse período, a energia dissipada pela resistência é igual à energia que sai (condensação e perdas). Para uniformizar os experimentos o dessalinizador foi operado por duas horas nesse período, para garantir a completa estabilidade nas medições. O resfriamento é o período mais longo do experimento e começava com o desligamento da resistência elétrica e termina quando a água do tanque chega à temperatura ambiente.

A equação da conservação de energia durante a fase de aquecimento pode ser expressa por $\dot{E}_g - \dot{E}_s = \dot{E}_a$ e substituindo as expressões, temos:

$$-\left[K_1 A(T_a - T_1)\Delta t + K_2 A_p (T_a - T_\infty)\Delta t\right] + \left[V_f I_f\right] = \left[m_a c_p \frac{dT_a}{dt}\right]_{tanque} \Delta t \tag{17}$$

A conservação de energia na fase de regime permanente, $E_a = 0$, é escrita como:

$$E_g - E_s = 0 \tag{18}$$

$$E_s = E_g \tag{19}$$

e substituindo as expressões

$$K_1 A(T_a - T_1)\Delta t + K_2 A_p (T_a - T_\infty)\Delta t = V_f I_f \tag{20}$$

As equações da conservação de energia durante a fase de resfriamento, $E_g = 0$, pode ser expressa por:

$$-E_s = E_a \tag{21}$$

E substituindo as expressões

$$-\left[K_1 A(T_a - T_1)\Delta t + K_2 A_p (T_a - T_\infty)\Delta t\right] = \left[m_a c_p \frac{dT_a}{dt}\right]_{tanque} \Delta t \tag{22}$$

Determinação do Coeficiente Global de Transferência de Calor (K_1) e (K_2)

Nesse trabalho foram estudados os dois coeficientes de transferência de calor: K_1e K_2. O coeficiente K_1 representa os processos de transferência de calor por evaporação, radiação e convecção da superfície da água no tanque para a superfície de condensação na parte inferior da primeira bandeja. O coeficiente K_2 representa essencialmente o processo de transferência de calor por condução através das paredes do tanque.

O coeficiente K_2 é determinado pela razão entre a condutividade térmica do material do tanque pela sua espessura ($K_2 = K/\Delta x$). O coeficiente K_1 é mais complexo por englobar os processos de evaporação, convecção, radiação e condensação. Foi necessária sua determinação para cada fase do experimento: Aquecimento, regime permanente e resfriamento. O procedimento utilizado para a determinação foi considerar K_1como um único termo no processo de transferência de calor e massa.

Com essa consideração a expressão para o coeficiente K_1 pode ser determinada na fase de aquecimento pela equação (17),

$$K_1 = \frac{[V_f I_f] - \left[m_a c_p \frac{dT_a}{dt}\right]_{tanque} \Delta t - K_2 A_p (T_a - T_\infty)\Delta t}{A(T_a - T_1)\Delta t} \tag{23}$$

Durante o regime permanente pela equação (20),

$$K_1 = \frac{V_f I_f - K_2 A_p (T_a - T_\infty)\Delta t}{A(T_a - T_1)\Delta t} \tag{24}$$

E na fase de resfriamento pela equação (22),

$$K_1 = \frac{-\left[m_a c_p \frac{dT_a}{dt}\right]_{tanque} \Delta t - K_2 A_p (T_a - T_\infty)\Delta t}{A(T_a - T_1)\Delta t} \tag{25}$$

Os termos necessários nas equações (23), (24) e (25), foram coletados nos experimentos ou são propriedades dos materiais disponíveis na literatura, permitindo a determinação de K_1.

A importância do coeficiente K_1 está na determinação da quantidade do condensado a partir da temperatura do tanque e das bandejas. A previsão da vazão mássica a ser produzida pode ser estimada por:

$$m = \frac{K_1 A(T_a - T_1)\Delta t}{h_{gf}} \tag{26}$$

6.3 Métodos

Os procedimentos utilizados na fabricação das bandejas, na determinação do volume de água no tanque, na determinação da resistência elétrica e na determinação das diferença de potenciais utilizadas nos experimentos estão representados nas seções seguintes.

Fabricação das bandejas

As bandejas foram fabricadas em duas etapas. A primeira de definição de dimensões e desenho em 3D e a segunda de fabricação. As bandejas foram desenhadas para auxiliar na etapa de fabricação.

A área horizontal projetada das bandejas foi de 520 X 276 mm e na fabricação foram usados os materiais: Chapa de aço inoxidável AISI 304 de 1,2mm; chapas lisas de alumínio de 1,2mm e chapas de aço polido de 0,8 mm. Para o fechamento, foi usado o silicone resistente à temperatura de até 150°C. Na fabricação foram usados os equipamentos: guilhotina (Indústria de Máquinas Aguiar LTDA, modelo TI 6 ME), viradeira (Indústria de Máquinas Aguiar LTDA, modelo VHL 2050) , máquinas de solda (SQUARE WAVE TIG 175 PRO) com a solda TIG, esmerilhadeira, furadeira e brocas.

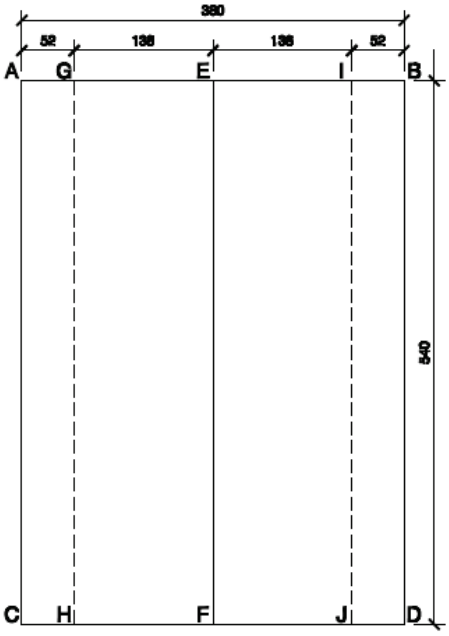
Na fabricação das bandejas foram observadas as etapas:

1º etapa: Utilizou-se a máquina de corte para produzir um pedaço retangular de 520 X 380 mm (o retângulo necessário é de 520 X 370 mm, mas por causa da imprecisão dos equipamentos foram deixados 10 mm de sobra para evitar possíveis erros) e dois retângulos menores de 276 X 45 mm. Estes dois retângulos foram soldados na chapa, na sequência de fabricação.

2º etapa: Foram traçadas três retas na chapa de 520 X 370 mm. Na face da chapa 1 (FIGURA 16) fez-se a reta $\overline{EF}$ no centro da chapa e na outra face (lado 2)

traçaram-se as retas $\overline{GH}$ e $\overline{IJ}$ que ficaram distanciadas de 138 mm do centro da chapa.

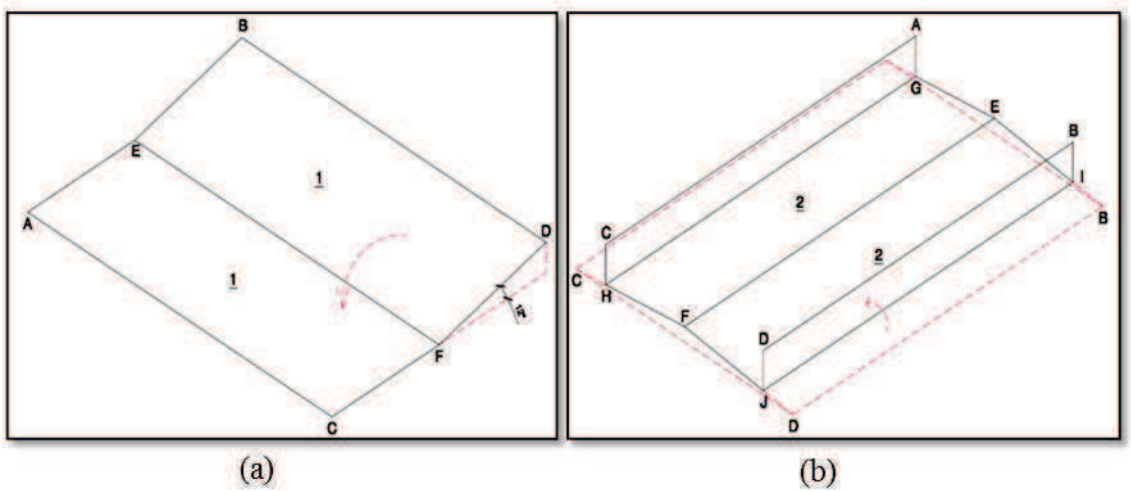
Figura 16 - Corte da chapa na face 1



Fonte: Elaborada pelo autor

3º etapa: Foram feitas três dobras na chapa. A primeira na face 1, na linha central da chapa sobre a reta $\overline{EF}$ de 12° graus. A segunda e terceira dobras foram feitas na face oposta nas retas $\overline{GH}$ e $\overline{IJ}$ de 102° graus (FIGURA 17).

Figura 17 - (a) Primeira dobra na face 1; (b) Segunda e Terceira dobra na face 2



Fonte: Elaborada pelo autor

4º etapa: Os dois retângulos de 276 X 54 mm foram usados no fechamento lateral da bandeja. Na realização desse fechamento, foram usados pontos de solda, distanciados de aproximadamente 10 cm. Após esse procedimento foi usado silicone industrial para vedação completa do encaixe. Não foi usado um cordão de solda contínua no fechamento das bandejas para se evitar o desalinhamento lateral das bandejas.

5º etapa: Fez-se um furo de 10 mm de diâmetro em uma distância de 110 mm da base superior da bandeja. Vedaram-se as arestas da parte superior e inferior com o silicone.

6º etapa: Remoção das irregularidades com a esmerilhadeira.

Determinação do Volume de água no tanque

A altura do volume de água no tanque foi definida a partir da resistência elétrica, pois para uma boa distribuição do calor era necessário que a resistência ficasse submersa na água. Para cobrir a resistência foram necessários 4,5 L de água.

O tanque (280 X 520 X 100 mm) tem uma capacidade total de 14,5L de água. Com referência nos resultados do trabalho de Rodrigues (2011) foi adotado um volume de 10 L de água para todos os experimentos. Esse volume de água foi observado a fim de que a água no tanque cobrisse totalmente a resistência elétrica.

Determinação da Resistência Elétrica

Para o aquecimento da água no tanque foi inicialmente instalada uma resistência elétrica de 2000W de potência no forma de círculo. Posteriormente essa resistência foi substituída por outra resistência com mesma potência no formato de “W”.

A Figura 11 (a) mostra a resistência com formato de círculo, que não cobria adequadamente a área do tanque interno. A resistência mostrou um bom desempenho no aquecimento da água no tanque, mas falhou na homogeneidade do aquecimento com variações de temperatura no interior do tanque de 3°C.

A Figura 11 (b) mostra a resistência no formato de “W”, que foi fabricada exclusivamente para melhor cobrir a área do tanque. A resistência mostrou um bom

desempenho no aquecimento e na homogeneidade da distribuição de calor no tanque, com variação de temperatura até 1,5°C.

Determinação da Diferença de Potencial Elétrico (ddp)

A definição da diferença de potencial elétrico (ddp) foi um dos parâmetros necessários para o desenvolvimento dos experimentos. A diferença de potencial elétrico era responsável pela energia que entrava no tanque. A calibragem desta ddp era feita por um variador de voltagem (*varivolt*) que filtrava diferença de potencial para controlar o aquecimento da resistência elétrica.

A diferença de potencial desejada era aquela que elevaria a temperatura da água no tanque para aproximada de 100°C na fase de regime permanente. Com diferença de potencial baixa, o tempo total do experimento era muito longo (maior consumo de energia em uma fase de baixa produção de condensado) e a temperatura no regime não atingia 100°C. Com uma diferença de potencial alta, ocorria maior produção das bandejas, mas com rápida redução do volume de água no tanque e, consequentemente, as submersão completa da resistência elétrica na água (redução da transferência de calor).

Foram testadas as diferenças de potenciais de 88 V, 110 V, 165 V, 200 V e 220 V para experimentos utilizando um estágio com o trocador de calor alimentado pela rede de abastecimento de água. As diferença de potenciais de 88 V e 110 V mostraram-se com tempo muito prolongado nos experimentos e não atingiram a temperatura necessária na fase do regime permanente. A diferença de potencial de 220 V mostrou-se excessiva, causando a não submersão da resistência. As diferenças de potencial de 165 V e 200 V mostraram-se adequadas para o desenvolvimento dos experimento, com diminuição da água no tanque dentro do limite desejado, que era de 5 L e com a temperatura no regime permanente próxima a 100°C.

7 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados em gráficos os resultados dos experimentos realizados no dessalinizador para as bandejas de alumínio, aço polido, aço inoxidável (AISI 304) e aço cromado, com um estágio e com as diferenças de potencial elétrico de 165 V e 200 V na resistência elétrica. Nas bandejas utilizadas nos experimentos, a bandeja de aço polido tinha espessura de 0,5 mm e as demais tinham espessura de 1,2 mm. A Tabela 1 apresenta os resultados das análises de condutividade elétrica e de salinidade das amostras de água bruta. A Tabela 2 apresenta as medições de rugosidade das chapas utilizados na fabricação das bandejas. A Tabela 3 apresenta os resultados dos cálculos do coeficiente global de transferência de calor para as três fases dos experimentos.

7.1 Resultados das Bandejas

Esta seção apresenta os gráficos de temperatura ao longo do tempo para a água no tanque e no primeiro estágio, utilizando-se as bandejas de alumínio, aço polido, aço inoxidável e aço cromado para as diferenças de potencial elétrico de 165 V e 200 V.

A descontinuidade da temperatura do primeiro estágio nos experimentos foi devido ao fornecimento de água para o trocador de calor. A vazão no trocador de calor era de água da rede de distribuição e variavam de 53,20 a 55,55mL/s.

Na legenda das Figuras 18 a 25, $T\infty$ representa a temperatura do ambiente, T_1 temperatura do primeiro estágio, T_a temperatura média no tanque, T_{a_1} representa temperatura no tanque 1, T_{a_2} temperatura no tanque 2 e $T_{par\text{-}isol}$ temperatura entre tanque e isolamento.

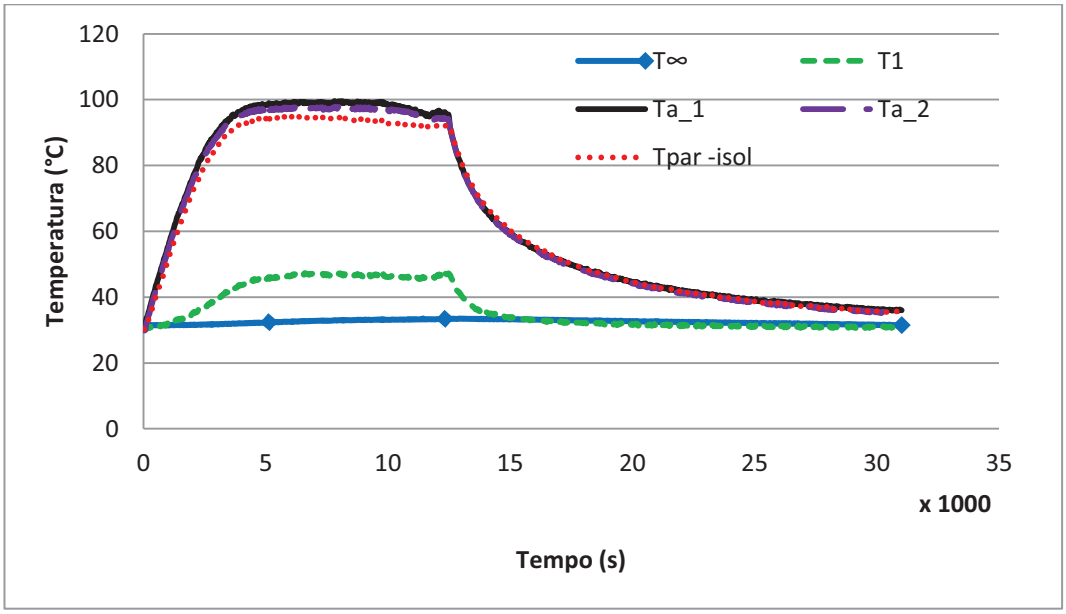
<u>Bandeja de Alumínio</u>

O experimento com a bandeja de alumínio apresentou produção de 4510 mL e 5900 mL de água dessalinizada para as diferenças de potencial de 165 V e de 200 V. Essas produções foram as mais altas alcançadas. A Figura 18 apresenta o gráfico das temperaturas nas três fases do experimento com 165 V, corrente elétrica de 6,8 A, resultando em uma potência de 1122 W. No primeiro estágio (trocador de calor) não houve alteração significativa no volume de 2000 mL. O tempo da fase de aquecimento foi de 5130 s (1,4 horas), iniciado

com temperatura do tanque de 30,89°C e alcançando a temperatura de 99,0°C. A produção neste período foi de 1005 mL.

O tempo definido para o regime permanente foi de 2 horas para todos os experimentos. Esse período de tempo foi longo o suficiente para as medições e cálculos dos parâmetros, pois não foram observadas oscilações dos valores medidos. A temperatura média no tanque foi de 98,3°C, a temperatura média no primeiro estágio foi de 46,5°C e a produção foi de 3247 mL, aproximadamente 72% de toda a produção do experimento. O tempo de resfriamento foi de 18660s (5,2 horas). Esse período teve inicio com a temperatura do tanque de 95,9°C e fim com a temperatura do tanque de 36 °C. A produção no resfriamento foi de 258 mL.

Figura 18- Gráfico de Temperatura em função do tempo para as temperaturas da água no tanque e no primeiro estágio utilizando a bandeja de alumínio e a diferença de potencial de 165 V.

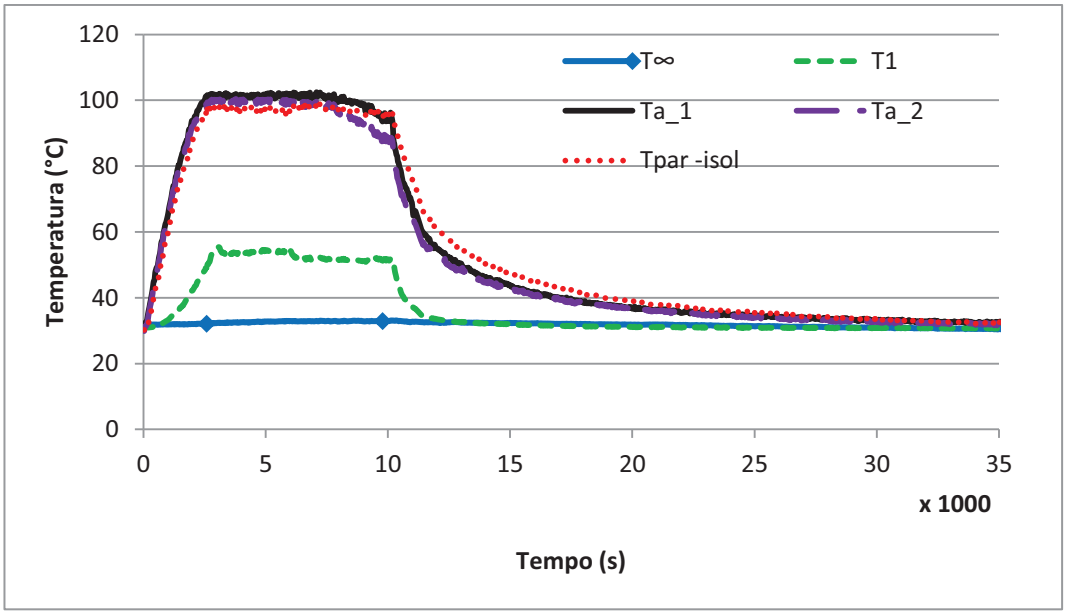


Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 19 mostra o experimento com diferença de potencial elétrico 200 V e corrente de 8,3 A, resultando em uma potência de 1660 W. O tempo da fase de aquecimento foi de 2580 s (0,72 horas) com temperatura inicial do tanque de 30,4°C e final de 98,9°C. A produção de condensado foi de 369 mL. No regime permanente as temperaturas médias no tanque e no primeiro estágio foram de 99,1°C e 46,5°C respectivamente. A produção nesta fase foi de 4852 mL, o que representa 81% da produção total do condensado no experimento. No resfriamento o tempo foi de 61410 s (17 h), com a temperatura inicial e final do tanque de 90,7°C e 29,9°C respectivamente e produção de 679 mL. Neste experimento, a bandeja do

primeiro estágio continha inicialmente 2000 mL de água ao final do experimento 1640 mL. Houve evaporação (perda) de 360 mL de água.

Figura 19 - Gráfico de Temperatura em função do tempo para as temperaturas da água no tanque e no primeiro estágio utilizando a bandeja de alumínio e a diferença de potencial de 200 V.

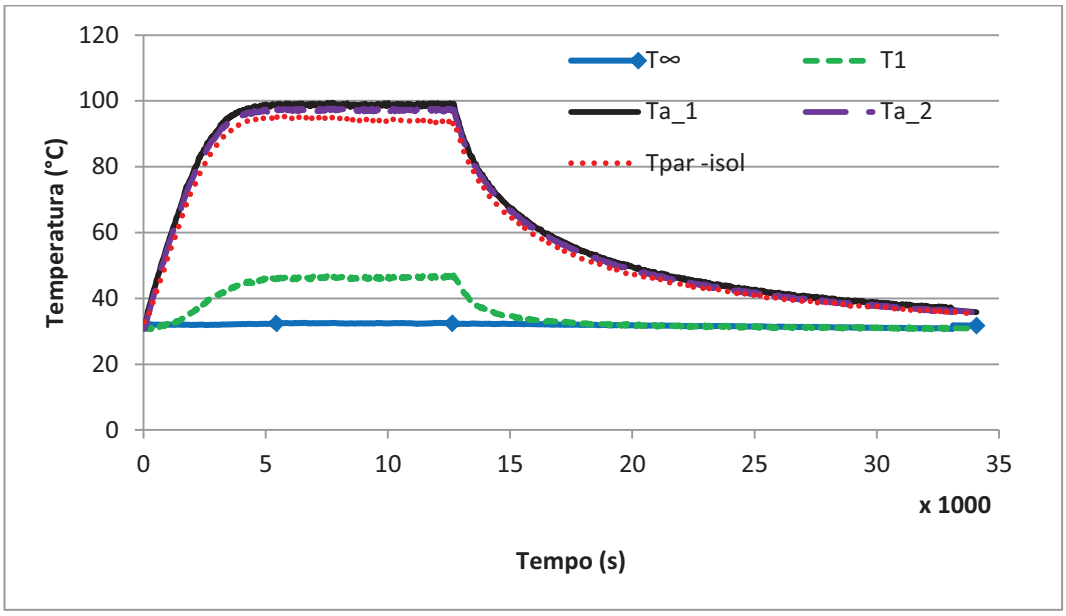


Fonte: Elaborada pelo autor

Bandeja de Aço Polido

A Figura 20 mostra o gráfico da temperatura com o tempo para o experimento com diferença de potencial elétrico de 165 V, corrente de 6,8 A e potência de 1122 W. A produção total do condensado foi de 3040 mL. A fase de aquecimento teve duração de 5430s (1,5 horas), na qual a temperatura do tanque aumentou de 31,8°C para 99,0°C e a produção foi de 643 mL. Na fase de regime permanente, o tempo foi de 7200 (2 horas), a temperatura média do tanque de 98,0°C, a temperatura média no primeiro estágio de 46,3°C e a produção de 2019 mL, correspondendo a mais de 72% do valor total de água coletada. Na fase de resfriamento, o tempo foi de 53280s (7,4 horas), a temperatura inicial foi de 97,69°C e a final foi de 31,34°C, com uma a produção de 228 mL. A bandeja no primeiro estágio teve uma diminuição (evaporação para o ambiente) de 50 mL dos 2000 mL de água durante todo o experimento.

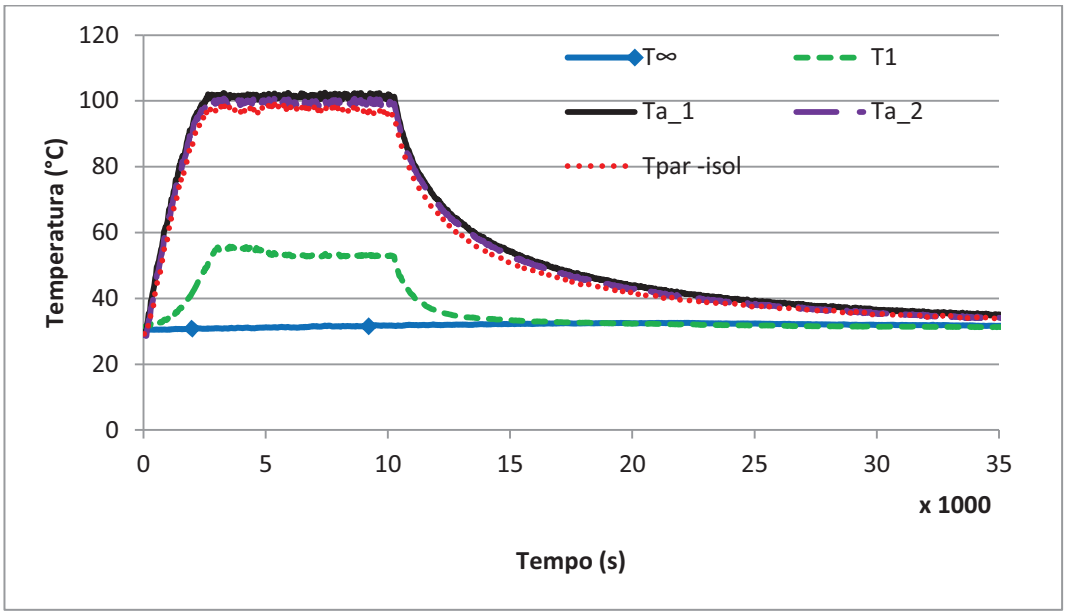
Figura 20 - Gráfico de Temperatura em função do tempo para as temperaturas da água no tanque e no primeiro estágio utilizando a bandeja de aço polido e a diferença de potencial de 165 V.



Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 21 mostra o gráfico de temperatura ao longo do tempo para a bandeja de aço polido com uma diferença de potencial de 200 V, corrente 8,4 A e potência de 1680 W. Na fase de aquecimento, o tempo de duração foi de 1980s (0,55 horas), a temperatura do tanque aumentou de 29,4°C para 90,8C° e a produção do condensado foi de 109 mL. Na fase do regime permanente, o tempo de duração foi de 7200s (2 horas), as temperaturas médias do tanque e do primeiro estágio foram de 100,1°C e 53,0°C, respectivamente, e a produção foi de 4106 mL, correspondente a 81% da produção total. Na fase de resfriamento, o período de tempo foi de aproximadamente 86970s (24 horas) no qual a temperatura da água no tanque diminuiu de 100,7°C para 31,1°C. A produção de condensado na fase de resfriamento foi de 245 mL. Nesse experimento a evaporação de água no primeiro estágio foi de 80 mL dos 2000 mL iniciais.

Figura 21 - Gráfico de Temperatura em função do tempo para as temperaturas da água no tanque e no primeiro estágio utilizando a bandeja de aço polido e a diferença de potencial de 200 V.

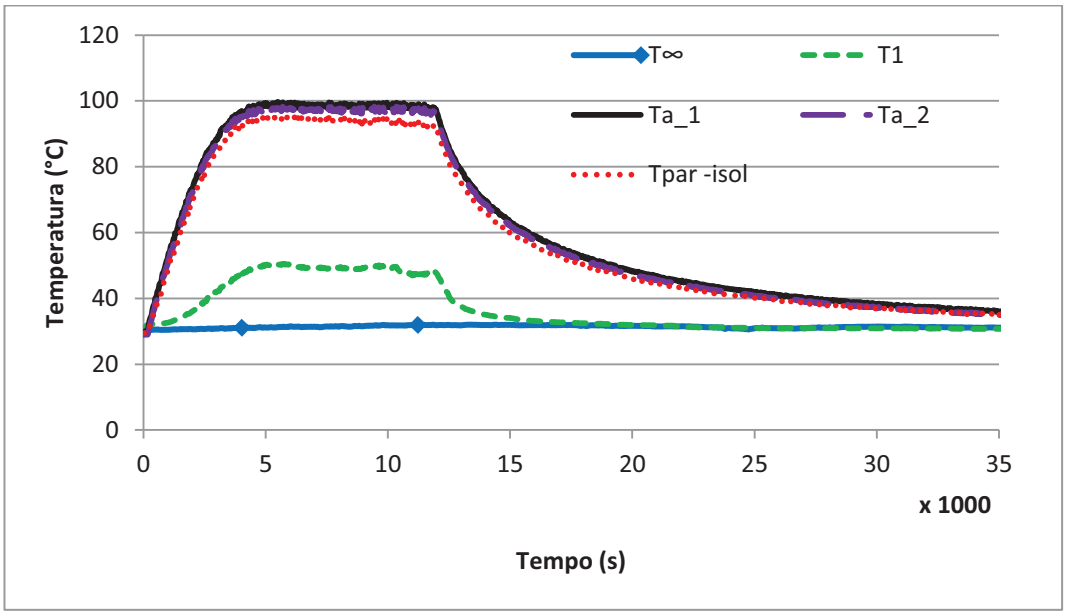


Fonte: Elaborada pelo autor

Bandeja de Aço Inoxidável AISI 304

A Figura 22 apresenta o gráfico de temperatura com o tempo para a bandeja de aço inoxidável AISI 304 para a diferença de potencial elétrico de 165 V, corrente de 6,7 A, potência de 1105,5 W. A produção total da água foi de 3660 mL. Na fase de aquecimento, tempo foi de 4020 s (1,1 horas), as temperaturas do tanque antes e depois do aquecimento foram de 29,4°C e 96,2°C, respectivamente, e a produção foi de 469 mL. No regime permanente, o tempo foi de 7200 s (2 horas), a temperatura média do tanque de 98,5°C e a temperatura média do primeiro estágio de 49,2°C. A produção de água dessalinizada foi de 2718 mL, o que representou 72% da produção. Na fase de resfriamento, o tempo necessário foi de 62220s (17 horas), as temperaturas antes e depois do resfriamento foram de 88,55°C e 37,49°C e a produção foi de 473 mL. Nesse experimento, o volume de água evaporada no primeiro estágio foi de 320 mL dos 2000 mL.

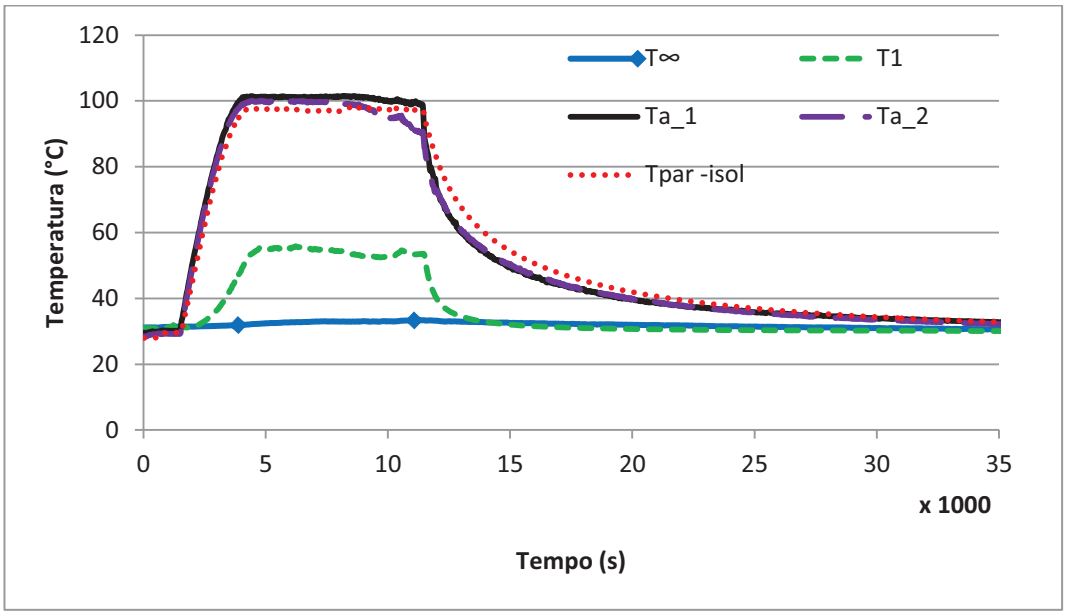
Figura 22 - Gráfico de Temperatura em função do tempo para as temperaturas da água no tanque e no primeiro estágio utilizando a bandeja de aço inoxidável e a diferença de potencial de 165 V.



Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 23 apresenta o gráfico da temperatura com o tempo para a bandeja de aço inoxidável AISI 304 com a diferença de potencial de 200 V, corrente de 8,4 A e potência energética de 1680 W. A produção total foi de 5300 mL. Na fase de aquecimento, o tempo de duração foi de 3870 s (1 hora), as temperaturas inicial e final foram de 29,02 °C e 98,45°C, respectivamente, e a produção de 1140 mL. Na fase de regime permanente, o tempo foi de 7200 (2 horas), as temperaturas médias do tanque e do primeiro estágio foram de 97,4°C e 54,0°C, respectivamente, e a produção de 4018 mL, representando 74% da produção total. Na fase de resfriamento, o tempo necessário foi de 53830 s (14 horas), a temperatura do tanque diminuiu de 95,3°C para 30,4°C e a produção foi de 142 mL. Nesse experimento o volume de água evaporada do primeiro estágio foi de 380 mL dos 2000 mL iniciais.

Figura 23 - Gráfico de Temperatura em função do tempo para as temperaturas da água no tanque e no primeiro estágio utilizando a bandeja de aço inoxidável e a diferença de potencial de 200 V.



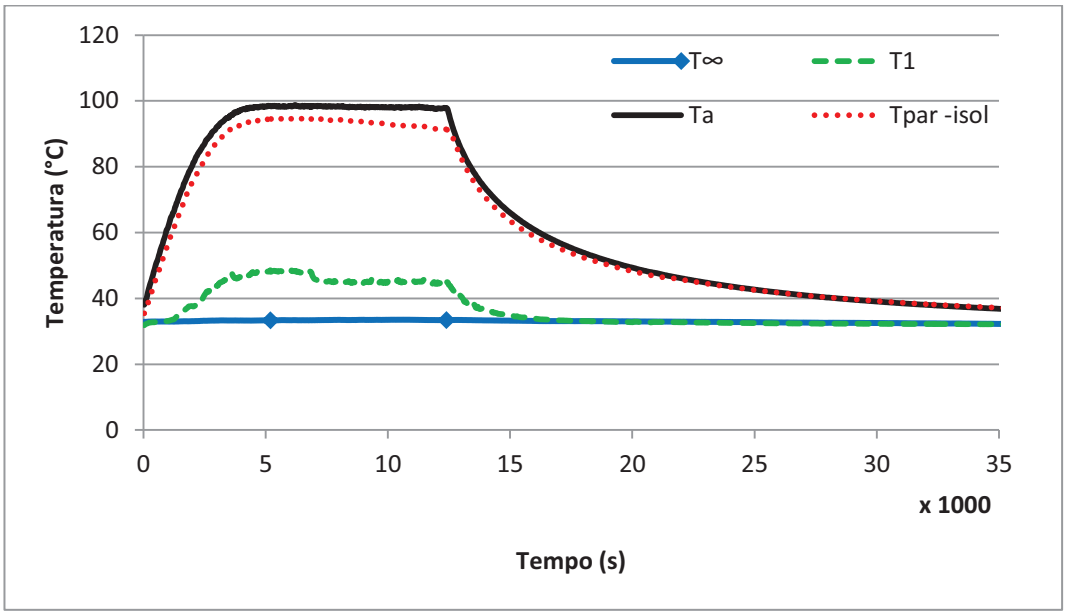
Fonte: Elaborada pelo autor

Bandeja de Aço Cromado

A bandeja de aço inoxidável AISI 304 passou por um processo de cromagem em sua superfície inferior, onde ocorre a condensação.

A Figura 24 mostra o gráfico da temperatura com tempo para a bandeja de aço cromado, com uma diferença de potencial elétrico de 165 V, corrente de 6,8 A e potência de 1122 W. A produção total foi de 3230 mL. Na fase de aquecimento o tempo foi de 5230 s (1,4 horas), as temperaturas do tanque no início e final foram de 38,0°C e 98,5°C, respectivamente, e a produção foi de 630 mL. No regime permanente, o tempo foi de 7200s (2 horas), a temperatura média do tanque foi de 98,2°C, a temperatura média do primeiro estágio foi de 45,3°C e a produção foi de 2400 mL, equivalente a 74% da produção total. Na fase de refrigeração, o tempo necessário foi de 75240 (21 horas), as temperaturas do tanque inicial e final foram de 97,7 °C e 32,2°C, respectivamente, e a produção foi de 200 mL. Neste experimento, o volume de água evaporada foi de 120 mL dos 2000 mL iniciais.

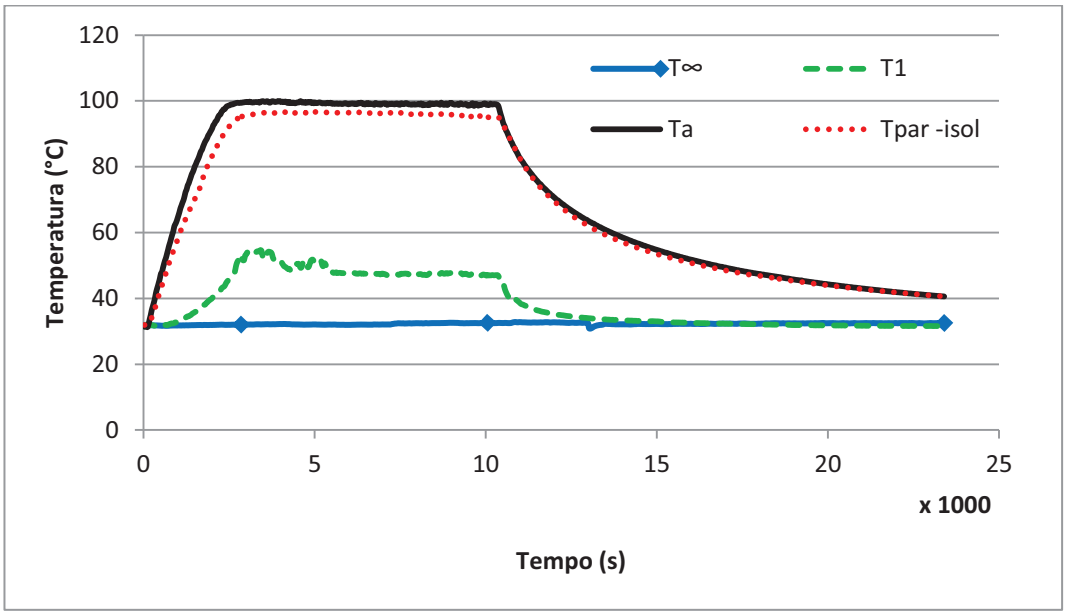
Figura 24 - Gráfico de Temperatura em função do tempo para as temperaturas da água no tanque e no primeiro estágio utilizando a bandeja de aço cromado e a diferença de potencial de 165 V.



Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 25 apresenta o gráfico da temperatura com o tempo para a bandeja de aço cromado com uma diferença de potencial elétrico de 200 V, corrente de 8,3 A e potência de 1660 W. A produção total foi de 4000 mL. Na fase de aquecimento, o tempo foi de 2850 s (0,8 horas), a temperatura inicial do tanque foi de 99,5°C e a produção nessa fase foi de 1231 mL. No período de regime permanente, a temperatura foi de 99,2 °C e a temperatura média do primeiro estágio foi de 48, 9°C. A produção foi de 2590 mL, o que representa 66% da produção total. Na fase de resfriamento, o tempo de duração foi de 13320 s (3,7 horas), a temperatura inicial do tanque de 98,71°C, a temperatura final do tanque de 40,57°C e a produção foi de 179 mL. O volume de água evaporado no primeiro estágio foi de 160 mL dos 2000 mL iniciais.

Figura 25 - Gráfico de Temperatura em função do tempo para as temperaturas da água no tanque e no primeiro estágio utilizando a bandeja de aço cromado e a diferença de potencial de 200 V.



Fonte: Elaborada pelo autor

7.2 Análise da Condutividade Elétrica e de Salinidade

A Tabela 1 apresenta as medições da condutividade elétrica para os experimentos com um estágio e com duas diferenças de potencial para cada tipo de bandeja (alumínio, aço polido, aço inoxidável e aço cromado). As diferenças de potencial foram 165 V e 200 V para cada bandeja.

Os resultados mostrados na Tabela 1 comprovam a eficiência do dessalinizador, com reduções superiores a 90% da condutividade elétrica para todos os experimentos. A maior redução observada foi para a bandeja de alumínio com diferença de potencial elétrico de 165 V, com uma redução de 99,52% da condutividade elétrica.

Tabela 1 - Resultados das análises da condutividade elétrica e a solução dos sólidos dissolvidos em parte por milhão (PPM) das amostras de água bruta e dessalinizada

Bandejas	Voltagens (V)	Água Bruta		Água Dessalinizada	
		Condutividade (µS/25°C)	Sólidos Dissolvidos (PPM)	Condutividade (µS/25°C)	Sólidos Dissolvidos (PPM)
Alumínio	165	821,92	526,0	3,96	2,5
	200	767,12	491,0	34,70	22,2
Aço Polido	165	794,52	508,5	4,29	2,7
	200	750,68	480,4	5,02	3,2
Aço Inoxidável	165	794,52	508,5	18,72	12,0
	200	850,23	544,1	52,97	33,9
Aço Cromado	165	785,53	502,7	5,59	3,6
	200	955,25	611,4	9,04	5,8

Fonte: Elaborada pelo autor

As grades instalações de tratamento de água como Lenntech (empresa internacional no tratamento e purificação de água, criada na década de 90 pela Universidade Técnica de Delft, na Holanda) utilizam a concentração de íons para identificar o total de sólidos dissolvidos na água. Os íons são carregados com corrente elétrica, logo quanto maior for a concentração (expressa em parte por milhão) maior será a concentração iônica. O total de sólidos dissolvidos nas águas doces apresentam de 0 a 500mg/L, as águas salobras contêm de 500 a 1500 mg/L e as salgadas apresentam concentrações com valores acima de 1500 mg/L (SRH, 2012).

Com relação ou trabalho de Lima (2003), que estudou um dessalinizador similar ao utilizado estima-se que os testes bacteriológicos na água dessalinizada fossem isentos de bactérias e coliforme fecais, uma vez que a temperatura no protótipo atingiu temperaturas acima das utilizadas por Lima no seu dessalinizador.

7.3 Teste de Rugosidade

As rugosidades superficiais (conjunto de irregularidades que caracterizam uma superfície) das chapas (bandejas) foram experimentalmente medidas no laboratório de Metrologia Dimensional (LAMETRO) da Universidade Federal do Ceará. As medições foram realizadas em seis pontos diferentes de amostras na instalação de medidas do LAMETRO (A estação de medição era composta de um computador com cartão de medição Mahr, no qual

encontra-se instalado o software "MarSurf XR 20" para o controle dos componentes da estação de medição e para a avaliação dos perfis adquiridos). A rugosidade da chapa de alumínio foi medida com 5,60 mm de comprimento total e 11200 pontos de frequência de corte (*cut-off*). Nas amostras de aço inoxidável, aço polido e aço cromado foram feitas medições de 1,75 mm de comprimento total e com 3500 pontos de frequência de corte. Todos os materiais foram avaliados com a velocidade de arrasto do Apalpador de 0,10 mm/s (O apalpador é o componente do sistema que entra em contato direto com a superfície a mensurar), com um comprimento de $\pm$ 250 mm e a altura máxima de 25,0 μm.

A Tabela 2 apresenta os resultados dos parâmetros de rugosidade para as amostras utilizadas. Os parâmetros analisados foram: Média Aritmética (R_a), a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento (picos e vales) dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média, dentro do percurso de medição; Profundidade Média (R_z), a média aritmética dos cinco valores de rugosidade parcial. Rugosidade parcial é a soma dos valores absolutos das ordenadas dos pontos de maior afastamento, acima e abaixo da linha média, existentes no comprimento de amostragem (*cut-off*); Profundidade Máxima (R_{max}), o maior valor das rugosidades parciais que se apresenta no percurso de medição. A capa de alumínio teve os maiores valores nos parâmetros de rugosidade. O aço inoxidável teve o segundo maior valor no parâmetro de rugosidade média aritmética. O aço cromado teve os menores valores para os parâmetros de rugosidade com 0,010 μm para média aritmética.

Comparando-se os resultados das medições de rugosidade com os de produção das bandejas, observou-se que a maior produção foi a bandeja de alumínio, que também apresentou a maior rugosidade. A rugosidade é um parâmetro importante na formação da gota de água de condensado e no seu escoamento, unida à parede da bandeja. A rugosidade não pode ser muito elevada, pois contribui para a formação de gotas grandes que facilmente caem no tanque sem serem coletadas. Por outro lado, a rugosidade não pode ser muito baixa, pois dificulta na formação e crescimento da gota. Das amostras das bandejas estudadas, a chapa de alumínio apresentou o melhor resultado.

Tabela 2 - Parâmetros de Rugosidade

Materiais	Parâmetros de Rugosidade		
	Ra (µm)	Rz (µm)	Rmax (µm)
Alumínio	0,189	1,018	1,37
Aço Polido	0,073	0,433	0,702
Aço Inoxidável	0,092	0,192	0,347
Aço Cromado	0,01	0,074	0,057

Fonte: Elaborada pelo autor

7.4 Coeficiente Global de Transferência de Calor (K_1)

O coeficiente global de transferência é o resultado mais significativo deste trabalho, visto que caracteriza o desempenho e, consequentemente, a produção de cada bandeja. Com sua determinação é possível o estudo de previsão da produção a partir de temperaturas nas bandejas. A tabela 3 apresenta os valores do coeficiente global de transferência de calor (K_1) para os experimentos com as potencias de 165 V e 200 V para todas as bandejas.

Os valores de K_1 apresentados na Tabela 3 foram calculados com os valores de produção proveniente das medições de peso da balança (massa de água no tanque de aquecimento). Observa-se que os valores de K_1 no regime permanente é praticamente o mesmo para todos as bandejas, ou seja, de 244 K/m²K.

A diferença na produção pode ser observada pela água coletada, como mostra a Tabela 3. Nesta tabela, as quantidades coletadas são para as três fases do experimento. Observa-se que houve um menor percentual de perda de água condensada na bandeja de alumínio (1%), justificando assim sua maior produção coletada.

Na fase de resfriamento os experimentos tiveram valores de K_1 aproximados a 30,0 K/m²K.

Tabela 3 - Coeficiente Global de Transferência de Calor (K_1)

Experimentos		K_1 (W/m²K)			Variação da Balança (g)	Produção Total de Água (mL)	Produção no Regime por Energia (mL/kJ)
Voltagem (V)	**Bandejas**	**Aque.**	**Reg. Perm.**	**Resf.**			
165V	Alumínio	74,8	150,0	36,5	4536	4510	0,402
165V	Aço Polido	72,0	148,0	35,5	3346	3040	0,304
165V	Aço Inoxidável	59,9	155,0	27,5	3760	3660	0,336
165V	Aço Cromado	95,8	146,0	31,8	3288	3230	0,300
200V	Alumínio	70,4	244,0	34,0	5989	5900	0,406
200V	Aço Polido	77,0	244,0	37,3	4620	4460	0,315
200V	Aço Inoxidável	76,8	251,0	33,3	5439	5300	0,336
200V	Aço Cromado	74,8	225,0	35,6	4197	4000	0,232

Fonte: Elaborada pelo autor

8 CONCLUSÃO

O novo sistema de aquecimento elétrico controlado para o dessalinizador térmico com recuperação de calor permitiu o controle da taxa de aquecimento da água do tanque de forma precisa, consequentemente, do calor de aquecimento da água no tanque e de sua temperatura de operação.

O sistema de medição mostrou-se adequado para o aparato experimental, visto que, as variáveis importantes para o estudo e otimização do sistema (temperaturas e massas) puderam ser medidas com instrumentos de precisão.

A bandeja de alumínio teve a maior produção de água dessalinizada, enquanto a bandeja de aço polido teve a menor produção.

A bandeja de alumínio apresentou o melhor resultado entre as estudadas e observa-se que este foi decorrente de um melhor escoamento do condensado produzindo na face.

A qualidade da água dessalinizada produzida pelo protótipo foi elevada para todos os tipos de bandejas estudadas, com redução na condutividade elétrica superior a 97%. Esse resultado é importante para utilizações do protótipo em futuras instalações publicas e privadas, visto que garante um nível de dessalinização e descontaminação adequado ao consumo humano.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFIAS

ADHIKARI, R.S.; KUMAR, A.; SOOTHA, G. D. Simulation studies on a multi-stage stacked tray solar still. **Solar Energy**, vol. 54, p. 317-325, 1995.

ALVES, R. D. B. **Sistema De Captação De Energia Solar Para Uma Torre De Dessalinização Térmica Com Recuperação De Calor**, 2009. 56p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2006.

BACHA, H. B.; ABDALAH, A. A. B.; MAALEJ, A. Y.; DHIA, H. B. Desalination unit coupled with solar collectors and storage tank: modelling and simulation. **Desalination**, n.206, p. 341–352, 2007.

CAENF – Companhia de água e esgoto de Nova Friburgo. Disponivel em www.aguasdenovafriburgo.com.br/ Acessado em Dezembro de 2009.

CAMPOS, T. R. Avaliação benefício-custo de sistemas de dessalinização de água em comunidades rurais cearenses. **Revista de Economia e Sociologia Rural (RER)**, Rio de Janeiro, V. 45, nº 04, p 963-984, out-dez. 2007.

CONAMA - CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução CONAMA Nº 20, de 18 de junho de 1986. Publicada no D.O.U. de 30/07/86

DELYANNIS, E. Historic background of desalination and renewable energies. **Solar Energy**, vol. 75, p. 357-366, 2003.

INCROPERA, F. P.; DE WITT, P. D. **Fundamentals of Heat and Mass Transfer**. 5.ed. New York: John Wiley & Sons, 2003.

KHALIFA, A. J. N.; HAMOOD, A. M. On the verification of the effect of water depth on the performance of basin type solar stills. **Solar Energy**, In Press, Corrected Proof, 2009 Available online 18 may 2009.

LÖF, G.; ELBLING, J. A.; BLOEMER, J. W. Energy balances in solar distillers. **AICHE Journal**, v. 7, n. 4, p. 641-649, 1961.

LOPES, J. T. **Dimensionamento e Análise Térmica de um Dessalinizador Solar Híbrido**. 2004. 92p. Dissertação (Mestrado Profissionalizante em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2004.

LORCH, W. **Handbook of Water Purification**, 2. ed. The Lorc Foundation. University of Buckinghan, 1987.

MATHIOULAKIS, E.; BELESSIOTIS, V.; DELYANNIS, E. Desalination by using alternative energy: Review and state-of-the-art. **Desalination**, n. 203, p. 346–365, 2007.

MEZHER, T.; FATH, H.; ABBAS, Z.; KHALED, A. Techno-economic assessment and environmental impacts of desalination technologies. **Desalination**, n. 266, p263-273, 2011.

MOTA, S. & ANDRADE, M. A. N. Uso da destilação solar no tratamento de águas contaminadas por microrganismos. Aplicações às pequenas comunidades. *in:* XII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAl. Maceió, 1985. Disponível em: http://ojs.unifor.br/index.php/tec/article/view/1388/874. Acessado em novembro de 2012.

PINHEIRO, J. C. V; SILVA, L. A. C. Apropriação da água subterrânea segundo sua qualidade para uso doméstico no Ceará: Uma aplicação de medidas de desigualdade. In: ENCUENTRO DE LAS AGUAS, 3., Santiago - Chile, 2001. Santiago: IICA - Instituto Interamericano de Cooperação Agrícola (Diseño e produción www.PlotDesign.com), v. 3, 2001, p. 1-10

PINHEIRO, J. C. V. Estratégias para formulação e implantação de um programa de dessalinização da água salobra no Ceará. Fortaleza – CE: 2001. Disponível em: http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/encuen/vieira.pdf. Acessado em: novembro de 2012.

PINTO, M. C. F. **Manual de Medição *in loco*: Temperatura, pH, Condutividade Elétrica e Oxigênio Dissolvido.** CPRM – Serviço Geológioco do Brasil, 2007. 43p. Disponível em: http://www.cprm.gov.br/pgagem/manual_medicoes_T_%20pH_OD.pdf. Acessado em 15 de mar. 2013.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS. **Projeto de integração do rio São Francisco com bacias hidrográficas do Nordeste setentrional, consolidação dos estudos ambientais.** Cap 3. 2007, 70p. Disponível em: http://licenciamento.ibama.gov.br/Recursos%20Hidricos/Integracao%20Sao%20Francisco/EIA/Textos/EIA%20Consolidado%20Item%203%20An%E1lise%20das%20Alternativas.pdf. Acesso em: 20 de jan. 2012

RODRIGUES, F. P. **Desempenho de Uma Torre De Recuperação de Calor Com Canais Sintéticos de Poliuretano Para Um Dessalinizador Solar Térmico.** 2010. 69p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010.

RODRIQUES, A. P. **Estudo Experimental de um Dessalinizador Térmico Com Aquecimento Controlado.** 2011. 73p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011.

SCHWARZER, K.; SILVA, M. E. V.; HOFFSCHMIDT, B.; SCHWARZER, T. A new solar desalination system with heat recovery for decentralized drinking water production. **Desalination**, vol. 248, p. 204-211, 2009.

SCHWARZER, K; VIEIRA, M. E.; FABER, C.; MÜLLER, C. Solar thermal desalination system with heat recovery. ELSEVIER, **Desalination**, vol.137, p. 23-29, 2001.

SRH (Secretaria de Recursos Hídricos). **Atlas Eletrônico dos Recursos Hídricos do Ceará**. Disponível em: <http://atlas.srh.ce.gov.br>. Acesso: 08 jan. 2012.

SIDEM - Sidem-desalination. Disponível em www.sidem-desalination.com/en/process/MSF/ Acessado em dezembro de 2011.

SOUZA, L. F. **Análise Térmica de um Dessalinizador de Múltipos Efeitos Para Obtenção de Água Potável**. 2002. 56p. Dissertação (mestrado em Engenharia Mecânica) – Centro de tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2002.

SOUZA, L. F. Dessalinização Como Fonte Alternativa de Água Potável, **Norte Científico**, Roraima, V.1, n° 01, p 84-97, dez. 2006.

UNEP – United Nations Environment Programme. Disponível em www.unep.or.jp/.../techrub-8d/desalination.asp Acessado em Dezembro de 2011.

WINES, M. China investe em projetos de dessalinização e reciclagem para superar a escassez de água 2011. Tradução de Anna Capovilla. **The New York Times/ O Estado de S.Paulo**. Disponível em: http://www.agsolve.com.br/noticia.php?cod=5457. Acessado em: 10 de janeiro de 2012.

ANEXO

ANEXO A - Processos de Transferência de Calor e Massa

Esta seção apresenta a fundamentação teórica dos processos de transferência de calor por condução, convecção, radiação e de calor e massa por evaporação e condensação. O anexo A tem com fundamento teórico o livro de Transferência de Calor e Massa de Incropera e Witt (2003).

A1. Transferência de Calor por Condução

A condução é a transformação de energia das partículas mais energéticas para as partículas menos energéticas, devido às interações entre elas. Assim, o processo de transferência de calor por condução é um processo difusivo, no qual o calor flui da região de maior temperatura para a de menor temperatura.

É possível quantificar a transferência de calor em termos de equações de taxa apropriadas. Para a transferência de calor por condução, a equação da taxa é conhecida como *Lei de Fourier*, proposta em 1822 por *J. B. J. Fourier*, cientista francês. Essa relação matemática estabelece que a taxa de calor transferido é diretamente proporcional ao gradiente de temperatura entre dois pontos, à área da seção perpendicular à transferência de calor e à condutividade térmica, representada pela letra λ, expressa por:

$$\dot{Q}_c = -\lambda \,.\, A \,.\, \frac{dT}{dx} \tag{A.1}$$

na qual $\dot{Q}_c$ é a taxa de transferência de calor por condução, A é a área da seção através da qual o calor flui por condução e $\frac{dT}{dx}$ é o gradiente de temperatura na direção normal à área de transferência de calor.

A2. Transferência de Calor por Convecção

A transferência de calor por condução ocorre por meio de dois mecanismos. A transferência de calor devido ao movimento aleatório molecular (difusão) e a transferência de calor através do movimento global, ou macroscópico, do fluido. Estes processos ocorrem, especialmente quando um fluido escorre em contato com uma superfície e tem temperatura

diferente da superfície. A contribuição dada pelo movimento molecular é dominante próximo à superfície, onde a velocidade do fluido é baixa.

Descreve-se a transferência de calor por convecção como sendo a transferência de energia que ocorre no interior de um fluido devido à combinação dos efeitos de condução e do movimento global do fluido. A energia que esta sendo transferida é uma energia sensível ou térmica interna do fluido. Contudo, existem processos de convecção que apresentam ainda a troca de calor latente.

A taxa de transmissão de calor transmitido entre uma superfície e um fluido, $\dot{Q}_{conv}$, pode ser expressa pela por,

$$\dot{Q}_{conv} = h_{conv} \,.\, A \,.\, \Delta T \tag{A.2}$$

na qual h_{conv} é o coeficiente de transferência de calor por convecção, A é a área de transferência de calor e ΔT é a diferença entre a temperatura de uma superfície e a temperatura da corrente livre de fluido.

A3. Radiação Térmica

Radiação térmica é a energia emitida por toda matéria que se encontra a uma temperatura finita. Ela pode ser emitida por superfície sólida, por líquidos e por gases. A energia do campo de radiação é transportada por ondas eletromagnéticas, por isso não necessita de meio, ou seja, a transferência de radiação ocorre no vácuo.

A taxa de A taxa de radiação emitida por um corpo é diretamente proporcional à quarta potência da temperatura absoluta desse corpo. A expressão para a taxa de emissão de radiação térmica (Lei de *Stefan-Boltzmann*) é dada por,

$$\dot{Q}_{rad} = \sigma \,.\, A \,.\, T^4 \tag{A.3}$$

na qual $\dot{Q}_{rad}$ é a taxa de transferência de calor por radiação, σ é a constante de *Stefan-Boltzmann* (σ = 5,67. 10^{-8} W/m^{2}K^4), A é a área da superfície e T é a temperatura do corpo em escala absoluta. Existe um limite superior para o poder emissivo, que é previsto pela lei de *Stefan-Boltzmann* que é o radiador ideal ou corpo negro. O corpo negro absorve ou emite a

máxima quantidade possível de radiação em todos os comprimentos de ondas e em todas as direções.

Para um corpo real, a taxa de radiação térmica é inferior à de um corpo real e é expressa por

$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon \,.\, \sigma \,.\, A \,.\, T^4 \tag{A.4}$$

na qual ε é a emissividade da superfície real.

A4. Evaporação

A evaporação é o processo no qual uma substância líquida passa do estado líquido para o estado gasoso. A evaporação ocorre devido à diferença de pressão entre a pressão do fluido na camada superficial do fluido e a pressão parcial do fluido na corrente livre. As moléculas do líquido, vizinhas à superfície, sofrem colisões que aumentam sua energia interna acima da necessária para superar a energia de ligação na superfície. A energia necessária para manter a evaporação provém da energia interna do líquido que não evapora e sofre, portanto, uma redução em sua temperatura. Em regime permanente, a energia latente perdida pelo líquido na evaporação é compensada pela energia transferida para o líquido pelas vizinhanças. A expressão para a taxa de transferência de calor por evaporação $\dot{Q}_{evap}$ pode ser expressa por,

$$\dot{Q}_{evap} = h_{evap} \,.\, A \,.\, \Delta\mathrm{T} \tag{A.5}$$

na qual h_{evap} é o coeficiente de transferência de calor por evaporação, A a área de transferência de calor e ΔT a diferença de temperatura entre a superfície e a corrente livre. Essa diferença de temperatura está relacionada à diferença entre a pressão de saturação do fluido na superfície e pressão parcial do fluido na corrente livre.

A5. Condensação

A condensação é um processo físico no qual um gás muda do estado gasoso para o líquido, isso ocorre quando a temperatura de um vapor é reduzida a valores inferiores ao de

seu temperatura de saturação. A energia latente do vapor é libertada e o calor é transferido para a superfície, formando-se o condensado. A relação para a taxa de transferência de calor por condensação é expressa por,

$$\dot{Q}_{cond} = h_{cond} \,.\, A \,.\, \Delta \mathrm{T} \tag{A.6}$$

na qual h_{cond} é o coeficiente de transferência de calor por condensação, A a área de transferência de calor e ΔT a diferença entre a temperatura do vapor saturado ou superaquecido e a temperatura da parede.

A vazão mássica transferida no processo de evaporação-condensação entre duas superfícies é dada por,

$$\dot{m} = \frac{h_{evap}.A.\Delta T}{h_{fg}} \tag{A.7}$$

na qual h_{fg} é o calor latente de vaporização.