

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA E DE PRODUÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ANDERSON PEREIRA RODRIGUES

ESTUDO EXPERIMENTAL DE UM DESSALINIZADOR TÉRMICO COM
AQUECIMENTO CONTROLADO

FORTALEZA

2011

ANDERSON PEREIRA RODRIGUES

ESTUDO EXPERIMENTAL DE UM DESSALINIZADOR TÉRMICO COM
AQUECIMENTO CONTROLADO

Dissertação submetida à Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Processos, Equipamentos e Sistemas para Energias Renováveis

Orientadora: Profa. Dra. Maria Eugênia Vieira da Silva

FORTALEZA

2011

R611e Rodrigues, Anderson Pereira
Estudo experimental de um dessalinizador térmico com aquecimento controlado / Anderson Pereira Rodrigues, 2011.
73 f. ; Il.; enc.

Orientadora: Profa. Dra. Maria Eugênia Vieira da Silva
Área de concentração: Processos, equipamentos e sistemas para energias renováveis .
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica e de Produção, Fortaleza, 2011.

1. Engenharia mecânica. 2. Dessalinização da água. 3. Gás natural
I. Silva, Maria Eugênia Vieira da (orient.). II. Universidade Federal do Ceará – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD 620.1

ANDERSON PEREIRA RODRIGUES

ESTUDO EXPERIMENTAL DE UM DESSALINIZADOR TÉRMICO COM
AQUECIMENTO CONTROLADO

Dissertação submetida à Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, Área de concentração em Energias Renováveis.

Aprovada em ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Maria Eugenia Vieira da Silva (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará

Prof. Dr. Paulo Alexandre (Co-Orientador)
Universidade Federal do Ceará

Prof. Dr. Luis Morão Cabral Ferro
Universidade Federal Rural do Semi-Árido

Dedico este trabalho a meus pais Francisco Carlos Rodrigues da Silva e Lúcia Pereira Rodrigues, pela dedicação, amor e acima de tudo pela paciência em todos esses anos.

AGRADECIMENTOS

Principalmente à Professora Maria Eugênia Vieira da Silva, por sua dedicação, preocupação e competência à frente do LESGN.

À Maria Elieneide Araújo e Erilson Barbosa, amigos e companheiros de trabalho no Laboratório de Energia Solar e Gás Natural (LESGN).

A minha namorada Lilian Barreto França, pelo incentivo nos estudos e pelos momentos de paz.

Aos alunos da graduação Francisco Elmo Uchoa Filho, Akio Cavalcante Sakumoto, Saulo Teles, Paulo Eduardo Praciano e todos os demais que já passaram um período junto à equipe do LESGN.

Aos amigos do mestrado Samuel Guerra Vieira e Danilo Sousa Rocha.

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

Aos professores do programa de pós-graduação Paulo Alexandre, William Barcellos, Francisco Ilson, André Bueno e todos os demais que de várias formas contribuíram com o trabalho.

A todos os demais, que porventura não estejam citados aqui e que contribuíram de forma direta ou indireta para a concretização deste trabalho.

“Você que está aí sentado, levante-se. Há um líder dentro de você, governe-o, faça-o falar.”

Chico Science

RESUMO

Os dessalinizadores solares operam com uma fonte de calor variável, a radiação solar, o que dificulta a identificação da influência das variáveis de processo e dos parâmetros geométricos construtivos da torre de dessalinização. O presente trabalho apresenta o estudo experimental de um protótipo dessalinizador térmico com recuperação de calor e fonte de energia controlada, projetado para operar nos regimes transiente e permanente. Esse protótipo possibilitou o estudo dos parâmetros operacionais que influenciam na produção de água dessalinizada na torre de dessalinização, a saber, a altura da coluna d'água no tanque de armazenamento, o tipo de queimador, a vazão de gás natural, o número de estágios e o uso de uma nanopelícula sob a superfície de condensação. Além disso, foi possível realizar a caracterização térmica da torre pela determinação experimental do coeficiente de transferência de calor (K_1) dos processos simultâneos de evaporação, radiação, convecção da superfície da água no tanque e de condensação nas paredes do estágio imediatamente superior ao tanque. O dessalinizador estudado é composto por um queimador, um tanque de armazenamento e uma torre de dessalinização com seis estágios. Controlando-se a vazão de gás natural foi possível manter temperaturas de operação pré-estabelecidas e constantes. Os resultados mostraram que o uso do queimador linear (queimador ideal) e de 6 litros de água no tanque de armazenamento apresentaram a melhor produção da torre. Foi mostrado também que a vazão de 0,533g/min para o gás natural e o uso de 6 a 7 estágios de dessalinização são mais adequados para a torre. Com as medições experimentais foi possível a determinação do coeficiente de desempenho, COP, e da razão de ganho na saída, GOR, e esses valores foram de 4,09 e 5,91, respectivamente. Um aumento de 65,59 % na produção de água dessalinizada foi observado com o uso da nanopelícula, embora testes químicos de possível contaminação não puderam ser realizados.

Palavras-chave: dessalinizador térmico, gás natural, parâmetros operacionais

ABSTRACT

Solar desalination systems operate with a transient heat source, the solar radiation, what makes it difficult to identify of the influence of the process variables and the constructive geometric parameters of the desalination tower. The present work presents the experimental study of thermal a desalination system prototype with heat recovery mechanism and controlled power supply to operate in transient and steady-state regimes. This prototype made possible the study of the operational parameters that influence the desalinated water production in the tower, namely, the height of the water column in the storage tank, the type of burner, the natural gas flow, the number of desalination stages, and the use of a nano film on the condensation surface. Additionally, it was possible to thermally characterize the desalination tower by determining the experimental overall heat transfer coefficient (K_1) of the simultaneous evaporation, radiation, and convection processes between the surface of the water in the tank and the condensation walls of the first stage immediately above. The desalination system consisted of a natural gas burning equipment, a tank of storage, and a tower with six desalination stages. By controlling the natural gas flow, it was possible to keep preset and constant operating temperatures. The results showed that the use of the linear burner (ideal burner) and of 6 liters of water in the tank of storage presented the best desalinated water production. They also showed that the flow of 0,533 g/min of natural gas and the use of 6 or 7 desalination stages are more adequate for tower operation. With the experimental measurements, the determination of the performance coefficient (COP) and of the gain output ratio (GOR) was possible. These values were 4,09 and 5,91, respectively. An increase of 65,59% in the desalinated water production was measured with the use of the nano film; however, chemical tests to verify possible chemical contamination were not carried out.

Keywords: thermal dessalinizador, natural gas use, operational parameters

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 – Disponibilidade e distribuição de água no planeta (CAENF, 2009).....	14
Figura 3.1 – Princípio de funcionamento MSF, adaptado de (SIDEM, 2009).....	24
Figura 3.2 – Princípio de Funcionamento MED, adaptado de (UNEP, 2009).....	25
Figura 3.3 – Princípio de Funcionamento de um dessalinizador solar de tanque, disponível em (UNEP, 2009).....	26
Figura 3.4 – Dessalinizador solar com aquecimento por coletores planos.....	27
Figura 4.1 – Dessalinizador térmico com recuperação de calor e aquecimento direto com gás natural.....	32
Figura 4.2 – Fotografia do protótipo experimental com seis estágios.....	33
Figura 5.1 – Queimador linear.....	35
Figura 5.2 – Sistema de abastecimento de gás natural.....	35
Figura 5.3 – Dessalinizador durante a fase de fabricação.....	36
Figura 5.4 – (a) Corte dos perfis; (b) geometria do corte transversal dos perfis.....	37
Figura 5.5 – Bandeja de aço inox utilizada nos estágios.....	38
Figura 5.6 – Desenho esquemático do trocador de calor.....	39
Figura 5.7 – Desenho esquemático da bancada de testes com o sistema de medições.....	40
Figura 5.8 – Fotografia da coleta de condensado por estágio.....	41
Figura 5.9 – Volume de controle do tanque de armazenamento.....	42
Figura 5.10 – Bancada de testes para o calculo da altura da coluna d’água.....	48
Figura 5.11 – Bancada de testes para a determinação da vazão.....	50
Figura 5.12 – Bancada de testes para o calculo do coeficiente de transferência de calor.....	52
Figura 6.1 – Gráfico de temperatura em função do tempo para as temperaturas da água no tanque de armazenamento 3L, 6L e 9L.....	56
Figura 6.2 – Gráfico de temperatura em função do tempo para o uso dos queimadores linear, circular e circular duplo.....	58
Figura 6.3 – Gráfico do COP e do GOR em relação ao número de estágios.....	61
Figura 6.4 – Gráfico do coeficiente de desempenho do dessalinizador (COP) em função do número de estágios.....	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Propriedades do Gás Natural (GÁS BRASILIANO GBD, 2011).....	29
Tabela 6.1 – Resultados da produção com a altura da coluna d’água no tanque de armazenamento	55
Tabela 6.2 – Comparação entre as vazões de gás natural, consumo, produção e produção/consumo	57
Tabela 6.3 – Produção de água com diferentes tipos de queimador.....	57
Tabela 6.4 – Resultado da influência do uso da nanopelícula na produção	59
Tabela 6.5 – Resultados das análises da condutividade elétrica das amostras de águas bruta e dessalinizada.....	61

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área [m^2]
COP	Coefficiente de desempenho
E	Energia [J]
\dot{E}	Taxa de energia [W]
GOR	Razão de ganho de saída
h	Coefficiente de transferência de calor [W/m^2K]
h_{fg}	Calor latente de vaporização [J/kg]
K_1	Coefficiente global de transferência de calor dos processos simultâneos de evaporação, radiação, convecção e condensação [W/m^2K]
K_2	Coefficiente de transferência de calor das perdas para o ambiente [W/m^2K]
M	Massa de condensado [kg]
\dot{m}	Taxa de transferência de massa [kg/s]
MED	Destilação de Múltiplo Efeitos
MSF	Destilação Flash de Múltiplos Estágios
n	Número de estágios
PCI	Poder calorífico inferior [$kcal/Nm^3$]
\dot{Q}	Taxa de transferência [W]
RO	Osmose Reversa
t	Tempo [min]
T	Temperatura [$^{\circ}C$]

Subscritos

a	Acumulada, armazenador
c	Condução
$circ - 1$	Queimador circular
$circ - 2$	Queimador circular duplo
$cond$	Condensação

<i>conv</i>	Convecção
<i>e</i>	Entrada
<i>evap</i>	Evaporação
<i>g</i>	Gerada
<i>GN</i>	Gás Natural
<i>lin</i>	Queimador linear
<i>met, ext</i>	Metal externo
<i>p</i>	Parede
<i>rad</i>	Radiação
<i>s</i>	Saída
<i>tanq</i>	Tanque
<i>troc, e</i>	Entrada do trocador de calor
<i>troc, s</i>	Saída do trocador de calor

Gregos

α	Absortividade
Δ	Diferença
ε	Emissividade
ϵ	Espessura
η	Rendimento
λ	Condutividade térmica [W/m. K]
σ	Constante de Stefan Boltzmann [$5,67 \times 10^{-8}$ W/m ² K ⁴]

Acrônimo

CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
LESGN	Laboratório de Energia Solar e Gás Natural
UFC	Universidade Federal do Ceará

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
3.1	Principais Tipos de Tecnologia de Dessalinização Térmica.....	23
3.2	Gás Natural.....	27
3.3	Nanopelícula.....	29
4	PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO DESSALINIZADOR	31
5	MATERIAIS E MÉTODOS	34
5.1	Componentes do Dessalinizador	34
5.2	Medições Experimentais	38
5.3	Desempenho do Dessalinizador	42
5.4	Procedimentos Experimentais	47
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	54
7	CONCLUSÕES	64
	ANEXO A - Processos de Transferência de Calor e Massa.....	70

1 INTRODUÇÃO

De toda a água encontrada nas fontes superficiais ou subterrâneas, cerca de 2,5% é doce, ou seja, possui um volume reduzido de sais que permite o seu consumo por seres humanos. Esse volume não está devidamente distribuído de forma a suprir toda a população mundial. Da quantidade total de água doce, 79,16% estão nas geleiras, ou seja, indisponíveis para o consumo humano; 20,56% estão nos aquíferos; 0,04% na atmosfera e 0,24% nos rios e lagos, que são as fontes mais utilizadas (CAENF, 2009). A Figura 1.1 mostra o gráfico em pizza da distribuição de água doce no nosso planeta.



Figura 1.1 – Disponibilidade e distribuição de água no planeta (CAENF, 2009)

O aumento da população mundial e o da poluição ocasionam uma maior demanda da necessidade de água apropriada para o consumo humano. O consumo de água potável, por sua vez, vem crescendo em um ritmo superior ao crescimento da população mundial. Para as comunidades das regiões áridas, a disponibilidade de água potável é o principal problema no que se diz respeito às condições apropriadas para a fixação dessa comunidade no meio rural.

Entre as possíveis soluções para o problema da escassez de água estão a barragem de rios para a construção de açudes e a perfuração de poços para a exploração da água existente no subsolo. Entretanto, estas duas alternativas apresentam um problema referente ao índice de salinidade da água, uma vez que com o passar dos anos a salinidade desses açudes

pode aumentar devido ao processo de evaporação da água e conseqüentemente a um possível acúmulo de sais. Uma das alternativas para contornar esse problema é a obtenção de água potável pelo tratamento da água salinizada.

A utilização de fontes alternativas de energia, como a energia solar é uma alternativa para os processos de dessalinização. Tanto o potencial solar quanto o eólico, dependendo dos recursos naturais locais, são formas ambientalmente e economicamente vantajosas de se obter energia. O Brasil é bastante favorecido por concentrar fontes naturais de energias renováveis, porém os investimentos nessa área são poucos em relação aos potenciais existentes. As regiões áridas, em particular, possuem uma intensidade elevada de radiação solar, que representa uma grande vantagem, pois não há a necessidade de combustível.

Em geral, as regiões afastadas dos grandes centros consumidores possuem certa dificuldade de acesso e de distribuição de serviços básicos, como por exemplo, a distribuição de energia elétrica e principalmente a distribuição de água potável. A necessidade da utilização do potencial energético local somado com a necessidade de obtenção de água potável faz da dessalinização solar uma vantajosa alternativa para aumentar a oferta de água apropriada ao consumo humano em regiões mais carentes.

A utilização da energia solar para a produção de água dessalinizada a partir de água salobra é uma idéia que vem sendo utilizada desde a época dos antigos egípcios, que utilizaram a energia do sol para obter água potável. Além dos egípcios, outras civilizações como a grega e a inca, idolatravam o sol e buscavam o conhecimento do seu melhor aproveitamento (DELYANNIS, 2003).

O alto nível de radiação em grande parte do território brasileiro e a necessidade de melhoria da qualidade de vida da população através do seu próprio desenvolvimento tecnológico serve como justificativas para investimentos em pesquisa em dessalinização a partir do aproveitamento da energia solar térmica.

Os dessalinizadores solares operam com uma fonte de calor variável, a radiação solar, o que dificulta a identificação da influência das variáveis de processo e dos parâmetros geométricos construtivos. Dessa forma, a motivação deste trabalho é a necessidade do estudo dos parâmetros operacionais que influenciam na produção de água dessalinizada em uma torre de dessalinização térmica com recuperação de calor. É necessário para isso um sistema com fonte de calor constante para que sua operação aconteça em regime permanente e possibilite o estudo dos parâmetros operacionais. No protótipo do dessalinizador térmico com recuperação de calor desenvolvido, a fonte de calor é a queima de gás natural em queimadores linear e

circular. A regulação da vazão de gás natural é feita por válvulas e registros, possibilitando uma temperatura de operação pré-estabelecida e constante.

O objetivo deste trabalho é o estudo experimental das variáveis e parâmetros que influenciam na produção de água dessalinizada na torre de dessalinização. As variáveis de processo avaliadas foram a temperatura no primeiro estágio da torre, a diferença de temperatura entre as bandejas e o volume de água no armazenamento. Essas variáveis influenciam diretamente a produção da torre. Os parâmetros foram: o número de estágios de dessalinização na torre, a potência de ativação (vazão de gás natural), tipo que queimador (linear, circular ou duplo circular) e o uso da nanopelícula sob as bandejas metálicas. Com os resultados experimentais, foram determinados o coeficiente global de transferência de calor na base da torre, o COP e o GOR.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- a) Elaborar os desenhos técnicos do dessalinizador – tanque, bandejas e perfis;
- b) Fabricar e montar o sistema de dessalinização;
- c) Instalar o 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.

A concepção, a fabricação, a montagem do dessalinizador, a implantação do sistema de aquisição de dados e as realizações experimentais foram feitas no Laboratório de Energia Solar e Gás Natural (LESGN) da Universidade Federal do Ceará (UFC), na cidade de Fortaleza.

Esta dissertação está dividida em sete capítulos, a saber: Introdução, Revisão Bibliográfica, Fundamentação Teórica, Princípio de Funcionamento do Dessalinizador, Materiais e Métodos, Resultados e Discussões e Conclusões.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A dessalinização térmica é utilizada desde a época dos antigos egípcios, que se utilizaram da radiação solar para obter água dessalinizada. Além deles, outras civilizações, como a grega e os incas buscavam o conhecimento da melhor forma de aproveitamento da energia solar (GARCÍA-RODRÍGUEZ, 2003). O primeiro dessalinizador do qual os resultados experimentais foram publicados só foi projetado séculos depois pelo Sr. Charles Wilson, construído em *Las Salinas* no Chile em 1872 (dessalinizador de tanque). Deste então a dessalinização é um tema que vem sendo estudado por muitos pesquisadores.

Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica sobre dessalinização térmica com recuperação de calor. Para a realização deste trabalho, é também importante uma revisão dos estudos publicados sobre as variáveis operacionais que influenciam a eficiência do dessalinizador.

Morse e Read (1968) estudaram a transferência de calor e massa em um dessalinizador de aquecimento direto. Foram analisadas algumas variáveis operacionais como: a velocidade do vento sobre a cobertura de vidro, a influência da temperatura ambiente e a perda de calor pela base do dessalinizador. A velocidade do vento e a temperatura ambiente se mostraram como variáveis relevantes na produção de água dessalinizada. A velocidade do vento pode influenciar em acréscimo de até 3% na produção de água dessalinizada, e a temperatura ambiente em até 14%.

Cooper (1973) construiu alguns destiladores solares para estudar os fatores que determinavam a eficiência de um destilador solar de simples efeito. Ele constatou que a inclinação da cobertura de vidro, a espessura da lâmina de água e o tipo de isolamento das paredes do tanque influenciavam no rendimento do sistema. Em seus resultados, Cooper observou que a eficiência de um destilador solar ideal não ultrapassava 60% e eram raras as exceções em que a eficiência de um destilador solar de tanque excedia 50%.

Proctor (1981) desenvolveu um sistema experimental de dessalinização solar. Tal sistema possuía 18,5m² de área e era composto por um tanque de concreto isolado com placa de isopor. A água era reciclada no equipamento por bomba centrífuga com capacidade de 20gal/min. O experimento apresentou resultados satisfatórios, uma vez que sua produção foi de 3 a 18 vezes maior que os destiladores convencionais.

Deronzier *et al.* (1981) desenvolveram um protótipo destilador solar especial de múltiplo efeito. O destilador era composto por um conjunto de coletores solares, que

possuíam uma área de superfície seletiva total de 270m^2 , e uma torre de evaporação com 12 estágios. O calor absorvido pelo coletor solar era transmitido para a água a ser dessalinizada através de um trocador de calor. A água evaporada era condensada em outro trocador de calor e, por fim, coletada. O primeiro estágio era mantido a temperaturas entre $80\text{-}85^\circ\text{C}$. O protótipo alcançou uma produção de $35\text{L}/\text{m}^2\cdot\text{dia}$.

Mota e Andrade (1985) projetaram um destilador solar para verificar o efeito da destilação solar sobre microrganismos patogênicos presentes na água a ser destilada, e as mudanças das características físico-químicas na mesma. Eles observaram que a destilação exterminou os microrganismos e alterou os 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.

Chendo *et al.* (1991) realizaram um estudo comparativo entre dessalinizadores de tanque usando vários tipos de enchimentos como: Pedra, carvão vegetal e tecido. A taxa de destilação no tanque aumentava na seguinte ordem: Carvão vegetal, tecido e pedras. O destilador solar com pedras apresentou produtividade máxima e, aproximadamente 4 horas após o pôr do sol, continuava produzindo água destilada. Esta produção noturna ocorria devido à alta capacidade calorífica de armazenamento de energia das pedras e à baixa temperatura ambiente, que contribuía para o aumento da taxa de condensação.

Adhikari *et al.* (1995) apresentaram um modelo de simulação computacional e desenvolveram um sistema experimental com três estágios de dessalinização para analisar o aumento da produção de água dessalinizada com o aumento do número de estágios num dessalinizador térmico com recuperação de calor. Um programa computacional foi desenvolvido para prever o valor da temperatura da água no estado estacionário em cada estágio de dessalinização e suas correspondentes produções de água dessalinizada. Os resultados obtidos com a modelagem computacional mostraram uma boa concordância com os experimentos realizados.

Rodríguez *et al.* (1999) apresentaram estudos econômicos da utilização de um coletor solar parabólico na geração de vapor para um dessalinizador. O fluido térmico utilizado foi água pura, que ao ser aquecida pelos raios convergentes do coletor parabólico, circulou na tubulação por processo de termossifão. O vapor gerado acionava uma unidade de destilação com recuperação de calor, onde o vapor era condensado e coletado. O sistema apresentou uma menor perda de exergia, além de um desempenho consideravelmente maior, tendo uma produção diária média de $12,0\text{m}^3$ de água dessalinizada por m^2 de coletor solar.

García-Rodríguez e Gómez-Camacho (1999) apresentaram uma análise termodinâmica da influência na produção de água destilada com a variação dos parâmetros operacionais de um sistema de destilação térmica de multi-efeito ligado a um coletor solar parabólico. O sistema funcionava com o aquecimento de um óleo sintético que fluía em um tubo que passa pelo foco de um concentrador parabólico. Como o uso de um trocador de calor, esse óleo transfere calor para a água a ser dessalinizada. Os parâmetros estudados foram: a altura solar, o eixo azimutal do coletor, o azimute das linhas de campo, a distância entre os coletores e o número de coletores. Os resultados mostraram que o azimute da linha de campo pode aumentar em até 23% a produção de água dessalinizada. A altura ideal do eixo para um coletor único é de 29° e pode aumentar a produção em até 12%.

Lima (2000) apresentou uma análise térmica e os resultados experimentais de um sistema dessalinização solar térmico com recuperação de calor. Foram apresentados os resultados das análises físico-químicas e bacteriológicas da água antes e após a dessalinização. O sistema é composto por coletores solares e uma torre com seis estágios de dessalinização. Em funcionamento, a energia proveniente do sol era absorvida pelos coletores que aqueciam o fluido de trabalho (óleo vegetal), que fluía através de uma tubulação de cobre. Ao entrar na torre de dessalinização o fluido de trabalho transferia calor para a água salobra através de um trocador de calor. Os resultados analíticos mostraram que o processo de dessalinização reduziu a alcalinidade, pH, cor, teor de cloretos e a condutividade elétrica da água dessalinizada. Foi observado que a dessalinização solar eliminou todas as bactérias dos grupos Coliformes Totais e do grupo Coliformes de origem fecal. O dessalinizador alcançou uma temperatura de 80°C no primeiro estágio e obteve uma eficiência experimental de 25%.

Schwarzer *et al* (2001) apresentaram um estudo teórico e experimental de uma torre de dessalinização térmica com recuperação de calor que funcionava com o aquecimento de um óleo que entrava em um trocador de calor e aquecia a água a ser dessalinizada. No trabalho foram apresentadas as equações de balanço de massa e de energia para o processo de dessalinização térmica, além dos resultados de uma simulação numérica para a produção de água potável e um estudo experimental em um dessalinizador solar térmico instalado na costa nordeste do Brasil. O dessalinizador era composto por um coletor solar ligado ao trocador de calor e uma torre de dessalinização com seis estágios com bandejas de 15° de inclinação. Os resultados numéricos mostraram que a taxa de produção poderia chegar a 25l/m²/dia, que é cinco vezes maior que a taxa de produção de um dessalinizador solar com aquecimento direto.

García-Rodríguez (2003) apresentou um trabalho sobre estado da arte em aplicações de energias renováveis em dessalinização. Ele apresentou uma descrição das

tecnologias industriais de dessalinização, além de uma revisão das fontes de energias renováveis aplicadas à dessalinização e as perspectivas futuras para as aplicações destas energias renováveis, focando principalmente os processos de membrana que funcionam utilizando células fotovoltaicas e energia eólica.

Delyannis (2003) apresentou um trabalho sobre a história da dessalinização e das energias renováveis através dos séculos. Ele iniciou seu relato citando um processo de dessalinização descrito no antigo testamento (Êxodo 15, 22-25). Depois foi apresentada a destilação nos períodos medieval, renascimento e século XX, findando nos dias atuais. Ele também descreveu algumas tecnologias de aproveitamento de energias renováveis, tais como: a utilização da energia eólica e solar para a produção de energia elétrica.

Coutinho (2003) apresentou os resultados analíticos, numéricos e experimentais de um dessalinizador solar com recuperação de calor. O protótipo era composto por um coletor solar com refletores espelhados planos e uma torre de dessalinização com seis estágios. A ligação entre essas unidades foi feita por uma tubulação na qual escoava um fluido térmico em convecção natural, que transportava calor do coletor solar para a torre de dessalinização, onde, através de um trocador de calor, aquecia a água a ser dessalinizada (água salobra e salgada). Os resultados das análises físico-químicas mostraram que o processo de dessalinização reduziu a cor, o pH, a turbidez, a condutividade elétrica, o teor de sólidos totais dissolvidos, a dureza total e o teor de cloreto da água dessalinizada. Foi observado que a dessalinização solar eliminou todas as bactérias dos grupos Coliformes Totais e do grupo Coliformes de origem fecal. Observou-se que a temperatura da água no primeiro estágio da torre de dessalinização alcançou valores próximos de 90°C e que a eficiência experimental global do dessalinizador foi de 22%.

Tanaka *et al.* (2004) desenvolveram um protótipo dessalinizador térmico com recuperação de calor onde a fonte de calor utilizada foi um conjunto de lâmpadas de aquecimento, que simularam a radiação solar constante, sendo possível operar em regime permanente. O dessalinizador era bastante compacto. O mesmo possuía um coletor térmico que recebia a radiação emitida pelas lâmpadas e aquecia a água a ser dessalinizada na torre. Os resultados experimentais mostraram que a taxa de produção global foi cerca de 93% maior do que o previsto.

Badram (2007) desenvolveu um dessalinizador solar para os desertos áridos da Jordânia no qual pôde estudar os parâmetros operacionais do dessalinizador. O dessalinizador era composto por uma única cobertura de vidro de 4mm de espessura e 1,46m² de área com uma inclinação de 32° com a horizontal e um tanque com 5 cm de altura e 1m² de área. O tanque

tinha uma absorção elevada à radiação solar. Nesse estudo observou-se a influência de diferentes condições na produtividade do dessalinizador, tais como a temperatura ambiente, o isolante térmico, a velocidade do vento sobre a cobertura de vidro e a altura da coluna d'água no tanque de armazenamento. Os resultados mostraram que o aumento da velocidade do vento de 2,7 para 5,0m/s resultou em um aumento da produção em 26%, enquanto foi registrado um aumento de produtividade de 53% quando a temperatura ambiente teve um aumento de 28°C para 32°C. A diminuição da altura da coluna d'água de 3,5 para 2cm contribuiu em aumentou em 26% na produtividade, enquanto o revestimento de asfalto ocasionou um aumento de 29% na produção.

Mathioulakis *et al.* (2007) apresentaram uma revisão e o estado da arte em dessalinização com ênfase em energia solar. Eles descreveram e apresentaram alguns valores das diversas tecnologias de dessalinização, citaram ainda plantas de dessalinização com altas capacidades de produção de 130 a 200.000 L/dia.

Schwarzer *et al.* (2008) aperfeiçoaram o protótipo de dessalinização solar térmica com recuperação de calor composto por uma torre de dessalinização com múltiplos estágios com bandejas de 16° de inclinação e um ou mais coletores. Os coletores solares foram utilizados para absorver energia solar e aquecer a água a ser dessalinizada. Quatro sistemas foram testados na Alemanha, Espanha, Índia e Brasil. Os testes de campo mostraram que o sistema produz cerca de 15 a 18L/m².dia, o que representa 5 a 6 vezes mais que a produção de um destilador de aquecimento direto. O estudo também mostrou que o numero ideal de estágios de recuperação de calor varia de 5 a 7 estágios.

Alves (2009) apresentou um sistema de captação de energia solar fabricado para o aquecimento de uma torre térmica de dessalinização com recuperação de calor e com uma modificação na distribuição de água quente no tanque de armazenamento de calor da torre. O sistema de captação de energia solar era formado por coletores solares térmicos de placa plana para altas temperaturas e foi responsável pela captação de radiação solar e pela conversão em energia térmica para o aquecimento da água a ser dessalinizada. A modificação realizada consistia na instalação de um tubo de aço inoxidável, no qual foram feitos furos passantes igualmente espaçados ao longo do seu comprimento, de forma a permitir uma melhor distribuição de água quente no tanque de armazenamento de calor. Os resultados mostraram que o dessalinizador apresentou desempenho térmico satisfatório. A temperatura no tanque de armazenamento alcançou valores próximos de 85°C e as temperaturas da água na saída dos coletores ficaram próximas a 100°C, obtendo uma produção diária de 31 litros e o valor do GOR (razão de ganho na saída) foi de 1,54.

Tanaka e Nakatake (2009) apresentaram uma análise teórica de uma unidade de dessalinização térmica com um refletor plano externo e concluíram que é possível aumentar a produção de água dessalinizada a partir da instalação de um refletor com uma determinada inclinação. Apresentam como resultado o aumento de produção de 4L/m²dia para uma unidade sem refletor e uma produção de 5L/m²dia para uma unidade com um refletor inclinado de 15°.

Khalifa e Hamood (2009) apresentaram um estudo que foi conduzido de forma a verificar a tendência da queda da produção de água dessalinizada com o aumento da profundidade da camada de salmoura. Utilizando resultados experimentais e teóricos de vários autores com uma produção variando entre 1,5 e 3,5 L/m²dia, desenvolveu-se uma correlação para cada um desses estudos. Um estudo experimental foi posteriormente conduzido para verificar esta tendência. Um dessalinizador solar foi construído e testado com cinco lâminas de água salgada diferentes, 1, 4, 6, 8 e 10cm. O estudo validou esta tendência da redução da produção com o aumento da lâmina d'água salgada ou salobra, e ainda mostrou que tal parâmetro pode influenciar em até 48% na produção de água dessalinizada.

Rodrigues (2010) apresentou o estudo do desempenho de uma torre de recuperação de calor para operar com um dessalinizador solar que pudesse ser utilizado para a produção descentralizada de água potável. O dessalinizador solar estudado possuía duas unidades básicas: a unidade de aquecimento, que era composto por um coletor de tubos evacuados, e a unidade de dessalinização. A torre de recuperação de calor possuía cinco estágios de dessalinização e apresentou bons resultados alcançando uma produção diária de 35 litros de água dessalinizada. Os parâmetros de desempenho foram calculados e alcançados os valores de 1,26, para o GOR do dessalinizador e 4,78 para o COP. O trabalho apresenta ainda o desenvolvimento de uma correlação para o número de Sherwood, desenvolvida a partir de uma unidade sob condições de temperatura controladas em laboratório, como modelo de referência para o desempenho de torres de recuperação de calor.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo está dividido em três seções. Na primeira seção estão apresentados os principais tipos de tecnologia de dessalinização térmica (fundamentos da dessalinização), na segunda seção os fundamentos da transferência de calor e massa e na terceira, informações sobre o gás natural.

3.1 Principais Tipos de Tecnologia de Dessalinização Térmica

A dessalinização é um processo de separação das moléculas de água das moléculas do sal. Existem várias formas de dessalinização, mas o resultado final é sempre a produção de água potável. Os principais processos de dessalinização são: dessalinização térmica e por osmose reversa.

O dessalinizador de osmose reversa (*Reverse Osmosis* - RO) utiliza uma membrana como agente separador. Tal membrana possui a característica de permitir a passagem das moléculas de água e de reter as moléculas de sais. Esse dessalinizador é formado por um conjunto de bombas de alta pressão, uma fonte elétrica para o acionamento dessas bombas, um conjunto de membranas semipermeáveis e filtros de cartuchos que podem ser de carvão ativado, celulose, antracito e material desferrizante, conforme a necessidade de remover os elementos indesejáveis contidos na água a ser dessalinizada. As vantagens desse tipo de tecnologia são as altas taxas de produção de água dessalinizada e a boa qualidade da água produzida. As desvantagens são os altos custos de instalação e manutenção (GARCÍA-RODRIGUEZ, 2003).

A dessalinização por osmose reversa pode ser caracterizada pela conversão de energia solar em elétrica, que aciona bombas de alta pressão e pela utilização de membranas de filtração.

Na dessalinização térmica o agente de separação é o calor que pode ser proveniente de várias formas. O presente trabalho estudou apenas nesse tipo de tecnologia.

Dessalinização de Múltiplos Estágios - Flash (Multistage flash - MSF)

A Destilação Flash de Múltiplos Estágios (*Multistage flash* - MSF) e a Destilação de Múltiplos Efeitos (*Multieffect distillation* - MED) são processos de dessalinização térmica constituídos por estágios sucessivos, onde há um decréscimo de suas temperaturas e pressões.

O processo de MSF é baseado na geração de vapor a partir da água salobra, ao entrar em uma câmara evacuada, onde a pressão é bruscamente diminuída. Esse processo é repetido em sucessivos estágios, com sucessivas quedas de pressão. Nesse processo a água a ser dessalinizada é aquecida em uma tubulação enquanto passa por uma série de estágios de dessalinização. Um aquecedor superaquece a água sob alta pressão. Ao ser derramada sobre uma coluna aberta com pressão mais baixa, a água salgada entra instantaneamente em ebulição, enviando o vapor de água pura para parte superior da coluna. O vapor condensado entra pelos coletores. A coluna seguinte tem pressão ainda mais baixa. Dessa maneira, a água salgada remanescente entra novamente em ebulição instantânea, e assim por diante até o último estágio.

A Figura 3.1 mostra um desenho esquemático do princípio de funcionamento de um Destilador de Múltiplo Efeito.

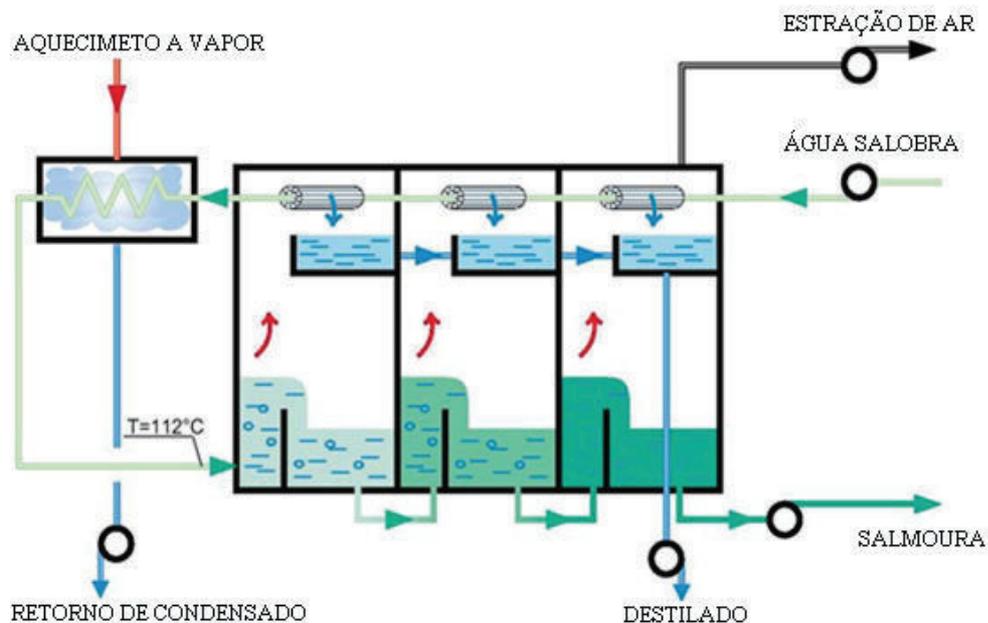


Figura 3.1 – Princípio de funcionamento MSF, adaptado de (SIDEM, 2009)

Destilação de Múltiplos Efeitos (*Multieffect distillation - MED*)

O processo de MED baseia-se na geração de vapor a partir da absorção de energia térmica pela água salobra. O vapor produzido em um estágio gera vapor no estágio seguinte, que se encontra em temperatura e pressão inferiores. O desempenho deste processo é diretamente proporcional ao número de estágios. Existe um sistema com essa tecnologia instalada em Abu Dhabi nos Emirados Árabes Unidos operando com 18 estágios e coletores de tubo evacuado. Sua capacidade é de 120m³/dia. As plantas deste processo normalmente utilizam uma fonte externa de vapor em uma temperatura em torno de 70°C (GARCÍA-RODRÍGUEZ, 2003). A Figura 3.2 mostra o princípio de funcionamento um sistema de destilação de múltiplos efeitos.

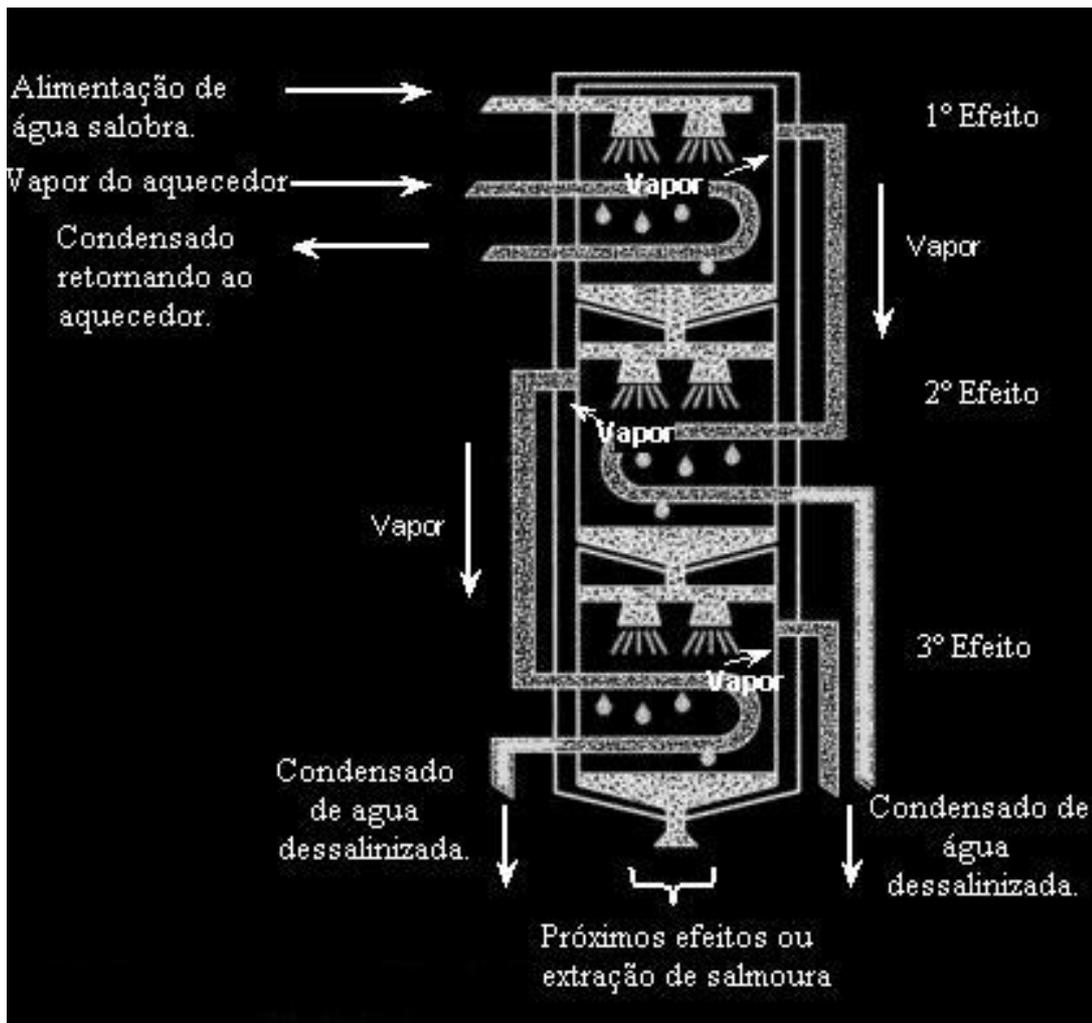


Figura 3.2 – Princípio de Funcionamento MED, adaptado de (UNEP, 2009)

Destilação Solar Térmica

Na dessalinização solar térmica o agente de separação é o calor proveniente da radiação solar, captada por coletores e/ou concentradores. A obtenção de água purificada, na dessalinização solar térmica, é baseada na evaporação da água salobra (ou salgada) por meio de aquecimento, sem necessariamente provocar sua ebulição. Essa é a grande vantagem desse processo, pois durante a ruptura da molécula de água na ebulição, poder-se-ia arrastar íons indesejáveis dos sais para o vapor a ser condensado.

Um dessalinizador solar pode ter acionamento direto ou indireto.

O dessalinizador de tanque é um exemplo de dessalinizador solar com aquecimento direto, uma vez que a radiação solar é usada diretamente para aquecer a água a ser dessalinizada, como mostra a Figura 3.3. Nesse sistema a água a ser dessalinizada é aquecida diretamente pela radiação solar, fazendo com que sua temperatura se eleve facilitando sua evaporação. A água evaporada é condensada sob a cobertura de vidro, onde a água escoará e será coletada.

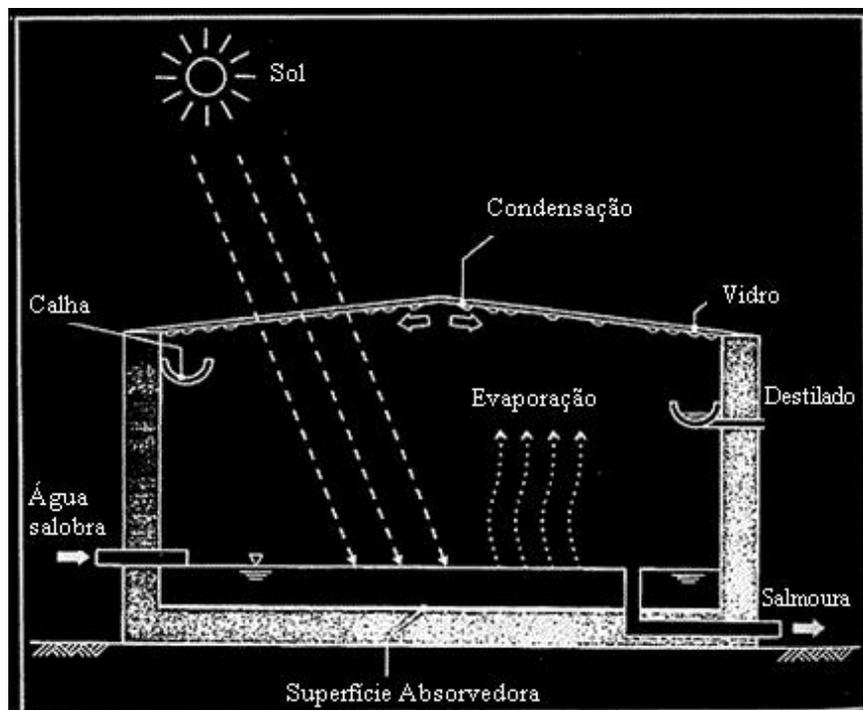


Figura 3.3 – Princípio de Funcionamento de um dessalinizador solar de tanque, disponível em (UNEP, 2009)

O dessalinizador de recuperação de calor é um exemplo de um dessalinizador solar com aquecimento indireto. Nesse tipo de dessalinizador um fluido térmico transporta o calor absorvido de um coletor solar para uma unidade de dessalinização. A Figura 3.4 mostra uma fotografia de um dessalinizador solar térmico com recuperação de calor com aquecimento por coletores planos.



Figura 3.4 – Dessalinizador solar com aquecimento por coletores planos

3.2 Gás Natural

Da mesma maneira que os demais combustíveis fósseis, o gás natural é uma mistura de hidrocarbonetos gasosos, originados da decomposição de matéria orgânica fossilizada ao longo de milhões de anos. Em temperatura e pressão atmosférica ambiente, o gás natural permanece no estado gasoso. Em seu estado bruto, o gás natural é composto principalmente por metano, com proporções variadas de butano, propano, etano hidrocarbonetos mais pesados e também CO_2 , N_2 , H_2S , água, ácido clorídrico, metanol e outras impurezas (SANTOS, 2007).

Além do uso básico da indústria gasoquímica, o gás natural tem se mostrado cada vez mais competitivo em relação a vários outros combustíveis, tanto no setor industrial como no de transporte e na geração de energia elétrica. O gás natural apresenta vantagens como

possibilitar uma combustão com elevado rendimento térmico, bem como o controle e regulação simples da chama.

As principais propriedades do gás natural são a sua densidade em relação ao ar, o índice de Wobbe, os teores de carbono, CO₂, hidrogênio, oxigênio e compostos sulfurosos, e o poder calorífico. Outras características intrínsecas importantes são os baixos índices de emissão de poluentes, em comparação a outros combustíveis fósseis, rápida dispersão em caso de vazamentos, os baixos índices de odor e de contaminantes.

A densidade de um gás combustível é uma característica importante sob o ponto de vista da segurança. Os gases com densidades superiores à do ar atmosférico, no caso de vazamento ou drenagem, apresentam a tendência de se acumularem temporariamente em regiões baixas. Já os gases mais leves que o ar, ao serem liberados na atmosfera, tendem a subir e se acumular temporariamente em partes elevadas como abóbadas e ou se infiltrarem em aberturas superiores nas edificações. O acúmulo de gases combustíveis em ambientes confinados ou mal ventilados pode causar um acidente desde que ocorra uma condição de ignição, daí a importância da densidade relativa ao ar ser uma propriedade importante para o gás natural (KRONA, 2011).

O índice de Wobbe, também chamado de Número de Wobbe, é usado para comparar a energia produzida pela combustão de diferentes gases num determinado equipamento. Ele representa o calor fornecido pela queima de gases através de um orifício submetido a pressões constantes, a montante e a jusante desse orifício. A pressão do gás a montante do orifício é aquela fornecida ao queimador e a pressão a jusante é a da câmara de combustão, normalmente a pressão atmosférica ou valores próximos dela, positivos ou negativos (KRONA, 2009). Se PCS for o Poder Calorífico Superior (valor calorífico) e G_s o peso específico do gás natural, o índice de Wobbe, I_W , é definido como

$$I_W = \frac{PCS}{\sqrt{G_s}} \quad (1)$$

O poder calorífico de combustíveis é definido como a quantidade de energia interna contida no combustível. Há dois tipos de poder calorífico: o poder calorífico superior e o poder calorífico inferior (GASNET, 2011).

Poder Calorífico Superior (P.C.S.): O poder calorífico superior é a quantidade de calor produzida por 1 kg de combustível, quando este entra em combustão, em excesso de ar, e os gases da descarga são resfriados de modo que o vapor de água neles seja condensado.

Poder Calorífico Inferior (P.C.I.): O poder calorífico inferior é a quantidade de calor que pode produzir 1kg de combustível, quando este entra em combustão com excesso de ar e gases de descarga são resfriados até o ponto de ebulição da água, evitando assim que a água contida na combustão seja condensada.

Para combustíveis que não contenham hidrogênio na sua composição, o valor de PCS é igual ao do PCI, porque não há a formação de água e conseqüentemente não há energia gasta na sua vaporização. O PCS e o PCI são medidos em unidades de energia por unidade de substância, geralmente massa, tais como: kcal/kg, kJ/kg, J/mol.

Tabela 3.1 - Propriedades do Gás Natural (GÁS BRASILIANO GBD, 2011)

Propriedade	Média
Poder Calorífico Superior (kcal/Nm ³)	9,958
Poder Calorífico Inferior (kcal/Nm ³)	8,993
Densidade Relativa (Ar = 1)	0,602
Número de Wobbe Superior*	13307
Número de Wobbe Inferior*	12043

* dados do gás natural da cidade de Santos – SP (GASNET, 2011).

3.3 Nanopelícula

Para facilitar o escoamento de condensado nas bandejas, películas ou outros materiais vêm sendo estudados no sentido de diminuir as perdas no processo de escoamento. Foi encontrada no mercado europeu uma nano película usada para o revestimento de vidro automotivo e tecidos. Esse revestimento se deve a um material baseado em nanotecnologia que ao ser aplicado sobre uma superfície cristalina cria um gesto de rejeição contra a água e líquidos oleosos, facilitando assim a remoção de impurezas nos cristais. Quando aplicado em tecidos esse material envolve cada fibra com revestimento antiaderente, como resultado, a

terra seca não pode aderir aos materiais, e líquidos não podem ser absorvidos pelas fibras, facilitando assim o seu escoamento (NANO SOLUCIONES, 2010).

4 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO DESSALINIZADOR

A dessalinização é comumente realizada através de dois processos: térmico e mecânico. Na dessalinização térmica, o agente de separação é o calor. Na dessalinização mecânica, bombas de alta pressão forçam fluxos de água salgada através de filtros que capturam as partículas de sais e minerais, deixando passar apenas a água pura (osmose reversa).

A dessalinização térmica da água salgada é um processo de separação que consiste na evaporação das moléculas de H_2O da água salgada, seguido de um processo de condensação sob uma superfície fria, onde escoa e é coletada. A água evaporada, ao entrar em contato com a bandeja do dessalinizador (superfície fria), condensa devido à diferença de temperatura com essa superfície, escoa pelas paredes inclinadas da bandeja e por canais laterais de escoamento de condensado, para ser coletada no exterior da torre. Na dessalinização solar, a energia térmica necessária para o processo de evaporação é obtida com a captura da energia proveniente do sol através do uso de coletores ou através de aquecimento direto da água a ser dessalinizada. No presente trabalho, diferentemente do dessalinizador solar, o calor necessário para o processo de dessalinização térmica foi obtido com a queima do gás natural. Como a queima de gás natural é controlada, é possível operar com uma fonte de calor constante, fazendo com que o sistema alcance o regime permanente.

O protótipo do dessalinizador térmico com recuperação de calor e aquecimento direto com gás natural possui duas unidades: Uma de aquecimento e uma de dessalinização. A unidade de aquecimento, composta por queimador e um cilindro de gás natural, é responsável pelo aquecimento do fluido de trabalho (água salobra ou salgada). A unidade de dessalinização é composta por um tanque de armazenamento com isolamento térmico de lã de vidro, por uma torre de dessalinização de seis estágios e por um sistema de coleta de água dessalinizada.

A Figura 4.1 mostra o desenho esquemático do protótipo. Na parte inferior da Figura 4.1 está a unidade de aquecimento, composta pelo queimador e pela fonte de gás natural. Sobre o queimador, está a unidade de dessalinização, composta pelo tanque e pela torre de dessalinização com bandejas metálicas horizontalmente dispostas.

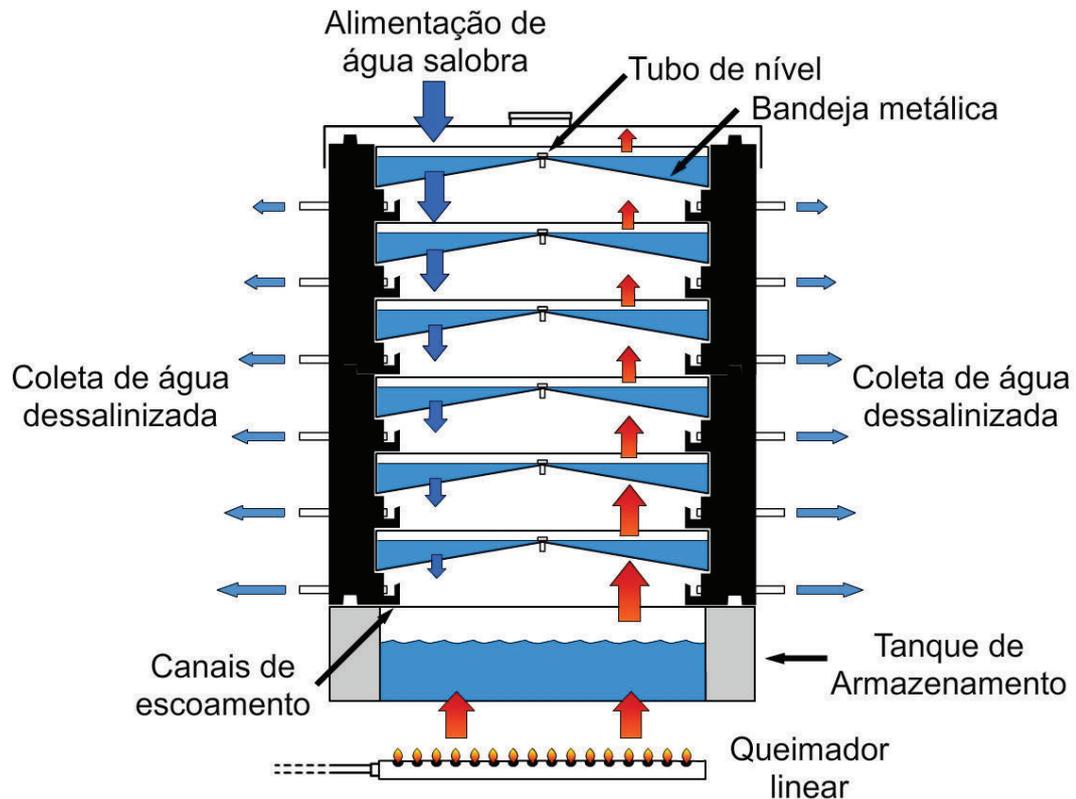


Figura 4.1 – Dessalinizador térmico com recuperação de calor e aquecimento direto com gás natural

A unidade de aquecimento fornece energia necessária para realizar e acelerar o processo de evaporação, pelo aumento da temperatura da água a ser dessalinizada. A energia fornecida é proveniente da queima de gás natural no queimador que é transmitido ao tanque de armazenamento e em seguida para a água a ser dessalinizada.

A alimentação do sistema é de forma descendente, ou seja, o estágio superior é alimentado até seu limite máximo. Devido a um tubo de nível na bandeja metálica, a água excedente da bandeja superior escoar para a bandeja inferior, até a alimentação chegar ao tanque de armazenamento. Ao instalar as bandejas metálicas nos perfis de poliuretano, é importante o cuidado para evitar que os furos das bandejas sejam alternados durante a montagem, para garantir o total enchimento da bandeja e melhor escoamento da água bruta.

Em seu funcionamento, a água salobra é aquecida no tanque, onde é evaporada e transfere calor para a água da bandeja imediatamente superior ao condensar nessa superfície, que funciona como uma superfície fria. O calor recebido por esse estágio é utilizado para aquecer a água salobra nessa bandeja e o processo de recuperação se repete para os demais estágios. Devido à inclinação das bandejas metálicas, o vapor d'água condensado escoar pelas paredes inclinadas dos estágios e é coletado em um reservatório externo à torre de

dessalinização. No balanço de energia, o calor liberado pela queima do gás natural é usado no aquecimento da água salobra ou perdido para o ambiente. No tanque de armazenamento de água salobra, parte do calor é transferida por evaporação, convecção e radiação para a superfície da bandeja superior, parte é usada no aquecimento da própria água quando em operação em regime permanente, parte é perdida através das gotas de água dessalinizada coletada, parte pela perda de vapor e através das paredes do armazenador.

A Figura 4.2 mostra uma fotografia do protótipo do dessalinizador, instalado em uma bancada móvel. Nessa fotografia, o queimador utilizado foi o de um fogão comercial para gás de cozinha (butano) com dois queimadores que foram modificados para operação com gás natural. Ao lado do dessalinizador está mostrado o cilindro de abastecimento de gás natural. Os componentes do dessalinizador estão descritos no Capítulo 5.



Figura 4.2 – Fotografia do protótipo experimental com seis estágios

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta os materiais e métodos usados no desenvolvimento e na fabricação 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 no tanque de armazenamento (K_1) na torre de dessalinização, necessárias à caracterização do desempenho térmico do dessalinizador.

5.1 Componentes do Dessalinizador

O dessalinizador pode ser dividido em duas unidades, uma de aquecimento e outra de dessalinização.

A unidade de aquecimento é formada por um ou mais queimadores e um sistema de abastecimento de gás natural.

O queimador é o componente da unidade de aquecimento responsável pela manutenção de uma chama estável sob o sistema de dessalinização, através da queima de gás natural. Três tipos de queimadores foram estudados: um queimador linear, um circular e um circular duplo. O queimador linear, também chamado de queimador tipo flauta, tem 50cm de comprimento, 19mm de diâmetro e 43 orifícios com 10mm de espaçamento entre eles. Esse queimador foi projetado e fabricado em projeto do LESGN, e mais informações podem ser encontradas em Holanda (2006). A Figura 5.1 mostra uma fotografia do queimador linear utilizado com seu suporte de apoio.

Foi feita uma alteração no ejetor de um fogão comercial de duas bocas para queimar com gás natural. Esse fogão foi utilizado como queimador circular simples e circular duplo. Cada queimador circular possui 34 orifícios distribuídos numa circunferência de 52mm de diâmetro. A distância entre os queimadores era de 25cm.

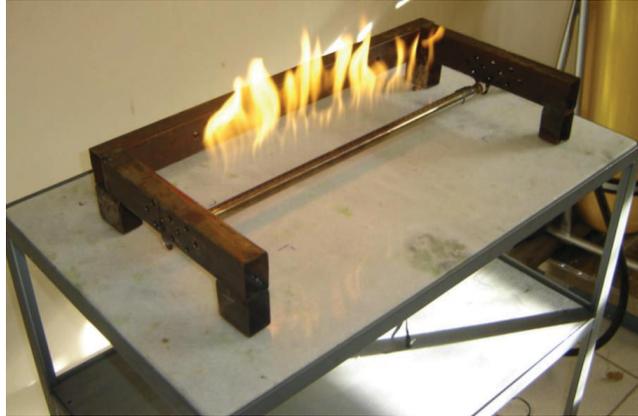


Figura 5.1 – Queimador linear

O sistema de abastecimento de gás natural é formado por um cilindro de gás natural ISO 4705, por uma válvula de esfera, por um regulador de vazão com indicação de pressão e por um medidor de volume ACTARIUS GALLUS 1000. O cilindro de abastecimento de gás natural foi uma adaptação do sistema automotivo de gás natural. Esse sistema foi desenvolvido por firma comercial local e outras informações podem ser encontradas em Medeiros (2003). A Figura 5.2 mostra uma fotografia do sistema de abastecimento de gás natural.



Figura 5.2 – Sistema de abastecimento de gás natural

A unidade de dessalinização é composta por um tanque de armazenamento de água e seis estágios de recuperação de calor, com uma bandeja metálica em cada estágio.

O tanque de armazenamento de água foi fabricado em aço inoxidável AISI 304 de 3 mm de espessura. Suas dimensões são de 52cm de comprimento, 27cm largura e 10cm de altura. O tanque foi envolvido por um isolamento lateral de 5 centímetros de espessura de lã de vidro envolto por chapas de aço inoxidável de 1 mm de espessura, o que fez com que o tanque de armazenamento adquirisse dimensões finais de 62cm de comprimento, 37cm de largura e 10cm de altura.

Os estágios de dessalinização são formados por canais de escoamento de poliuretano e uma bandeja de aço inoxidável por estágio. O poliuretano funciona também como isolante térmico e sua espessura é de 5cm.

Diferentemente de um dessalinizador solar, onde a água é aquecida através de um coletor solar e levada ao tanque em tubulação de circuito de sifão térmico, o aquecimento do dessalinizador a gás natural é feito através da face inferior do tanque, na queima do gás natural que tem como principal função fornecer a energia necessária para o processo de evaporação.

O tanque de armazenamento e as bandejas são de aço inoxidável para diminuir o processo de corrosão devido ao contato direto do aço com a água salina.

A Figura 5.3 mostra uma fotografia do dessalinizador durante sua fabricação. Estão mostrados o tanque de armazenamento de água e os seis perfis de poliuretano, onde é possível observar os canais de escoamento de condensado.



Figura 5.3 – Dessalinizador durante a fase de fabricação

Perfil de Poliuretano

Os perfis de poliuretano funcionam como instrumentos de coleta de condensado e como isolantes térmicos laterais. As propriedades isolantes desse material ajudam na redução de perdas da energia interna dos estágios, permitindo um maior aproveitamento do calor que seria perdido para o ambiente.

A geometria dos perfis de poliuretano foi previamente estudada e esses foram fabricados na Alemanha. Essa geometria tem o intuito de minimizar as perdas por vazamento de vapor de água.

Os perfis foram cortados com intuito de formarem unidades retangulares de 62cm de comprimento por 37cm de largura. Para uma união mais eficiente, fizeram-se cortes de 45° nas extremidades dos perfis, como mostra a Figura 5.4a. Para a fixação dos quatro perfis do estágio foram usados parafusos, cola e silicone. Há duas calhas no perfil, uma onde é apoiada a bandeja desse estágio e a outra para o escoamento de condensado. A Figura 5.4b mostra o corte transversal do perfil, onde é possível observar as duas calhas. Um tubo de cobre faz a coleta externa de condensado. Para evitar perda de vapor entre um perfil e outro, isolou-se o contato entre os dois perfis com borracha elastomérica adesiva.

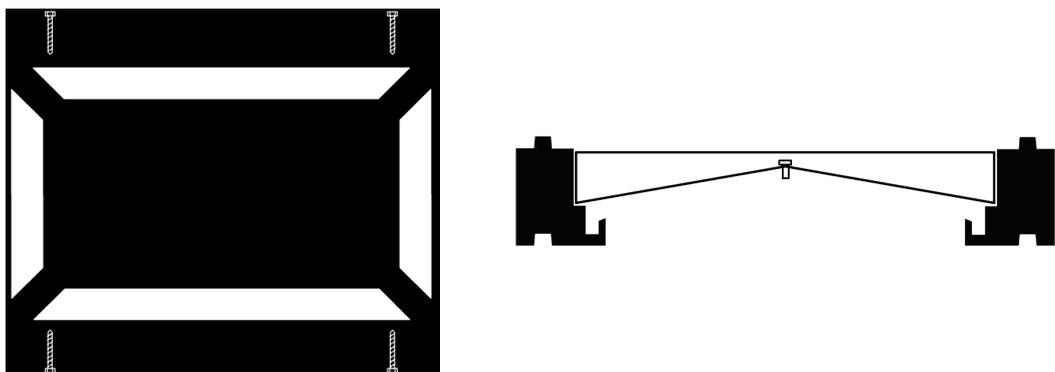


Figura 5.4 – (a) Corte dos perfis; (b) geometria do corte transversal dos perfis

Bandeja Metálica

Cada um dos seis estágios possui uma bandeja de aço inoxidável de 1,2 mm de espessura. As bandejas têm 52 cm de comprimento, 27,5 cm de largura e 4,5 cm de altura. As

bandejas metálicas foram fabricadas em aço inoxidável AISI 304. As chapas de aço inoxidável foram cortadas, dobradas e soldadas. A fabricação das bandejas foi realizada na Oficina Mecânica da UFC com o uso de máquinas de corte, de solda, furadeira e viradeira. Outras bandejas produzidas anteriormente a essas apresentaram deformações após do processo de soldagem das tampas laterais, que provocaram uma curvatura. Para contornar esse problema, usaram-se apenas pontos de solda com um espaçamento de 5cm. Esse procedimento se mostrou eficaz, uma vez que as bandejas adquiriram a geometria planejada. Para evitar vazamento de água, vedaram-se as bandejas com silicone.

Para o controle do nível de água há em cada bandeja um tubo de nível, que também é usado na alimentação da torre. Na instalação das bandejas, os tubos de nível foram instalados em lados alternados para possibilitar um melhor enchimento durante a alimentação do sistema.

A Figura 5.5 mostra uma fotografia da bandeja metálica, onde está indicado o tubo de nível. A inclinação de 10° da bandeja (ângulo da superfície de condensação) permite que o condensado escoe para o perfil de poliuretano, onde é coletado.



Figura 5.5 – Bandeja de aço inox utilizada nos estágios

5.2 Medições Experimentais

A fim de que fossem realizadas as medições experimentais para estudo dos parâmetros operacionais que influenciam na produção de água no dessalinizador térmico, foi

montada uma bancada de testes composta por um sistema de aquisição de dados com equipamentos e sensores, um trocador de calor e o sistema de alimentação e controle de gás natural.

Trocador de Calor

O uso de um trocador de calor tem o objetivo de possibilitar a realização de experimentos com o controle e a manutenção de temperaturas pré-estabelecidas. Com o seu uso foi possível realizar experimentos para a determinação do volume de água no tanque de armazenamento, para o cálculo do coeficiente global de transferência de calor do tanque e para a determinação da influência da nanopelícula.

O trocador de calor foi fabricado e instalado na bandeja superior, de forma a controlar sua temperatura e proporcionar temperaturas aproximadamente uniformes na superfície de condensação.

O vazão no trocador de calor era de água da rede de distribuição com vazões que variavam de 53,20 a 55,55ml/s. O trocador era constituído por oito tubos de cobre de 152cm de comprimento, 10mm de diâmetro, 0,6mm de espessura e por sete curvas com 10cm de raio de curvatura. A Figura 5.6 mostra um desenho esquemático do trocador de calor utilizado nos experimentos.

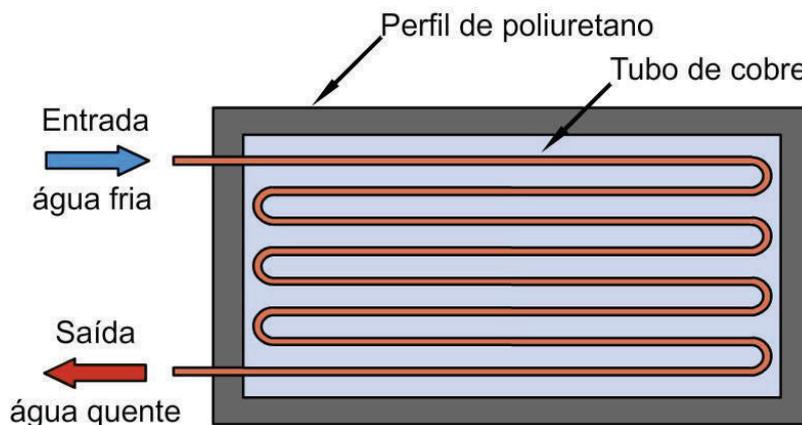


Figura 5.6 – Desenho esquemático do trocador de calor

O sistema de medições e de coleta de dados é composto por uma balança de precisão, um coletor de dados, termopares do tipo K e T e um medidor de vazão. A Figura 5.7 mostra o desenho esquemático da bancada de testes com o sistema de medições.

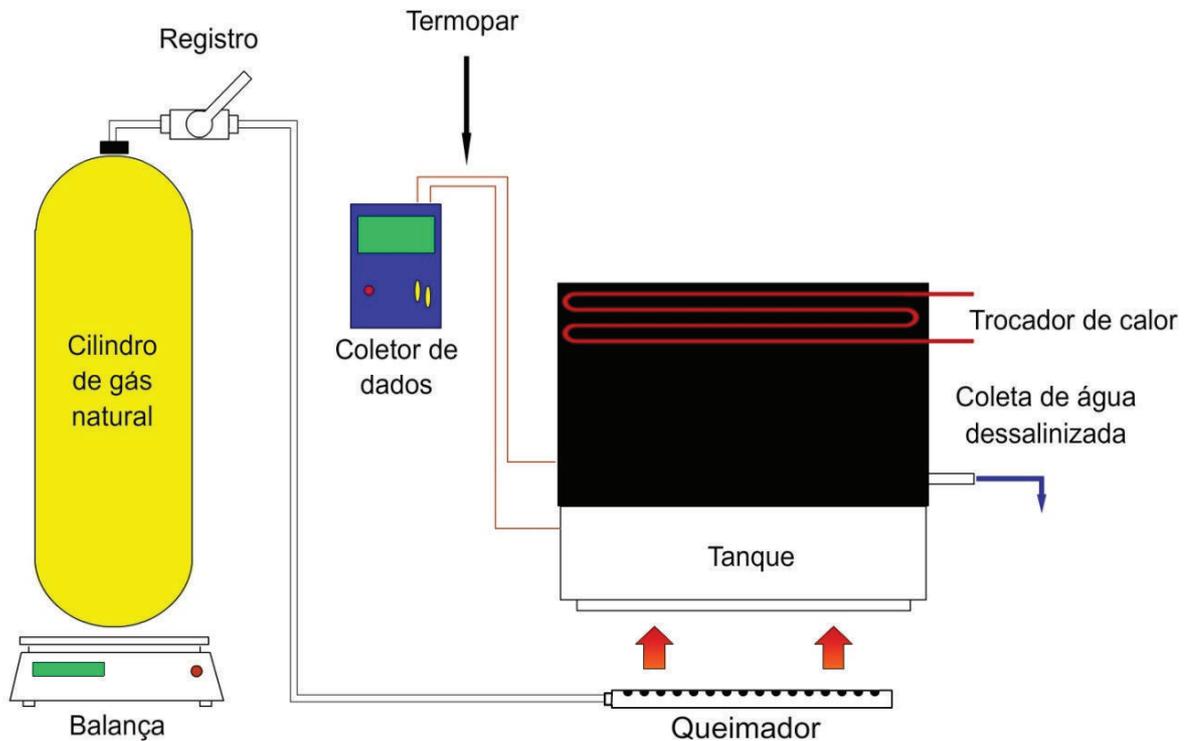


Figura 5.7 – Desenho esquemático da bancada de testes com o sistema de medições

O coletor de dados utilizado foi um do modelo OM-DAQPRO-5100 da OMEGA. O coletor de dados disponibiliza até oito canais para as medições de temperatura das bandejas metálicas, do trocador de calor, do ambiente, do tanque de armazenamento e das paredes, quando necessário. Os termopares utilizados foram termopares tipo K e T, com precisão de 0,75% (ESTÁTICA, 2011). O coletor de dados foi programado para fazer uma varredura nos valores de temperatura a cada dez segundos, e médias a cada seis valores.

O volume de gás natural foi medido com o auxílio de um medidor de volume GALLUS 100 da ACTARIS com uma precisão de 10^{-3}m^3 . Os valores de volume foram usados no controle do consumo de gás. Esses dados foram manualmente registrados em intervalos de tempo conforme a necessidade.

A balança analítica de precisão GP-100K da AND, com uma precisão de 10^{-3}kg , foi instalado sobre uma base plana para obter a vazão mássica do gás natural, isto é, o

consumo durante o experimento. A balança tinha a capacidade de armazenar as medições e exportar as mesmas para um microcomputador.

Para o conhecimento da produção de água dessalinizada durante o funcionamento do dessalinizador, foi adotada uma coleta de condensado individualizada por estágio. Com isso, foi possível conhecer a produção total do dessalinizador, bem como a produção de cada um dos estágios de recuperação de calor, facilitando a percepção e localização de possíveis problemas no funcionamento dos estágios, tais como desnivelamento, vazamentos e dificuldades de escoamento no percurso de coleta de condensado. A Figura 5.8 mostra uma fotografia dos recipientes de coleta de condensado por estágio. Para se verificar a produção de água dessalinizada utilizou-se uma proveta de um litro graduada a cada 10ml.



Figura 5.8 – Fotografia da coleta de condensado por estágio

Medições de Salinidade

A condutividade elétrica é uma medição da capacidade que a água possui de conduzir corrente elétrica. Este parâmetro está relacionado à presença de íons dissolvidos na água, que são partículas carregadas eletricamente. Quanto maior é a quantidade de íons dissolvidos, maior é a condutividade elétrica da água.

Para se verificar a qualidade da água produzida no dessalinizador utilizou-se um condutivímetro de bancada CDB-70 da OMEGA. Foram medidas as condutividades tanto da água coletado quanta da água bruta. O condutivímetro mede a condutividade elétrica e a

temperatura da água. Para as leituras dos valores de salinidade o condutivímetro possui ainda cinco possibilidades de ajuste da faixa de medição que são: até $20\mu\text{S}/\text{cm}^2$, até $200\mu\text{S}/\text{cm}^2$, até $2000\mu\text{S}/\text{cm}^2$, até $20\text{mS}/\text{cm}^2$ e até $200\text{mS}/\text{cm}^2$.

No procedimento adotado para as medições de salinidade, foram retiradas amostras de 200 ml da água produzida em cada estágio. Quando as amostras entravam em equilíbrio térmico, os sensores de temperatura e condutividade eram introduzidos nos recipientes com o condensado. Após a estabilidade da medição os valores eram anotados. 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 condutividade elétrica dessa água.

5.3 Desempenho do Dessalinizador

A Figura 5.9 apresenta o desenho esquemático dos processos de transferência de calor da torre de dessalinização. Esses processos são: Evaporação (evap) e condensação (cond), convecção (conv), radiação térmica (rad), e condução (c).

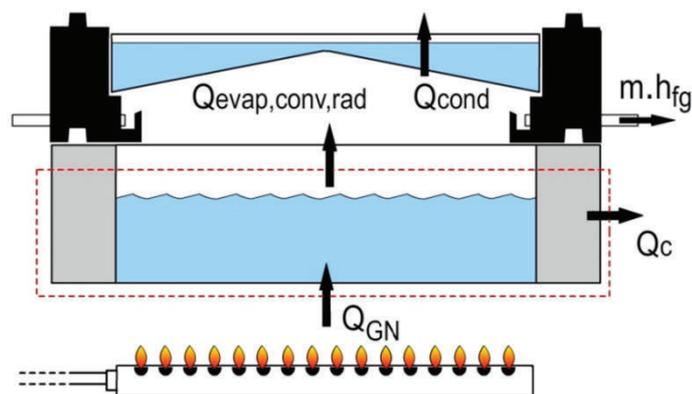


Figura 5.9 – Volume de controle do tanque de armazenamento

A equação da conservação de energia para um sistema qualquer é expressa por,

$$E_e - E_s + E_g = E_a \quad (2)$$

na qual E_e é a energia que entra no sistema, E_s é a energia que sai, E_g é a energia gerada e E_a é a energia acumulada no sistema.

Para o volume de controle do tanque de armazenamento, não há energia gerada e, assim, a equação da conservação de energia pode ser expressa por,

$$E_e - E_s = E_a . \quad (3)$$

Os termos da Equação (3) representam a energia cedida ao tanque de armazenamento pela queima do gás natural, a energia que sai do tanque pelos processos de transferência de calor e massa e a energia sensível acumulada na água do tanque. Esses termos podem ser expressos por,

$$E_e = E_{GN} = [\eta \cdot PCI \cdot m]_{GN} \quad (4)$$

$$E_s = K_1 \cdot A \cdot (T_a - T_1) \cdot \Delta t + K_2 \cdot A_p \cdot (T_a - T_p) \cdot \Delta t \quad (5)$$

$$E_a = \left[m \cdot c_p \cdot \frac{dT_a}{dt} \right]_{tanq} \cdot \Delta t . \quad (6)$$

Assim, a expressão para o balanço de energia no volume de controle da água no tanque de armazenamento é expresso por,

$$\left[m \cdot c_p \cdot \frac{dT_a}{dt} \right]_{tanq} \cdot \Delta t = [\eta \cdot PCI \cdot m]_{GN} - K_1 \cdot A \cdot (T_a - T_1) \cdot \Delta t - K_2 \cdot A_p \cdot (T_a - T_p) \cdot \Delta t . \quad (7)$$

Nas Equações (4), o termo η representa o rendimento do queimador, PCI é o poder calorífico inferior do gás natural, m é a massa de gás natural consumida e GN é o índice referente ao gás natural.

Nas Equação (5) e (7), o termo K_1 representa o coeficiente global de transferência de calor da superfície da água no tanque para a parede inferior da primeira bandeja. Esse coeficiente incorpora os processos de transferência de calor por evaporação, radiação e convecção da superfície da água e de condensação na bandeja do primeiro estágio. Os demais

termos representam: T_a a temperatura da água no tanque de armazenamento, T_1 a temperatura no primeiro estágio, Δt o intervalo de tempo e A é a área superficial do tanque.

$$K_1 \cdot A \cdot (T_a - T_1) = [\dot{m} \cdot h_{fg}]_{cond} + h_{conv} \cdot A \cdot (T_a - T_1) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_a^4 - T_1^4) \quad (8)$$

na qual h_{conv} é o coeficiente de transferência de calor por convecção, ε é a emissividade da água e σ é a constante de Stefan Boltzmann.

Também na Equação (5), o termo K_2 representa o coeficiente de perda de calor por condução para o ambiente, ou seja, é a razão entre a condutividade térmica do material isolante e sua espessura, A_p é a área lateral do tanque, perpendicular ao fluxo de calor por condução e T_p é a temperatura na parede externa. Essa temperatura foi medida durante a realização dos experimentos.

O armazenamento de energia no tanque ocorre nas fases de aquecimento, até que sejam estabilizadas as temperaturas no tanque e nas bandejas, e na fase de resfriamento, quando o queimador é desligado e a torre de dessalinização continua operando até que as temperaturas nas bandejas se aproximem da temperatura ambiente. O termo c_p representa o calor específico da água a pressão constante e o termo dT_a/dt é a taxa de variação da temperatura no tanque. No período de aquecimento esse termo é positivo e no de resfriamento é negativo.

A Equação (3) pode ser também escrita em termos de taxas de energia, ou seja,

$$\left[m \cdot c_p \cdot \frac{dT_a}{dt} \right]_{tanq} = [\eta \cdot PCI \cdot \dot{m}]_{GN} - K_1 \cdot A \cdot (T_a - T_1) - \frac{\lambda}{\epsilon} \cdot A_p (T_a - T_p) \quad (9)$$

na qual λ é a condutividade térmica do material isolante e ϵ é a sua espessura.

Determinação da Eficiência do Queimador

Para que os parâmetros operacionais do dessalinizador pudessem ser estudados, foi necessária a determinação da eficiência do processo de queima, que representa a energia que entra na torre, como apresentado na Equação (4).

No desenvolvimento de uma expressão para a determinação da eficiência do queimador, os coeficientes de transferência de calor foram aproximados por,

$$K_1 \cdot A \cdot (T_a - T_1) \approx [\dot{m} \cdot h_{fg}]_{cond} \quad (10)$$

$$K_2 \cdot A_p \cdot (T_a - T_p) = \frac{\lambda}{\epsilon} \cdot A_p (T_a - T_p) \cdot \Delta t \quad (11)$$

Na Equação (10), o coeficiente K_1 foi estimado considerando-se apenas o processo de evaporação-condensação, devido às impossibilidades de determinação precisa dos termos de convecção e radiação. Para apoiar essa consideração, salienta-se que o valor do calor latente é muito superior (aproximadamente 3 ordens de grandeza) aos valores dos processos de convecção natural e de radiação, na faixa de temperatura de operação do experimento.

Em regime permanente, quando não há variações significativas nas temperaturas nas massas de água da bandeja e do tanque de armazenamento, a expressão da eficiência do processo de queima é dada por,

$$\eta = \frac{[h_{fg} \cdot m]_{cond} + \frac{\lambda}{\epsilon} \cdot A_p (T_a - T_p) \cdot \Delta t}{[m \cdot PCI]_{GN}} \quad (12)$$

Usando a Equação (12), os valores das propriedades dos materiais e as medições experimentais da água dessalinizada durante o período, m_{cond} , do consumo de gás natural m_{GN} , das temperaturas no tanque, T_a , e na parede, T_p , a eficiência do processo de queima pode ser determinada.

Determinação do Coeficiente Global de Transferência de Calor (K_1)

Na Equação (7) do balanço de energia no volume de controle da água do tanque, há dois coeficientes de transferência de calor: K_1 e 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 primeira bandeja. O coeficiente K_2

representa o processo de transferência de calor por condução através das paredes laterais do tanque.

Embora K_2 seja de fácil determinação, K_1 é um coeficiente que incorpora simultaneamente os processos de evaporação, convecção e radiação da superfície da água do tanque e condensação na superfície da bandeja do primeiro estágio. O procedimento inicial para a determinação de K_1 é considerar todos esses processos de transferência em um único termo.

Com essas considerações, a expressão para K_1 pode ser expressa por

$$K_1 = \frac{[\eta \cdot PCI \cdot m]_{GN} - K_2 \cdot A_p \cdot (T_a - T_p) \cdot \Delta t}{A(T_a - T_1) \cdot \Delta t} \quad (13)$$

para o regime permanente.

Visto que os termos da Equação (13) foram medidos durante os experimentos, ou são propriedades dos materiais disponíveis na literatura, os valores para o coeficiente global de transferência de calor K_1 puderam ser calculados.

O coeficiente K_1 é de importância no estudo experimental do dessalinizador por caracterizar o processo de produção de condensado, permitindo sua determinação a partir de conhecimento das temperaturas no tanque e na bandeja. Assim, a previsão da vazão mássica a ser produzida em condições semelhantes pode ser calculada por

$$m = \frac{K_1 \cdot A \cdot (T_a - T_1) \cdot \Delta t}{h_{fg}} \quad (14)$$

Determinação dos Parâmetros de Desempenho

No estudo do desempenho da torre dessalinização, dois parâmetros característicos são definidos: A razão de ganho de saída (*Gain Output Ratio* – GOR) e o coeficiente de desempenho (*Coefficient of Performance* – COP).

A razão do ganho de saída é definida como a razão entre a energia latente da água necessária para que ocorra a evaporação e a energia transferida para o dessalinizador devido à queima do gás natural,

$$GOR = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \cdot h_{f,g}}{E_q} \quad (15)$$

na qual $h_{f,g}$ é o calor latente de evaporação da água a 100 °C, m_i representa a massa de água dessalinizada produzida em cada estágio i , E_q é a energia liberada pelo queimador para o tanque de armazenamento e n é o número de estágios.

O coeficiente de desempenho é definido como a razão entre toda a massa de água dessalinizada produzida pela torre e a massa de condensado produzida pelo primeiro estágio, ou seja,

$$COP = \frac{\sum_{i=1}^n m_i}{m_1} \quad (16)$$

na qual m_i é a massa produzida pela torre no estágio i e m_1 é a massa produzida pelo primeiro estágio.

5.4 Procedimentos Experimentais

No presente trabalho, foram estudadas variáveis operacionais que caracterizam o desempenho do dessalinizador. São eles: a altura da coluna d'água no tanque de armazenamento, o fluxo de gás natural no queimador, o tipo do queimador usado e o número de estágios de dessalinização. Os dados experimentais foram usados nos cálculos dos parâmetros que caracterizam o desempenho do dessalinizador, a saber, a razão de ganho de saída (GOR) e o coeficiente de desempenho (COP).

Para cada uma dessas variáveis foram executados procedimentos experimentais específicos que estão apresentados a seguir.

a) Altura da Coluna d'Água no Tanque de Armazenamento

O nível de água no tanque de dessalinização influencia o tempo necessário para o início do regime permanente, como também a produção após o desligamento do queimador.

No estudo da influência do nível da água no tanque de armazenamento, foi desenvolvido um arranjo específico na torre de dessalinização, composto por um queimador, o tanque de armazenamento, um trocador de calor e um estágio de dessalinização, que operava como superfície de condensação e onde estava instalado o trocador. A Figura 5.9 mostra um desenho esquemático do sistema montado para o estudo da operação do dessalinizador em diferentes alturas de volume de água.

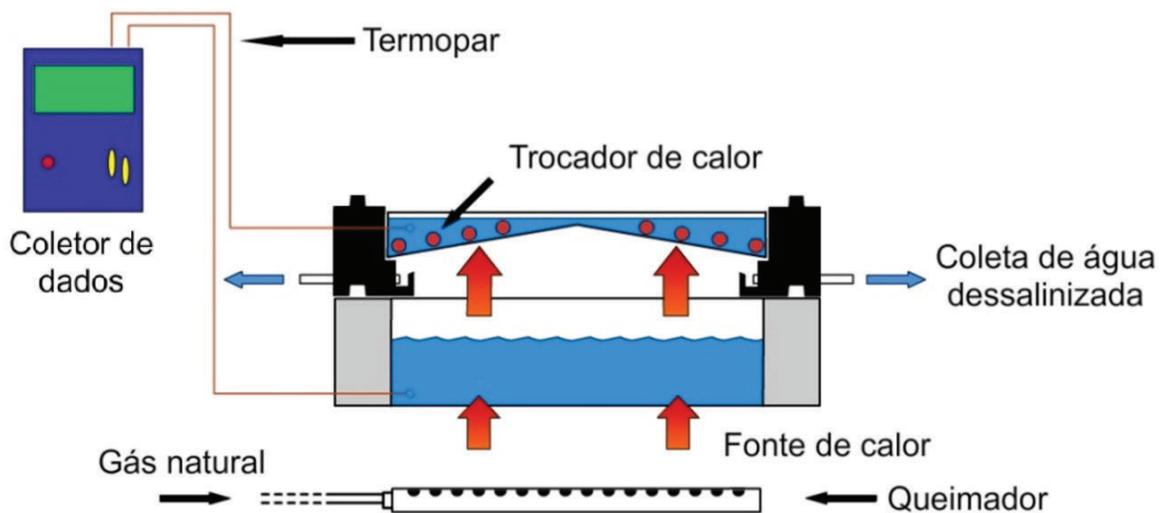


Figura 5.10 – Bancada de testes para o calculo da altura da coluna d'água

Foram estudadas três alturas de colunas d'água, equivalentes aos volumes de 3, 6 e 9 litros de água no tanque. Como o tanque possui as dimensões internas de 52cm de comprimento, 27cm largura e 10cm de altura, esses volumes representam alturas de lâminas de água de 2,4cm, 4,8cm e 7,2cm. Para cada altura de coluna d'água realizaram-se três experimentos, para que fosse obtido um valor médio. O fluxo de gás natural foi mantido constante em cada experimento por duas horas, sendo utilizado o mesmo fluxo para todas as alturas estudadas, de forma que o calor recebido em todos os casos fosse aproximadamente o mesmo. Com o uso do trocador de calor foi possível controlar e manter temperatura aproximadamente constante na superfície de condensação. Com isso pode-se observar a

produção de água dessalinizada, possibilitando a observação da variação da produção de água dessalinizada com a altura da coluna d'água. Nesse estudo, mantiveram-se constantes as temperaturas no tanque de armazenamento (em torno dos 90°C) e na superfície de condensação (em torno dos 40°C), de forma que o nível da água fosse a única variação de um experimento para o outro.

O seguinte procedimento foi usado em todos os experimentos do presente trabalho:

- a) Alimentar a torre de dessalinização com água ser dessalinizada;
- b) Iniciar o sistema de aquisição de dados;
- c) Por em operação o trocador de calor;
- d) Abrir a válvula de fluxo de gás no cilindro;
- e) Acender o queimador;
- f) Medir da quantidade de água dessalinizada produzida durante o período de aquecimento;
- g) Medir de água dessalinizada produzida durante o período de resfriamento (após o fechamento da válvula de fluxo de gás natural).

b) Tipo do Queimador

Foram estudados três tipos de queimadores para se verificar a influência dos mesmos na produção de água dessalinizada. Os queimadores utilizados nesse estudo foram: Queimador linear, circular e duplo circular. Foi montado um arranjo experimental similar ao montado para obter a altura da coluna d'água ideal, Figura 5.10, composto pelo o tanque de armazenamento, um estágio de dessalinização, o trocador de calor e um dos três tipos de queimadores.

Para cada queimador realizaram-se dois experimentos, no qual a chama era mantida constante por duas horas, com uma vazão mássica média de gás natural de aproximadamente 2,15g/min. Após esse período deixava-se o dessalinizador funcionando com sua energia interna por mais duas horas (período de resfriamento). Ao término do experimento, a produção total de água dessalinizada era medida.

c) Vazão de Gás Natural no Queimador

O objetivo deste experimento é determinar, para o queimador selecionado, o maior valor para o GOR, ou seja, a maior razão entre a quantidade de água dessalinizada e o volume de gás natural consumido.

No estudo do nível da vazão de gás natural no queimador, foi desenvolvido um arranjo específico na torre de dessalinização, composto por um queimador linear, o tanque de armazenamento e seis estágios de dessalinização. A Figura 5.11 mostra um desenho esquemático do sistema montado.

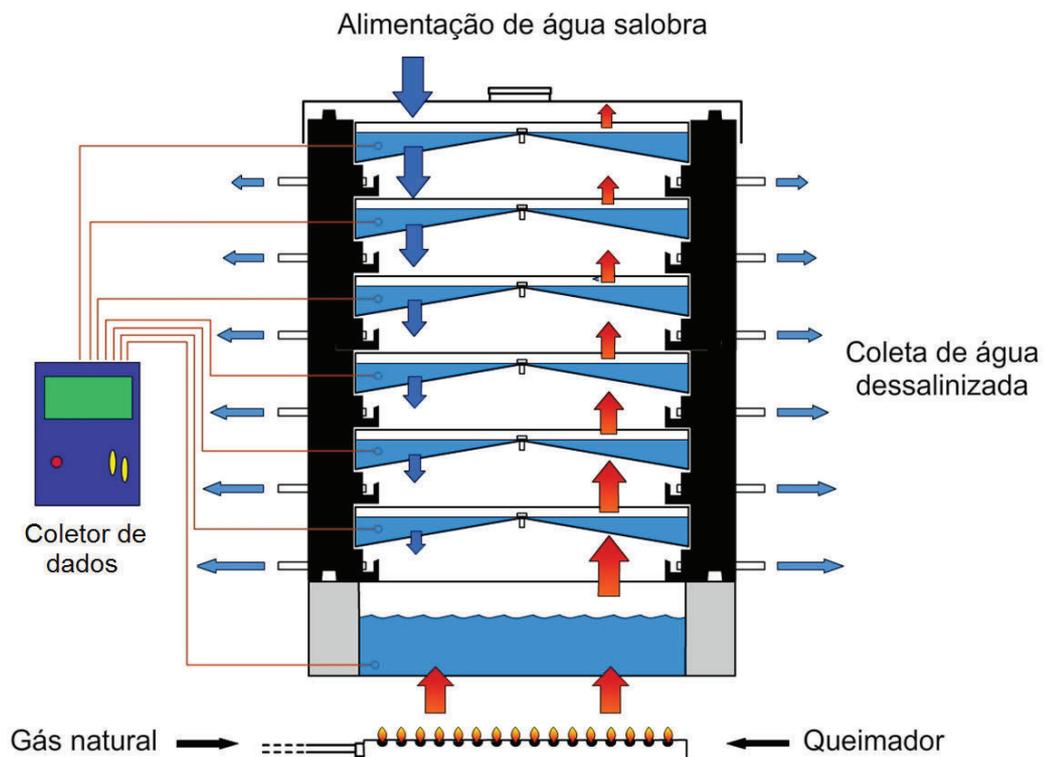


Figura 5.11 – Bancada de testes para a determinação da vazão

Foram estudados três fluxos de gás natural: 0,533g/min, 0,719g/min e 0,902 g/min. Para cada vazão de gás natural, realizaram-se três experimentos, para que fosse obtido um valor médio.

Seguiu-se o mesmo procedimento experimental realizado para obter a altura da coluna d'água ideal apresentada na página 46, diferindo apenas no período de queima do gás natural, que foi de quatro horas.

d) Uso da Nanopelícula

Quando uma nanopelícula é aplicada numa superfície metálica, como é o caso das bandejas do dessalinizador em estudo, a água condensada sob a bandeja escoava com mais facilidade, aumentando assim a produção de água dessalinizada.

Para estudar sua influência no escoamento da água dessalinizada com o uso da nanopelícula, foi montado um sistema de testes igual ao da Figura 5.9. Foram realizados experimentos com e sem o uso da nano película na superfície de condensação (face inferior da bandeja). Em cada experimento a chama do queimador foi mantida constante por quatro horas. Após esse período a chama era apagada e o sistema ficava em funcionamento por mais duas horas apenas com sua energia interna. O trocador foi utilizado para maximizar a condensação, de forma a possibilitar uma maior produção de água dessalinizada.

e) Rendimento do Queimador

Um arranjo experimental como o da Figura 5.12 foi montado para se estudar o rendimento do queimador. O sistema era composto pelo tanque de armazenamento, um queimador linear, e um estágio de dessalinização com um trocador de calor. Foram instalados termopares no tanque de armazenamento, na parede externa do tanque, no primeiro estágio, na saída e na entrada do trocador de calor.

Nos experimentos, o queimador foi mantido em funcionamento até a temperatura da bandeja do primeiro estágio de dessalinização entrar em regime permanente e permanecer neste estado por duas horas. Após esse período o queimador foi desligado. Foram registrados os dados de temperaturas, consumo de gás natural e de produção de água dessalinizada antes, durante e depois do regime permanente. Com esses valores, foi possível calcular o rendimento do queimador com a Equação (12).

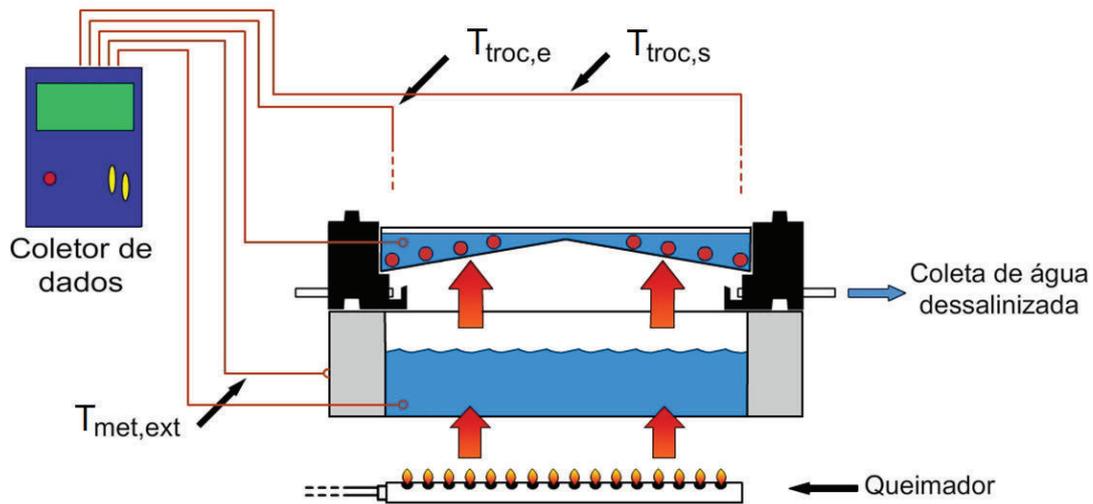


Figura 5.12 – Bancada de testes para o cálculo do coeficiente de transferência de calor

f) Desempenho do Dessalinizador

Após a realização dos experimentos que identificaram as variáveis operacionais do dessalinizador (volume de água no tanque, consumo de gás natural e tipo de queimador), foram realizados experimentos com os estágios da torre de dessalinização para a terminação do seu desempenho.

Para esse estudo, foi montado um arranjo experimental como o da Figura 5.11, composto por seis estágios de dessalinização, o tanque de armazenamento com o volume d'água de seis litros e um queimador linear com uma vazão mássica de gás natural de 0,533g/min. O sistema de aquisição de dados era formado pelo coletor de dados de temperatura com sete termopares e por um sistema de coleta e medição de condensado.

Nos experimentos o queimador foi mantido em funcionamento até a temperatura dos estágios de dessalinização entrar em regime permanente e permanecer neste estado por três horas. Após o fechamento da válvula de alimentação de gás natural o coletor de dados permaneceu registrando os valores das temperaturas. No experimento apresentado no Capítulo 6, esse período foi de 48 horas. Esse foi o período de tempo necessário para que a energia acumulada no dessalinizador fosse utilizada na produção de condensado e as temperaturas dos estágios voltassem aos valores iniciais. Foram coletadas as massas de

condensado antes, durante e após o regime permanente. Com os dados de temperatura, produção e consumo de gás, foi possível calcular o COP e o GOR do dessalinizador.

g) Número de Estágios de Dessalinização

Foi estudada a influência do número de estágios de dessalinização na produção de água. Um arranjo experimental como o da Figura 5.11 foi montado para estudar esse parâmetro. Como já havia sido obtido o fluxo ideal de gás natural para o sistema, essa vazão foi usada nos experimentos seguintes.

Em cada experimento a chama do queimador foi mantida constante por quatro horas. Foram registradas as produções por estágio. Após esse período o sistema operou por mais quatro horas apenas com sua energia interna. Logo após a produção era registrada. Esse procedimento foi sendo repetido variando o número de estágios de forma crescente, de 1 até 6.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados dos experimentos realizados como descritos no Capítulo 5 e os valores dos parâmetros que caracterizam o desempenho do dessalinizador apresentados na Seção 5.4. As tabelas com os resultados das análises de condutividade elétrica e de salinidade das amostras de água bruta e dessalinizada mostram a eficiência da dessalinização na remoção de sais. Os gráficos resultantes das medições experimentais mostram os valores da temperatura da água no tanque de armazenamento e nos estágios de dessalinização. Os resultados estão apresentados nas próximas seções, seguindo a ordem de realização dos experimentos.

a) Altura da Coluna D'água

Com o uso do trocador de calor foi possível manter a temperatura praticamente constante na superfície de condensação em todos os experimentos. O controle do fluxo de gás natural para o queimador permitiu a manutenção da temperatura da água no tanque constante e uniforme. A temperatura no tanque de armazenamento durante o regime permanente foi mantida próxima a 96°C, e a temperatura na bandeja com o trocador de calor se manteve próxima a 43°C. Dessa forma, a diferença de temperatura entre o tanque de armazenamento e a superfície de condensação ficou por volta de 53°C.

A Tabela 6.1 apresenta a produção de água dessalinizada, as temperaturas no tanque de armazenamento e na bandeja para os seis experimentos realizados para o estudo da altura da coluna d'água no tanque de armazenamento. Foram estudadas três alturas, sendo realizados dois experimentos para cada altura. Na tabela T_a e T_1 são as temperaturas no tanque de armazenamento e no primeiro estágio de dessalinização, respectivamente. Com essa Tabela 6.1 observa-se que para um mesmo consumo de gás natural o volume de 6 litros no tanque de armazenamento, equivalente a uma altura de coluna d'água de 4,8cm, a produção é máxima. A produção média para o volume no tanque de 6 litros é em torno 25,75% maior que a produção média para o volume de 3 litros e aproximadamente 22,88% maior que a produção média para o volume de 9 litros.

Tabela 6.1 – Resultados da produção com a altura da coluna d'água no tanque de armazenamento

Volume (litros)	Altura (cm)	T _a (°C)	T _{cond} (°C)	ΔT (°C)	Consumo de gás natural (g)	Produção de água dessalinizada (ml)	Produção média (ml)
3	2,4	96,9	45,7	51,2	255	1480	1,495
		91,2	43,8	47,4	252	1510	
6	4,8	97,0	43,0	54,0	257	1910	1,880
		96,6	43,6	53,0	260	1850	
9	7,2	97,0	42,2	54,8	259	1520	1,530
		96,0	41,3	54,7	261	1540	

A Figura 6.1 mostra o gráfico de temperatura no tanque de armazenamento e na primeira bandeja em função do tempo. Ao se analisar esse gráfico é possível observar que o dessalinizador reage de formas distintas com volumes diferentes no tanque de armazenamento, uma vez que volumes diferentes ocasionaram tempos distintos para o início do regime permanente. Os experimentos realizados com os volumes de 3, 6 e 9 litros entraram em regime permanente com 37, 49 e 80 minutos, respectivamente. Esse período fez com que os três casos estudados obtivessem produções distintas, antes de entrar em regime permanente. Por outro lado, pode-se observar que o valor ΔT para os casos estudados foi aproximadamente o mesmo, indicando que em regime permanente a produção de água dessalinizada é aproximadamente a mesma em todos os casos. Dessa maneira, pode-se concluir que para longos períodos de queima a diferença na produção de água dessalinizada com a variação do volume de água não é tão significativa. Porém, é interessante observar que para um dessalinizador solar, essa variável operacional se mostra importante na produção de água dessalinizada, uma vez que o período de aquecimento depende da quantidade de horas de radiação solar e de sua intensidade. Assim, o volume de água no tanque influencia diretamente o período de tempo para alcançar o regime permanente como também a produção de água quando a torre opera sem a fonte de calor, somente com a energia armazenada.

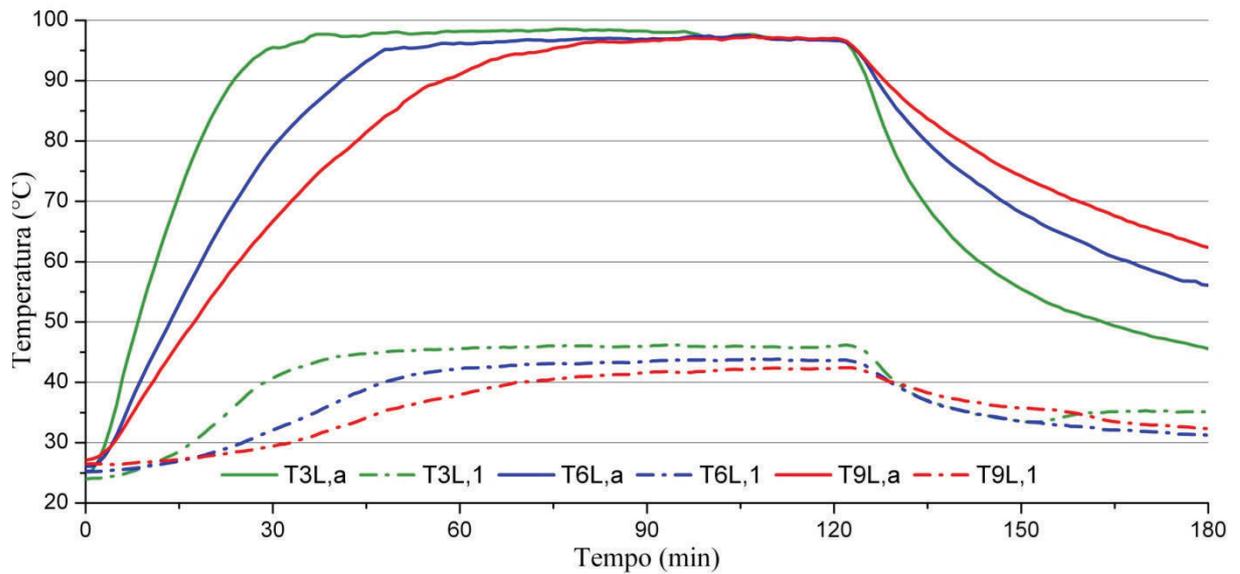


Figura 6.1 – Gráfico de temperatura em função do tempo para as temperaturas da água no tanque de armazenamento 3L, 6L e 9L. Na legenda T3L, a representa a temperatura no tanque de armazenamento com 3L e T3L,1a representa a temperatura na primeira bandeja com o volume de 3L no tanque de armazenamento

b) Vazão de Gás Natural

A vazão ideal de gás natural utilizado na queima para fornecimento de energia ao sistema de dessalinização é um parâmetro importante. Valores reduzidos de vazão resultam em baixas temperaturas no tanque de armazenamento, diminuindo a intensidade dos processos de transferência de calor e de massa, ou seja, diminuindo a taxa de evaporação da água a ser dessalinizada. Por outro lado, altas vazões ocasionam o superaquecimento do sistema, um baixo gradiente de temperatura para promover a condensação e um baixo valor de GOR.

Com o sistema de alimentação de gás natural e os queimadores disponíveis, foram realizados experimentos com três vazões distintas: 0,533, 0,719 e 0,902g/min. O sistema operou com seis estágios de dessalinização por um período de queima de 6 horas para todos os experimentos. A Tabela 6.2 mostra os resultados dos experimentos.

Tabela 6.2 – Comparação entre as vazões de gás natural, consumo, produção e produção/consumo

Vazão de gás natural (g/min)	Consumo de gás natural (g)	Produção de água de ssalinizada (l)	Produção de água dessalinizada / Consumo de gás natural (ml/g)
0,533	256	5,43	21,21
0,719	345	6,94	20,12
0,902	433	7,97	18,40

Os resultados mostram que a relação produção/consumo é maior para a menor vazão de gás natural. O valor mínimo adotado para a vazão de gás natural (0,533g/min) possível para manter a chama no queimador foi o valor que obteve a maior relação produção/consumo. Essa vazão foi considerada como a vazão ideal e usada nos experimentos para a determinação do GOR e do COP e para análise desse sistema.

c) Desempenho do Dessalinizador em Função do Tipo de Queimador Utilizado

A Tabela 6.3 mostra a produção de água com os 3 tipos de queimador utilizados nos experimentos. É possível se observar que há uma variação na produção de água dessalinizada com o tipo de queimador, para os mesmos consumo de gás natural e fluxo de água no trocador de calor. A melhor produção foi obtida com o queimador linear, porém essa produção é apenas de 2,17% superior à produção com o uso do queimador duplo circular, e 3,87% superior à produção com o queimador circular. É importante ressaltar que apesar das diferenças percentuais na produção serem pequenas, houve reprodutibilidade dos resultados experimentais.

Tabela 6.3 – Produção de água com diferentes tipos de queimador

Queimador	Consumo de gás natural (g)	Produção de água dessalinizada (ml)
Linear	260	1880
Duplo Circular	262	1840
Circular	259	1810

A Figura 6.2 mostra as temperaturas no tanque de armazenamento e na bandeja com o trocador de calor para os queimadores linear, duplo circular e circular. Observa-se que

as temperaturas com o uso do queimador linear aumentam mais rapidamente do que com o uso do queimador circular duplo, que por sua vez cresce mais rapidamente do que o uso do queimador circular. Isso se deve à forma como a chama é distribuída sob a face inferior do tanque de armazenamento. Ou seja, no queimador linear, a área de distribuição da chama é maior que no queimador duplo circular e esse, por sua vez, tem área de distribuição maior que o queimador circular. O queimador linear eleva a temperatura da água no tanque de armazenamento mais rapidamente que nos demais queimadores estudados, como pode ser observado nos resultados experimentais.

O tipo de queimador mostrou pequenas diferenças em função de sua geometria. Esse resultado não pode ser melhor observado porque o fluxo de gás natural mínimo alcançado com o sistema de queima foi de 0,533g/min. Esse valor mostrou-se elevado para as dimensões do tanque de armazenamento. Maior influência da geometria do queimador, que governa a distribuição de temperatura no tanque, poderá ser observada com o uso de um sistema de queima que opere com menor faixa de gás natural.

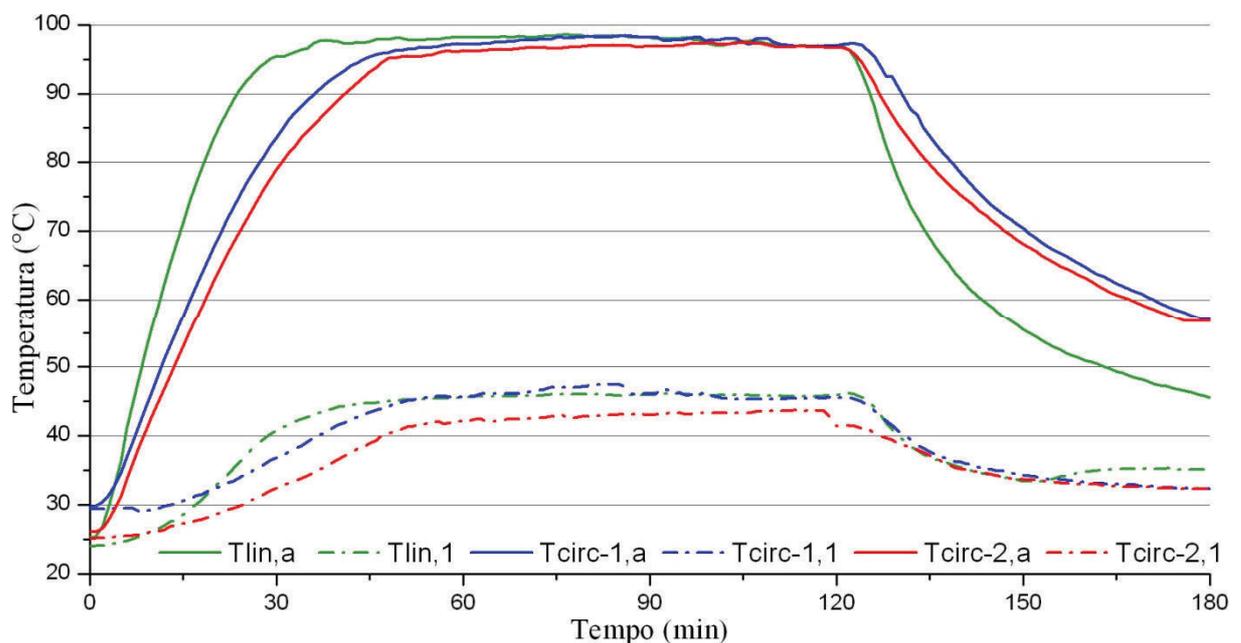


Figura 6.2 – Gráfico de temperatura em função do tempo para o uso dos queimadores linear, circular e circular duplo. Na legenda, Tlin,a e Tlin,1 representam, respectivamente, as temperaturas no tanque de armazenamento e na primeira bandeja com o uso do queimador linear

d) Uso da Nanopelícula sob a Superfície de Condensação

Foram realizados experimentos para verificar a influência do uso da nanopelícula no escoamento do condensado sob a superfície de condensação.

Os resultados desses experimentos estão mostrados na Tabela 6.4. Observa-se que o uso da nanopelícula resultou em um aumento de 66% na produção de água dessalinizada.

A análise física mostrou que a condutividade elétrica da água dessalinizada não variou de forma considerável com o uso da nanopelícula, contudo para se constatar a real pureza da água obtida é necessária uma análise química (principalmente a presença de óleos e graxas) de todos os componentes presentes na água dessalinizada.

Tabela 6.4 – Resultado da influência do uso da nanopelícula na produção

	Consumo de gás natural (g)	Condutividade Elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}^2$)	Produção de água dessalinizada (ml)
Sem nano película	486	35,1	1860
Com nano película	489	36,3	3080

Durante os experimentos, observaram-se diferentes respostas ao uso da nanopelícula. Durante o regime permanente o experimento realizado sem o uso da nanopelícula apresentou temperaturas próximas a 97°C e a 37°C no tanque de armazenamento e na superfície de condensação, respectivamente. O experimento com o uso da nanopelícula, por sua vez, apresentou valores próximos a 97°C e a 27°C .

O uso da nanopelícula facilitou o escoamento do condensado na superfície de condensação, diminuindo as perdas das gotas de condensado que caem no tanque de armazenamento sem serem coletadas. Esse escoamento mais continuado foi responsável por uma maior saída de energia do sistema em forma de condensado, aumentando sua produção e diminuindo a temperatura na bandeja do primeiro estágio. Essa diminuição de temperatura na bandeja e, conseqüentemente, o aumento da diferença de temperatura também contribuem para o aumento da produção.

e) Rendimento do Queimador

Antes dos cálculos dos parâmetros de desempenho do dessalinizador (COP, GOR e K_1), foi necessária a determinação da eficiência do processo de queima. Foram realizados três experimentos nos quais a diferença média de temperatura entre a água no tanque de armazenamento e na bandeja do primeiro estágio foi de 55°C e as temperaturas da água no tanque de 97°C, 95°C e 88°C. O valor médio da eficiência do queimador (Equação (12)) foi de 0,21.

f) Desempenho do Dessalinizador

Com a otimização das variáveis operacionais foi possível alcançar uma produção máxima de 9,62 litros com 265g de gás natural, obtendo uma relação Produção/Consumo de 36,30 ml/g. Observa-se que este valor de 36,30ml/g é superior ao valor máximo alcançado antes da otimização do sistema, que era de 21,21ml/g.

Dos mesmos experimentos usados na determinação da eficiência do queimador, foram retirados os dados necessários para o cálculo do coeficiente global de transferência de calor, K_1 , apresentado na Equação (13). O valor preliminar foi de 54W/°C.m² para temperaturas na água do tanque variando de 88°C a 97°C e uma mesma diferença de temperatura de 55°C.

A Figura 6.3 mostra o gráfico do COP e do GOR em função do número de estágios. É possível observar que os gráficos descrevem uma curva que tendem para uma assíntota horizontal. Os valores máximos alcançados para o COP e o GOR foram 4,09 e 5,91, respectivamente. Este valor de GOR para a torre de dessalinização é superior aos dessalinizadores solares propostos por Adhikari (1995), Mathioulakis (2007) e Rodrigues (2010). Adhikari (1995) e Rodrigues (2010) obtiveram valores entre 2 e 3, enquanto Adhikari (1995) apresentou referências de sistemas que alcançaram valores de GOR entre 3 e 4,5.

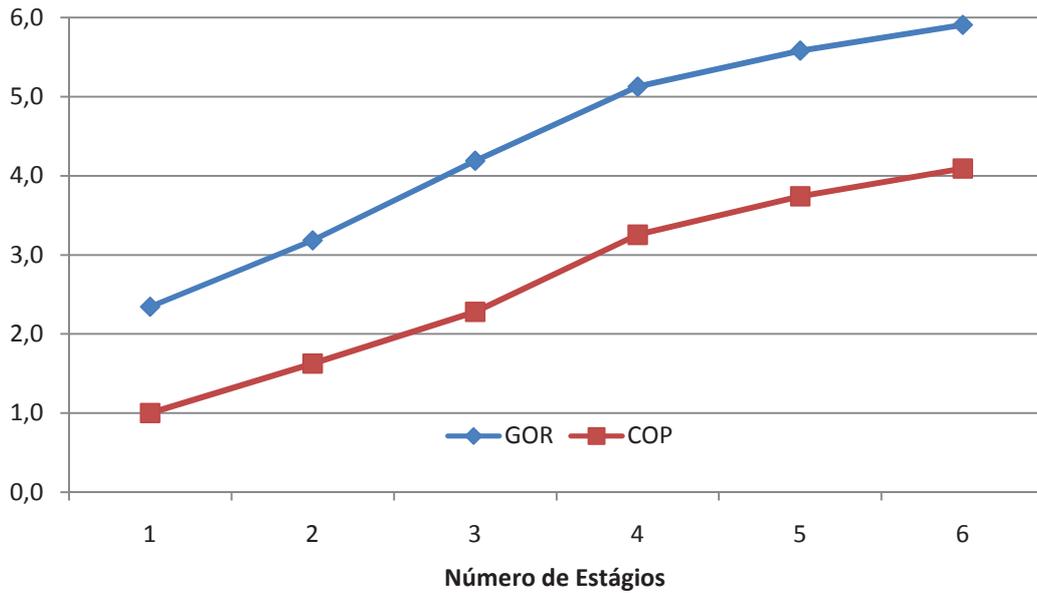


Figura 6.3 – Gráfico do COP e do GOR em relação ao número de estágios

g) Análise da Condutividade Elétrica e de Salinidade

Os resultados da condutividade elétrica das águas bruta e dessalinizada estão apresentados na Tabela 6.5.

Verifica-se o alto grau de condutividade elétrica das águas brutas e o baixo nível de sais presentes na água produzida pelo dessalinizador, comprovando assim a boa qualidade da água produzida.

Devido aos baixos níveis de condutividade elétrica, o que indica baixos níveis de salinidade, pode ser necessária a adição de sais minerais à água dessalinizada para adequá-la ao consumo humano.

Tabela 6.5 – Resultados das análises da condutividade elétrica das amostras de águas bruta e dessalinizada

	Água Bruta		Água Dessalinizada		
	Água do Mar	Água da distribuição local	Água do Mar	Água da distribuição local	Padrão Internacional
Temperatura (°C)	25,0	29,0	26,1	29,2	---
Condutividade Elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}^2$)	46300	433	345	35,1	100

Os valores obtidos da condutividade elétrica das águas dessalinizadas são próximos aos valores alcançados por Coutinho (2003). O dessalinizador proposto por Coutinho (2003) obteve valores de condutividade elétrica para água dessalinizada de $13,1\mu\text{S}/\text{cm}^2$ para águas provindas de poços e $343\mu\text{S}/\text{cm}^2$ para águas provindas do mar.

Não foram realizados testes bacteriológicos na água bruta nem dessalinizada. Contudo, espera-se uma redução significativa nos teores de coliformes, tendo-se como base os resultados apresentados por Lima (2003). No protótipo do dessalinizador, operando em temperaturas inferiores às do presente protótipo, a pesquisadora verificou a ausência de coliformes após a dessalinização.

A água do mar testada foi proveniente da costa litorânea da cidade de Fortaleza e a água da distribuidora local foi a disponível no laboratório para consumo geral.

h) Número de Estágios

A torre de dessalinização opera recuperando em um estágio superior o calor liberado pelo estágio inferior. Essa recuperação possui um limite, ou número ideal de estágios. Se esse limite for ultrapassado o aumento o aproveitamento desse calor liberado passa a não ser mais significativo, não tornando vantajosa a produção do estágio excedente. Para o estudo da produção em relação ao número de estágios foi utilizada a vazão ideal de gás natural encontrada na Seção 6.3 ($0,533\text{g}/\text{min}$).

A Figura 6.4 mostra o coeficiente de desempenho do dessalinizador, COP (Equação 16), em função do número de estágios. Foram realizados experimentos com o número de estágios variando de 1 a 6, para um mesmo consumo de gás natural de 128g. Observa-se que a curva do COP aumenta mais rapidamente quando o número de estágios é menor (estágios 1 e 2). O gráfico do COP pode ser aproximado ao gráfico de uma equação do terceiro grau, como apresentado na Figura 6.4.

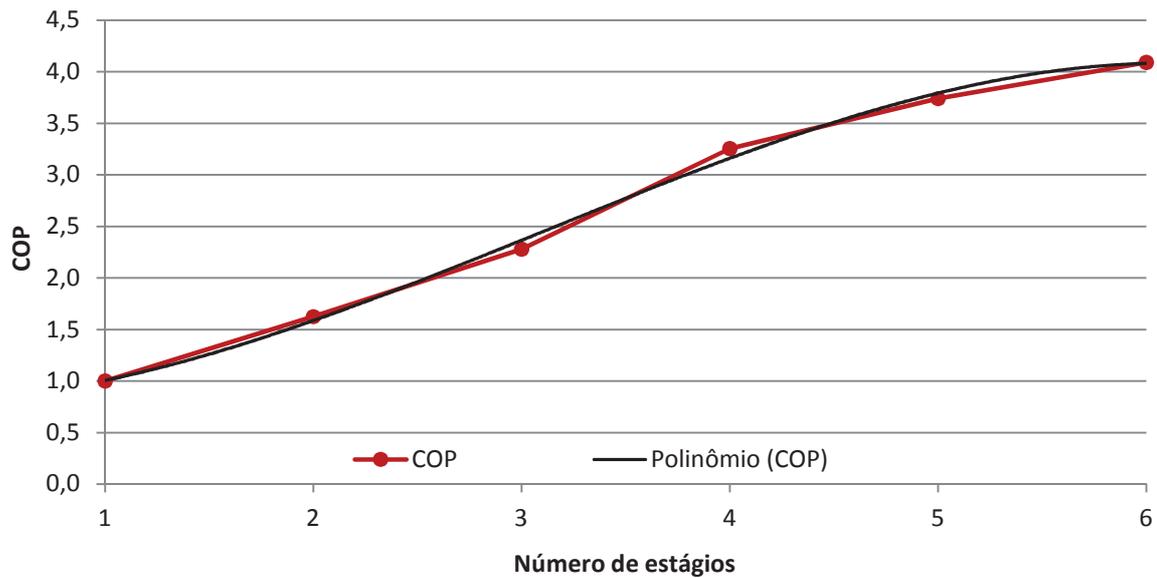


Figura 6.4 – Gráfico do coeficiente de desempenho do dessalinizador (COP) em função do número de estágios

Os valores do COP foram usados em uma aproximação polinomial do terceiro grau. A equação encontrada foi,

$$COP = -0,03n^3 + 0,279n^2 - 0,047n + 0,805 \quad (17)$$

com $R^2 = 0,997$. Essa equação representa de forma adequada o valor do COP dentro do seu domínio, ou seja, para um número de estágios próximo a 6. O aumento do número de estágios sempre aumenta a produção do dessalinizador e o COP é melhor representado, de forma geral, por uma equação exponencial. No caso particular, a boa aproximação do polinômio pode ser usada com essa observação.

A Equação (17) foi usada na determinação do número ótimo de estágios, que representa o ponto de derivada zero. O valor encontrado foi de 6,11. Assim, o dessalinizador operou próximo ao seu número ótimo de estágios, podendo também ser operado com 7 estágios.

O processo de recuperação de calor pode ser analisado no gráfico da Figura 6.4. Com um estágio, o COP é de valor unitário. Com seis estágios, o COP obteve um valor de 4,09, mostrando que o sistema produziu mais de 4 vezes o que produziria se estivesse operando com um único estágio, devido ao processo de recuperação de calor.

7 CONCLUSÕES

O dessalinizador térmico com aquecimento controlado se mostrou adequado para o estudo dos parâmetros operacionais que influenciam na produção de água dessalinizada na torre de dessalinização. Adicionalmente, o sistema apresentou um desempenho satisfatório, visto que foram conseguidos bons valores para produção de água dessalinizada em relação ao consumo de gás natural e para os parâmetros de desempenho GOR e COP, que obtiveram os valores máximos de 5,91 e 4,09, respectivamente.

O processo de dessalinização da água pôde ser comprovado com a redução acentuada dos níveis de condutividade elétrica, como pôde ser observado nas análises das amostras de água do mar e do poço, antes e depois da dessalinização.

Para a operação em regime intermitente, em intervalos de 3 a 5 horas, recomenda-se o volume de 6L de água no tanque de armazenamento. Para operação continuada, o volume não é uma variável importante e o volume de 3L pode ser recomendado a fim de que o sistema atinja o regime permanente mais rapidamente.

A influência do queimador foi pequena para a vazão de gás natural de 0,533g/min. Contudo para menores vazões, os efeitos da distribuição de temperatura em função da geometria do queimador poderão ser mais acentuados. Devido à melhor distribuição da chama sob o tanque de armazenamento, o queimador linear deverá obter o melhor resultado. Com os resultados dos experimentos da vazão de gás natural foi possível observar a necessidade da fabricação de um novo queimador de menor potência para otimizar o GOR. O queimador linear apresentou um rendimento médio de 0,21, inferior ao valor de 0,30 apresentado por Medeiros (2003) para um queimador similar.

O coeficiente global de transferência de calor da superfície da água no tanque de armazenamento para a superfície inferior da bandeja do primeiro estágio, K_1 , foi estimado com os mesmos dados dos experimentos para determinação da eficiência térmica. O valor preliminar de K_1 foi de $54\text{W}/^\circ\text{C}\cdot\text{m}^2$. Com medições adicionais, em temperaturas variando de 50° a aproximadamente 100°C para várias diferenças de temperatura, esse valor pode ser estimado com mais precisão.

Foi possível constatar a influência das variáveis operacionais na produção de água dessalinizada. Com a otimização dessas variáveis operacionais o dessalinizador obteve sua produção máxima de 9,62 litros com a queima de 265g de gás natural, obtendo uma relação produção/consumo de 36,30ml/g de gás natural.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADHIKARI, R. S.; KUMAR, A.; SOOHA, 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 nova torre de dessalinização térmica com recuperação de calor.** 2009. 56 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – UFC, Fortaleza.

CHENDO, M. A. C.; EGARIEWE, S. U. **Effects of pebbles and wick on the performance of a shallow basin solar still.** Solar World Congress. Proceedings of the Biennial Congress of the International Solar Energy Society. Colorado, p. 2264-2269, 1991.

COOPER, P. I. **The maximum efficiency of single-effect solar stills.** Solar Energy, v. 15, p. 205-217, 1973.

COUTINHO, L.D.E. **Protótipo experimental de um dessalinizador solar com recuperação de calor.** 2003. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – UFC, Fortaleza.

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

DERONZIER, J. C.; LAURO, F.; PLOYART, R. **Solar desalination: Prototype “pithon” a special solar multiple-effect distiller.** Dessalination, vol. 39, p. 117-123, 1981.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar engineering of thermal process.** 3.ed. John Wiley & Sons, 2006.

GARCÍA-RODRÍGUEZ, L. **Renewable energy applications in desalination: state of the art.** Solar Energy, vol. 75, p. 381-393, 2003.

HOLANDA, J. G. D. **Projeto de um Queimador Atmosférico, com Alimentação Central, para um Refrigerador térmico Movido a Gás Natural.** XII Congresso nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica, 2006.

INCROPERA, F. P.; DE WITT, P. D. **Fundamentals of Heat and Mass Transfer.** 5.ed. New York: John Wiley & Sons, 1996.

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, vol. 83, p.1312-1321, 2009.

LIMA, C. A. **Dessalinizador solar térmico com recuperação de calor – análise térmica e resultados experimentais.** 2000. 61 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil, Saneamento Ambiental) - UFC, Fortaleza.

MEDEIROS, M.R.Q. **Validação Experimental de um Refrigerador Térmico Movido a Gás Natural.** 2003. 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – UFC, Fortaleza.

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

MOTA, S.; ANDRADE, M. A. N. **Uso da destilação solar no tratamento de águas contaminadas por microrganismos. Aplicações às pequenas comunidades.** XII Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Maceió, 1985.

PROCTOR, D. **The use of waste heat in a solar still.** Solar Energy, v. 14, p. 433-449, Great Britain: Pergamon Press, 1973.

QUASCHNING, V. **Understanding Renewable Energy Systems.** [S.l.] 3. ed. Earthscan, 2005.

ROCHA, R. R. A.; MARTIN, E. S. **Análise preliminar do estado ambiental do córrego água lavadeira, Rancharia-SP: Análise física e química da água.** Revista Eletrônica da Associação dos Geógrafos Brasileiros, v. 2, p. 116-130, 2005.

RODRIGUES, F. P. **Desempenho de uma Torre de Recuperação de Calor com Canais Sintéticos de Poliuretano para um Dessalinizador Solar Térmico.** 2010. 69 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – UFC, Fortaleza.

SANTOS, E. M.; FAGÁ, M. T. W.; BARUFI, C. B.; POULALLION, P. L. **Gás natural: a construção de uma nova civilização.** Estudos Avançados, 21 (59), p.67-90, 2007.

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

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.

TANAKA, H.; NAKATAKE, Y. **Increase in distillate productivity by inclining the flat plate external reflector of a tilted-wick solar still in winter.** Solar Energy, vol. 83, p. 785-789, 2009.

WEBSITES

ESTÁTICA

Disponível em www.estatica-metrologia.com.br/termopares.php Acessado em março de 2011.

GÁS BRASILIANO GBD

Disponível em www.gasbrasiliano.com.br/gasnatural-2010/o_que_e.asp Acessado em fevereiro de 2011.

GASNET

Disponível em www.gasnet.com.br/novo_gasnatural/combust_completo.asp Acessado em fevereiro de 2011.

KRONA

Disponível em www.krona.srv.br/display05.html Acessado em fevereiro de 2011.

NANO SOLUCIONES

Disponível em www.nano-soluciones.com/ Acessado em fevereiro de 2011.

SIDEM - Sidem-desalination

Disponível em www.sidem-desalination.com/en/process/MSF/ Acessado em dezembro de 2009.

UNEP – United Nations Environment Programme

Disponível em www.unep.or.jp/.../techrub-8d/desalination.asp Acessado em Dezembro de 2009.

ANEXOS

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.

A1. Transferência de Calor por Condução

Temperaturas mais altas estão associadas a energias moleculares mais altas. Quando moléculas vizinhas se chocam há uma transferência de energia das moléculas mais energéticas para as menos energéticas. Sendo assim, há uma transferência de energia por condução, de um ponto de maior temperatura para o de menor temperatura. 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:

$$\dot{Q}_c = -\lambda \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \quad (\text{A.1})$$

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 (INCROPERA, 1996).

A2. Transferência de Calor por Convecção

A transferência de calor por convecção se dá pela superposição do transporte de energia pelo movimento aleatório das moléculas (difusão) com o transporte devido ao movimento global do fluido (deslocamento macroscópico do fluido). Na maioria das vezes a convecção é o mecanismo de transferência de calor entre uma superfície sólida e um fluido (líquido ou gás). Esse movimento global do fluido pode ser devido à ação de uma força externa, chamada de convecção forçada, ou devido à existência de uma diferença de temperatura em um campo gravitacional, chamado de convecção natural.

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

$$\dot{Q}_{conv} = h_{conv} \cdot A \cdot \Delta T \quad (\text{A. 2})$$

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

A radiação térmica é a energia liberada por um corpo com temperatura acima de zero grau Kelvin, ou zero absoluto. Essa energia da radiação térmica é transportada por ondas eletromagnéticas (fótons). Essa radiação ocorre tanto em superfícies sólidas, como em líquidos e gases. Enquanto a condução e a convecção necessitam de um meio material para se propagar, a radiação se propaga também no vácuo.

Um corpo que absorve ou emite a máxima quantidade possível de radiação em todos os comprimentos de onda e em todas as direções, é chamado de corpo negro. 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,

$$\dot{Q}_{rad} = \sigma \cdot A \cdot T^4 \quad (\text{A. 3})$$

na qual \dot{Q}_{rad} é a taxa de transferência de calor por radiação, σ é a constante de *Stefan-Boltzmann* ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$), A é a área da superfície e T é a temperatura do corpo em escala absoluta.

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

$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4 \quad (\text{A. 4})$$

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,

$$\dot{Q}_{evap} = h_{evap} \cdot A \cdot \Delta T \quad (\text{A. 5})$$

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 (INCROPERA, 1996).

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,

$$\dot{Q}_{cond} = h_{cond} \cdot A \cdot \Delta T \quad (\text{A.6})$$

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,

$$\dot{m} = \frac{h_{evap} \cdot A \cdot \Delta T}{h_{fg}} \quad (\text{A.7})$$

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