



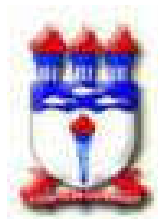
UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA

Nº de ordem: MET – UFAL – MS/060

**EFEITOS DAS VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS NA DESSALINIZAÇÃO
SOLAR DE ÁGUA NA REGIÃO LITORÂNEA DE ALAGOAS**

DIOGO CANEZ BRAUNER

Maceió – Alagoas
setembro de 2009



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA

Nº de ordem: MET – UFAL – MS/060

**EFEITOS DAS VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS NA DESSALINIZAÇÃO
SOLAR NA REGIÃO LITORÂNEA DO NORDESTE BRASILEIRO**

Diogo Canez Brauner

Dissertação apresentada ao Instituto de
Ciências Atmosféricas/UFAL, para
obtenção do título de Mestre em
Meteorologia – Área de concentração em
Processos de Superfície Terrestre

Orientador: Prof. Dr. Marcos Antonio Lima Moura

Maceió – Alagoas
setembro de 2009

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico
Bibliotecária Responsável: Helena Cristina Pimentel do Vale

B825e Brauner, Diogo Canez.

Efeito das variáveis meteorológicas na dessalinização solar de água na região litorânea de Alagoas / Diogo Canez Brauner, 2009.
viii, 70f. : il., graf., tabs.

Orientador: Marcos Antonio Lima Moura.

Dissertação (mestrado em Meteorologia : Processos de Superfície Terrestre) – Universidade Federal de Alagoas. Instituto de Ciências Atmosféricas. Maceió, 2009.

Bibliografia: f. 66-70.

1. Meteorologia. 2. Radiação solar. 3. Clima. 4. Semi-árido – Alagoas. 5. Água Potável. 6. Água salobra. I. Título.

CDU: 551.521.31(813.5)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA

CERTIFICADO DE APRESENTAÇÃO


N.º de ordem: MET-UFAL-MS-060.

“Efeitos das Variáveis Meteorológicas na dessalinização solar de água na
região litorânea de Alagoas”

Diogo Canez Brauner

Dissertação submetida ao colegiado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Alagoas - UFAL, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Meteorologia.


Aprovado pela Banca Examinadora composta por:



Prof. Dr. Marcos Antônio Lima Moura
(Orientador)



Prof. Dr. Maurício Luiz Senz
(Membro Externo)



Dra. Sandra Helena Vieira de Carvalho
(Membro interno)

Maceió – AL

Setembro/2009

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	ii
LISTA DE TABELAS	iv
DEDICATÓRIA	v
AGRADECIMENTOS	vi
RESUMO	vii
ABSTRACT	viii
1 INTRODUÇÃO	9
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 Radiação solar	4
2.2 Disponibilidade hídrica e potencial solar	7
2.3 Tecnologia de dessalinização	9
2.3.1 Processos Térmicos	9
2.3.2 Processos por Membrana	11
2.4 Dessalinização solar	12
3 MATERIAIS E MÉTODOS	16
3.1 Descrição do funcionamento de um dessalinizador	16
3.2 Descrição da área de estudo	18
3.3 Instrumentação	21

3.4	Características construtivas	23
3.5	Desempenho do dessalinizador	25
	a) Influência das variáveis meteorológicas	25
	b) Estudo de caso: comparativo Inverno/Verão	25
3.6	Análise Estatística	25
3.7	Parâmetro “D”:	26
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
	4.1 Desempenho do dessalinizador	27
	a) Influência das variáveis meteorológicas	27
	b) Estudo de caso: comparativo Inverno/Verão	50
	4.2 Análise estatística	58
5	CONCLUSÕES	63
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Esquema do princípio de funcionamento de um destilador solar. Fonte: BUROS (1980), citado por SOARES (2004). _____	17
FIGURA 2 - Nova delimitação do semi-árido brasileiro. Fonte: MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL (2005). _____	19
FIGURA 3 - Localização do município de Maceió, Alagoas. Fonte: WIKIPÉDIA, 2008.	21
FIGURA 4 - Equipamento em operação durante o período do experimento. _____	24
FIGURA 5 – Layout do equipamento em projeção 3D. Medidas em centímetros (cm). _	24
FIGURA 6 - Perfil médio de temperatura (°C) no período de estudo, sendo (1) destilação e (2) dessalinização. Período de 09 a 15 de janeiro de 2008. _____	28
FIGURA 7 - Perfil horário médio da temperatura na água e vidro (°C) e volume de condensado ($\text{mL m}^{-2} \frac{1}{2} \text{h}^{-1}$) em (a) destilação e (b) dessalinização. _____	30
FIGURA 8 – Perfil médio horário de radiação solar global (W m^{-2}) e volume de condensado ($\text{mL m}^{-2} \frac{1}{2} \text{h}^{-1}$) nos dois processos no período de 9 a 15 de janeiro de 2008. _____	32
FIGURA 9 – Volume acumulado médio diário para: condensado ($\text{mL m}^{-2} \text{dia}^{-1}$) e R_g (MJ m^{-2}). _____	34
FIGURA 10 – Relação entre o perfil médio de radiação solar global (W m^{-2}) e eficiência (%) nos dois processos. _____	35

FIGURA 11 - Perfil médio de condensado acumulado ($\text{mL m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) e da velocidade do vento (m s^{-1}) no período de 9 a 15 de janeiro de 2008. _____	36
FIGURA 12 - Relação entre velocidade do vento (m s^{-1}) e eficiência (%) nos processos de destilação e dessalinização. _____	37
FIGURA 13 - Ciclos diários da radiação solar global (W m^{-2}) e das temperaturas da água pura (1) e salobra (2) e ambiente ($^{\circ}\text{C}$) no período de 09 a 15.01.08. _____	38
FIGURA 14 - Ciclos diários de radiação solar global acumulada (MJ m^{-2}) e volumes acumulados de destilado e dessalinizado ($\text{mL m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) no período de 09 a 15 de janeiro de 2008. _____	40
FIGURA 15 - Relação entre os volumes de destilado e dessalinizado ($\text{mL m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) e radiação solar global média (W m^{-2}) no mês de janeiro de 2008. _____	41
FIGURA 16 - Temperaturas média da água ($^{\circ}\text{C}$) nos dois processos, e volumes de condensado diário ($\text{mL m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) no período de 09 a 15.01.2008. _____	43
FIGURA 17 - Ciclo de variação da amplitude térmica entre a temperatura da água ($T_{\text{água}}$) e vidro (T_{vidro}) nos processos de destilação/dessalinização. _____	44
FIGURA 18 - Variação do volume de condensado ($\text{mL m}^{-2} \frac{1}{2} \text{ h}^{-1}$) e valores médios de velocidade do vento (m s^{-1}) ao longo do dia. _____	47
FIGURA 19 – Influência da salinidade (mg L^{-1}) e da lâmina de água no interior do equipamento (mm) na variação diária do volume de condensado ($\text{mL m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$). ____	48
FIGURA 20 - Relação entre volume de condensado ($\text{mL m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) e o parâmetro D . ____	49
FIGURA 21- Ciclo diário de radiação solar global (W m^{-2}) e radiação solar acumulada (MJ m^{-2}) no inverno e no verão. _____	51

FIGURA 22 – Variação média diária de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) na água (a) e no vidro (b) nas duas estações, sob diferentes salinidades. _____	53
FIGURA 23 - Rendimento médio horário de condensado ($\text{mL m}^{-2} \frac{1}{2} \text{h}^{-1}$) e acumulado (mL m^{-2}) no inverno e verão sob diferentes salinidades. _____	55
FIGURA 24 - Eficiência de dessalinização em função da salinidade em duas estações distintas, inverno e verão. _____	57
FIGURA 25 - Regressão logaritma entre o volume de condensado ($\text{mL} \frac{1}{2} \text{h}^{-1}$) e velocidade do vento (m s^{-1}). Dados de meia hora no período de 11 a 15 de janeiro de 2008. __	59
FIGURA 26 - Regressão polinomial entre radiação solar global (W m^{-2}) e condensado ($\text{mL} \frac{1}{2} \text{h}^{-1}$) nos processos de destilação e dessalinização. Dados de meia hora no período de 11 a 15 de janeiro de 2008. _____	60
FIGURA 27 - Regressão polinomial entre volume de condensado ($\text{mL} \frac{1}{2} \text{h}^{-1}$) e temperatura da água ($^{\circ}\text{C}$) nos dois processos. Dados de meia hora no período de 11 a 15 de janeiro de 2008. _____	61
FIGURA 28 - Regressão exponencial entre a diferença $T_{\text{água}} - T_{\text{vidro}}$ ($^{\circ}\text{C}$) e eficiência (%) no processo de destilação e dessalinização. Médias de meia hora no período. _____	62

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Precipitação ocorrida entre 09 e 15 de janeiro de 2008. _____	33
--	----

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho as minhas irmãs Alessandra e Fabiana. Espero que mesmo com minhas faltas como ser humano, como irmão, vocês saibam como sou envaidecido, orgulhoso e honrado por ser irmão de vocês, sobretudo pelo ser humano especial que cada uma de vocês é. Os laços que nos unem são maiores que os de sangue, são laços de alma, laços de amor, de carinho, de ternura, de respeito e muita admiração.

A Zulma Sica Canez, avó amada e idolatrada que recentemente desencarnada retorna, livre, para reencontrar os seus e levar sua luz a outros pagos. A distância é apenas o tempo a passar.

*“É da forja viva do pensamento que nascem as
asas dos anjos e as algemas dos condenados”.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Ele, causa primeira do Todo. Aquele que é impronunciável, uma vez que, ainda não temos sabedoria nem conhecimento para definir o que ainda é indefinível. A Ti, obrigado por tudo me dar e nada faltar.

Aos meus pais João Carlos e Luiza Maria por receberem-me como filho, por me oferecer um lar, uma família e, sobretudo, não apenas por palavras, mas pelo exemplo, plantarem em mim sementes de valores hoje tão carentes em nossa sociedade, valores como caráter, integridade, respeito, humildade, honestidade, responsabilidade e tolerância.

A Kizze, lindo ser humano, dádiva Dele, bênção em minha vida. Agradeço pela tua presença e sorriso diário, pelo amor, paciência, carinho e incentivo. Obrigado por confiar em mim. Amo-te!

Ao Prof.Dr. Marcos Antonio Lima Moura, pela tolerância, paciência e orientação.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES – pelo apoio financeiro sem o qual não seria possível a realização desse trabalho.

Aos amigos conquistados e reunidos nesse período, sou grato pelo apoio e amizade. Obrigado especial a Irene e Japa.

EFEITOS DAS VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS NA DESSALINIZAÇÃO SOLAR DE ÁGUA NA REGIÃO LITORÂNEA DE ALAGOAS

BRAUNER, Diogo Canez. Efeitos das variáveis meteorológicas na dessalinização solar de água na região litorânea de Alagoas. Orientador: Dr. Marcos Antônio Lima Moura. Maceió/AL, 2009. 71 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – UFAL.

RESUMO

Apesar de o Brasil possuir 11,6% de toda água doce do mundo, esta água está mal distribuída, pois apenas 3% desse total estão disponíveis para uma população de 52 milhões de habitantes. Ainda, as variações climáticas que essa região enfrenta ao longo de cada ano é uma das causas responsáveis pela falta de água para o consumo humano. Em busca de soluções, as águas subterrâneas vêm sendo mais exploradas pelo homem, todavia, as águas comumente encontradas são impróprias para o consumo devido aos seus altos índices de sais dissolvidos. Dessa forma, o objetivo desse trabalho foi avaliar a influência dos parâmetros meteorológicos, da estação do ano, da lâmina de água e da salinidade sobre a produtividade de água e eficiência no processo de dessalinização solar. O experimento foi realizado no período entre junho de 2007 e março de 2008 utilizando dois dessalinizadores, um com água pura e outro com água salobra, com salinidade variando entre 800 e de 1600 mg L⁻¹, sendo feita análise dos efeitos das variáveis meteorológicas, salinidade e lâmina de água com base na média horária e diária do período de 09 a 15 de janeiro de 2008. Além disso, foi feito um comparativo entre inverno e verão e, também, análise estatística dos resultados. Foi desenvolvido um parâmetro que permite simular com precisão satisfatória o potencial de produtividade de água potável para as condições climáticas desejada. No inverno, independentemente da salinidade, os resultados mostram que a técnica não é viável no nordeste brasileiro, sendo produzido apenas 0,9 L m⁻². Já para as condições de verão a técnica se mostrou viável para ambas as salinidades, contudo, o experimento com menor salinidade obteve um rendimento relativo 23% superior ao de maior salinidade, registrando uma produção diária de 2,7 L m⁻² contra 2,2 L m⁻² evidenciando uma forte relação inversa entre salinidade e rendimento de condensado. A precipitação, desde que de baixa intensidade, não é prejudicial. As melhores condições para dessalinização solar são atingidas quando se registra temperatura média diária da água salobra em torno de 40°C, radiação solar global acumulada acima de 18 MJ m⁻² dia⁻¹ e vento com velocidade acima de 6 m s⁻¹. A lâmina de água também mostrou possuir uma relação inversa a produtividade devendo, dentro do possível, se operar com baixas lâminas de solução no interior do equipamento.

Palavras-chave: radiação solar global, clima, água potável, água salobra, semi-árido.

EFFECTS OF METEOROLOGICAL VARIABLES OVER WATER SOLAR DESSALINIZATION IN THE COASTAL REGION OF ALAGOAS

BRAUNER, Diogo Canez. Efeitos das variáveis meteorológicas na dessalinização solar de água na região litorânea de Alagoas. Orientador: Dr. Marcos Antônio Lima Moura. Maceió/AL, 2009. 71 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – UFAL.

ABSTRACT

Although 11,6% of the world's potable water is placed in the Brazilian territory, the water is not well distributed because only 3% of it is available for a 52 million population. Besides, the annual climate variability of this region is responsible for the lack of water for human usage. Subterranean water has been explored on the attempt of solving this problem, but unfortunately no drinkable water has been found, due to the elevated amount of salts founded in it. Therefore, this study has the objective of analyze the effects of meteorological variables, season, salinity and water layer, over the process of potable water production and solar desalinization. The study was based on the data obtained from two desalters one filled with pure water and the other with salt water, with salinity changing between 800 mg L^{-1} and 1600 mg L^{-1} . The experiment started in June of 2007 and finished in march of 2008. Moreover, summer and winter were statistically compared. A suitable parameter, capable of provide a satisfactory simulation of water production potential under specific climate conditions, was developed. During the winter, regardless the salinity, the results shows that the technique is not worth using in the Brazilian Northeast, and only $0,9 \text{ L m}^{-2}$ of water were produced. Although, during the summer, the technique showed great results on both desalters, though the one filled with pure water had a relatively greater efficiency of 23% over the other, recording a daily production of $2,7 \text{ L m}^{-2}$ against $2,2 \text{ L m}^{-2}$, enunciating an inverse relation between salinity and production efficiency. The precipitation, whether not intense, is not unfavorable. The best conditions for solar desalinization are settled when the daily mean temperature of the salt water achieves 40°C , global solar radiation over $18 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ and wind speed over 6 m s^{-1} . The water layer also showed an inverse relation with the production, leading us to believe that insert small water layers into the desalter is more efficient.

Key words: global solar radiation, climate, potable water, salt water, semi arid.

1 INTRODUÇÃO

O nosso planeta possui água líquida em grande abundância, $\frac{3}{4}$ da superfície da Terra é recoberta por água, sendo que 97,2% do volume destas águas são salgadas, isto é, apresentam sólidos totais dissolvidos (STD) igual ou superior a 30.000 mg L^{-1} , ou seja, é inapropriada para o consumo humano e abastecimento público.

O princípio básico da destilação já é conhecido há muito tempo contudo, foi em 1872, no Chile, a construção da primeira importante instalação que se tem notícia. Este destilador solar situava-se em Las Salinas, numa zona desértica. Essa planta é descrita como sendo uma instalação coberta de vidro, abarcando uma superfície de 50.000 ft^2 (4645 m^2), produzindo 18.950 litros de água destilada por dia. O destilador funcionou de 1872 até 1910. Um marco no desenvolvimento ocorreu nos anos 40, durante a segunda guerra mundial, quando vários estabelecimentos militares, em regiões áridas, necessitaram de água para suprir suas tropas. Foram construídos vários destiladores de tamanhos bem mais reduzidos, com a finalidade de serem utilizados nas embarcações de salva-vidas. A potencialidade que a dessalinização oferecia ficou evidenciada e trabalhos foram

prosseguidos após a guerra em vários países. Destiladores de grande porte foram então construídas em Coober Pedy (Austrália) com 34.000 ft², produzindo 6.700 litros dia⁻¹, Patmos (Grécia) com 93.000 ft², produzindo 27.000 litros dia⁻¹ e outros países mais como Tunísia, Espanha e Paquistão.

No Brasil, especialmente no Nordeste, região árida, a dessalinização vem sendo praticada em muitos municípios dos Estados que integram essa região, pois os poços artesanais perfurados para amenizar a seca apresentam a maior parte deles, água salobra.

O Brasil é um país privilegiado, pois aqui estão 11,6% de toda água doce do planeta. No entanto essa água está mal distribuída, 70% das águas doces do Brasil estão na Amazônia, onde vivem apenas 7% da população. Essa distribuição deixa apenas 3% de água para o nordeste, formado pelos Estados do Maranhão, Piauí, Ceará, Alagoas, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Sergipe e Bahia.

As variações climáticas que essa região enfrenta ao longo de cada ano é um dos parâmetros responsáveis pela falta de água para o consumo humano. Em busca de soluções, as águas subterrâneas vem sendo mais exploradas pelo homem, todavia, as águas comumente encontradas são impróprias para o consumo devido aos seus altos índices de sais dissolvidos. Além do problema de salinidade sabemos que contaminações bacteriológicas são responsáveis por inúmeras doenças que levam muitas vezes à morte, principalmente no interior do semi-árido nordestino, região desprovida de saneamento e assistência à saúde.

Listam-se ainda as seguintes vantagens da tecnologia de dessalinização solar: a região nordeste apresenta alto potencial energético e condições climáticas propícias, o equipamento é de baixo custo e manutenção simples, há viabilidade econômica e técnica e o projeto proporciona retorno econômico para as comunidades atendidas, mas, sobretudo, retorno social, de saúde pública e qualidade de vida.

Este trabalho teve como objetivo analisar os processos de destilação e dessalinização, ou seja, consistiu em determinar a produtividade e eficiência dos mesmos e verificar suas interações com os parâmetros meteorológicos estudados: radiação solar global, temperatura, velocidade do vento e precipitação. Além disso, buscou-se, também, verificar a influência da lâmina de água e da salinidade da solução no interior dos equipamentos no processo de destilação/dessalinização.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Radiação solar

No Sol, a energia nuclear é produzida com o hidrogênio fazendo o papel de combustível. A alta pressão existente em seu núcleo faz com que o hidrogênio atinja temperaturas de 15 milhões de graus centígrados no centro do Sol. Com o gás nessa temperatura e pressão é que ocorrem as reações nucleares que mantêm o Sol aquecido. As reações nucleares do Sol transformam o hidrogênio em hélio e nessa transformação é liberada uma enorme quantidade de energia (CDCC – USP, 2007). A fotosfera solar emite energia por meio de radiação, essa quantidade de energia é de aproximadamente 72×10^6 W m⁻².

O espectro eletromagnético é definido como o conjunto de todas as ondas eletromagnéticas com comprimento de onda que variam desde 0,01 μm (raios gama) até 1000 μm (ondas longas de rádio). Ondas são perturbações periódicas, ou oscilações de partículas ou do espaço. Todos os movimentos ondulatórios em um meio resultam de

oscilações de partículas individuais em torno de suas posições de equilíbrio. Isto significa que uma onda progressiva é o movimento provocado por uma perturbação qualquer e não um deslocamento do meio em si mesmo. Em outras palavras, uma onda não propaga matéria; cada partícula do meio oscila apenas em torno de sua posição de equilíbrio. As ondas propagam somente energia, que é transferida por meio de átomos e moléculas da matéria.

De acordo com VAREJÃO (2000), o comprimento de onda (λ) é definido como a distância que separa duas cristas consecutivas sendo expresso normalmente em centímetros ou micra ($1 \mu\text{m} = 10^{-4} \text{ cm}$). A radiação solar chega a Terra principalmente em comprimentos de onda na faixa compreendida entre $0,2 \mu\text{m}$ e $3 \mu\text{m}$, tendo o seu máximo de emissão no comprimento de onda de $0,48 \mu\text{m}$. Essa distribuição aproxima-se a distribuição de um corpo negro a 5770 K .

A radiação solar recebida acima da atmosfera é denominada radiação solar extraterrestre. Segundo LOPES (2004), nos anos 50, os valores da intensidade da radiação solar extraterrestre eram apenas estimados, pois as medidas eram realizadas na superfície da terra. Já nos anos 70, com a evolução dos balões atmosféricos e aeronaves especiais, foi realmente possível medir a intensidade da radiação solar fora da atmosfera. Muitos experimentos foram realizados com diferentes instrumentos de medida, e deles resultaram o valor de $1353 \text{ W m}^{-2} \pm 1,5\%$, sendo aceito pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) e pela *American Society of Testing and Materials* (ASTM). Nos anos 80, através de novas medidas realizadas, passou-se a recomendar o valor de $1367 \text{ W m}^{-2} \pm 1\%$, reconhecido pelo *The World Radiation Center* (WRC). Este número é denominado Constante Solar (S) e é a energia recebida do sol, por unidade de tempo, sobre uma área de superfície perpendicular à direção de propagação da radiação solar a uma distância média Terra- Sol de 1 UA ($1 \text{ UA} = 1,495 \times 10^{11} \text{ m}$).

Define-se como radiação ou energia radiante àquela forma de transferência de energia em que, para sua propagação, não é necessário um meio material. Segundo VAREJÃO (2000), a verdadeira natureza da radiação ainda é objeto de permanente investigação científica no âmbito da Física Moderna. Dependendo do interesse e da experiência conduzida, a radiação pode se manifestar em uma natureza corpuscular (fóton) ou se comportar como uma onda eletromagnética. Na escala subatômica as propriedades corpusculares e ondulatórias coexistem e se completam (VAREJÃO, 2000).

Conhecer a intensidade da radiação solar recebida sobre uma superfície durante determinado tempo é essencial para um bom dimensionamento de sistemas que utilizam energia solar (LOPES, 2004). A energia da radiação solar extraterrestre recebida durante um dia, sobre uma superfície paralela no plano horizontal da superfície da terra, é determinada através da equação a seguir (VIANELLO, 2004):

$$R_n = 37,6 \times \left(\frac{D}{D_0}\right)^2 \times (H \times \sin\varphi \times \sin\delta + \cos\varphi \times \cos\delta \times \sin H) \quad (1)$$

R_0 é a irradiância solar diária incidente sobre uma superfície horizontal no topo da atmosfera, sendo “ H ” em radianos e “ R_0 ” em MJ/m².

$\left(\frac{D}{D_0}\right)^2$ é a variação da densidade de fluxo de radiação que atinge uma superfície normal

aos raios, no topo da atmosfera, em virtude da distância variável da Terra em relação ao Sol.

H é a duração do dia solar.

φ é a latitude local.

δ é a declinação do sol que também é função do dia do ano.

2.2 Disponibilidade hídrica e potencial solar

Muitos países podem entrar em guerra por causa dos recursos hídricos, pois estudos indicam que o consumo mundial de água dobra a cada 20 anos. A água tem sido considerada, no final deste século, um recurso escasso e estratégico, por questão de segurança nacional e por seus valores social, econômico e ecológico (MAIA NETO, 1997).

Atualmente, vários países enfrentam problemas com a falta de água, como Kuwait, Israel, Jordânia, Arábia Saudita, Líbia, Iraque, Bélgica, Argélia, Cabo Verde, Etiópia, Iraque, Hungria, México, Estados Unidos, França, Espanha e outros, ou seja, em 26 países do planeta a seca é crônica. No Brasil, a ocorrência mais freqüente de seca reside no Nordeste, enquanto problemas sérios de abastecimento em outras regiões já são identificados e conhecidos. Organismos internacionais alertam para o fato de que nos próximos 25 anos cerca de 2,8 bilhões de pessoas poderão viver em regiões com extrema falta de água, inclusive para o próprio consumo (PAZ *et al.* 2000).

Na escala mundial, a demanda hídrica estava estimada, em 1996, em $5.692 \text{ km}^3 \text{ ano}^{-1}$ contra uma oferta de $3.745 \text{ km}^3 \text{ ano}^{-1}$, ou seja, a oferta hídrica mundial só atendia a cerca de 66% dos usos múltiplos. Mantendo-se as taxas de consumo e se considerando um crescimento populacional à razão geométrica de 1,6% a a, o esgotamento da potencialidade de recursos hídricos pode ser referenciado por volta do ano 2053. Assim, as disponibilidades hídricas precisam ser ampliadas e, para tanto, são necessários investimentos em pesquisa e desenvolvimento tecnológico para exploração viável e racional da água (MAIA NETO, 1997).

A despeito de ser o Brasil o maior detentor mundial de água potável, com 8% das reservas mundiais, respondendo por 18% do potencial de água de superfície do planeta, ao se considerar, em lugar da disponibilidade absoluta de recursos hídricos renováveis, aquela relativa à população dele dependente, o Brasil deixa de ser o primeiro e passa ao

vigésimo terceiro do mundo, visto que, enquanto a Região Amazônica concentra 80% dos recursos hídricos brasileiros, abrigando 7% da população, na Região Nordeste, que abriga 27% da população, apenas está disponível 3,3% desses recursos (PAZ et al. 2000).

De acordo com SOARES (2006), apesar da deficiência em recursos hídricos superficiais, poderiam ser extraídos do subsolo da Região Nordeste, sem risco de esgotamento dos mananciais, pelo menos 19,5 bilhões de m³ de água por ano (40 vezes o volume explorado hoje), segundo estudos da Associação Brasileira de Águas Subterrâneas (ABAS). O Brasil tem o impressionante volume de 111 trilhões e 661 milhões de metros cúbicos de água em suas reservas subterrâneas, inclusive detendo o maior aquífero do mundo, o Botucatu ou Gigante do Mercosul. O uso desta água, porém, é limitado por um problema típico dos poços do interior nordestino: a concentração elevada de sais. Grande parte da região (788 mil km², ou 51% da área total do Nordeste) está situada sobre rochas cristalinas e o contato por longo tempo, no subsolo, entre a água e esse tipo de rocha, leva a um processo de salinização. Sem opção, diversas comunidades rurais nordestinas consomem água com salinidade acima do limite recomendado pela Organização Mundial da Saúde (OMS), que é de 500 ppm.

Além de um recurso imprescindível à vida, a água também é um insumo de desenvolvimento, sendo a sua escassez, um dos primordiais fatores de origem da miséria no Nordeste. MONTEIRO & PINHEIRO (2004), encontraram forte correlação entre indicadores sócio-econômicos no Estado do Ceará e a salinização das águas que abastecem suas populações. Os 10 municípios (entre 170) com piores indicadores possuem quase 70% de seus poços com altos teores de sais, enquanto nos 10 melhores classificados este percentual é de apenas 16%.

O Brasil, por ser um país localizado na sua maior parte na região inter-tropical, possui grande potencial para aproveitamento de energia solar durante todo o ano. Além da

importância atual no panorama energético e no desenvolvimento sustentável do país, o conhecimento da radiação solar incidente é importante para áreas da atividade humana como, por exemplo, a meteorologia e a climatologia. No setor de agronegócios, é importante para o planejamento e obtenção da maior eficiência energética nas diversas etapas de produção: a seleção das culturas, o plantio, a colheita incluindo o desenvolvimento e operação de sistemas de irrigação de áreas e a secagem de grãos (PEREIRA *et al.* 2006).

Segundo COLLE & PEREIRA (1998), o Brasil apresenta valores médios de irradiação variando entre 4500–6100 Wh m⁻². A região Sul é a que apresenta maior variabilidade com valores de 2500 Wh m⁻² no inverno e de até 7500 Wh m⁻² no verão. Já a região Nordeste, apresenta menores variações, entre 4000–7000 Wh m⁻². Nos meses que compreendem o verão, época de maior interesse por ser nesse período a maior escassez de água no semi-árido nordestino, a irradiação varia entre 5500–7000 Wh m⁻², o que torna essa região muito propícia para investimentos em pesquisas, projetos e instalação de equipamentos que funcionem com base no princípio da dessalinização solar.

2.3 Tecnologia de dessalinização

2.3.1 Processos Térmicos

Grande parte da água dessalinizada a nível mundial é produzida com calor para, através da destilação, gerar água potável a partir da água do mar. Os processos térmicos baseiam-se em mudanças de fase e são independentes. Dividem-se em destilação e congelamento.

No processo *Multiple Stage Flash* (MSF), a água marinha é aquecida em um recipiente chamado de aquecedor de água salgada. Esta água marinha aquecida flui então

para outro recipiente, denominado de estágio, onde a pressão é tal que a água irá ferver imediatamente. A introdução súbita da água aquecida na câmara faz com que esta ferva rapidamente, quase explodindo ou transformando-se rapidamente em vapor. O vapor gerado pelo “flashing” é convertido em água doce através da condensação em tubos de troca de calor que correm através de cada estágio (SOUZA, 2006).

Os destiladores solares reproduzem o ciclo hidrológico natural, onde a radiação solar aquece a água salgada produzindo evaporação. Este vapor então, ao entrar em contato com uma superfície mais fria é condensado, obtendo-se nesse processo a água doce como produto.

Outro exemplo de processo por destilação é conhecido por *Destilação de Múltiplos Efeitos* (MED). Segundo SOUZA (2006), acontece em uma série de recipientes (efeitos) e utiliza o princípio de redução de pressão interna nos vários efeitos. Isto permite à água marinha se submeter à ebulição múltipla sem suprimento de calor adicional após o primeiro efeito. A água marinha é então vaporizada sobre a superfície dos tubos evaporadores numa película fina para promover ebulição e evaporação rápida. Apenas uma porção de água marinha aplicada aos tubos do primeiro efeito é evaporada. A água remanescente é levada para o segundo efeito, onde é novamente aplicada a uma série de tubos. Estes tubos são por sua vez aquecidos pelos vapores criados no primeiro efeito. Este vapor é condensado formando o produto água doce, enquanto libera calor para evaporar uma porção de água marinha remanescente no próximo efeito. Isto continua pelos vários efeitos. Nas grandes plantas são encontrados de 8 a 16 efeitos.

Extensivos trabalhos foram realizados nos anos 50 e 60 para desenvolver a dessalinização por congelamento. Durante o processo de congelamento, a solubilidade dos sais diminui sendo naturalmente excluídos durante a formação dos cristais de gelo. Antes que a massa inteira de água tenha congelado, a mistura é usualmente lavada e enxaguada

para remover os sais na água remanescente ou aderidos aos cristais de gelo. O gelo é então derretido para produzir água doce (PINA, 2004).

2.3.2 Processos por Membrana

Na natureza, as membranas desempenham um importante papel na separação dos sais. As membranas são utilizadas em dois processos comercialmente importantes de dessalinização: *Eletrodialise* (ED) e *Osmose Reversa* (RO). Entretanto, as membranas são utilizadas diferentemente em cada um destes processos.

Segundo SOARES (2006), na osmose reversa, a água escoar no sentido inverso ao da osmose, devido à aplicação de pressão à solução mais concentrada sendo fundamental o uso de uma fonte de energia para vencer o potencial osmótico e membranas semi-permeáveis de qualidade. Esta pressão varia de 1,7 a 2,7 N m⁻² para a água salobra e de 5,4 a 8,0 N m⁻² para a água salgada. A membrana e seu conjunto consistem de um recipiente de pressão e uma membrana que permite que a água seja pressurizada contra a membrana. A membrana deve ser capaz de suportar a queda de toda a pressão através dela. Nenhuma membrana é perfeita na sua capacidade de rejeição de sais, de forma que uma pequena quantidade de sais passa através da membrana e aparece na água produto (SOUZA, 2006).

Já a eletrodialise, está apoiada no princípio geral de que a maioria dos sais dissolvidos na água apresentam-se carregados positivamente ou negativamente e, que íons podem ser atraídos por eletrodos de cargas elétricas opostas (PINA, 2004). Quando são colocados eletrodos ligados a uma fonte externa de corrente contínua como uma bateria e um “contêiner” de água salgada, a corrente elétrica é transportada através da solução, com os íons tendendo a migrar para o eletrodo de carga oposta. Assim, nas extremidades são

colocados eletrodos que ao serem ligados a um potencial elétrico, fazem deslocar seletivamente sais através das membranas, deixando atrás água doce como produto. (SOUZA, 2006).

2.4 Dessalinização solar

O consumo de água potável está aumentando em todo o planeta, principalmente devido à explosão populacional e ao rápido crescimento industrial. Em regiões em que as fontes de água salobra e energia solar estiverem disponíveis, pequenas quantidades de água potável podem ser produzidas a um baixo custo utilizando um destilador solar, o qual é de construção barata e de fácil manutenção (AL-HAYEK & BADRAN, 2004).

BOUCHEKIMA (2003), relata que os destiladores solares são caracterizados pela facilidade de construção podendo ser realizada por pessoas locais desde que haja disponibilidade de materiais, a operação é fácil podendo ser feita por pessoal não qualificado, a manutenção é simples e o custo de operacional é quase inexistente. Além disso, os destiladores solares são usados em pequena escala comercial para abastecer comunidades em áreas isoladas. Este processo remove impurezas como sal e metais pesados, bem como, destrói organismos microbiológicos (AL-HAYEK & BADRAN, 2004). Frequentemente as fontes de água são salgadas e/ou contaminadas por bactérias nocivas não podendo ser usada para consumo (AYBAR, EGELIOGLU & ATIKOL, 2005). O sistema de dessalinização solar pode ser uma fonte ideal de água para consumo e para agricultura nas zonas áridas (BOUKAR & HARMIM, 2007).

A maioria dos destiladores de água produzidos podem variar drasticamente com a posição geográfica, posição solar, condições meteorológicas, desenho do destilador

solar, altura lâmina de água e técnicas operacionais (AL-HAYEK & BADRAN, 2004). De acordo com TOURE & MEUKAM (1997), os resultados obtidos dependem das condições climáticas de cada país.

Um destilador é formado basicamente por uma estrutura de sustentação, uma superfície absorvedora da radiação solar, a qual contém o fluido a ser destilado e uma cobertura transparente.

Dentre os materiais empregados na estrutura do destilador pode-se citar concreto, fibra de vidro, ferrocimento (MOTA & ANDRADE, 1986), madeira (SOTO, URBAN & SCHWARZER, 2003; BOUKAR & HARMIM, 2007; AL-HAYEK & BADRAN, 2004 e MEUKAN, 2004), fibra plástica reforçada (FRP) (TRIPATHI & TIWARI, 2005; TIWARI, 2003). Como superfície absorvedora encontramos diversos materiais como madeira e fibra de vidro desde que devidamente pintados de preto para aumentar a absorção da radiação solar. Contudo, os materiais mais utilizados são aço galvanizado (AYBAR, EGELIOGLU & ATIKOL, 2005; AYBAR, 2006) e aço inoxidável (SOTO, URBAN & SCHWARZER, 2003; AL-HAYEK & BADRAN, 2004; BOUKAR & HARMIM, 2007 e MEUKAN *et al.* 2004).

Alguns autores utilizam materiais isolantes para minimizar a transferência de calor por condução para o meio e, assim, maximizar a temperatura no interior do dessalinizador. Como materiais isolantes encontramos lã de vidro, poliestireno (CAPPELLETTI, 2002; MEUKAN *et al.* 2004) e lã de rocha (AL-HAYEK & BADRAN, 2004). A cobertura do destilador pode ser feita de qualquer material transparente, sendo plástico e vidro os mais utilizados. O vidro foi o material utilizado por todos os autores citados apresentando espessura entre 3–5 mm. O vidro é o material mais empregado pois possui boa resistência mecânica e por aumentar o efeito estufa no interior do

dessalinizador, efeito esse desejável visto que causa um aumento de temperatura no interior do mesmo.

Ainda encontram-se autores que fazem uso de materiais refletores para aumentar a absorção da radiação solar. Segundo TANAKA & NAKATAKE (2007), o uso de refletores internos e externos pode ser uma modificação barata e útil para aumentar a radiação solar incidente na bandeja, bem como, a produtividade de água destilada. Os autores recomendam ainda, que os lados e a parte de trás do destilador sejam cobertas com materiais altamente refletivos, servindo como refletores internos. Assim, além da radiação direta e difusa, a radiação refletida, também é absorvida pela bandeja do destilador. Também, AL-HAYEK & BADRAN (2004), recomendam a utilização de espelhos no interior do destilador para aumentar a absorção de radiação solar.

Já quanto aos resultados encontrados, CAPPELLETTI (2002), em seu experimento, cita que a temperatura da água na base variou entre 50–80°C. Já no trabalho de AL-HAYEK & BADRAN (2004), a temperatura da água chegou a atingir 80°C as 14 h.

Na pesquisa feita por MEUKAM *et al.* (2004), a variação de temperatura da água e da bandeja foi de 70–80° C entre 12 e 14:30 h. A temperatura da cobertura nesse horário ficou aproximadamente 10°C menor que a da água.

TOURE & MEUKAM (1997), desenvolveram um modelo matemático que mostrou a variação de temperatura entre a água e a cobertura de vidro, durante o dia, sendo esta variação de 10%. O modelo teórico quando comparado ao experimental apresentou um erro relativo de 5%.

MEUKAM *et al.* (2004), nas conclusões de seu experimento, cita que para regiões equatoriais a melhor inclinação da cobertura é de 16°. Os autores citados encontraram em seus experimentos produções diárias de água destilada entre 3,5–6 litros

m⁻². Segundo TOURE & MEUKAM (1997), ao longo do dia, as lâminas de água que obtiveram maior produção de água destilada foi de 5 e 10 mm, nessa ordem. Os mesmos autores sugerem ainda que, para uma irradiação total diária de aproximadamente 20 MJ m⁻², a produção de água destilada varia de 5 a 6 litros para lâminas de água variando entre 5 e 60 mm.

Os autores citados relatam em seus artigos que a eficiência de um destilador varia em torno de 25–40% no inverno e de 30–60% no verão, dependendo do projeto, da construção, operação e condições ambiente.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Descrição do funcionamento de um dessalinizador

Segundo DUFFIE & BECKMAN (1991) e KREITH & KREIDER (1978), a primeira aplicação conhecida de uma planta de destilação solar foi em 1872 quando um dessalinizador em Las Salinas, no deserto ao norte do Chile, ficou em operação por três décadas produzindo água potável para animais em uma mina de sal.

De acordo com BEZERRA (2001), a destilação pode ser traduzida por um balanço de energia associado a um processo de transferência de calor e massa. A dessalinização solar consiste em reproduzir o ciclo hidrológico natural.

A FIGURA 1 mostra o princípio básico de funcionamento de um destilador solar, onde a radiação solar aquece a água salgada contida no fundo armazenador ou bandeja, produzindo evaporação, até atingir uma condição de saturação no interior do equipamento. Este vapor então, ao entrar em contato com a superfície mais fria, que nesse caso é a cobertura transparente de vidro, é condensado obtendo-se nesse processo a água doce como produto. A água evaporada ao se condensar na cobertura escoar por gravidade,

devido à inclinação da mesma, e é coletada por calhas as quais conduzem a água doce para um recipiente armazenador.

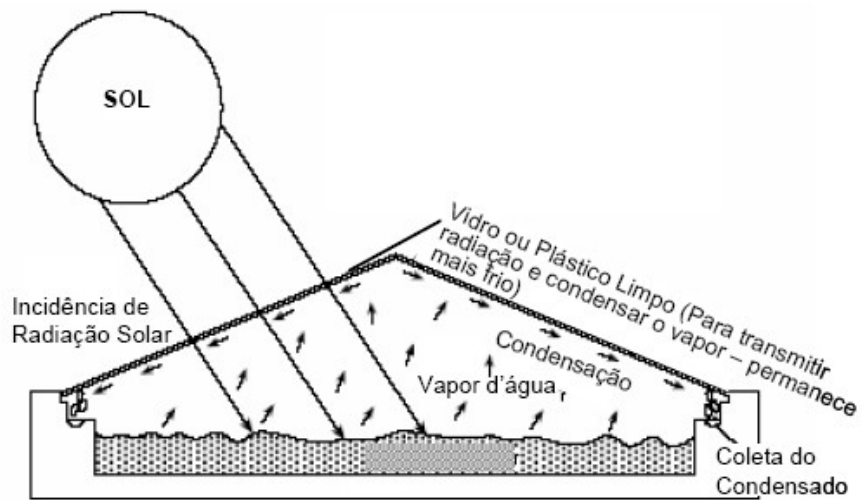


FIGURA 1 - Esquema do princípio de funcionamento de um destilador solar. Fonte: BUROS (1980), citado por SOARES (2004).

No balanço de energia aproximadamente 68% da energia da radiação solar é dissipada, absorvida e refletida pelo vidro, além da refletida pela água, convecção, evaporação e perdas através das paredes e do isolamento térmico do destilador restando apenas 32% de energia útil armazenada pela água (BEZERRA, 2001).

Experimentalmente pode-se medir a eficiência de um dessalinizador solar através da equação 2, adaptação da proposta por DUFFIE & BACKMAN (1991):

$$\eta = \frac{m_{H_2O} L_v}{R_g} \quad (2)$$

onde

m_{H_2O} é a massa de água destilada produzida (kg)

L_v é o calor latente de vaporização (MJ kg^{-1})

R_g é a irradiância solar global (MJ).

3.2 Descrição da área de estudo

De acordo com o MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL (2005), o semi-árido brasileiro, cenário geográfico onde ocorrem as secas, abrange os seguintes estados do Brasil: Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, Bahia, além do Vale do Jequitinhonha, no Norte de Minas Gerais, e parte da região Norte do Espírito Santo, totalizando 1.133 municípios em uma área de 969.589,4 km² (FIGURA 2).

Para a delimitação do semi-árido brasileiro, o Grupo de Trabalho Interministerial tomou por base três critérios técnicos (MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL, 2005):

- I. precipitação pluviométrica média anual inferior a 800 milímetros;
- II. índice de aridez de até 0,5 calculado pelo balanço hídrico que relaciona as precipitações e a evapotranspiração potencial, no período entre 1961 e 1990;
- III. risco de seca maior que 60%, tomando-se por base o período entre 1970 e 1990.



FIGURA 2 - Nova delimitação do semi-árido brasileiro. Fonte: MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL (2005).

Trata-se de uma área onde o regime pluvial é irregular, seus solos são rasos, com ocorrência de vegetação do tipo xerófila, resistente a longos períodos de estiagem. Estas condições intrínsecas de solo e água servem de base para a sua classificação em

zonas de: caatingas, seridó, carrasco e agreste (INSTITUTO NACIONAL DO SEMI ÁRIDO, 2007).

Já o estado de Alagoas apresenta um clima tropical com variação entre quente/úmido e quente/seco, com chuvas concentradas no outono e inverno. A precipitação média anual é da ordem de 1000 mm, sendo o período de abril a julho correspondente a estação chuvosa e o período de setembro a dezembro a estação seca. Precipitações acontecem em todos os meses do ano, com máximos na região litorânea e mínimos no oeste do estado (SILVA, 2007).

De acordo com NICÁCIO (2002), a temperatura média anual de Alagoas varia entre 21°C e 29°C, sendo na faixa litorânea menos elevada, ou seja, na parte oriental do estado o clima é úmido com temperaturas entre 19°C e 28°C, com chuvas abundantes. Já na parte ocidental, o clima é semi-árido, com temperaturas oscilantes entre 13°C e 40°C, dependendo da estação do ano.

O município de Maceió, sede do experimento objeto desse trabalho, localiza-se na parte central da faixa litorânea do estado de Alagoas, inserida na mesorregião do Leste Alagoano e microrregião que leva seu nome, estende-se entre os paralelos 09°21'31" e 09°42'49" S e os meridianos 35°33'56" e 35°38'36" W, ocupando uma área de aproximadamente 511 km², o que corresponde a 1,76% do território alagoano (FIGURA 3). Considerando sua localização na Região Nordeste do Brasil, em plena zona tropical e banhada pelo Oceano Atlântico, Maceió possui clima quente e úmido, e apresenta temperatura média anual entre 20°C e 28°C, com máxima em torno de 35°C (BORBA, 2005).

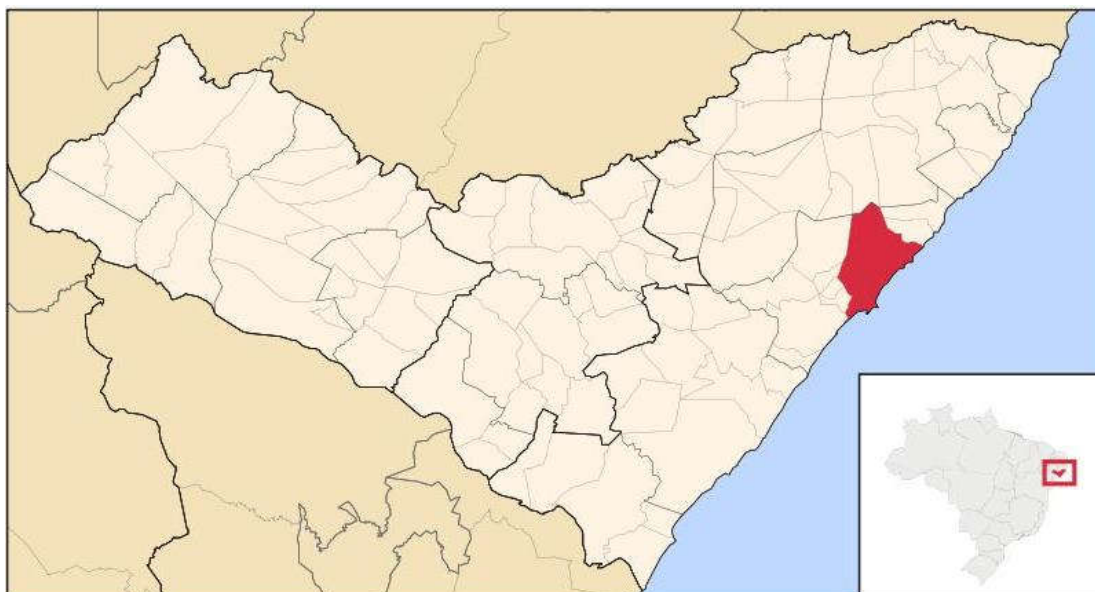


FIGURA 3 - Localização do município de Maceió, Alagoas. Fonte: WIKIPÉDIA, 2008.

3.3 Instrumentação

Para aquisição dos dados de temperatura foram utilizados quatro sensores termopar do tipo T, fio cobre-constantan, com ampla faixa de utilização entre -270°C até 400°C . Os termopares foram dispostos nos equipamentos da seguinte maneira:

- a) água pura do equipamento 1;
- b) água salobra do equipamento 2;
- c) parte interna da cobertura de vidro do equipamento 1;
- d) parte interna da cobertura de vidro do equipamento 2;

Para coleta dos dados de radiação solar global foi utilizado um piranômetro modelo LI200SZ fabricado pela Campbell Scientific. É um sensor de radiação solar compacto e estável de alto rendimento térmico. Sensível a luz na faixa espectral entre 400 e 1100 nm;

Um pluviômetro foi utilizado para recepcionar o volume de água condensada pelos equipamentos. A relação entre lâmina no interior do equipamento e volume de condensado é a seguinte:

$$0,197 \text{ mm} = 9,195 \text{ mL}$$

O pluviômetro utilizado foi um Campbell Scientific, Inc. Modelo: TE525, com sensor do tipo cubo tombador com interruptor magnético. Construído com alumínio anodizado, possui faixa de trabalho entre 0° a 50°C e precisão de até 25,4 mm hora⁻¹: ±1%

Foi utilizado, também, um termo higrômetro marca Campbell Scientific, Inc. Modelo: HMP35C com intervalo de medição da umidade relativa entre 0-100% e precisão da ordem de ± 2%, entre 0 a 90% e ± 3%, de 90 a 100%. O intervalo de medição de temperatura é de -35°C a +50°C operando com precisão de ± 0,4°C no intervalo -24° a +48°C e ± 0,9°C no intervalo -38° a +53°C.

Os dados de precipitação foram obtidos junto a Secretaria Estadual do Meio Ambiente e Recursos Hídricos – SEMARH de Alagoas. Os dados referem-se à eventos registrados pela estação meteorológica locada na Usina Cachoeira, pertencente ao Grupo Carlos Lyra, situada a aproximadamente 8 quilômetros do local do experimento .

O registro de vento refere-se à média horária registrada no mês de janeiro de 2008 no Aeroporto Internacional Zumbi dos Palmares (9°31'S, 35°47'W), distante 4 Km do local do experimento, e disponibilizados pela Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica (REDEMET) com acesso livre a partir de seu endereço eletrônico.

As medidas, realizadas pelos instrumentos citados, foram feitas a cada dez segundos e gerenciadas por um sistema automático de aquisição de dados (datalogger) modelo 21X marca Campbell Scientific Inc, USA. Os dados foram armazenados em um *storage module* e, aproximadamente, a cada 7 dias eram transferidos para um

microcomputador sendo, após, calculada a média de meia hora das leituras realizadas através de software adequado.

3.4 Características construtivas

Para a realização desse experimento foram construídos, de forma idêntica, dois equipamentos de destilação, sendo um para operar com água pura¹ e o outro para operar com água salobra. Os materiais utilizados na construção foram escolhidos por serem baratos, de fácil manuseio e por facilitarem a construção dos equipamentos.

Para a estrutura externa foram utilizadas madeiras de baixa qualidade, obtidas de sobras da construção civil, tendo elas, aproximadamente 20 mm de espessura.

Internamente, para revestimento da caixa de madeira, foi utilizado PVC (policloreto de vinila) do tipo empregado na construção civil, em tetos com forro desse tipo. Esse material, por ser internamente vazado, apresenta ar no seu interior o que permitiu o isolamento entre a água na parte interna do PVC e a caixa de madeira, na parte externa do PVC. No interior dos equipamentos, para proporcionar vedação e uma melhor absorção da radiação solar global, foi empregada tinta preta na superfície do PVC e, acima da superfície pintada, foi, ainda, utilizado lona plástica preta como revestimento final para

¹ O termo água pura refere-se a água utilizada no experimento, proveniente da rede de abastecimento público, também chamada água doce.

oferecer uma melhor vedação e desempenho. A cobertura dos equipamentos foi construída utilizando folhas de vidro de 5 mm com inclinação de 26°, FIGURA 4.

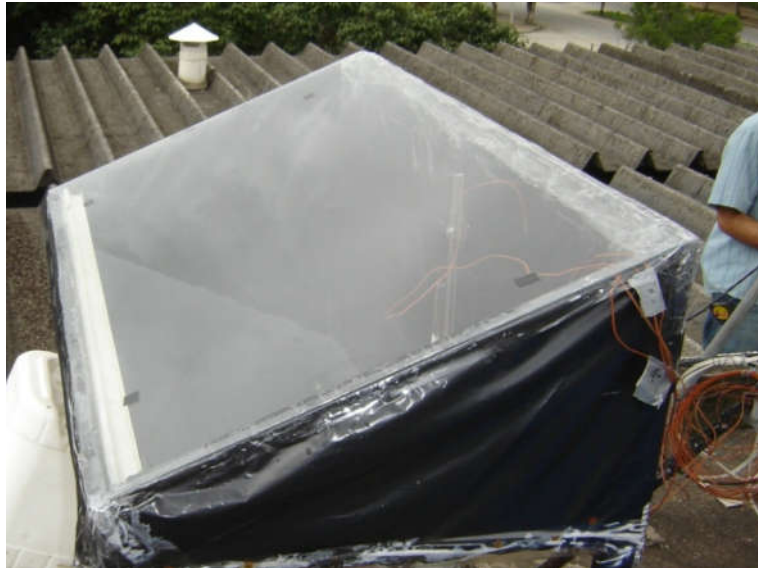


FIGURA 4 - Equipamento em operação durante o período do experimento.

A área útil dos equipamentos é de 0,6655 m², possuindo as seguintes dimensões, em centímetros (FIGURA 5):

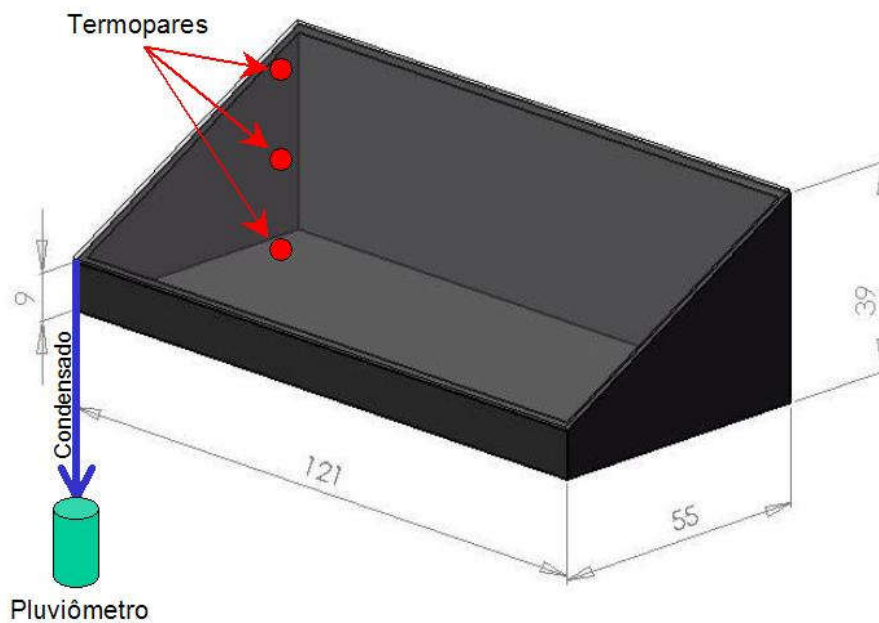


FIGURA 5 – Layout do equipamento em projeção 3D. Medidas em centímetros (cm).

3.5 Desempenho do dessalinizador

O experimento foi realizado no período entre junho de 2007 e março de 2008.

a) Influência das variáveis meteorológicas

Com base nos dados médios de meia hora do período entre 09 a 15 de janeiro de 2008 foi feita análise dos principais parâmetros meteorológicos e suas influências no rendimento e eficiência de dois equipamentos de dessalinização solar, ambos operando com volume de 20 litros (lâmina inicial de 30 mm), sendo um com salinidade de 1600 mg.L⁻¹ e outro com água pura.

b) Estudo de caso: comparativo Inverno/Verão

Ambos os períodos com volume de 20 litros, sendo:

1) Inverno:

- Período 26/06 a 01/07/2007: salinidade de 800 mg L⁻¹
- Período 02/07 a 10/07/2007: salinidade de 1600 mg L⁻¹

2) Verão:

- Período 09/01 a 15/01/2008: salinidade de 1600 mg L⁻¹
- Período 27/02 a 03/03/2008: salinidade de 800 mg L⁻¹

3.6 Análise Estatística

Através de regressões lineares buscou-se obter correlações entre o volume de condensado e intensidade dos parâmetros meteorológicos avaliados e, dessa forma, verificar quais os elementos fundamentais no processo de destilação e dessalinização. Fez-

se regressões considerando as médias horárias do período de 11 a 15 de janeiro de 2008. Contudo, foram utilizados apenas os dados compreendidos entre 5:30 e 18:00 horas.

3.7 Parâmetro “*D*”:

Pela definição matemática, parâmetro designa toda quantidade que entra em uma equação de uma curva e se pode fazer variar sem alterar a natureza dessa curva ou, ainda, todo elemento cuja variação de valor altera a solução de um problema sem alterar-lhe a natureza (WEISZFLOG, 2007). Assim, através da análise dos principais fatores envolvidos no processo de dessalinização foi desenvolvido um parâmetro para determinar o potencial produtivo de um equipamento em função das variáveis meteorológicas locais e características da solução salina e manejo no equipamento. O parâmetro *D* é expresso pela seguinte equação:

$$D = \frac{\bar{R}_g \times \bar{T}_a}{H_w \times S} \quad (3)$$

\bar{R}_g é a radiação solar global média (W m^{-2})

\bar{T}_a é a temperatura média ambiente ($^{\circ}\text{C}$)

H_w é a lâmina inicial de solução (mm)

S é salinidade da solução (mg L^{-1})

Através dele é possível gerar uma equação para estimar a produtividade de condensado. Para tal, basta reproduzir o experimento e gerar o parâmetro (através dos dados e variáveis que o constituem). De posse dessas informações avalia-se o coeficiente de correlação R^2 e, se este for satisfatório, gera-se uma equação parametrizada para as condições meteorológicas locais e de manejo do equipamento. Assim, têm-se uma equação que permite estimar o rendimento de condensado para uma dada região.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Desempenho do dessalinizador

a) Influência das variáveis meteorológicas

No intervalo que compreende o nascer do sol até aproximadamente 8:00h da manhã nota-se um crescimento exponencial das temperaturas e, a partir daí, há diminuição na inclinação da reta com o passar do tempo. Contudo, esse incremento ainda é positivo até as 13:00h para o equipamento destilador e até, no máximo, 12:00h para o dessalinizador. Após esses instantes, as curvas de temperatura passam a decrescer até aproximadamente as 21:00h onde, então, apresentaram baixas variações entre si, por volta de 26°C.

Ainda, verifica-se que a maior temperatura da água foi registrada as 12:00h no destilador, atingindo uma temperatura média de 63°C. Já a temperatura do vidro do mesmo equipamento atingiu sua máxima temperatura, de 65,3°C, as 11:30h. O vidro atinge sua temperatura máxima antes da água devido a sua menor capacidade térmica, inferior a da água.

O dessalinizador registrou sua máxima temperatura as 12:30h, alcançando a marca de 53,9°C (FIGURA 6). O retardo no horário e menor temperatura, quando comparado ao destilador, é devida a forte ligação molecular entre sal e água o que requer maiores energias para vaporização. A temperatura máxima observada no vidro foi verificada no mesmo horário do destilador (11:30h), pois o vidro é idêntico nos dois equipamentos. A temperatura máxima registrada foi de 56,3°C.

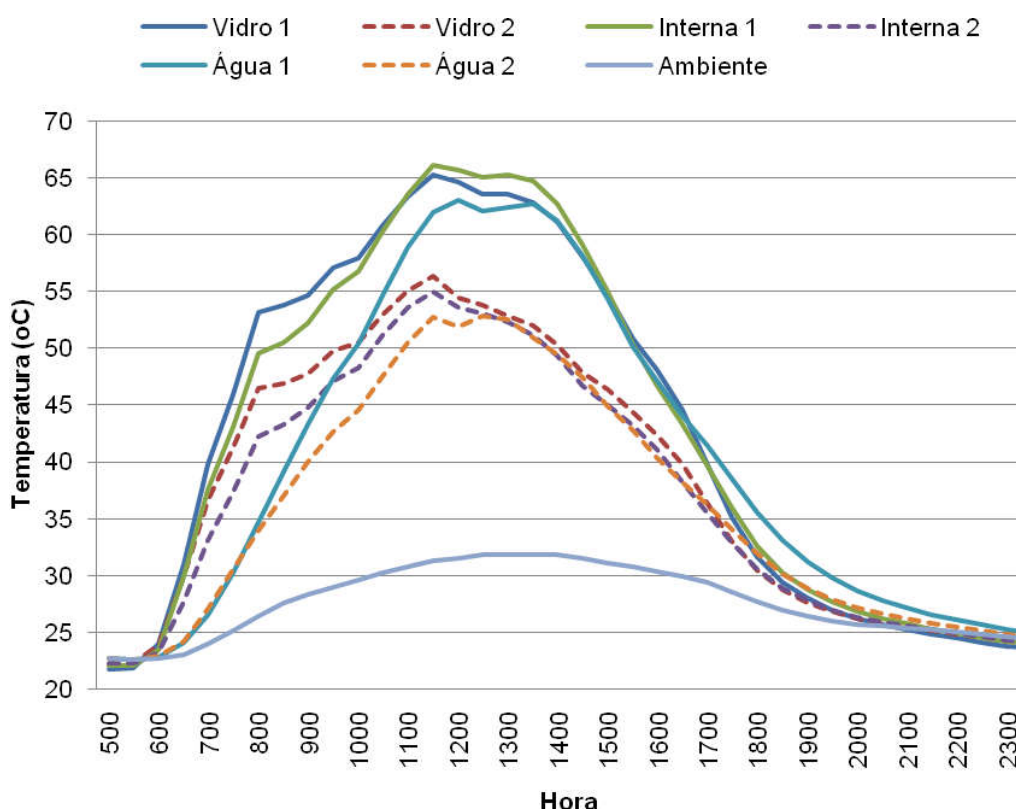


FIGURA 6 - Perfil médio de temperatura (°C) no período de estudo, sendo (1) destilação e (2) dessalinização. Período de 09 a 15 de janeiro de 2008.

A maior variação de temperatura da água entre o destilador e o dessalinizador foi registrada as 14:00h, quando a água pura obteve uma temperatura 23,8% maior do que a água salobra sendo que, na média, a temperatura da água no destilador foi 9,7% superior ao dessalinizador. A diferença registrada no vidro entre os dois equipamentos foi de 8,7%

maior no destilador, sendo a maior variação verificada, também, às 14:00h quando alcançou uma temperatura 21,4% superior a registrada no dessalinizador.

Mesmo operando em temperatura ambiente mais elevada (entre 34-40°C) e temperatura da água de até 71°C (TIWARI *et al.*, 2003), apresentaram rendimentos inferiores aos registrados nesse trabalho, atingido máximos de 210 mL h⁻¹. Ainda, em outro experimento, TIWARI & TIWARI (2006) registraram temperaturas da água similares as obtidas neste experimento, com máximas de aproximadamente 56-58°C. No entanto, seu rendimento máximo foi de 205 mL h⁻¹, pois a lâmina de água utilizada nesse experimento foi maior (40 mm). PHADATARE & VERMA (2007), sob as condições de inverno da Índia, com temperatura ambiente entre 27-32°C, verificou temperaturas da água de até 53°C, com produção diária variando entre 1,8 e 2,1 L m⁻². Isso, provavelmente, devido à alta radiação solar incidente que, mesmo para condição de inverno, nos horários de maior insolação registrou valores médios entre 750 e 840 W m⁻².

Nota-se que, em ambos os processos (destilação e dessalinização), o intervalo de tempo que apresentou os maiores valores de condensado coincide com os horários em que a diferença entre temperatura da água e do vidro é positiva ou, então, aproxima-se de zero. Esse horário compreende basicamente o intervalo entre 12:30 e 15:00h.

Para as médias de meia hora analisadas, a temperatura da água foi superior a temperatura do vidro apenas no processo de destilação, entre 14:00 e 14:30h, quando verificou-se uma relação $T_{\text{água}}/T_{\text{vidro}} > 1$. No processo de dessalinização foi verificada, em todos os horários, uma relação ≤ 1 . No entanto, essa relação foi > 1 , em ambos os processos, a partir das 17:00h ocasião em que diminui a incidência solar e, com a energia armazenada na água, se observa temperaturas da água superiores as do vidro. Na média, essa relação foi de 0,97 na destilação e de 0,96 na dessalinização (FIGURA 7).

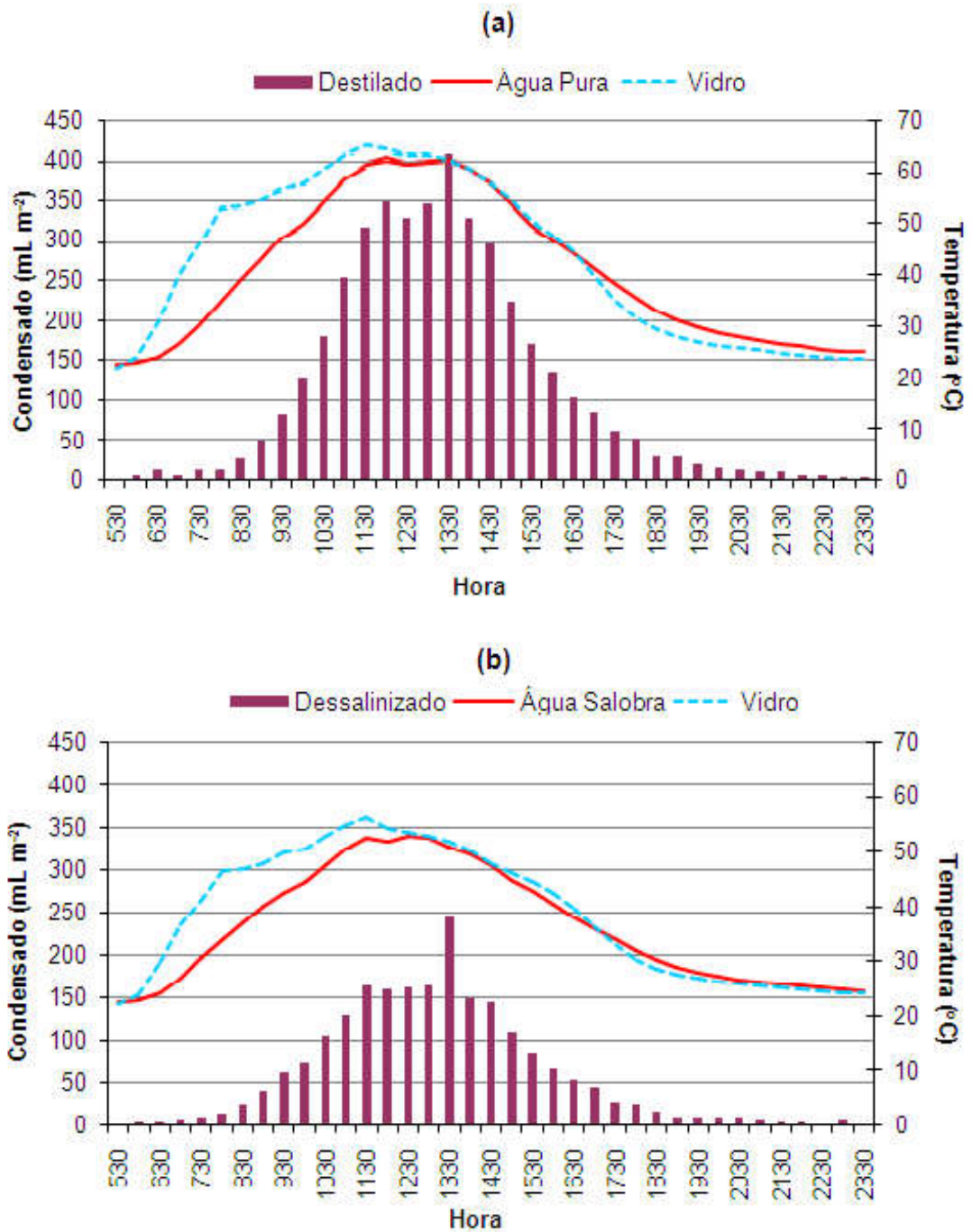


FIGURA 7 - Perfil horário médio da temperatura na água e vidro (°C) e volume de condensado (mL m⁻² ½ h⁻¹) em (a) destilação e (b) dessalinização.

ABDENACER & NAFILA (2007) afirmam que a eficiência de um dessalinizador solar depende de parâmetros físicos e construtivos, especialmente, pela

diferença de temperatura entre superfície evaporadora e a condensadora, que permite um grande incremento no rendimento e eficiência do equipamento.

Foi confirmado, como esperado, que pela maior energia requerida para evaporação, o processo de dessalinização produziu um volume de condensado menor do que aquele observado na destilação. Assim, com um menor volume de condensado produzido, menor energia liberada no vidro (calor latente) e, consecutivamente, observa-se menores temperaturas no vidro do equipamento dessalinizador do que no destilador.

A água possui alto calor específico, sendo que uma unidade de massa (Kg) de água necessita para evaporar de aproximadamente 2,4 MJ de energia, em pressão e temperatura ambiente. Contudo, esse valor não é constante sendo variável de acordo com a temperatura. Assim, quanto maior for a temperatura da água menor a quantidade de energia necessária para o processo de evaporação. Dessa forma, a água, tanto pura quanto salobra, possui alta capacidade térmica fazendo com que haja uma defasagem do pico de produção de condensado em relação ao pico de radiação solar global, ou seja, os maiores valores de produção de condensado são encontrados após o horário em que é registrada a maior radiação solar global (FIGURA 8).

Para um perfil de radiação solar global similar ao verificado neste trabalho, AL-HAYEK & BADRAN (2004), na Jordânia, registrou um rendimento médio aproximado de $1000 \text{ mL m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ as 14:00h, semelhante a este experimento. Provavelmente, as altas temperaturas da água registradas (superior a 80°C), em conjunto com os espelhos empregados no equipamento sejam responsáveis pelo elevado rendimento.

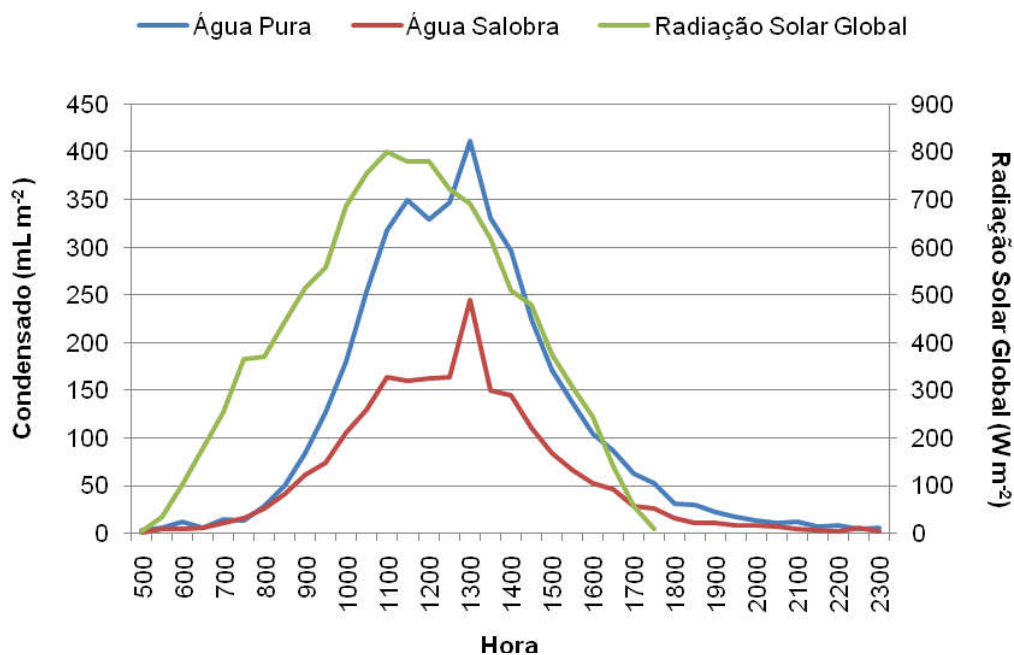


FIGURA 8 – Perfil médio horário de radiação solar global ($W m^{-2}$) e volume de condensado ($mL m^{-2} h^{-1}$) nos dois processos no período de 9 a 15 de janeiro de 2008.

Ainda, na referida figura, observa-se que o pico de radiação solar global ocorreu as 11:30h, ocasião em que foi registrado um valor médio de $800,6 W m^{-2}$ tornando, então, a decrescer. Entre 11:30 e 12:30h, intervalo que deveria ser registrado os maiores valores de radiação solar global, percebe-se que há uma diminuição seguida de uma estabilização após as 11:30h. Isso ocorreu, principalmente, devido a alta nebulosidade associada a precipitação ocorrida no dia 13 de janeiro (TABELA 1), evento que chegou a registrar, no intervalo citado, valores de até $379 W m^{-2}$ as 12:30h acarretando uma diminuição nos valores médios de radiação solar global.

TABELA 1 - Precipitação ocorrida entre 09 e 15 de janeiro de 2008.

Dia	Precipitação (mm)
09	1,3
10	0,0
11	1,8
12	2,0
13	5,5
14	2,0
15	0,0

Nota-se que entre as 12 e 13:00h há uma estabilização no volume de dessalinizado enquanto no destilador verifica-se um decréscimo na produção de destilado visto que, devido a não existência de sais, a água pura é mais suscetível as variações de energia, no caso, a radiação solar. Após esse horário há um grande incremento no volume de condensado em ambos os processos, pois não foi verificado nenhum valor anormal de radiação solar global que provocasse efeitos negativos no volume de condensado. Mesmo o dessalinizador trabalhando sob baixas concentrações de sal (1600-2471 mg L⁻¹), o dessalinizador apresentou rendimento bastante inferior àquele com água pura sendo que, este último, chegou a um rendimento relativo $\geq 100\%$, quando comparado ao primeiro, entre 12 e 16:00h.

O intervalo de maior volume de condensado acumulado do equipamento compreende a faixa entre 8:30 e 15:00h sendo este responsável pela quase totalidade da produção diária. Após as 17:00h não se têm mais radiação solar global, mas mesmo assim, os equipamentos continuam a produzir condensado. Esse rendimento é bastante baixo, mas deixa claro que, mesmo sem a disponibilidade energética do sol, o processo de produção de condensado continua até aproximadamente as 23:00h devido ao *storage effect* (efeito de armazenamento).

O rendimento médio de condensado no período foi de 2,19 L m⁻² para o dessalinizador e de 4,23 L m⁻² para o destilador (FIGURA 9). Em experimento realizado na

Índia, VALSARAJ (2002), sob condições similares de radiação solar global, registrou resultados semelhantes atingindo uma produção acumulada aproximada de $1,6 \text{ L m}^{-2}$.

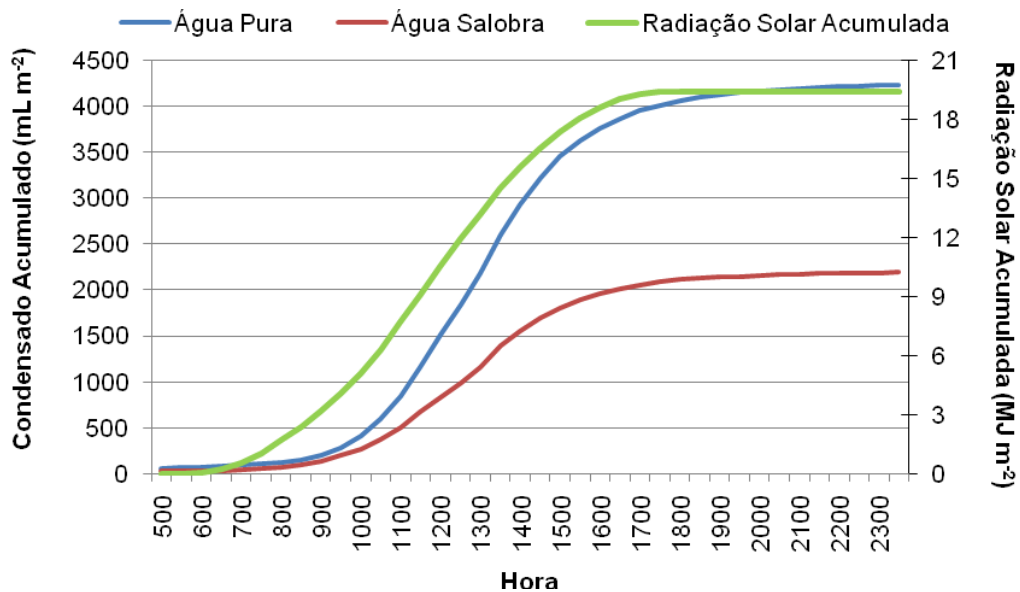


FIGURA 9 – Volume acumulado médio diário para: condensado ($\text{mL m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) e R_g (MJ m^{-2}).

A eficiência, em ambos os processos, obteve os melhores resultados sempre que a radiação solar global se manteve $\geq 400 \text{ W m}^{-2}$ (FIGURA 10). Exceção é observada após as 15:00h devido a energia armazenada no sistema, o que também é verificada no início e fim do dia solar quando o Sol apresenta baixa elevação e, consecutivamente, baixa disponibilidade energética. Contudo, a energia armazenada na água no interior dos equipamentos faz com que haja produção de condensado maior do que aquela que seria possível, apenas, pela energia do sol, fazendo, assim, a eficiência do processo aumentar significativamente nesses horários. Assim, entre 12 e 15:00h, a eficiência apresentou variação entre 56,2 e 79,3% no processo de destilação e 27,4 a 47,2% no processo de dessalinização. A média diária foi de 45,6% na destilação e 23,4% na dessalinização.

ABDEL-REHIM & LASHEEN (2007), em trabalho realizado no Egito, registraram eficiências relativamente baixas no processo de dessalinização com máximas

em torno de 30% entre 15-17:00h. Já TIWARI *et al.* (2003), registraram eficiência próxima de 40% quando a diferença entre a temperatura da água e do vidro da cobertura foi máxima.

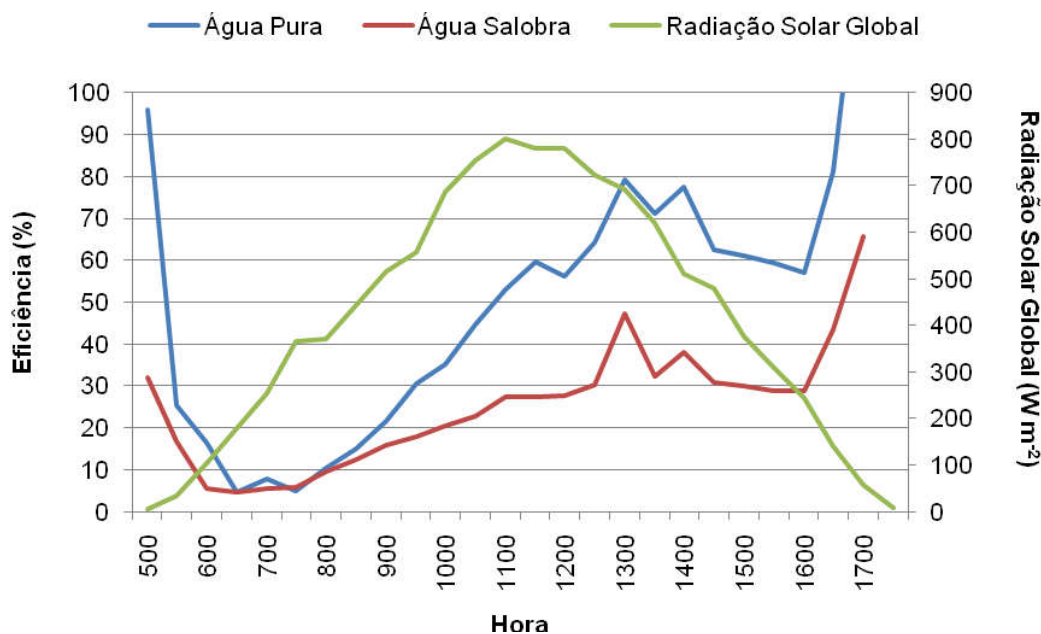


FIGURA 10 – Relação entre o perfil médio de radiação solar global ($W m^{-2}$) e eficiência (%) nos dois processos.

Na Índia, TIWARI & TIWARI (2006), verificaram baixos valores de eficiência no processo (máximo de 19%). Contudo, nessa situação, provavelmente isso se deva as altas lâminas de água empregadas no processo, entre 40 e 200 mm. FATH (1997), em experimento localizado em Alexandria, Egito, registrou em um dessalinizador de efeito simples eficiência máxima de 70% próximo as 12:00h.

Existe uma defasagem no horário entre a curva de produção de condensado e a curva de energia. A resposta em atraso da produção de condensado em relação a curva de radiação solar global se explica pela inércia térmica da água. No entanto, a curva de produção de condensado é adiantada à curva de eficiência com relação aos valores máximos. O esperado seria que essas duas curvas coincidisse ou que os máximos valores

de eficiência estivessem adiantados em relação aos máximos volumes de condensado, ou seja, em fase com os picos de radiação solar global, fato não verificado.

Através da FIGURA 11 é possível verificar que entre as 12 e 16h, horário onde se dá a maior produção de condensado em ambos os processos, também se verifica os ventos mais intensos com velocidade média variando entre 6,1 e 6,9 m s^{-1} . Segundo TOURE & MEUKAN (1997), quando a velocidade do vento aumenta de 0 m s^{-1} para 9 m s^{-1} têm-se um incremento de 10% na produção de água. Assim, de acordo com a conclusão do autor e considerando uma relação linear é correto afirmar que, proporcionalmente, a intensidade observada dos ventos entre 12-16h, poderia causar um incremento na produção de condensado entre 6,8 e 7,7%.

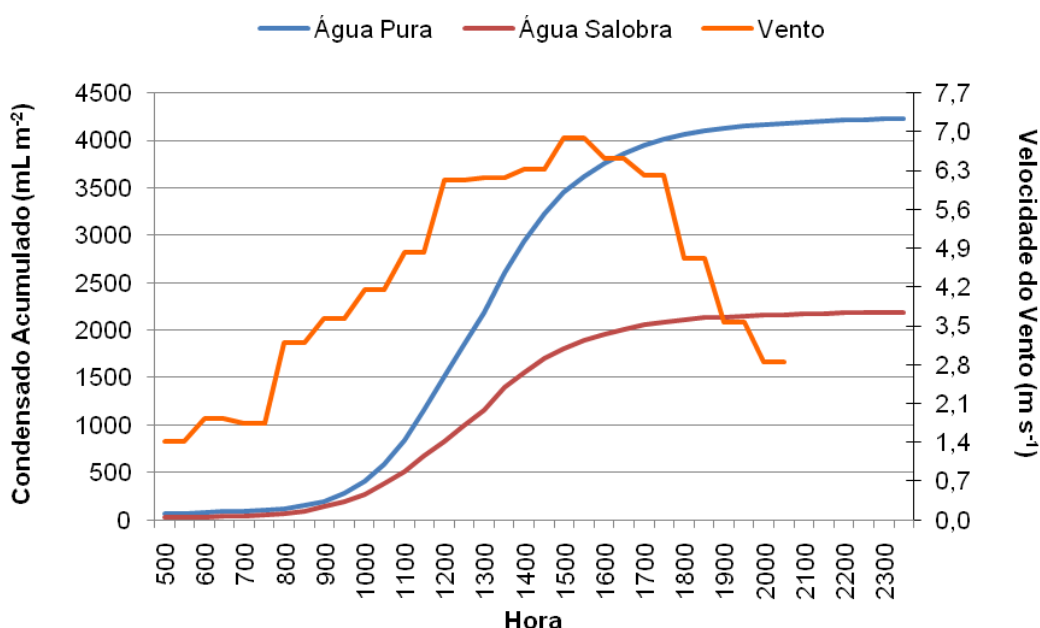


FIGURA 11 - Perfil médio de condensado acumulado ($\text{mL m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) e da velocidade do vento (m s^{-1}) no período de 9 a 15 de janeiro de 2008.

Além do efeito de armazenamento, possivelmente, esse retardo da curva de eficiência com relação as curvas de radiação global e de produção de condensado, possa ser explicado pela alta velocidade média do vento, entre 6,2 e 6,9 m s^{-1} , observada nesse

intervalo de tempo. Nesse horário (13:00-15:30h) registrou-se eficiências que variaram entre 61 e 79,3% para o equipamento destilador e entre 29,9 e 47,2% para o equipamento dessalinizador, como pode ser visto na FIGURA 12.

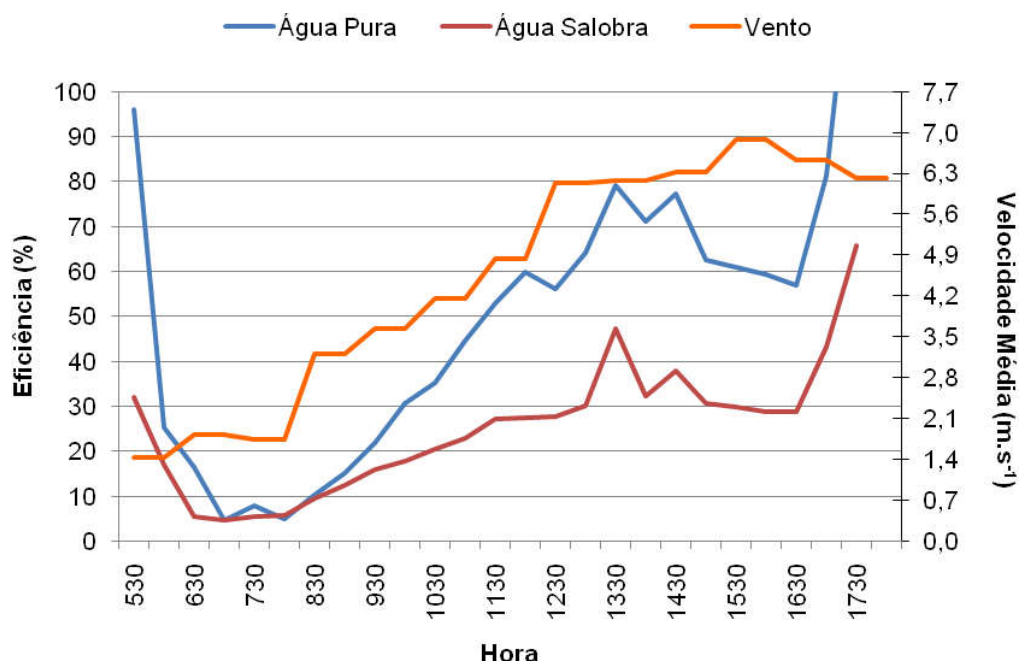


FIGURA 12 - Relação entre velocidade do vento ($m s^{-1}$) e eficiência (%) nos processos de destilação e dessalinização.

Verifica-se que a temperatura ambiente durante todo o período se comportou de forma regular, com temperatura média de $26,7^{\circ}C$ e variações, principalmente, entre dia e noite, com mínima de $21,6^{\circ}C$ registrada no dia 11 de janeiro às 6:00h e máxima de $33,8^{\circ}C$ no dia 10 de janeiro às 14:00h (FIGURA 13).

Para que haja evaporação de uma massa de água não se faz necessária altas temperaturas, sendo a evaporação um processo físico que ocorre mesmo em temperatura ambiente necessitando, para tal, apenas uma quantidade maior de energia. Contudo, nos estudos e experimentos realizados, fica evidente que para se obter uma produção satisfatória, que torne o processo viável, o equipamento deve ser projetado e construído com características que lhe possibilite alcançar temperaturas máximas superiores aos $50^{\circ}C$.

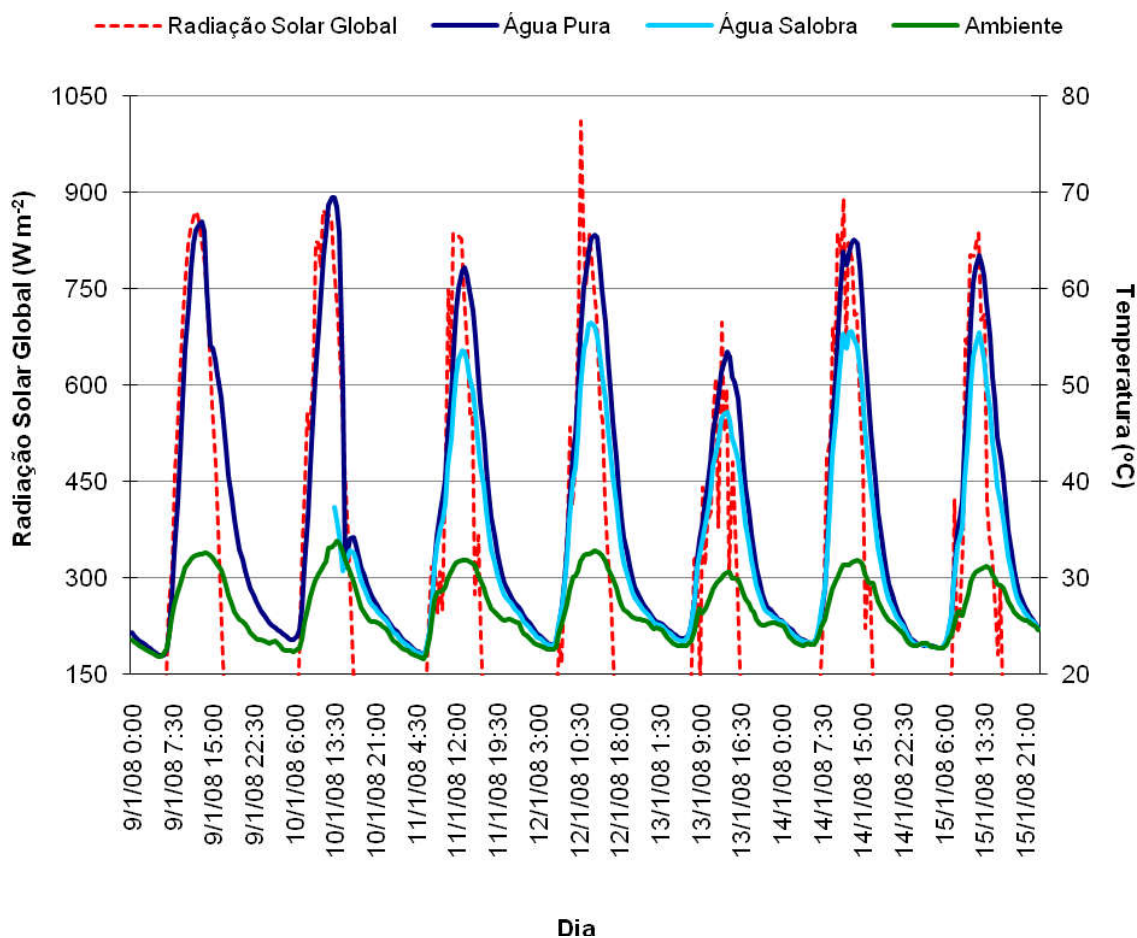


FIGURA 13 - Ciclos diários da radiação solar global (W m^{-2}) e das temperaturas da água pura (1) e salobra (2) e ambiente ($^{\circ}\text{C}$) no período de 09 a 15.01.08.

A temperatura máxima da água registrada no processo de destilação ocorreu às 13h do dia 10 de janeiro, sob uma temperatura média ambiente de $33,2^{\circ}\text{C}$ e radiação solar global de 859 W m^{-2} , alcançando $69,4^{\circ}\text{C}$. Já no processo de dessalinização registrou-se $56,5^{\circ}\text{C}$ às 13h do dia 12 de janeiro, ocasião em que a temperatura ambiente foi de $32,6^{\circ}\text{C}$ e radiação solar global de 793 W m^{-2} .

Verificou-se que, em média, a temperatura da água no processo de destilação foi 7,2% superior a água no processo de dessalinização, enquanto que a temperatura interna do vidro no processo de destilação foi 5,6% superior a temperatura interna do vidro no processo de dessalinização. Foi verificado, também, que no processo de destilação a

temperatura da água foi 0,2% maior do que a temperatura interna do vidro, enquanto que no processo de dessalinização esse valor foi 1,8% menor.

TOURE & MEUKAN (1997), em sua investigação experimental na Costa do Marfim, registraram temperaturas da água de até 75°C entre 12 e 14h submetido a radiações superiores a 20 MJ m⁻². Já CAPPELLETTI (2002), alcançou temperaturas máximas entre 53-58°C, consideradas baixas pelo autor. Por sua vez, TIWARI *et al.* (2003), na Índia, registrou temperatura máxima de 71,1°C no verão, submetido a radiação solar entre 430-800 W m⁻² e temperatura ambiente entre 32-40°C. SOARES (2004), em seu experimento em Santa Catarina, registrou uma temperatura máxima da água de 63°C para uma temperatura ambiente de 40°C.

O maior valor de radiação solar global acumulada foi registrado no dia 09 de janeiro (23,4 MJ m⁻²) obtendo um rendimento de água destilada de 3,66 L m⁻² dia⁻¹. Porém, nos dias 11 e 12 de janeiro, onde os valores de radiação solar global acumulada foram menores (19 e 20,5 MJ m⁻²) registraram-se maiores volumes de condensado (FIGURA 14).

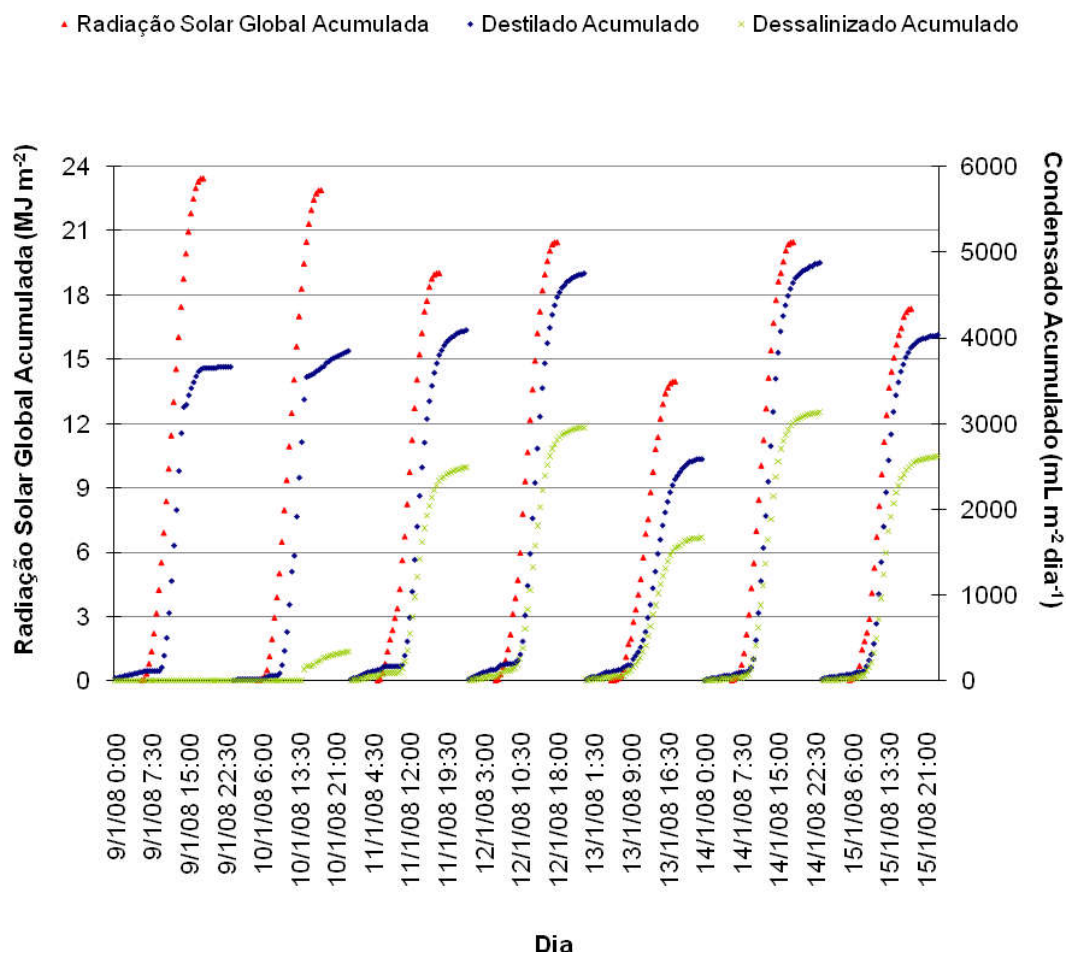


FIGURA 14 - Ciclos diários de radiação solar global acumulada (MJ m^{-2}) e volumes acumulados de destilado e dessalinizado ($\text{mL m}^{-2} \text{dia}^{-1}$) no período de 09 a 15 de janeiro de 2008.

No dia 11/01 verificou-se $4,09 \text{ L m}^{-2}$ de destilado e $2,49 \text{ L m}^{-2}$ de água dessalinizada. Já no dia 12/01, os volumes de condensado foram de $4,75 \text{ L m}^{-2}$ e $2,96 \text{ L m}^{-2}$, para água destilada e dessalinizada, respectivamente. O dia 13 de janeiro apresentou baixos volumes de condensado nos dois processos devido à alta nebulosidade e precipitação ocorridas, consecutivamente, reduzindo a incidência de radiação solar global diminuindo, assim, a energia disponível para evaporação da massa de água.

Verificou-se que o rendimento de condensado, em ambos os processos, passa a ter um incremento exponencial quando se registra uma radiação global acumulada no equipamento entre 2 e 4 MJ m^{-2} , fato que ocorreu geralmente entre 8:30 e 10:00h,

dependendo das condições de nebulosidade e da lâmina de água contida no equipamento. Segundo CAPPELLETTI (2002), esse valor seria de aproximadamente $3,5 \text{ MJ m}^{-2}$, corroborando os resultados obtidos.

Faz-se necessário que, para rendimentos satisfatórios de condensado, haja uma incidência diária de radiação solar global acumulada de aproximadamente 18 MJ m^{-2} ou uma radiação solar global média de no mínimo 400 W m^{-2} (FIGURA 15). A eficiência e rendimento no processo de dessalinização solar estão condicionados a uma regularidade da radiação solar que incide no equipamento, ou seja, que não haja flutuações significativas na radiação solar incidente com valores médios na faixa de aproximadamente $400\text{--}500 \text{ W m}^{-2}$ (FATH, 1997; TIWARI *et al.* 2003; AL-HAYEK & BADRAN, 2004; SOARES, 2004; BOUKAR & HARMIM, 2007; KUMAR & BAI, 2008).

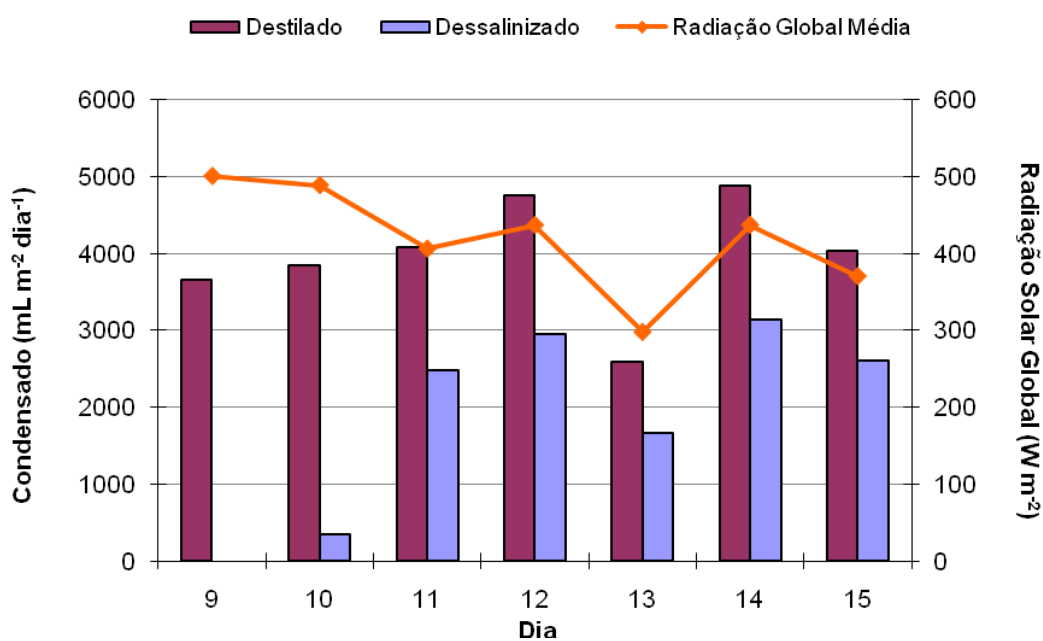


FIGURA 15 - Relação entre os volumes de destilado e dessalinizado ($\text{mL m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) e radiação solar global média (W m^{-2}) no mês de janeiro de 2008.

Considerando-se o período de 11 a 15 de janeiro, observou-se que o processo de dessalinização teve rendimento, em média, 37% menor do que o processo de destilação,

sendo produzidos em média $2,57 \text{ L m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ de água dessalinizada e $4,06 \text{ L m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ de água destilada, com eficiência média no período de 33,5% e 53%, respectivamente.

No decorrer do período, alguns dos maiores valores de temperatura média para os dois processos (água pura e água salobra) foram verificados nos últimos dias nos quais os valores de radiação solar global acumulada foram menores.

No entanto, mesmo nos dias em que a radiação solar acumulada foram menores as temperaturas médias se mantiveram praticamente constantes, provavelmente devido a regularidade nos valores da temperatura ambiente (média de $26,7^{\circ}\text{C}$).

O dia 15 de janeiro registrou uma radiação solar global acumulada inferior a maioria dos dias anteriores ($17,4 \text{ MJ m}^{-2}$), contudo verificou-se temperaturas médias de $33,8$ e $31,8^{\circ}\text{C}$ para água pura e salobra, respectivamente. Isso se deve, provavelmente, ao fato da temperatura ambiente ter se mantido sem variações nesse dia, com média de $26,3^{\circ}\text{C}$. Assim, como a água possui alta capacidade térmica e nesta data a lâmina de água no interior dos equipamentos encontrarem-se reduzidas, foi possível, para a mesma quantidade de energia, alcançar-se valores maiores de temperatura da água pura e salobra (FIGURA 16).

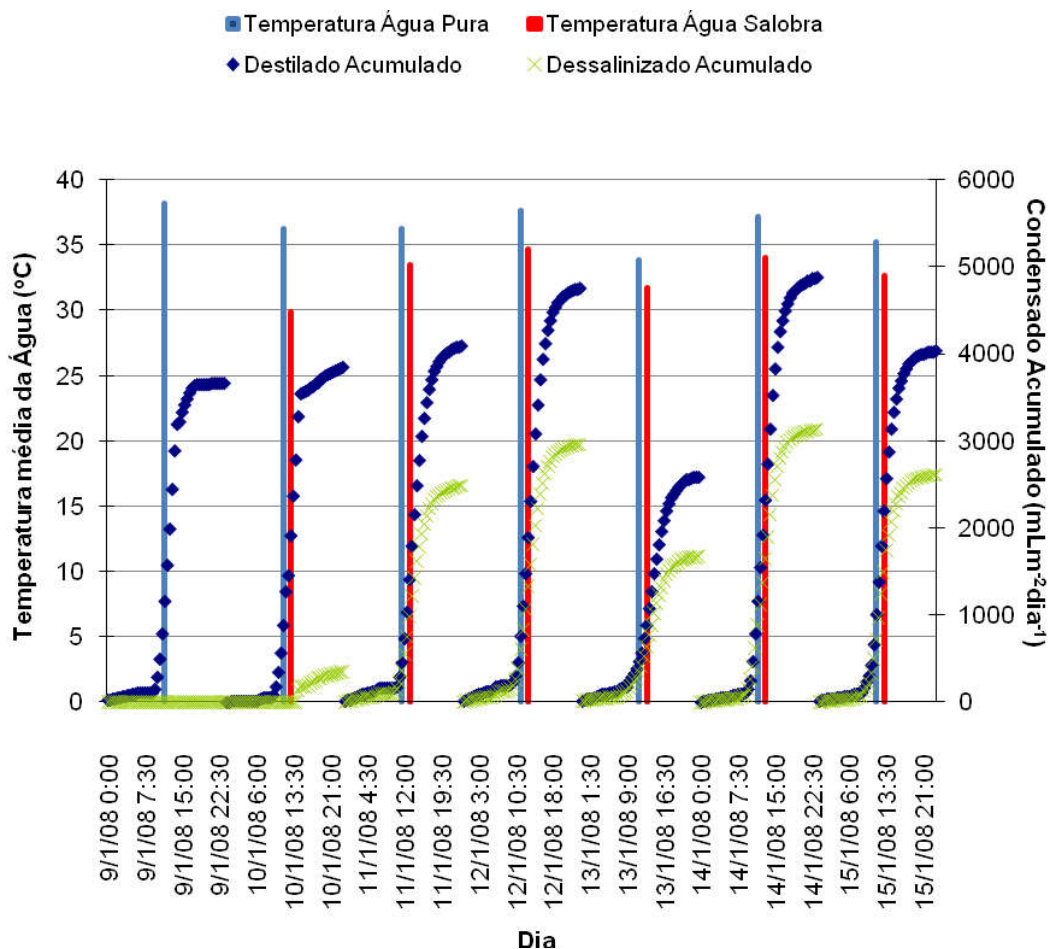


FIGURA 16 - Temperaturas média da água (°C) nos dois processos, e volumes de condensado diário (mL m⁻² dia⁻¹) no período de 09 a 15.01.2008.

Após o processo de evaporação de uma massa de água, o vapor de água ascende por convecção até entrar em contato com uma superfície condensadora que, por sua vez, deverá ter uma temperatura superficial menor formando um ΔT que é resultado da diferença de temperatura entre a água (ou vapor de água) no interior do equipamento e a temperatura interna da cobertura de vidro. De acordo com TIWARI *et al.* (2003), para o processo de destilação/dessalinização, é importante maximizar essa diferença entre a temperatura da água e a temperatura da cobertura de vidro.

AL-HAYEK & BADRAN (2004), realizou experimento com um dessalinizador dotado de espelhos no interior do equipamento, sob as condições climáticas

da Jordânia, registrando temperaturas da água superiores a 80°C para temperaturas ambiente acima dos 30°C , radiação solar acima de 800 W m^{-2} . Já TRIPHATI & TIWARI (2005), em experimento conduzido nos meses de inverno na Índia, alcançaram temperaturas da água de até $69,7^{\circ}\text{C}$ sendo que a radiação média no horário foi sempre superior a 450 W m^{-2} .

Na FIGURA 17, observam-se amplitudes maiores para ΔT , ou seja, em geral, verificou-se que para lâminas maiores de água há uma maior inércia térmica do sistema, fenômeno conhecido como *storage effect* (efeito de armazenamento). Constatou-se, ainda, que a curva de ΔT para água salobra apresentou menores amplitudes do que a curva obtida para água pura. Isso, como já comentado, é devido à presença de sais contidos na solução.

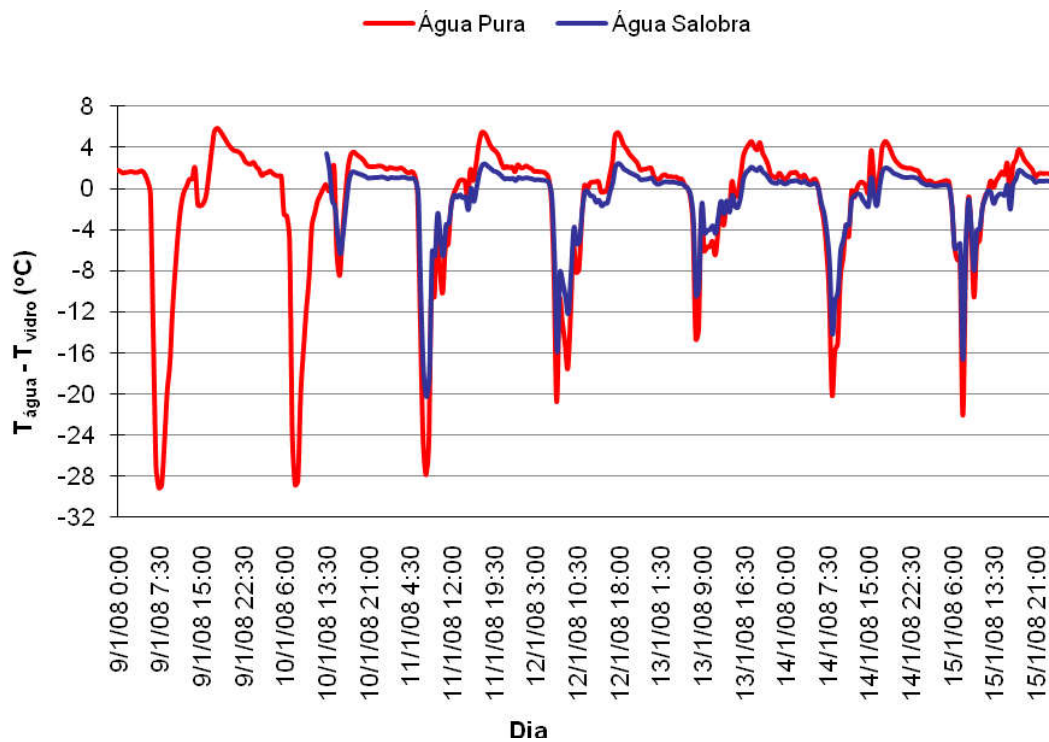


FIGURA 17 - Ciclo de variação da amplitude térmica entre a temperatura da água ($T_{\text{água}}$) e vidro (T_{vidro}) nos processos de destilação/dessalinização.

No decorrer do período analisado verificou-se uma predominância de ΔT negativos. Em geral, os valores positivos registrados ocorreram após as 17h devido à diminuição da intensidade da radiação solar. A amplitude não excedeu 3°C para água salobra e 6°C para água pura, porém foram positivas durante a noite e a madrugada, tornando-se negativas, geralmente, a partir das 6 horas.

Durante o dia também se observou ΔT positivos, mas com menor frequência e com diferenças menores, alcançando valores normalmente inferiores a 2°C no processo de destilação e inferior a 1°C na dessalinização, sendo esses ΔT positivos, registrados com maior frequência no intervalo compreendido entre 13 e 15 horas. Nessa situação a diferença positiva é obtida não pela diminuição da radiação solar global, mas sim, devido aos máximos da temperatura da água superarem a temperatura do vidro devido a alta incidência de radiação solar global.

PHADATARE & VERMA (2007), encontraram valores positivos para essa diferença quando utilizou lâminas de água de 20 e 40 mm e negativos para as lâminas de 80, 100 e 120 mm. Por sua vez, TIWARI & TIWARI (2006), estudaram o efeito da variação da lâmina de água nessa diferença de temperatura entre água e vidro e verificou que, quando utilizada a menor lâmina de água (40 mm), ΔT positivos foram registrados mais rapidamente devido à menor massa de água a aquecer, variando positivamente entre 1°C (em torno de 13h) e 6°C as 17h. No entanto, as lâminas de água de 120 e 160 mm, adquiriram diferenças positivas somente em torno das 15h, mas devido ao efeito de armazenamento em maiores volumes de água (resultado da alta capacidade térmica da água), essas lâminas de água apresentaram valores positivos entre 4°C e 8°C entre 16h e 6h da manhã seguinte.

Sabe-se que o deslocamento de massas de ar pode transportar consigo energia, na forma de calor, e massa. Dessa forma, ao deslocar-se pela superfície condensadora

(cobertura de vidro), o vento arrasta consigo uma porção de calor contida no vidro. Essa porção de calor armazenada no vidro advém de duas fontes: da reflexão da radiação solar, por parte da água contida no equipamento, por meio de ondas longas formando o conhecido “efeito estufa” e pelo processo de condensação do vapor na parte interna da cobertura de vidro. Nesse processo de condensação há liberação de uma grande quantidade de energia na forma de calor latente que ao ser transferido para o vidro torna-se calor sensível aumentando sua temperatura consideravelmente, visto que seu calor específico é relativamente baixo.

Já quanto ao vento, não é possível verificar visualmente algum efeito predominante que relacione sua intensidade com a produção de água visto que, em condições experimentais, é difícil quantificar os efeitos da variação da velocidade do vento, pois para isso seria necessário que os outros parâmetros permanecessem constantes.

Como pode ser visto na FIGURA 18, no dia 13 de janeiro registrou-se velocidade do vento dentro da média ($3,5 \text{ m s}^{-1}$), mas baixo volume de condensado. Já no dia 11, por exemplo, como visto nas figuras anteriores, a radiação solar global acumulada foi reduzida (19 MJ m^{-2}) quando comparada aos demais dias e, também, a temperatura da água em ambos os processos apresentou valores médios. No entanto, o volume de condensado produzido em ambos os processos foi similar ou superior a outros dias em que foi registrado maiores valores de radiação solar e temperatura média da água. Esse incremento na produção talvez possa ser explicado pelo maior valor de velocidade média do vento observado nesse dia ($3,8 \text{ m s}^{-1}$).

Ainda, é possível verificar visualmente que a curva da velocidade do vento está em fase com as curvas de produção de água, ou seja, seguem as mesmas tendências, quando se verifica aumento nos valores da velocidade do vento, constatadas pelo aumento na inclinação da curva, nota-se, também, aumento da quantidade de água

destilada/dessalinizada (FIGURA 18). Isso evidencia que o parâmetro “vento” é um fator que proporciona um incremento no rendimento do processo, conforme já exposto por outros autores. No entanto, não é um parâmetro essencial, pois quando comparado à radiação global ou à temperatura ambiente e da água, é de importância secundária.

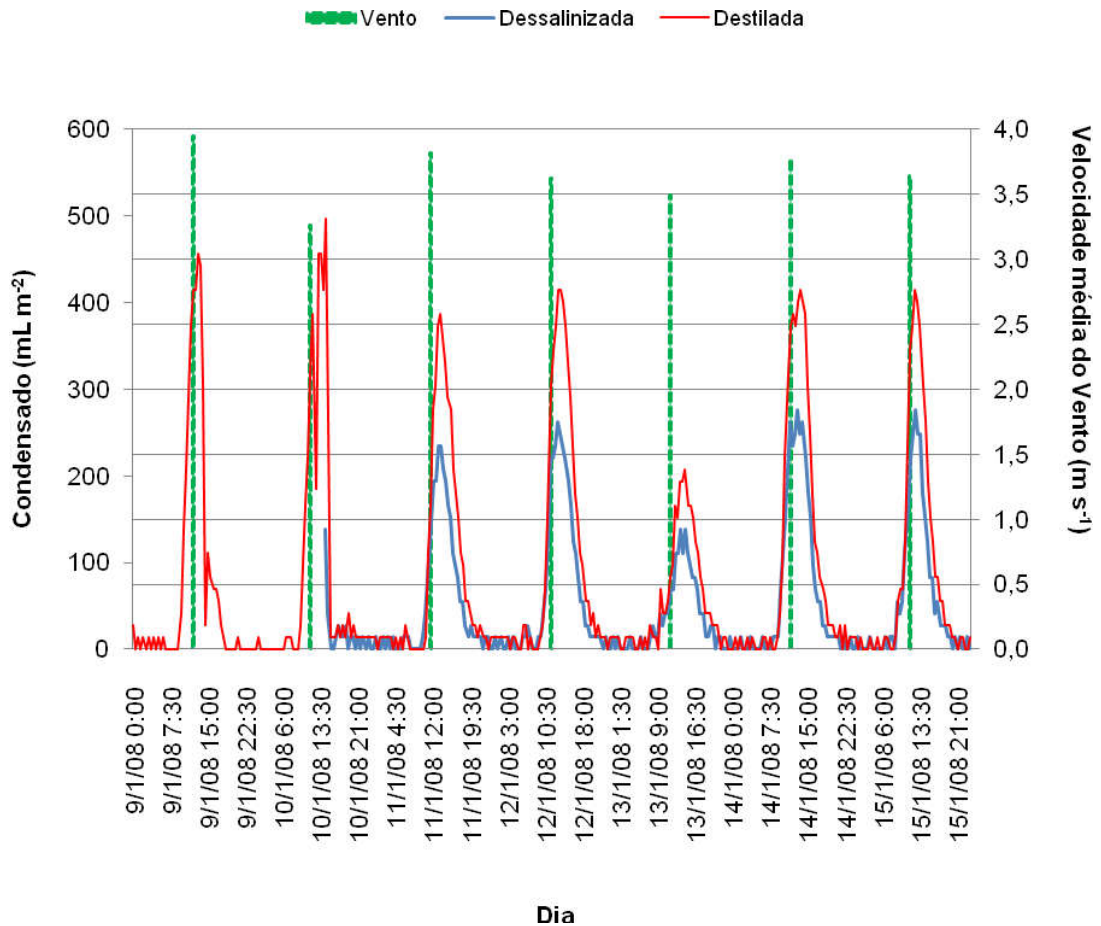


FIGURA 18 - Variação do volume de condensado ($\text{mL m}^{-2} \frac{1}{2} \text{h}^{-1}$) e valores médios de velocidade do vento (m s^{-1}) ao longo do dia.

PHADATARE & VERMA (2007), citam como os principais fatores ambientais no processo de dessalinização a intensidade da radiação solar, a temperatura ambiente e a velocidade do vento. Ainda, segundo TOURE & MEUKAN (1997), quando a velocidade do vento aumenta de 0 m.s^{-1} para 9 m.s^{-1} têm-se um incremento de 10% na produção de água.

Nota-se que existe uma relação inversamente proporcional entre lâmina de água e produtividade do condensado, ou seja, com a diminuição da lâmina de água devido à evaporação do volume de água há um incremento positivo na geração de condensado seja ele destilado ou dessalinizado (FIGURA 19). Exceção se percebe no dia 13, que como já citado, foi influenciado por precipitação e baixa disponibilidade de radiação solar global.

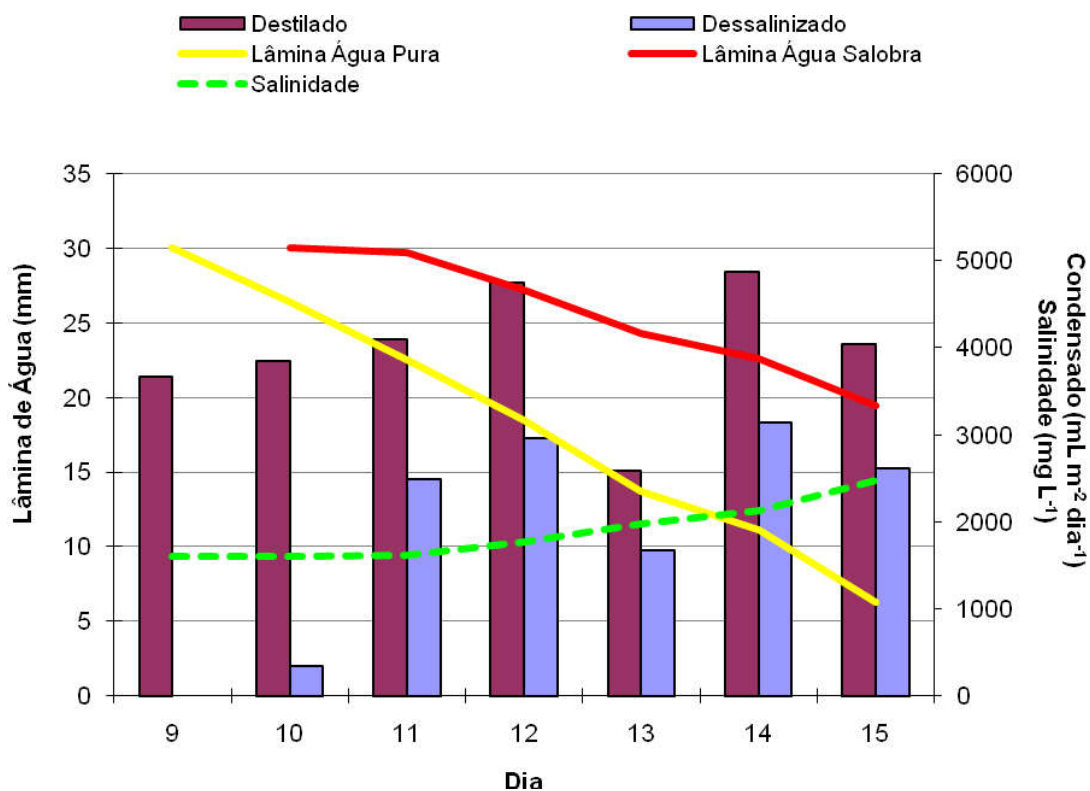


FIGURA 19 – Influência da salinidade (mg L^{-1}) e da lâmina de água no interior do equipamento (mm) na variação diária do volume de condensado ($\text{mL m}^{-2} \text{dia}^{-1}$).

Sabe-se que a salinidade tem forte influência no processo de dessalinização, contudo, percebe-se que às concentrações de sal atingidas no período (até 2.471 mg L^{-1} no dia 15/01) não foram significativas no processo. Nota-se que a curva da lâmina de água salobra a partir do dia 11 de janeiro possui inclinação bastante similar à curva entre o dia 14-15 de janeiro. É possível que salinidades maiores do que 2.500 mg L^{-1} passem a afetar

diretamente o processo de dessalinização, pois percebe-se nitidamente uma tendência de aumento exponencial da curva de salinidade com a diminuição da lâmina de água.

Como pode ser verificado na FIGURA 20, houve uma relação perfeita entre a curva de volume de condensado e a curva do parâmetro “*D*”. Consta-se que, para o período analisado, os valores do parâmetro aumentam com o incremento no rendimento de condensado. Obviamente que a faixa de valores gerados através do parâmetro *D* variam em função dos parâmetros meteorológicos, da salinidade e da lâmina inicial de solução, ou seja, variam de acordo com o local e com o manejo do equipamento.

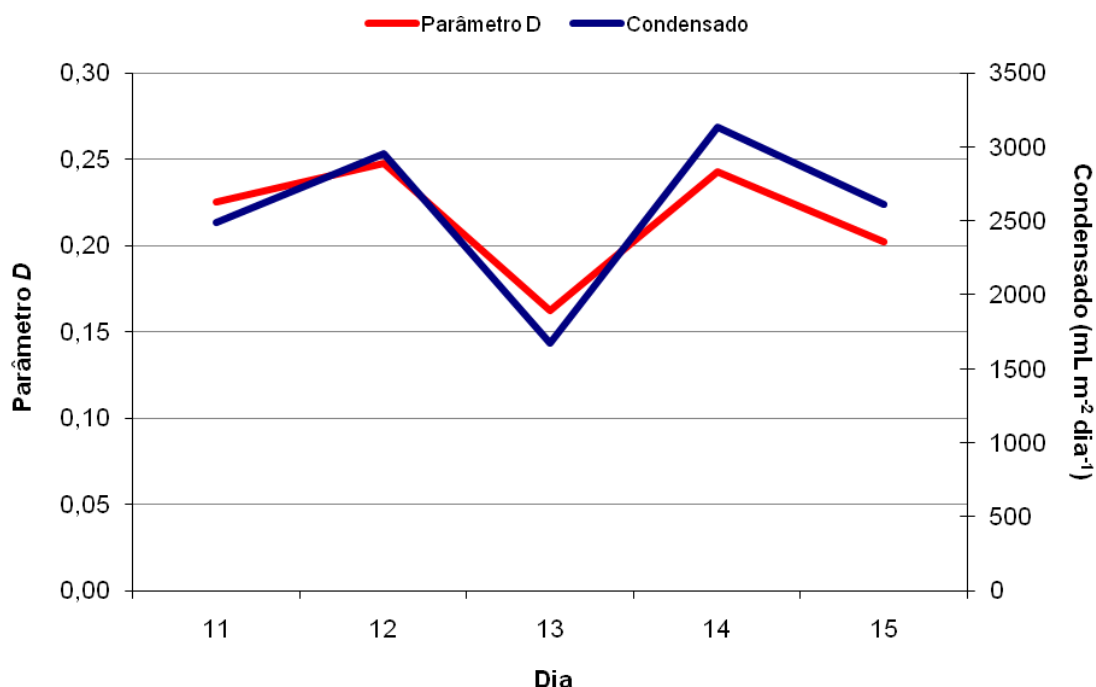


FIGURA 20 - Relação entre volume de condensado (mL m⁻² dia⁻¹) e o parâmetro *D*.

Para as condições analisadas os valores de *D* variaram entre 0,16 e 0,25. No intervalo entre o dia 11 e o dia 12 de janeiro, por exemplo, o incremento na salinidade da solução foi de 9,2%, enquanto a lâmina de água diminuiu em 8,4%. Já o volume de condensado aumentou 18,9%, com *D* igual a 0,23 no dia 11 e 0,25 em 12 de janeiro evidenciando que, para as salinidades avaliadas, a lâmina de solução no equipamento é de

maior importância que a salinidade da solução visto que a média de temperatura e de radiação solar global nesses dias apresentaram pequenas variações.

Os dias 13 e 15 de janeiro apresentaram os menores valores de D no período, sendo eles 0,16 e 0,20, respectivamente. Essa variação negativa se deve essencialmente as reduções de radiação solar global média, 298 W m^{-2} no dia 13 e 370 W m^{-2} no dia 15 de janeiro.

Através de regressão linear entre o volume de condensado e o valor do parâmetro D é possível gerar uma equação para estimar a produtividade do equipamento. Preferencialmente, é desejável que o equipamento dessalinizador opere com lâmina de solução e salinidade constantes variando, apenas, os valores de radiação solar global e temperatura ambiente.

No entanto, no experimento realizado, o equipamento operou sob variações de lâmina de solução e de salinidade, mesmo assim, através de regressão linear foi possível gerar uma equação, com coeficiente de correlação de 0,88, para estimar a produtividade. A equação encontrada para o período avaliado foi $Y=15310x - 736$, sendo “Y” o volume de condensado e “X” o valor do parâmetro D . Assim, para as condições avaliadas a equação que estima a produtividade de condensado (P_w) é:

$$P_w=15310D - 736$$

b) Estudo de caso: comparativo Inverno/Verão

Apesar de o experimento ter sido realizado em uma baixa latitude (aproximadamente $9^{\circ}32'S$), fato que, pela proximidade com a Linha do Equador, não haja grandes variações na radiação solar global, se verificou significativas variações no ciclo

diário desse parâmetro nos períodos analisados. É possível observar as variações sazonais de radiação solar global, tanto em seu ciclo diário como no total acumulado em um dia.

Observou-se que nos períodos de verão a média dos valores máximos de radiação solar global foram superiores a 800 W m^{-2} , enquanto que nos períodos de inverno não excedeu os 600 W m^{-2} . Além disso, após o pico máximo, as mesmas intensidades de radiação solar, no inverno e no verão, apresentam defasagem sendo que no verão há um retardo aproximado de duas horas em relação ao inverno. Por exemplo, no inverno registra-se 400 W m^{-2} em torno de 14h enquanto no verão, a mesma intensidade, é verificada somente às 16h (FIGURA 21).

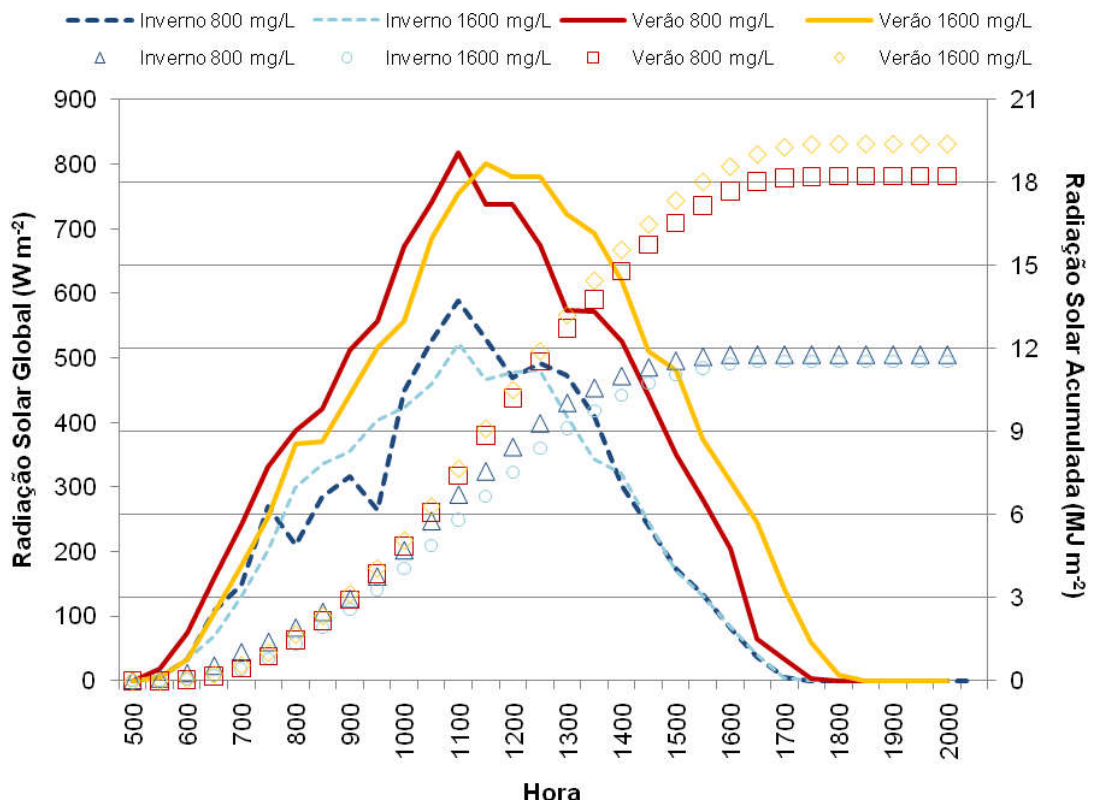


FIGURA 21- Ciclo diário de radiação solar global (W m^{-2}) e radiação solar acumulada (MJ m^{-2}) no inverno e no verão.

Ainda observam-se no verão, nas primeiras horas da manhã, valores mais elevados de radiação solar global quando comparados ao inverno, sendo registrados

valores acima de 400 W m^{-2} (8:00h), enquanto no inverno, essa intensidade é verificada somente em torno de 9:30h. Isso se verifica, pois no hemisfério sul, quando é verão, o sol apresenta maior perpendicularidade com a superfície e, assim, maior intensidade solar. Nos períodos de verão verificou-se um bom potencial solar, superior a 18 MJ m^{-2} , diferença que pode ser traduzida em um grande incremento no rendimento de condensado.

A variação observada na radiação solar global não é verificada na temperatura da água, bem como, na temperatura do vidro. Da mesma forma, a temperatura ambiente não apresentou variações significativas, registrando-se nos experimentos de inverno médias entre $25,1^{\circ}\text{C}$ e $25,6^{\circ}\text{C}$. Nos períodos de verão a média variou entre $28,5^{\circ}\text{C}$ e 30°C . A temperatura ambiente registrada nas duas estações apresentou um perfil similar, com variações ocorrendo em fase, ou seja, nos mesmos intervalos de tempo.

As temperaturas do equipamento (água e vidro) não apresentaram grandes variações. A temperatura média da água no inverno foi de $35,7^{\circ}\text{C}$ no equipamento com salinidade de 800 mg L^{-1} e de $35,1^{\circ}\text{C}$ no de 1600 mg L^{-1} . Já no verão, para as salinidades de 800 e 1600 mg L^{-1} , as temperaturas médias da água registradas foram de $38,7^{\circ}\text{C}$ e 38°C , respectivamente. Percebe-se que as temperaturas registradas na água apresentam tendência de variação em função da temperatura ambiente mais do que em variação da radiação solar global.

As temperaturas médias verificadas no vidro dos equipamentos apresentaram comportamento similar aos observados na água, com temperaturas médias ligeiramente maiores que estas últimas, pois como se sabe, devido ao baixo calor específico do vidro, sob variações de energia sua temperatura varia mais do que a água. Esse fato pode ser observado visualmente nas primeiras horas da manhã nos períodos de verão onde se verifica temperaturas do vidro bastante superiores àquelas registradas na água (FIGURA

22). Os valores registrados foram de 37,3°C e 36,3°C (inverno) e 38,7°C e 39,8°C (verão) para salinidades de 800 e 1600 mg L⁻¹, respectivamente.

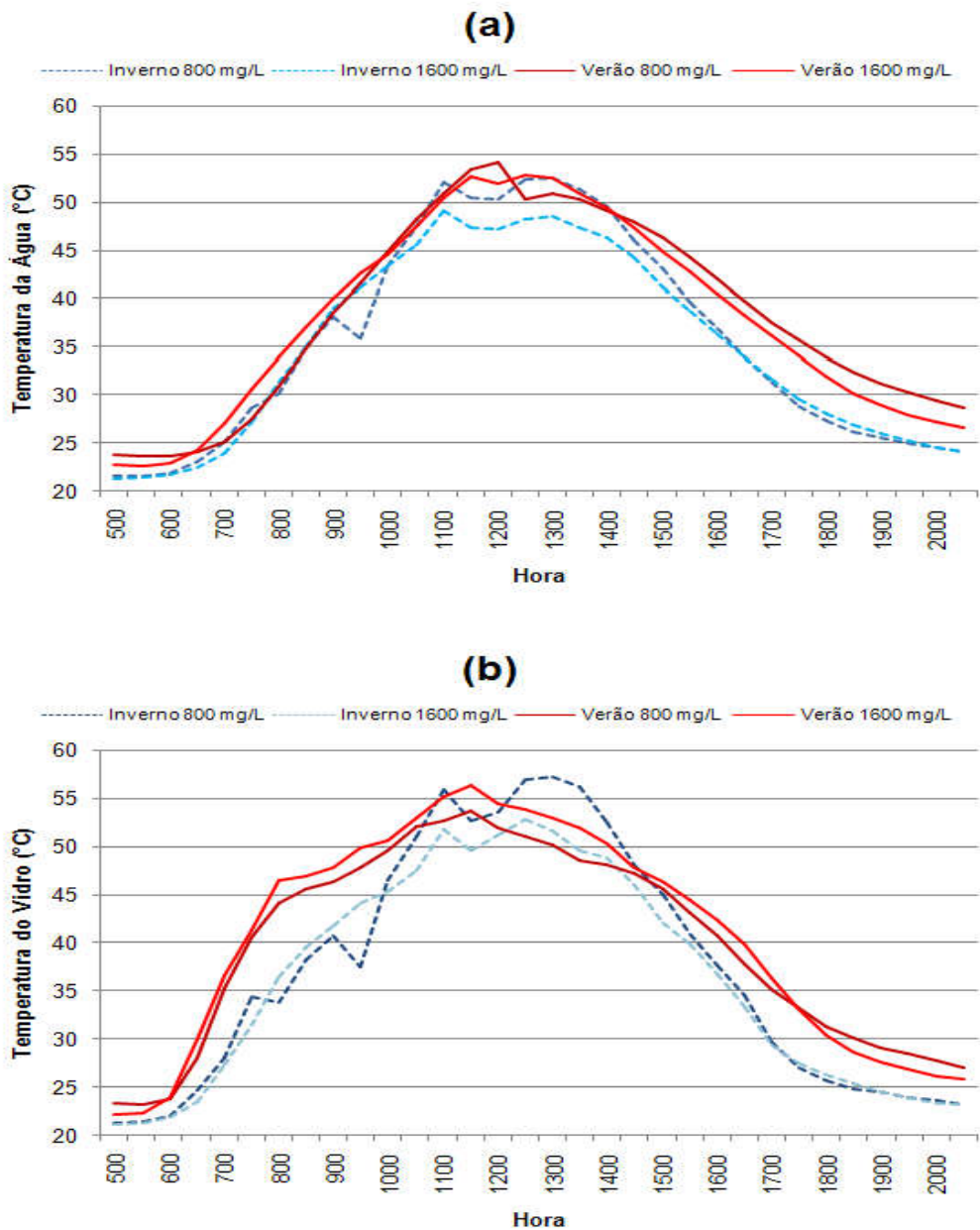


FIGURA 22 – Variação média diária de temperatura (°C) na água (a) e no vidro (b) nas duas estações, sob diferentes salinidades.

TIWARI *et al.* (2003) realizaram experimento em Nova Delhi, Índia, região que apresenta um perfil de radiação solar global similar ao verificado em Maceió, Alagoas, mas apresenta amplitudes maiores de temperatura do que esta última, com temperaturas

mais baixas no inverno e maiores no verão. Foi verificado em seu trabalho, um perfil de temperatura da água no inverno similar ao verificado neste trabalho, com máximas de 47-49°C. No entanto, no verão, estes mesmos autores registraram maiores temperaturas da água, com máximas de 71°C, contudo, salienta-se o fato de que os dados obtidos não são as médias de um período mas sim valores registrados em um único dia. Já em simulação realizada na Turquia, AYBAR (2006), registrou valores médios da temperatura da água de 40°C e máximos de 60°C, resultados bastante semelhantes aos encontrados neste trabalho.

Apesar da pequena variação nas temperaturas ambiente, da água e do vidro, verificou-se uma enorme variação na produção de condensado, possivelmente devido a diferença significativa de radiação solar global entre os períodos de inverno e verão. Sendo assim, provavelmente, essa diferença de energia entre os períodos de inverno e verão ficou armazenada no sistema na forma de calor latente disponível para o processo de vaporização, proporcionando resultados muito mais satisfatórios na geração de condensado no verão do que no inverno.

No inverno a produção acumulada de condensado, para ambas as salinidades, não apresentou variação significativa ficando entre 0,84 e 0,89 L m⁻² dia⁻¹. Nos horários de maior incidência de radiação solar nota-se a influência da salinidade no processo de dessalinização, notando-se maior produção no experimento com menor salinidade. Sob salinidade de 800 mg L⁻¹ o equipamento chegou a produzir 83 mL m⁻² ½ h⁻¹ às 12:30h enquanto sob salinidade de 1600 mg L⁻¹ a maior produtividade registrada foi de 64,5 mL m⁻² ½ h⁻¹ às 14:00h. O retardo no rendimento máximo de condensado se deve a maior concentração salina da solução.

Nos experimentos realizados no verão verificou-se que o equipamento que operou com salinidade de 800 mg L⁻¹ obteve um volume acumulado médio de condensado de 2,7 L m⁻² dia⁻¹ enquanto o equipamento que continha água com salinidade de 1600 mg

L⁻¹ registrou um volume acumulado de condensado de 2,2 L m⁻² dia⁻¹, ou seja, um rendimento relativo superior em 23%. Vale salientar que o experimento com maior salinidade, mesmo operando sob maior radiação solar acumulada, apresentou menor rendimento relativo.

Os máximos rendimentos observados foram de 235 mL m⁻² ½ h⁻¹ e 245 mL m⁻² ½ h⁻¹ para salinidade de 800 e 1600 mg L⁻¹, respectivamente. No entanto, o experimento com menor salinidade obteve rendimentos superiores a 200 mL m⁻² ½ h⁻¹ no intervalo entre 11:30-13:30h (FIGURA 23).

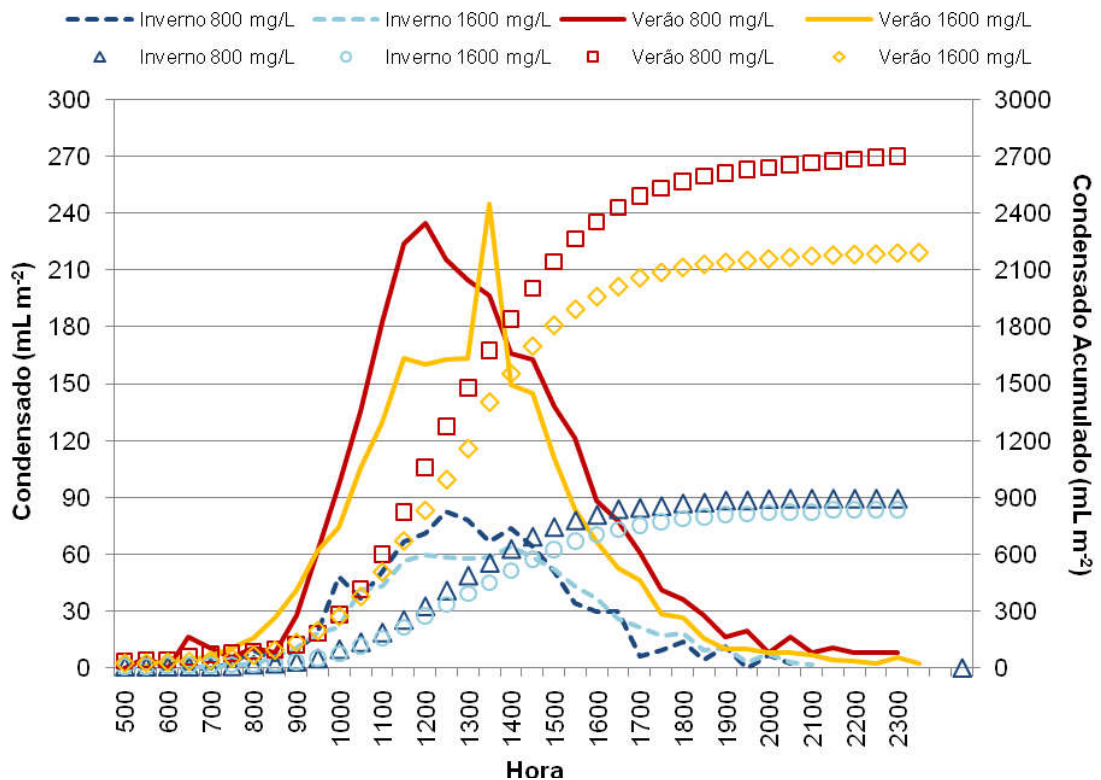


FIGURA 23 - Rendimento médio horário de condensado (mL m⁻² ½ h⁻¹) e acumulado (mL m⁻²) no inverno e verão sob diferentes salinidades.

Já no experimento com salinidade de 1600 mg L⁻¹ esse rendimento foi registrado apenas às 13:30h. Essa diferença pode ser expressa através do rendimento médio dos períodos analisados, registrado nos intervalos de ½ (meia) hora, onde se obteve um

rendimento médio de 82 e 67 mL m⁻² ½ h⁻¹ para salinidade de 800 e 1600 mg L⁻¹, respectivamente.

É presumível que no verão as variações em produção e produtividade nos experimentos que operaram sob diferentes salinidades, sejam significativas devido à maior disponibilidade energética e variação na concentração de sais da água. De fato, verificou-se que em média, no verão, o rendimento relativo de condensado foi 262% e 303% maior que no inverno, para salinidades de 1600 mg L⁻¹ e 800 mg L⁻¹, nessa ordem.

Como visto, sendo o rendimento de condensado e a salinidade uma relação inversa torna-se lógico que para uma mesma quantidade de energia o experimento com menor salinidade obtenha maior produtividade. Diante disso observa-se na FIGURA 24 que em uma mesma estação, os experimentos com maior salinidade geralmente apresentam menor eficiência. Exceção é verificada nos horários de baixa intensidade de radiação solar global, uma vez que o incremento na salinidade acarreta um retardo na resposta ao rendimento de condensado, da mesma forma que também aumenta a inércia térmica do sistema, ou seja, essa energia fica armazenada proporcionando condensação de água por mais tempo e, em consequência disso, nesses horários a eficiência do experimento de maior salinidade é maior do que no de menor salinidade.

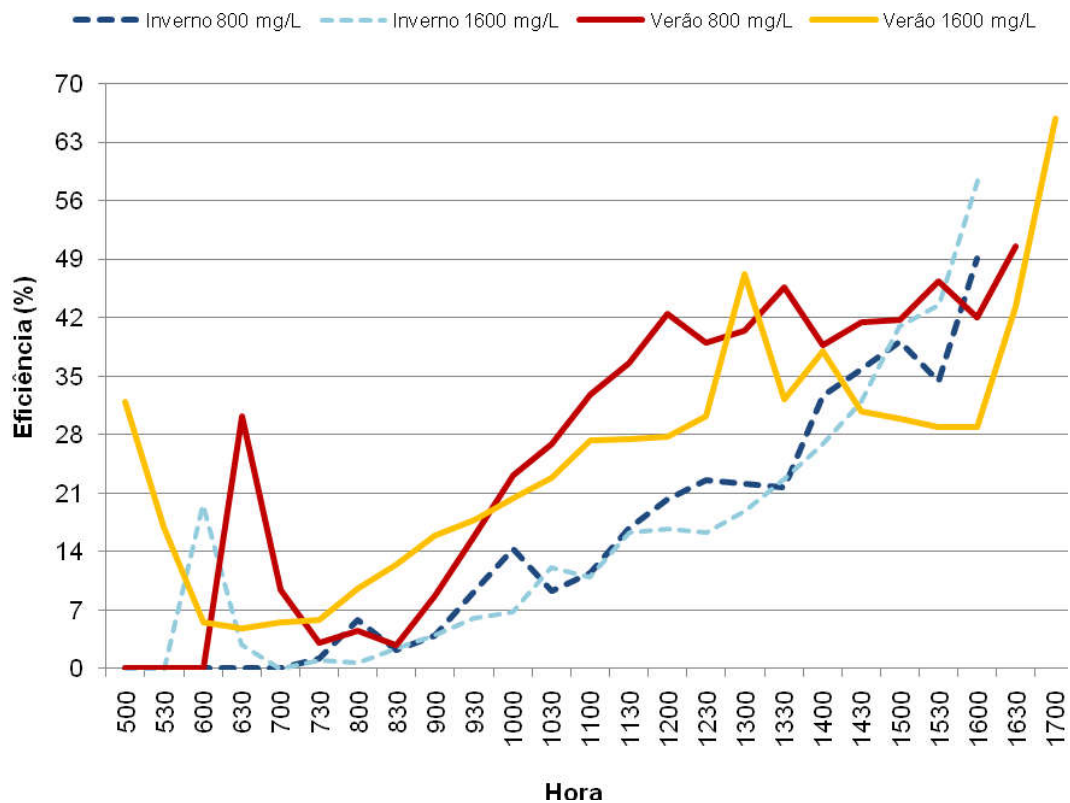


FIGURA 24 - Eficiência de dessalinização em função da salinidade em duas estações distintas, inverno e verão.

Percebe-se, ainda, que em todos os experimentos, sob diferentes condições de clima e de salinidade, as maiores eficiências verificadas ocorreram quando a radiação solar global acumulada registrou valores de aproximadamente 11 MJ m^{-2} . Esse valor foi atingido nas condições de verão em torno de 12h e no inverno às 15h.

Nos horários de maior radiação solar global ($\geq 400 \text{ W m}^{-2}$) foram registradas eficiências entre 11,5 a 39% no experimento com salinidade de 800 mg L^{-1} e entre 6 a 19% no experimento com 1600 mg L^{-1} nas condições de inverno. PHADATARE & VERMA (2007), no inverno, no horário de maior radiação solar (14h) registraram eficiências entre 25 e 34%, dependendo da altura da lâmina de água dentro do dessalinizador.

Já para condições de verão e com radiação solar acima de 400 W m^{-2} , as eficiências verificadas variaram entre 9 e 45,6% no equipamento que operava com

salinidade menor e entre 12,5 e 47,2% no equipamento com salinidade de 1600 mg L⁻¹. As eficiências médias verificada nos períodos de análise foram de 18,1% no inverno e de 35,6% no verão sob a menor salinidade. Operando sob salinidade de 1600 mg L⁻¹, as eficiências registradas foram de 17,4% e 27,1%, para inverno e verão, respectivamente.

KUMAR & BAI (2008), na Índia, registraram uma eficiência de 30% correspondente a uma média de incidência solar de 28 MJ m⁻². Ainda, as variações de eficiência em função da salinidade já são evidenciadas por ABDENACER & NAFILA (2007) onde os autores relatam que a água salobra requer muito menos energia para dessalinização do que a água do mar.

4.2 Análise estatística

As regressões a seguir, foram geradas utilizando-se os dados de ½ hora no intervalo de tempo entre 5:30 e 18:00h dos dias 11 a 15 de janeiro. Optou-se por utilizar esse intervalo por ser período diurno e, também, para não haver mascaramento dos resultados visto que a noite não há radiação solar global e registram-se velocidades de vento superiores aquelas registradas na manhã.

A FIGURA 25 registra todas as variações de produtividade de condensado durante o período do experimento evidenciando que quanto maior a velocidade do vento maior o incremento na produtividade dos equipamentos.

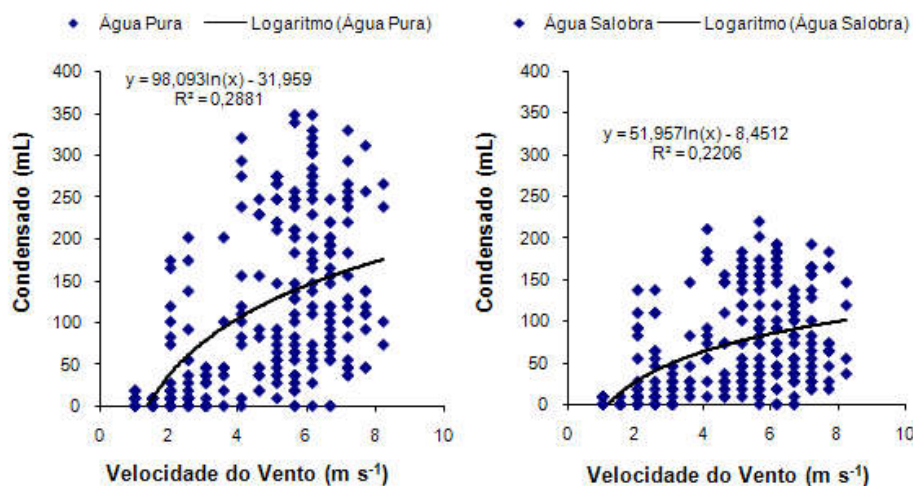


FIGURA 25 - Regressão logaritma entre o volume de condensado ($\text{mL } \frac{1}{2} \text{ h}^{-1}$) e velocidade do vento (m s^{-1}). Dados de meia hora no período de 11 a 15 de janeiro de 2008.

Verifica-se que o parâmetro vento apresenta grandes variações em sua intensidade em pequenos intervalos de tempo. Assim, resultados que, a princípio, podem parecer contraditórios como baixos volumes de condensado sob velocidades altas de vento, se explica devido à influência da radiação solar global que, no horário onde se registra maiores intensidades de vento é, justamente, o horário em que a radiação solar global se torna mínima ou nula. O inverso também é verdadeiro, ou seja, por efeito da radiação solar global alta, se verifica altos volumes de condensado mesmo sob baixas velocidades do vento. Contudo, apesar da baixa consistência e baixo coeficiente de correlação, é possível verificar uma tendência de quando haja um aumento na velocidade do vento verifique-se, também, um incremento no volume de água destilada/dessalinizada, mesmo sendo o vento um parâmetro de importância secundária.

Utilizando-se o período citado, foi feita uma regressão polinomial entre a radiação solar global e o volume de água destilada/dessalinizada (FIGURA 26).

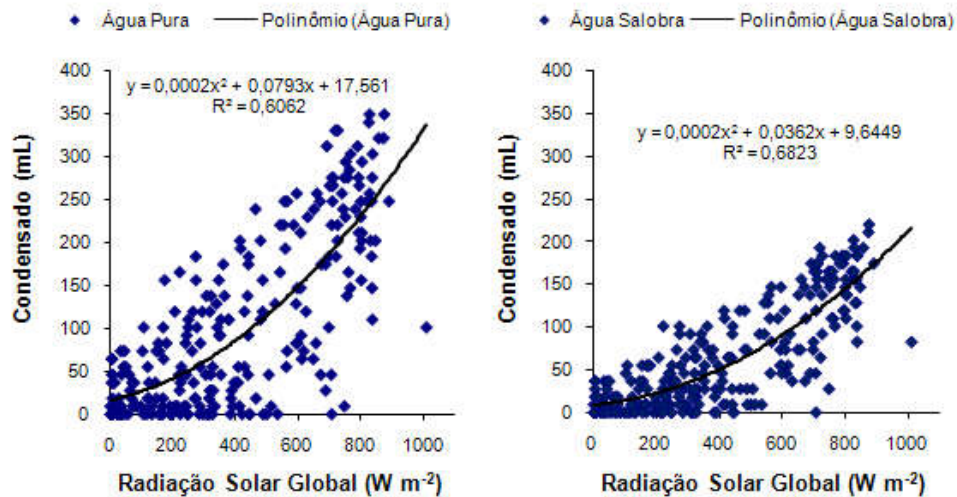


FIGURA 26 - Regressão polinomial entre radiação solar global (W m^{-2}) e condensado ($\text{mL } \frac{1}{2} \text{ h}^{-1}$) nos processos de destilação e dessalinização. Dados de meia hora no período de 11 a 15 de janeiro de 2008.

A água salobra, devido aos sais, apresenta desvios menores em torno da média, pois, para uma mesma quantidade de energia, apresenta menores variações na produção de condensado do que a água pura. Os dados visualizados acima da reta linear representam o período da tarde, onde para valores de radiação solar global semelhantes aos da manhã, apresenta maior rendimento devido ao efeito de armazenamento, ou seja, a disponibilidade energética devido a esse efeito é maior no período vespertino.

A consistência nos dados e a boa correlação gerada (0,92 para o processo de destilação e 0,93 para a dessalinização) sugerem que, talvez, a temperatura da água no interior do equipamento, mesmo sendo resultante de fatores como radiação solar global e temperatura ambiente, seja o principal componente de rendimento no processo de dessalinização a ser considerado em projetos dessa natureza, devendo ser maximizado (FIGURA 27).

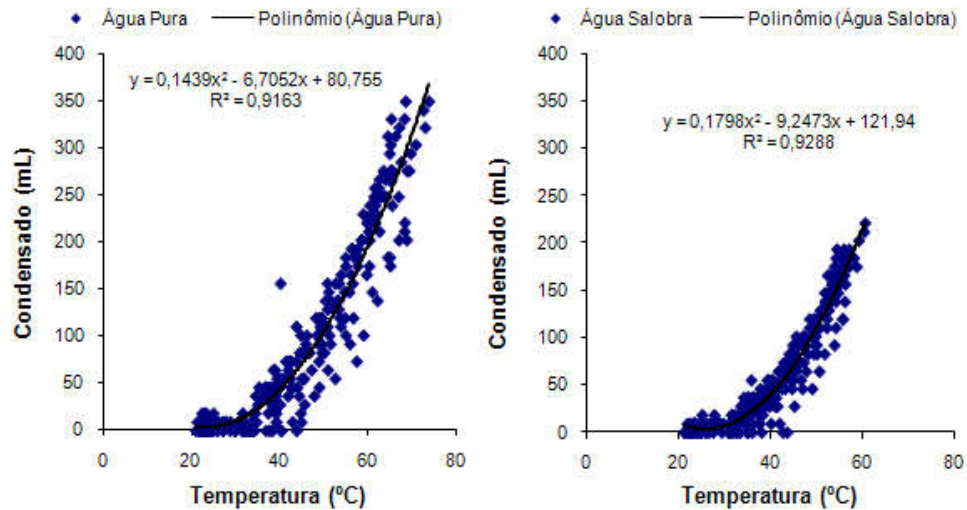


FIGURA 27 - Regressão polinomial entre volume de condensado ($\text{mL } \frac{1}{2} \text{ h}^{-1}$) e temperatura da água ($^{\circ}\text{C}$) nos dois processos. Dados de meia hora no período de 11 a 15 de janeiro de 2008.

A água, como já comentado, possui alta capacidade térmica o que, ao contrário da radiação solar global e da velocidade do vento que variam bruscamente em pequenos intervalos de tempo, lhe permite agir como um acumulador térmico produzindo um efeito de armazenamento e, assim, apresentar variações pequenas diante de grandes variações da radiação solar, da temperatura ambiente, do vento, etc. As regressões polinomiais feitas a partir dos dados de meia hora da temperatura da água nos dois processos foram as únicas, dentre os parâmetros meteorológicos, que não se verificou variações significativas. Provavelmente, como anteriormente citado, resultado do *storage effect*.

Sabe-se que no processo de dessalinização solar é desejável que se verifique um valor positivo para a diferença de temperatura entre a água e o vidro da cobertura do equipamento. Quanto mais positivo esse ΔT , teoricamente, maior o rendimento de condensado e maior a eficiência do sistema visto que para uma mesma quantidade de vapor gerado, quanto menor a temperatura da cobertura de vidro, maior o volume de condensado gerado.

Essa teoria foi confirmada no experimento realizado. Como pode ser visto os máximos valores de eficiência, em ambos os processos, foram registrados quando o ΔT foi \geq zero (FIGURA 28).

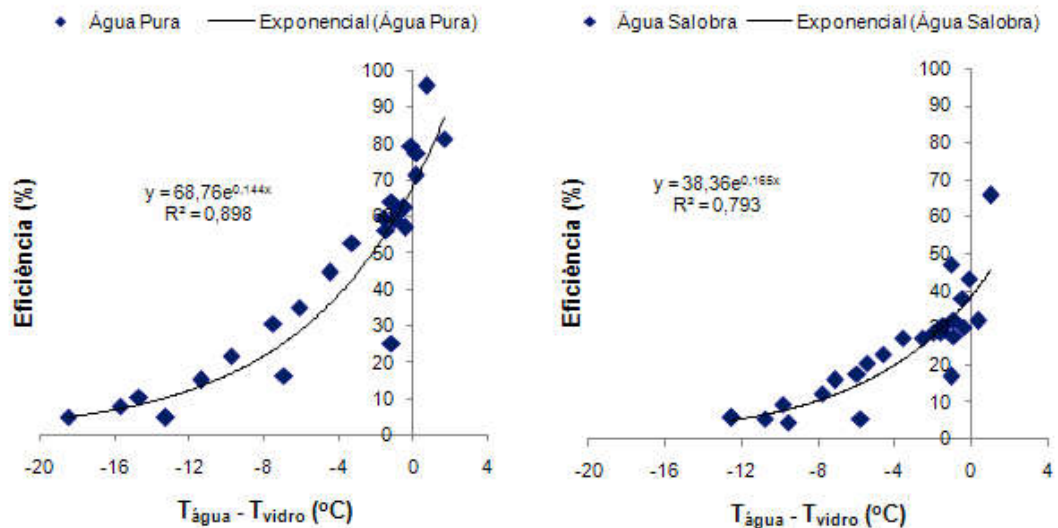


FIGURA 28 - Regressão exponencial entre a diferença $T_{\text{água}} - T_{\text{vidro}} (^{\circ}\text{C})$ e eficiência (%) no processo de destilação e dessalinização. Médias de meia hora no período.

Essa condição ($\Delta T \geq 0$) pode ser atingida através de modificações no equipamento de modo a conseguir que a água no seu interior alcance maiores temperaturas ou modificando o material utilizado na cobertura para que, esse último, adquira menores temperaturas. Outra forma para se atingir a condição citada seria através de ventos mais intensos ou, então, por meio de baixas precipitações já que foi verificado que esses eventos dissipam o calor contido na cobertura de vidro e, assim, diminuem sua temperatura.

5 CONCLUSÕES

Primeiramente, cabe salientar que, apesar da simplicidade e rusticidade empregada na construção dos equipamentos estes apresentaram resultados bastante satisfatórios e que a técnica de dessalinização solar é viável de ser adotada na região litorânea de alagoas.

Fica evidente que a nebulosidade é um evento altamente prejudicial ao processo. No entanto, as precipitações ocorridas no período analisado, quando de baixa intensidade e que não estejam associadas à alta nebulosidade se mostraram até benéficas ao processo, pois baixaram a temperatura da cobertura de vidro e proporcionaram um incremento no rendimento de condensado.

Durante o período do experimento não foi registrada temperatura média ambiente abaixo de 26°C. Contudo, os resultados obtidos sob essa temperatura sugerem que locais que registrem temperatura média ambiente $\geq 25^{\circ}\text{C}$ apresente viabilidade para o emprego da técnica de dessalinização solar. Deve-se buscar, através de melhorias no

projeto e nos materiais empregados, maximizar a temperatura da água salobra fazendo com que esta registre temperatura média diária superior a 40°C.

Com relação à radiação solar global, os melhores resultados de produção de condensado e eficiência do processo ocorreram nos dias em que sua média foi $\geq 400 \text{ W m}^{-2}$ (18 MJ m⁻²), tornando esse valor um referencial básico para estudo de viabilidade técnica do uso da dessalinização solar. Na condição de inverno em Alagoas, como demonstrado, o uso da dessalinização solar não apresentou viabilidade devido à baixa radiação solar global acumulada ($\sim 12 \text{ MJ m}^{-2}$), com baixo rendimento de condensado e baixa eficiência.

O vento, apesar de não ser um parâmetro meteorológico fundamental no processo de dessalinização e de difícil mensuração de sua influência, pareceu ser um fator que proporcionou um incremento no rendimento e eficiência quando sua intensidade foi superior a 6 m s^{-1} .

A lâmina de água no interior dos equipamentos, como esperado, mostrou ter uma relação inversa ao rendimento, ou seja, quanto menor a lâmina de água maior o rendimento de condensado. Para viabilizar o uso da dessalinização, a lâmina de água é um fator essencial que deve ser levado em consideração em um projeto empregando, sempre, a menor lâmina possível.

A salinidade da solução apresentou durante o período analisado uma variação entre 1600-2471 mg L⁻¹, no entanto, essa variação não causou variações significativas quando se levou em consideração o rendimento de condensado e eficiência entre um dia e outro. Talvez essa influência não tenha sido perceptível devido à diminuição da lâmina de água que pode ter um efeito compensatório. Já no estudo em que se analisou a salinidade de 800 mg L⁻¹ e 1600 mg L⁻¹ nas condições de verão, a influência da salinidade sobre o processo de dessalinização solar ficou evidente, com rendimentos significativamente menores na condição de maior salinidade. Porém, nas condições de inverno, para ambas as

salinidades, o mesmo não foi verificado, pois foi pequena e não significativa a variação no rendimento de condensado.

Apesar do período do experimento ter sido relativamente curto, o parâmetro criado apresentou um bom ajuste em relação ao rendimento de condensado. A equação gerada, a partir do parâmetro, simulou satisfatoriamente o rendimento diário de condensado. Então, o parâmetro pode ser empregado em qualquer localidade e a equação gerada a partir dele, após ser parametrizada para as condições locais de interesse, permite estimar com boa precisão o potencial de água a ser dessalinizada, para o equipamento utilizado.

Dentre as regressões obtidas, a regressão polinomial entre temperatura da água e rendimento de condensado foi a que apresentou um melhor coeficiente de correlação, seguido da regressão exponencial gerada a partir da relação entre eficiência e ΔT (água – vidro). As regressões geradas a partir da relação entre rendimento de condensado e radiação solar global e velocidade do vento não apresentaram boa correlação.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDEL-REHIM, Z. S.; LASHEEN, A. Experimental and theoretical study of a solar desalination system located in Cairo, Egypt. **Desalination**, v. 217, p. 52 – 64, 2007.

ABDENACER, Pr. K.; NAFILA, S. Impact of temperature difference (water – solar collector) on solar-still global efficiency. **Desalination**, v. 209, p. 298 – 305, 2007.

AL-HAYEK, I.; BADRAN, O. O. The effect of using different designs of solar stills on water distillation. **Desalination**, v.169, p. 121 – 127, 2004.

AYBAR, H. Mathematical modeling of an inclined solar water distillation system. **Desalination**, v.190, p. 63 – 70, 2006.

AYBAR, H. S.; EGELIOGLU, F.; ATIKOL, U. An experimental study on an inclined solar water distillation system. **Desalination**, v.180, p. 285 – 289, 2005.

BEZERRA, A. M. **Aplicações térmicas da energia solar**. 4 ed. João Pessoa: Editora Universitária, 2001. 243 p.

BORBA, J. C. C. **Identificação do Potencial Eólico no Estado de Alagoas Utilizando Dados de Reanálises**. 2005. Dissertação (Mestrado em Meteorologia). Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 80 p.

BOUCHEKIMA, B. A small solar desalination plant for the production of drinking water in remote arid areas of southern Algeria. **Desalination**, v.159, p. 197 – 204, 2003.

BOUKAR, M.; HARMIM, A. Design parameters and preliminary experimental investigation of an indirect vertical solar still. **Desalination**, v.203, p. 444 – 454, 2007.

BRASIL – Ministério da Ciência e Tecnologia – Instituto Nacional do Semi Árido. **O Semi – Árido**. Disponível em:

<<http://www.insa.gov.br/index.php/content/view/97.html>> Acesso: 02 de dezembro de 2008.

BRASIL – Ministério da Integração Nacional. **Relatório Final: Grupo de Trabalho Interministerial para redelimitação do semi-árido nordestino e do polígono das secas**. Brasília, janeiro de 2005. 118 p.

CAPPELLETTI, G. M. An experiment with a plastic solar still. **Desalination**, v.142, p. 221 – 227, 2002.

Centro de Divulgação Científica e Cultural (CDCC) – USP. **Sol**. Disponível em: <<http://cdcc.sc.usp.br/cda/aprendendo-basico/sistema-solar/sol.html>> Acesso em: 16 de setembro de 2007.

COLLE, S.; PEREIRA, E. B. **Atlas de Irradiação Solar do Brasil**. Brasília: LABSOLAR – EMC/UFSC, INMET e INPE, 1998. il. 65 p. Disponível em:

<http://www.lepten.ufsc.br/prodeserv/atlas/atlas_de_irradiacao.pdf> Acesso em 10 de fevereiro de 2008.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar engineering of thermal processes**. 2 ed. John Wiley & Sons, Inc., 1991. 919 p.

FATH, H. E. S. High performance of a single design, two effects, solar distillation unit. **Energy Convers. Mgmt.** v. 38, n. 18, p. 1895 – 1905, 1997.

FERREIRA, S. A.; COHEN, J. C. P. Variação Intra-Regional da Precipitação Pluviométrica Junto ao Litoral Atlântico da Amazônia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, **Anais...** Fortaleza, 2001.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de física**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, vol. 2, 2006.

HAMILTON, C. J. **O Sol**. Instituto de Física – UFRGS. Disponível em: <<http://www.if.ufrgs.br/ast/solar/portug/sun.htm>> Acesso em: 16 de setembro de 2007.

KUMAR, K. V.; BAI, R. K.. Performance study on solar still with enhanced condensation. **Desalination**, v. 230, p. 51 – 61, 2008.

KREITH, F.; KREIDER, J. F. **Principles of solar engineering**. Hemisphere Publishing Corporation, 1978. 778 p.

LIOU, K. N. **An introduction to atmospheric radiation**. New York: Academic Press, 1980. 392 p.

LOPES, J. T. **Dimensionamento e Análise Térmica de um Dessalinizador Solar Híbrido**. 2004. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Mecânica/Refrigeração e Condicionamento Ambiental) Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

MAIA NETO, R.F. Água para o desenvolvimento sustentável. **A Água em Revista**, Belo Horizonte, n.9, p. 21 – 32, 1997.

MEUKAM, P.; NJOMO, D.; GBANE, A.; TOURE, S. Experimental optimization of a solar still: application to alcohol distillation. **Chemical Engineering and Processing**, v.43, p. 1569 – 1577, 2004.

MONTEIRO, V. P.; PINHEIRO, J. C. V. Critério para Implantação de Tecnologias de Suprimentos de Água Potável em Municípios Cearenses Afetados pelo Alto Teor de Sal. **Revista Economia e Sociologia Rural**, Rio de Janeiro, v.42, n.2, p. 365 – 387, abr/jun 2004.

MOTA, S.; ANDRADE, M. A. N. Uso da destilação solar no tratamento de águas contaminadas por microrganismos. Aplicações às pequenas comunidades. **Revista Tecnologia**, n.7, p. 24 – 26, 1986.

NICÁCIO, R.M. **Radiação solar global e difusa para a região de Maceió, Alagoas: Medidas e modelos**. 2002. Dissertação (Mestrado – Meteorologia) Universidade Federal de Alagoas, Maceió. 107 p.

PAZ, V. P. S.; TEODORO, R. E. F.; MENDONÇA, F. C. Recursos Hídricos, Agricultura Irrigada e Meio Ambiente. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.4, n.3, p. 465 – 473, 2000.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; ABREU, S. L.; RÜTHER, R. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. São José dos Campos: INPE, 2006. il. 60 p.

PINA, A. V. V. **Dessalinização solar no abastecimento de água para uma família no arquipélago de Cabo Verde**. 2004. Monografia (Engenharia Mecânica) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

PHADATARE, M. K.; VERMA, S. K. Influence of water depth on internal heat and mass transfer in a plastic solar still. **Dessalination**, v. 217, p. 267 – 275, 2007.

Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica – REDEMETS. **Registro de velocidade do vento no Aeroporto Internacional Zumbi dos Palmares, Maceió/Alagoas**. Disponível em: <www.redemet.aer.mil.br> Acesso em: maio de 2008.

SILVA, J. K. A. **Caracterização do vento e estimativa do potencial eólico para a região de tabuleiros costeiros (Pilar, Alagoas)**. 2007. Dissertação (Mestrado – Meteorologia) Universidade Federal de Alagoas, Maceió. 64 p.

SOARES, C. **Tratamento de água unifamiliar através da destilação solar natural utilizando água salgada, salobra e doce contaminada**. 2004. Dissertação (Mestrado – Engenharia Ambiental) Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

SOARES, T. M.; SILVA, I. J. O.; DUARTE, S. N.; SILVA, E. F. de F. Destinação de águas residuárias provenientes do processo de dessalinização por osmose reversa. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.10, n.3, p. 730 – 737, 2006.

SOTO, E. G.; URBAN, P. R.; SCHWARZER, K.. Desalinizador solar de múltiplos efectos a alta temperatura: Diseño, modelación y simulación. **Facultad de Ingeniería, U.T.A. (Chile)**, v.11, n.2, p. 25 – 33, 2003.

SOUZA, L. F. Dessalinização como fonte alternativa de água potável. **Norte Científico**, v.1, n.1, dezembro de 2006. Disponível em:

<http://www.redenet.edu.br/publicacoes/arquivos/20070704_103510_008.pdf.>
> Acesso em: 08 de novembro de 2007.

TANAKA, H.; NAKATAKE, Y. Effect of inclination of external flat plate reflector of basin type still in winter. **Solar Energy** (2007), doi:10.1016/j.solener.2006.11.006.

TIWARI, A. Kr.; TIWARI, G. N. Effect of water depths on heat and mass transfer in a passive solar still: in summer climatological condition. **Desalination**, v. 195, p. 78 – 94, 2006.

TIWARI, G.N.; SHUKLA, S.K.; SINGH, I.P. Computer modeling of passive/active solar stills by using inner glass temperature. **Desalination**, v.154, p. 171 – 185, 2003.

TOURE, S.; MEUKAM, P. A numerical model and experimental investigation for a solar still in climatic conditions in Abidjan (Côte D'Ivoire). **Renewable Energy**, v.11, n.3, p. 319 – 330, 1997.

TRIPATHI, R.; TIWARI, G.N. Effect of water depth on internal heat and mass transfer for active solar distillation. **Desalination**, v.173, p. 187 – 200, 2005.

VALSARAJ, P. An experimental study on solar distillation in a single slope basin still by surface heating the water mass. **Renewable Energy**, v. 25, p. 607 – 612, 2002.

VAREJÃO – SILVA, M. A. **Meteorologia e Climatologia**. 2º ed. Brasília: INMET, 2000. v.1. 515 p.

VENDRAMINI, E. Z. **Distribuições probabilísticas de velocidades do vento para avaliação do potencial energético eólico**. Tese (Doutorado em Agronomia) Universidade Estadual Paulista, Botucatu 110 p., 1986.

VIANELLO, R. L.; ALVES, A. R. **Meteorologia básica e aplicações**. Viçosa: UFV – Universidade Federal de Viçosa, 2004. 449 p.

WIKIPÉDIA – A Enciclopédia Livre. **Maceió**. Disponível em: <<http://pt.wikipedia.org/wiki/Macei%C3%B3>> Acesso em: 06 julho de 2008.

WEISZFLOG, WALTER (Editor). **Moderno dicionário da língua portuguesa**. São Paulo: Editora Melhoramentos, 2007. 2280 p.