

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA

CONDENSAÇÃO DA UMIDADE ATMOSFÉRICA: UM ESTUDO DA
VIABILIDADE DA PRODUÇÃO DE ORVALHO POR RESFRIAMENTO DO AR
NOS MUNICÍPIOS PARAIBANOS DE CAMPINA GRANDE E SÃO JOÃO DO
CARIRI

GENIVAL DA SILVA

CAMPINA GRANDE - PB

Março de 2007

GENIVAL DA SILVA

CONDENSAÇÃO DA UMIDADE ATMOSFÉRICA: UM ESTUDO DA VIABILIDADE
DA PRODUÇÃO DE ORVALHO POR RESFRIAMENTO DO AR NOS MUNICÍPIOS
PARAIBANOS DE CAMPINA GRANDE E SÃO JOÃO DO CARIRI

Dissertação apresentada ao programa de
Pós-graduação em Meteorologia da
Universidade Federal de Campina Grande,
em cumprimento às exigências para
obtenção do Grau de Mestre.

Área de Concentração: Meteorologia de Meso e Grande Escalas

Sub-área: Hidrometeorologia

Orientador: Prof. Dr. Francisco de Assis Salviano de Sousa – UFCG –CTRN - UACA

CAMPINA GRANDE - PB

Março de 2007

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA
CENTRAL DA UFCG**

S586c Silva, Genival da
Condensacao da umidade atmosferica : um estudo da
viabilidade da producao de orvalho por resfriamento do ar
nos municipios paraibanos de Campina Grande e Sao Joao do
Cariri / Genival da Silva. - Campina Gande, 2007.
66 f. : il.

Dissertacao (Mestrado em Meteorologia) - Universidade
Federal de campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos
Naturais.

1. Orvalho 2. Umidade do Ar 3. Condensacao 4.
Dissertacao I. Sousa, Francisco de Assis Salviano de, Dr.
II. Universidade Federal de Campina Grande -Campina Grande
(PB). III. Título

CDU 551.574.41(043)

GENIVAL DA SILVA

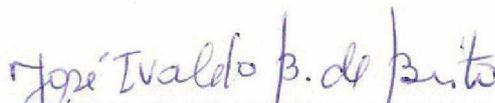
CONDENSAÇÃO DA UMIDADE ATMOSFÉRICA: UM ESTUDO DA VIABILIDADE DA
PRODUÇÃO DE ORVALHO POR RESFRIAMENTO DO AR NOS MUNICÍPIOS
PARAIBANOS DE CAMPINA GRANDE E SÃO JOÃO DO CARIRI

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 16/3/2007

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. FRANCISCO DE ASSIS SALVIANO DE SOUSA
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande



Prof. Dr. JOSÉ IVALDO BARBOSA DE BRITO
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande



Prof. Dr. JOSÉ FIDELES FILHO
Departamento de Física
Universidade Estadual da Paraíba

Aos meus filhos Dayse,
Bruno, Fábio e Diogo e à
minha esposa Dória,

DEDICO.

AGRADECIMENTOS

À Natureza, por oferecer-me as condições propícias ao desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus pais, in memoriam, José Francisco (Zé Madureiro) e Maria das Neves (Dona Nê), por tudo que fizeram por mim.

À minha esposa Dória e aos meus filhos Dayse Danielle, Bruno Giordano, Fábio Fernando e Diogo Anderson, pela ajuda na construção dos experimentos e na obtenção dos dados.

Ao Professor Dr. Francisco de Assis Salviano de Sousa, pela orientação desta pesquisa.

Aos Professores Dr. José Fideles Filho e Dr. José Ivaldo Barbosa de Brito, pela participação na Banca Examinadora.

À Universidade Estadual da Paraíba, pela disponibilidade de tempo integral para a realização deste trabalho e pelas análises realizadas no orvalho coletado em S. J. do Cariri.

À Universidade Federal de Campina Grande, através da Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas e da Coordenação de Pós-Graduação em Meteorologia, pela disponibilidade dos professores e da infra-estrutura, essenciais à condução dos trabalhos.

Aos Professores Doutores João Tertuliano Nepomuceno Agra e Morgana Lígia de Farias Freire pela confiança depositada.

A Divanete, Eyres e Miriam pela competência e dedicação às suas atribuições.

A todos os colegas do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia e, de forma especial, a João Athaydes, Leidiane, Lindemberg (Bega), Rafael, Rita Micheline e Roberto Alan pela colaboração dada durante a realização dos trabalhos.

A Detinha, pelo acolhimento durante a realização dos trabalhos de campo realizados no Sítio Farias – São João do Cariri – PB.

Enfim, a todos que contribuíram para esta importante realização de minha vida,

Os meus sinceros AGRADECIMENTOS.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	x
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xi
LISTA DE SÍMBOLOS	xii
RESUMO	xiii
ABSTRACT	xiv
1. INTRODUÇÃO	15
1.1 Objetivos.....	19
1.1.1 Objetivo geral.....	19
1.1.2 Objetivos específicos	19
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
3. MATERIAL E MÉTODO	25
3.1. Área de estudo.....	25
3.2 Cálculos meteorológicos e termodinâmicos	27
3.3 Aparato experimental	31
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
4.1 Orvalho produzido.....	37
4.2 Consumo de energia	49
4.3 Análises microbiológicas e fisico-químicas	50
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES	51
5.1 Conclusões	51
5.2 Sugestões para futuras pesquisas	52

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	53
APÊNDICE A.....	56
APÊNDICE B.....	58
APÊNDICE C.....	59
APÊNDICE D.....	60
ANEXO 1.....	65
ANEXO 2.....	66

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ciclo hidrológico.....	16
Figura 2 – Médias anuais de precipitação no Estado da Paraíba. Em destaque as localidades de Campina Grande e São João do Cariri.....	17
Figura 3 – Localização de Bahrain - Golfo Pérsico.....	21
Figura 4 – Ajaccio - Ilha de Córsega – França.....	22
Figura 5 – Regiões climáticas do Estado Paraíba e a localização dos municípios de Campina Grande (a) e São João do Cariri (b).....	25
Figura 6 – Sítio Farias (7°27'48"S; 36°30'32"W; 492m) - São João do Cariri – PB	26
Figura 7 – Compressor, condensador e evaporador retirados do refrigerador	32
Figura 8 – Montagem experimental utilizada na condensação do vapor atmosférico.....	34
Figura 9 – Bâscula adaptada ao aparato experimental.....	34
Figura 10 – Nova versão da b�scula adaptada ao experimento.....	35
Figura 11 – Caixa térmica utilizada no transporte das garrafas PET contendo gelo.....	36
Figura 12 – Volume de orvalho produzido por metro quadrado (Δh) e a variação média da umidade específica $\langle q - q_s \rangle$	41
Figura 13 – Temperatura da superfície de condensação (T_s), diferença média entre as umidades específicas $\langle q - q_s \rangle$ e o volume de orvalho produzido por metro quadrado (Δh).....	42
Figura 14 – Temperatura da superfície de condensação (T_s), diferença média entre as umidades específicas $\langle q - q_s \rangle$, e o volume de orvalho produzido por metro quadrado (Δh) em 27.05.2006, no Sítio Farias em São João do Cariri.	44

Figura 15 – Massa de orvalho produzido em experiências realizadas no dia 30/10/2006, simultaneamente em Campina Grande e em São João do Cariri	45
Figura 16 – Valores obtidos no experimento realizado na estação meteorológica da UACA/UFCG, em 13/12/2006	47
Figura 17 – Valores obtidos no experimento realizado na Estação Meteorológica da UACA/UFCG, em 21 e 22/12/2006.....	49
Figura B.1 – Curva de calibração do termistor do tipo NTC usado na medida de temperaturas das superfícies de condensação de orvalho.....	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados climatológicos (médias anuais) dos municípios de Campina Grande, Monteiro, São João do Cariri e Soledade, localizados na Região do Cariri Paraibano	27
Tabela 2 - Dados obtidos em ambiente fechado (sala anexa ao Laboratório de Física Básica III da UEPB).	38
Tabela 3 – Condensação do vapor d’água usando o congelador retirado do refrigerador... 39	
Tabela 4 – Condensação do vapor d’água sobre o tubo evaporador	39
Tabela 5 – Dados obtidos pelo experimento realizado em ambiente fechado em 20/05/2006 em Campina Grande-PB.....	40
Tabela 6 – Dados obtidos pelo experimento realizado em ambiente externo, em 21/05/2006, na cidade de Campina Grande.....	42
Tabela 7 – Dados obtidos pelo experimento realizado em ambiente aberto, no dia 27/05/2006, no Sítio Farias – São João do Cariri-PB.	43
Tabela 8 – Dados obtidos em experiências realizadas simultaneamente em Campina Grande (CG) e São João do Cariri (SJC), em 30/10/2006, em ambiente aberto	45
Tabela 9 – Dados obtidos em 13/12/2006, na Estação Meteorológica da UACA/UFCG. ..	46
Tabela 10 – Dados obtidos nos dias 21 e 22/12/2006, na Estação Meteorológica da UACA/UFCG	48
Tabela 11 – Consumo de energia para cada litro de água produzido	50
Tabela B.1 – Valores de resistências elétricas apresentadas pelo termistor e as respectivas temperaturas	58
Tabela D.1 – Formato da tabela de dados gerada pelo programa ORVALHO.BAS	64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CG – Campina Grande

E – Este

N – Norte

NEB – Nordeste Brasileiro

NTC – Coeficiente de Temperatura Negativo

PB – Paraíba

PET – Polietileno Tereftalato

PVC – Poli Cloreto de Vinila

S – Sul

SAELPA – Sociedade Anônima de Eletrificação da Paraíba

SJC – São João do Cariri

UACA – Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas

UEPB – Universidade Estadual da Paraíba

UFCG – Universidade Federal de Campina Grande

W – Oeste

ZCIT – Zona de Convergência Intertropical

LISTA DE SÍMBOLOS

c_p – Calor específico a pressão constante

E – Energia, razão de condensação de orvalho

e – Pressão real de vapor d'água

e_s – Pressão de saturação do vapor d'água

h – Coeficiente de transferência de calor

L_v – Calor latente de vaporização

m – massa

P – Pressão, potência

Q – Calor

q – Umidade específica

R – Constante dos gases, resistência elétrica

r – Razão de mistura

T – Temperatura

T_d – Temperatura do ponto de orvalho

T_s – Temperatura da superfície de condensação

t – tempo

U – Intensidade do vento

UR – Umidade Relativa

V – Volume

ξ – Constante psicrométrica

RESUMO

Pesquisas realizadas nos municípios paraibanos de Campina Grande e São João do Cariri têm mostrado a viabilidade da produção de água potável a partir da formação do orvalho em superfícies refrigeradas por sistemas convencionais de refrigeração ou pelo uso de garrafas PET contendo gelo. Os resultados experimentais aqui apresentados mostram que o resfriamento do ar pode produzir quantidades suficientes de água para minimizar as consequências da escassez de água potável na região Semi-árida do Nordeste brasileiro. O experimento baseado no contato direto do ar com a superfície fria do sistema de refrigeração produziu orvalho a uma taxa de 1,23 litros por hora por metro quadrado. Para se produzir um litro de orvalho, este sistema consome, em média, 0,75 kWh de energia elétrica. Os resultados obtidos são satisfatórios, considerando-se que o equipamento experimental utilizado é bastante simples.

ABSTRACT

Researches carried in Campina Grande and São João do Cariri cities have shown the viability of the production of drinking water by the formation of the dew on cold surfaces of conventional refrigeration systems or on external surfaces of PET bottles containing ice. The experimental results presented here show that the cooling of air can produce enough quantity of water to minimize the consequences of shortage of drinking water in the semiarid zone of Brazilian Northeast region. The experiment based on direct contact between the air and the cold surface of the refrigeration system has produced dew at a rate of 1.23 liters per hour per square meter. To obtain a liter of dew, the system consumes, on average, 0.75 kWh of electrical energy. The obtained results are satisfactory, considering that the experimental equipment used is sufficiently simple.

1 INTRODUÇÃO

A água é uma das substâncias mais importantes para a existência da vida na Terra. Ela cobre aproximadamente 70% da superfície terrestre. As reservas de água existentes no planeta ocupam um volume total estimado em $1,38 \times 10^{18} \text{ m}^3$. Deste total, apenas 2,5% é água doce, o que corresponde a aproximadamente $3,45 \times 10^{16} \text{ m}^3$. As calotas polares e geleiras detêm as maiores reservas de água doce da Terra, ocupando um volume de $25 \times 10^{15} \text{ m}^3$, águas subterrâneas ocupam $8,4 \times 10^{15} \text{ m}^3$, seguindo-se os rios e lagos que apresentam juntos um volume de $0,2 \times 10^{15} \text{ m}^3$. O volume de $1,36 \times 10^{13} \text{ m}^3$ restante está contido na atmosfera e biosfera (Tucci, 1997).

Os primeiros cinco quilômetros mais baixos da atmosfera contêm aproximadamente 90% da massa total de vapor de água presente na mesma. A massa de vapor de água presente na atmosfera representa aproximadamente apenas 0,001% de toda a massa de água existente em nosso planeta, ou dez vezes o volume das águas contidas nos rios. Se todo o vapor de água fosse condensado ocuparia um volume de $1,3 \times 10^{13} \text{ m}^3$. Caso esse volume fosse distribuído uniformemente sobre toda a superfície da Terra, formaria uma lâmina de água com aproximadamente 25 mm de espessura (Garcez & Alvarez, 1988). A formação do vapor d'água se deve ao aquecimento das superfícies cobertas por água, dos solos úmidos (evaporação) e das superfícies vegetadas (transpiração), devido à radiação solar. A Figura 1 mostra um esquema do ciclo da água na natureza.



Figura 1 – Ciclo hidrológico (Fonte: http://pt.wikipedia.org/wiki/Ciclo_hidrológico).

As maiores concentrações de vapor de água na atmosfera estão presentes nas regiões tropicais, ao passo que as polares são detentoras das menores concentrações. As variações espacial e temporal da radiação solar na superfície da Terra, em consequência dos seus movimentos e da sua forma, associados ao relevo, às circulações atmosféricas e à maneira como as águas e a regiões vegetadas estão distribuídas sobre a superfície da Terra, determinam como se dá a distribuição do vapor de água em cada região da atmosfera nos diversos meses do ano.

O Brasil é um país privilegiado com uma disponibilidade hídrica per capita anual de 50.810m^3 . Apesar dessa abundância de recursos hídricos, tem-se registrados problemas de abastecimento nas regiões Sudeste, devido as grandes concentrações populacionais, e Nordeste, em consequência dos baixos índices de precipitação e alto teor de salinidade nas águas do subsolo.

O Nordeste brasileiro situado aproximadamente entre as latitudes de 1°S e 18°S e longitudes de 34°W e 48°W, possui uma grande diversidade climática. Pode-se observar desde o clima semi-árido com chuvas anuais abaixo de 500 mm no interior da região até o clima tropical chuvoso encontrado na costa Leste e no Norte do Maranhão com totais anuais acima de 1.600 mm (Rao *et al*, 1996 *apud* Nóbrega, 2003). Os municípios paraibanos localizados nas microrregiões do Cariri e Curimataú paraibano estão entre os municípios brasileiros que possuem os menores índices médios anuais de precipitação, inferiores a 800 mm (Figura 2).

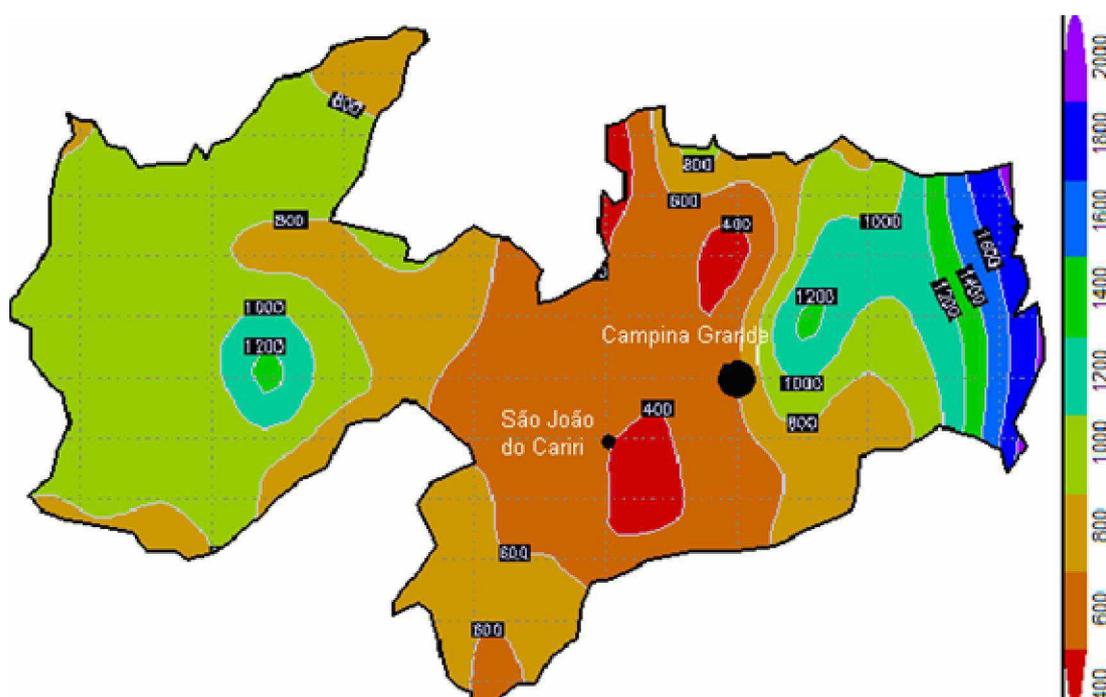


Figura 2 – Médias anuais de precipitação no Estado da Paraíba. Em destaque as localidades de Campina Grande e São João do Cariri. (fonte: UFCG/UACA).

A capacidade de retenção de vapor d'água pela atmosfera está relacionada com a temperatura do ar. Quanto maior for a temperatura do ar maior será sua capacidade de reter vapor d'água. Quando a quantidade de vapor atinge o seu valor máximo para uma determinada temperatura, diz que o ar está saturado. A temperatura em que ocorre a saturação é denominada de temperatura do ponto de orvalho. A formação do orvalho

ocorre quando as superfícies expostas ao ar livre se resfriam por efeito radiativo e atingem temperaturas abaixo da temperatura do ponto de orvalho. Exemplos da ocorrência deste fenômeno são verificados quando um veículo é estacionado ao ar livre durante a madrugada ou quando se enche um copo com bebida gelada. Nesses casos é verificada a formação de gotículas de água nas superfícies externas dos mesmos.

O Brasil possui cerca de 12% das reservas de água doce disponível nas bacias hidrográficas do planeta. Mesmo com todo esse potencial hídrico, o interior do Nordeste Brasileiro, mais precisamente a região do semi-árido, sofre permanentemente com a escassez hídrica. Entre os estados brasileiros, a Paraíba, com $1.320 \text{ m}^3 \cdot \text{hab}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$, é o estado que possui o segundo menor potencial hídrico do País, sendo superado apenas pelo Estado de Pernambuco com um potencial hídrico de $1.171 \text{ m}^3 \cdot \text{hab}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$ (Sousa & Leite, 2003).

Mesmo apresentando um clima semi-árido, o interior do Estado da Paraíba apresenta em sua climatologia uma umidade específica que atinge valores consideráveis (superiores a 15g/kg). Isto se deve ao transporte de vapor d'água do oceano feito pela circulação predominantemente de sudeste. Neste estudo propõe-se a produção de água, por meio do orvalho, a partir do resfriamento do ar, com base no teor de vapor d'água existente e nas baixas temperaturas atingidas durante o período noturno.

Com a finalidade de solucionar os transtornos causados pela escassez hídrica predominante no interior da região do Nordeste Brasileiro, diversas ações têm sido implementadas, tais como a construção de açudes, perfuração de poços tubulares e construção de cisternas de placas. Tendo em vista os baixos índices pluviométricos, os açudes, quando não secam totalmente, podem passar anos seguidos sem transbordar, o que provoca um aumento excessivo na salinidade da água represada, chegando a mesma tornar-se imprópria para o consumo humano e animal. Os poços tubulares também se apresentam

sem muita serventia em consequência do alto teor de sal presente na água. As cisternas de placas tendem a se constituírem como uma das soluções para o problema da falta de água potável. No entanto, os longos períodos de estiagens fazem com que se acumule grande quantidade de resíduos sólidos (poeira e fezes de animais) sobre as calhas e os telhados onde se faz a captação da água de chuva, comprometendo a qualidade da mesma para consumo humano.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Numa perspectiva de se encontrar meios de se obter água para consumo humano, este trabalho tem como objetivo geral o estudo da viabilidade da produção de água potável a partir do resfriamento do ar na região do Cariri Paraibano no que se refere à relação volume produzido versus custo de produção, inicialmente previsto para os municípios de Campina Grande e São João do Cariri.

1.1.2 Objetivos específicos

- Pesquisar a climatologia dos municípios paraibanos onde foram realizadas as experiências iniciais para a produção de orvalho, como também daqueles onde serão realizados futuros experimentos;
- Analisar o volume de orvalho produzido em relação as variáveis meteorológicas que mais influenciam nessa produção: umidade específica, temperaturas do ar e da superfície de condensação e velocidade do vento;
- Realizar análises microbiológicas e físico-químicas do orvalho produzido no município de São João do Cariri;

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Regiões onde há déficit de água doce, mas que apresentam em determinadas épocas do ano condições climatológicas e meteorológicas capazes de formar o orvalho, tem sido utilizadas como locais de pesquisas para a captação de água de orvalho. No início do século vinte, foram realizadas algumas tentativas de se construir estruturas capazes de recuperar a água contida no vapor atmosférico a partir do orvalho. O primeiro aparato experimental que se tem registro foi construído na Crimeia – Ucrânia, em 1912, pelo engenheiro Russo F. I. Zibold (Nikolayev *et al.*, 1996). A construção tinha a forma de um tronco de cone cujo diâmetro da base media 20m, enquanto o diâmetro da parte superior media 8m, e a altura media 6m. O espaço interno foi preenchido com seixos redondos, cujos diâmetros variavam entre 15 e 40cm. Não foram encontrados registros sobre o volume de orvalho produzido. No entanto, 20 anos depois, na transcrição de um trabalho oral, é mencionada a produção de 360 litros de água oriundos do orvalho em um único evento. Em 1929, baseado no experimento de F. I. Zibold, o hidrometeorologista Chaptal (1932 *apud* Muselli *et al*, 2006) conduziu um estudo sobre um condensador de orvalho em Montpellier – França, utilizando uma estrutura em forma de pirâmide e preenchido com rochas. O volume de orvalho formado, em seis meses, foi de 87,8 litros no primeiro ano e

de 40,5 litros no segundo ano. Esses valores foram considerados insignificantes e, por isso, os projetos foram abandonados.

Em pesquisa realizada em Bahrain (26°10'N, 50°33'E, 1m), foram utilizados alumínio, vidro e polietileno na confecção de placas condensadoras de orvalho por resfriamento radiativo (Alnaser & Barakat, 2000). Nesses estudos a formação do orvalho foi correlacionada com as seguintes variáveis meteorológicas: velocidade do vento, umidade relativa, temperatura do ar e temperatura da superfície condensadora. Verificou-se também que placas condensadoras confeccionadas com o alumínio produzem mais orvalho que as demais e que, quando resfriadas a 0°C, em condições favoráveis, podem produzir até 31 litros de água por dia, por metro quadrado. Note que, mesmo estando situado numa região desértica (Figura 3), Bahrain possui uma atmosfera que atinge em média 76% de umidade relativa, pela manhã, no mês de janeiro.

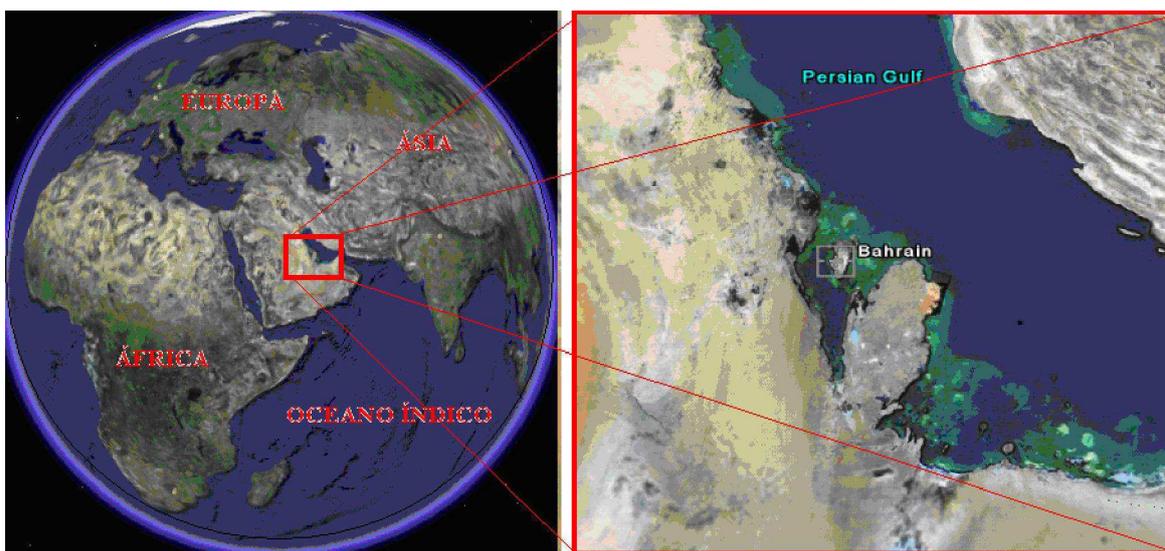


Figura 3 – Localização de Bahrain - Golfo Pérsico. (Fonte: Google Earth).

Em 1999, um modelo de condensador com uma área superficial de 0,3 m² (1 m x 0,3 m), confeccionado com uma folha metálica, foi estudado sistematicamente em relação à inclinação e a velocidade do vento (Beysens *et al.*, 2003 *apud* Muselli *et al.*,

2006). Com base nos resultados deste estudo, foram construídos dois grandes condensadores de orvalho com 30 m² de área cada. A superfície de condensação de ambos foi confeccionada com polietileno. O primeiro protótipo, denominado de P1, era exposto ao vento por todos os lados, sendo danificado pelo mesmo após 1 ano de uso. O segundo, denominado de P2, foi construído sobre quatro paredes de tijolos, sendo, portanto, mais resistente à ação dos ventos. Instalados em Ajaccio (Figura 4) – Córsega – França (41°55'N, 8°48'E, 70 m), os protótipos P1 e P2 tiveram seus desempenhos correlacionados à velocidade do vento, umidade relativa, cobertura de nuvens, temperatura do ar e temperatura da superfície do condensador. O volume de orvalho condensado em P1, no período de um ano (01/11/2000 a 30/10/2001), foi de 567 litros. Já o volume condensado em P2, também no período de um ano (10/12/2001 a 09/12/2002), foi de 597 litros. Para os períodos mencionados, o número de dias em que efetivamente ocorreu a formação de orvalho nos condensadores P1 e P2 foi de 160 e 180, nos anos de 2001 e 2002, respectivamente. Esses números indicam que a formação de orvalho, na região de Ajaccio, ocorreu em menos da metade dos dias dos anos em que as pesquisas foram realizadas e que os modelos P1 e P2 não apresentaram diferenças significativas nos volumes de orvalho produzidos.

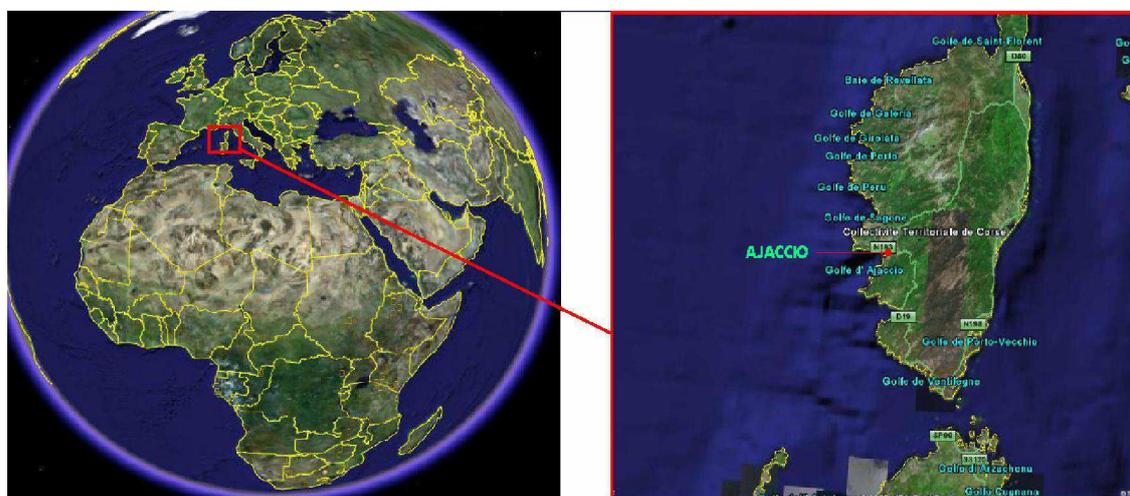


Figura 4 – Ajaccio - Ilha de Córsega – França. (Fonte: Google Earth).

A contaminação atmosférica pode comprometer a qualidade do orvalho produzido. Por isso, a água de orvalho produzida para o consumo humano deve ser previamente analisada quanto às suas características físicas, químicas e microbiológicas. Análises de pH (potencial hidrogeniônico) e bacteriológicas realizadas em água de orvalho produzida em Bordeaux (França) mostraram que a mesma é adequada para o consumo humano. No entanto, análises semelhantes realizadas na água produzida em Ajaccio (Ilha de Córsega – França) mostraram ser a mesma imprópria para o consumo humano, visto que apresentou contaminação por bactérias, provavelmente causada por pássaros (Beysens et al., 2004).

Estudos realizados por Marques *et al.* (1983, *apud* Nóbrega *et al.* 2003), não encontraram diferenças significativas de umidade nos baixos níveis da Troposfera sobre a região do Nordeste Brasileiro ao comparar um ano seco com um chuvoso. A ocorrência de maiores diferenças no fluxo de vapor d'água entre as estações seca e chuvosa foi verificada nas áreas localizadas no norte e no sul da Região Nordeste, provavelmente relacionadas às mudanças de posição da ZCIT (Zona de Convergência Intertropical) e a possíveis penetrações de sistemas frontais vindos do sul do continente.

Como foi visto, resultados experimentais realizados em várias partes do mundo têm mostrado que o volume de orvalho formado apenas pelo resfriamento radiativo é bastante pequeno para auxiliar no suprimento de água à população das regiões mencionadas. No entanto, os estudos realizados em Bahrain (Alnaser & Barakat, 2000) mostraram que com o uso de placas de alumínio refrigeradas a temperaturas inferiores àquelas conseguidas com o resfriamento radiativo produzem volumes de orvalho bem mais significativos. Por esse motivo, a proposta deste trabalho é a de produzir o orvalho a partir do esfriamento de superfícies de condensação por processos de refrigeração, o que demandará consumo de energia. Por isso, é importante pesquisa o potencial energético (solar e eólico) disponível nas regiões onde se pretenda obter água a partir do esfriamento do ar.

A escassez de água potável na região do semi-árido do Nordeste Brasileiro, associado à alta umidade relativa do ar no período noturno, justifica e motiva o desenvolvimento desta pesquisa. Portanto, a obtenção de água a partir do orvalho pode ser uma fonte alternativa de suprimento de água potável, mas é necessário que se estabeleça a relação custo benefício com o intuito de se conhecer a viabilidade técnica e econômica desse processo.

3. MATERIAL E MÉTODO

3.1 ÁREA DE ESTUDO

O interior da região Nordeste do Brasil, denominada Polígono das Secas, apresenta clima semi-árido, cuja precipitação média anual é cerca de 500 mm. Com relação aos recursos hídricos à superfície, predomina os rios intermitentes que escoam apenas no curto período chuvoso. Em consequência dessas características a população da região é bastante penalizada pela falta de água, principalmente a potável. Essa situação torna-se mais crítica durante os longos períodos de estiagens, bastante comuns na região. Dessa forma, é nessa região onde estão situados os municípios paraibanos de Campina Grande e São João do Cariri (Figura 5), locais em que foram realizados os primeiros experimentos desta pesquisa.

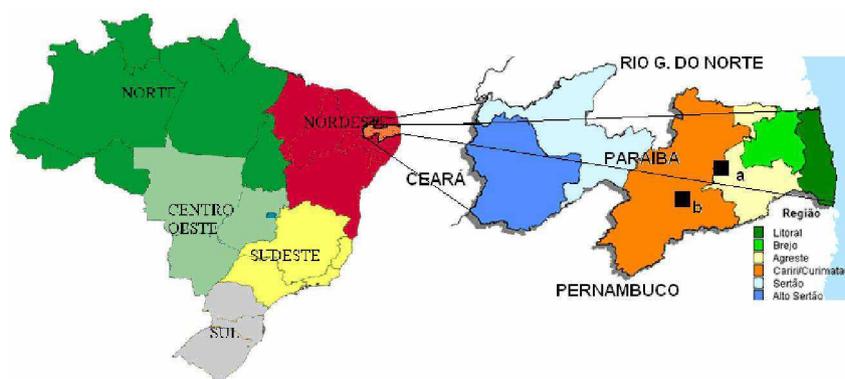


Figura 5 – Regiões climáticas do Estado Paraíba e a localização dos municípios de Campina Grande (a) e São João do Cariri (b).

Em Campina Grande, os experimentos foram realizados em dois locais: Em um terreno localizado no bairro do Catolé ($7^{\circ}13'45''\text{S}$; $35^{\circ}52'32''\text{W}$; 514m) e na Estação meteorológica da UACA localizada no Campus I da UFCG ($7^{\circ}12'52''\text{S}$; $35^{\circ}54'27''\text{W}$; 525m). Em São João do Cariri, o local escolhido foi o Sítio Farias (Figura 6).



Figura 6 – Sítio Farias ($7^{\circ}27'48''\text{S}$; $36^{\circ}30'32''\text{W}$; 492m) - São João do Cariri - PB.

Na Tabela 1 são apresentados os dados climáticos de quatro municípios paraibanos, todos localizados no semi-árido. Pode ser notado que as médias anuais dos valores de umidade relativa e de temperatura do ar são bastante semelhantes. O que se afasta são os valores das precipitações médias anuais. São João do Cariri e Soledade apresentam valores bastante inferiores aos outros dois. Considerando homogeneidade climatológica dos municípios mencionados e a não disponibilidade dos dados de umidade relativa para o município de São João do Cariri-PB, estes foram estimados a partir das médias anuais das umidades relativas das demais localidades relacionadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Dados climatológicos (médias anuais) dos municípios de Campina Grande, Monteiro, São João do Cariri e Soledade, localizados na Região do Cariri Paraibano. Fonte: UFCG/UACA.

Municípios	Temperatura (°C)			Umidade Relativa (%)			Precipitação (mm)
	Máx.	Mín.	Média	12:00	18:00	24:00	
C. Grande	29,0	19,1	22,7	84,3	57,4	87,2	765,5
Monteiro	30,5	19,0	23,3	72,5	57,6	84,1	717,1
S. João do Cariri	30,8	19,5	24,0	78,8	57,5	84,7	384,8
Soledade	29,3	18,9	24,2	79,5	57,6	82,9	400,9

3.2 CÁLCULOS METEOROLÓGICOS E TERMODINÂMICOS

A quantidade de vapor d'água presente na atmosfera é determinada a partir da pressão real do vapor (e) e da pressão atmosférica (p). A massa de vapor d'água por unidade de massa de ar úmido, a umidade específica (q), é calculada por:

$$q = \frac{622e}{p - 0,378e} \quad (1)$$

em que, neste caso, q é expressa em g/kg, e e p devem ser expressas nas mesmas unidades de pressão, em geral, hPa.

Se for considerada a razão entre a massa de vapor e a massa de ar seco, denominada de razão de mistura (r), o seu valor é calculado por:

$$r = \frac{622e}{p - e} \quad (2)$$

em que, também, r dada em g/kg.

Determina-se e a partir da umidade relativa do ar (UR) e da pressão de saturação do vapor d'água (e_s), que são relacionados por:

$$UR = \frac{e}{e_s} \times 100 \quad (3)$$

em que UR é expressa em percentagem (%).

A quantidade máxima de vapor d'água presente na atmosfera é função da temperatura do ar. Ao atingir esse valor máximo, para uma dada temperatura, a pressão real de vapor (e) atinge seu valor máximo (e_s) e o ar torna-se saturado. O valor de e_s para a temperatura do ar T pode ser calculado a partir da equação de Tetens (Vianello e Alves, 2004), como segue:

$$e_s = 6,1078 \times 10^{\left(\frac{7,5T}{237,3+T}\right)} \quad (4)$$

em que e_s é dada em mb e T em °C.

Supondo que uma massa de ar, sob uma temperatura T e cuja pressão real seja e tenha sua temperatura reduzida, sem que haja acréscimo ou retirada de vapor, até que a mesma fique saturada ($e = e_s$). A essa nova temperatura dá-se o nome de temperatura do ponto de orvalho (T_d), visto que para temperaturas inferiores a T_d ocorre formação de orvalho. O valor de T_d pode ser obtido a partir da equação (4), fazendo $T_d = T$ e $e = e_s$ (Vianello e Alves, 2004):

$$T_d = \frac{186,4905 - 237,3 \log e}{\log e - 8,2859} \quad (5)$$

em que T_d é expressa em °C e e em mb.

Supondo que uma massa de ar unitária não-saturada, inicialmente sob uma temperatura T , entre em contato com uma superfície fria cuja temperatura T_s seja inferior a T_d . Sendo assim, parte do vapor contido nessa massa de ar passará para a fase líquida. A massa de orvalho formada Δm , por quilograma de ar resfriado, pode ser estimada a partir

da diferença entre as umidades específicas do ar $q(T)$ e $q(T_s)$ nas respectivas temperaturas T e T_s , ou seja:

$$\Delta m = q(T) - q(T_s) \quad (6)$$

em que Δm é a massa de orvalho. Caso as umidades específicas estejam expressas em g/kg, a massa de orvalho será dada em gramas.

A partir das equações (1), (3) e (4), a equação (6) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\Delta m = 622 \left[\frac{e_s(T).UR(T)}{100p - 0,378e_s(T).UR(T)} - \frac{e_s(T_s)}{p - 0,378e_s(T_s)} \right] \quad (7)$$

A estimativa da massa de orvalho condensada (em g/m³), quando o ar é resfriado de uma temperatura T até T_s , é calculada por (Iribarne, 1985):

$$\Delta m = \frac{1000}{R_v T} \cdot \Delta e_s \quad (8)$$

Sendo R_v a constante específica do vapor (461,5J.kg⁻¹.K⁻¹), T a temperatura do ar (em Kelvin) e Δe_s a diferença das pressões de vapor à saturação nas temperaturas T e T_s .

Ao ser resfriado, o ar transfere calor para a placa. A taxa de transferência calor por unidade de área ΔQ é dado pela soma do calor sensível ΔQ_s e do calor latente de condensação ΔQ_L (expressos em Joules), ou seja:

$$\Delta Q = \Delta Q_s + \Delta Q_L \quad (9)$$

O valor de ΔQ_s é calculado por:

$$\Delta Q_s = m.c_p.\Delta T \quad (10)$$

em que m é a massa de ar úmido (em kg), c_p o calor específico do ar úmido à pressão constante (em J kg⁻¹K⁻¹) e ΔT a diferença entre a temperatura ambiente e a temperatura da superfície fria (em K). O valor de c_{p_u} é dado por (Iribarne, 1985):

$$c_p = c_{pd} (1 + 0,87q) \quad (11)$$

Sendo c_{pd} o calor específico do ar seco à pressão constante ($c_{pd} = 1005 \text{ J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$); q é a umidade específica do ar. O calor latente (ΔQ_L) transferido do vapor d'água para a superfície de condensação, durante a formação do orvalho, é dado por:

$$\Delta Q_L = \Delta m.L_v \quad (12)$$

em que Δm é a massa de orvalho formada e L_v o calor latente de vaporização da água, cujo valor é de $2,501 \times 10^6 \text{ J kg}^{-1}$.

De acordo com Alnaser & Barakat (2000), a taxa de transferência de energia para uma placa exposta ao ar, isolada termicamente em relação ao solo, por unidade de área, é calculada por:

$$P = L_v E + Q_a + Q_i \quad (13)$$

sendo:

P - potência total transferida para a placa (em W.m^{-2});

L_v - calor latente de vaporização ($L_v = 2,501 \times 10^6 \text{ J.kg}^{-1}$)

E - razão de condensação de orvalho por unidade de área (em kg.m^{-2});

Q_a - taxa de calor transferido pelo ar por convecção e condução (em W.m^{-2});

Q_i - calor transferido por condução através do isolamento posterior (em W.m^{-2});

O produto $L_v E$ é o calor liberado pelo vapor d'água para a superfície de condensação, o qual é determinado por:

$$L_v E = h_v [e(T) - e(T_s)] / \xi \quad (14)$$

em que h_v (dado em $\text{W.m}^{-2}\text{K}^{-1}$) é um coeficiente de transferência de vapor, $e(T)$ é a pressão de vapor a temperatura ambiente e $e(T_s)$ é a pressão de vapor à temperatura da superfície de condensação (ambas dadas em Pa); ξ é a constante psicrométrica. ($\xi = 66 \text{ Pa.K}^{-1}$).

O calor transferido da vizinhança ($Q_a + Q_i$) é calculado por:

$$Q_a + Q_i = (h_a + h_i)(T - T_s) \quad (15)$$

sendo h_i (dado em $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$) o coeficiente de transferência de calor do material constituinte do isolante térmico posterior, enquanto o coeficiente h_a (também dado em $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$), que é aproximadamente igual a h_v , é calculado em função da velocidade do vento U (em m.s^{-1}), ou seja:

$$h_a = 2,8 + 3,0U \quad (16)$$

De acordo com o exposto, uma superfície com uma área de 1m^2 , mantida a uma temperatura média de 10°C , produz aproximadamente 288 gramas de orvalho em uma hora, sob a ação de um vento médio de 3 m/s, temperatura do ar de 22°C e umidade relativa de 90 %. Se o isolamento da parte inferior da placa for feito de isopor com uma espessura de 5 cm, o calor total transferido para a superfície de condensação, em 1 hora é de 349,8 Wh (Apêndice A).

3.3 APARATO EXPERIMENTAL

As primeiras atividades experimentais realizadas nesta pesquisa ocorreram no período de 07 de setembro de 2003 a 27 de fevereiro de 2004. O local escolhido para a obtenção das primeiras medidas foi o Laboratório de Física Básica III do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual da Paraíba. Foi utilizado o congelador de um refrigerador de uso doméstico como superfície de condensação do vapor de água presente na atmosfera. Neste período inicial, o congelador foi utilizado como superfície de condensação, o mesmo foi mantido dentro de uma sala, sem ventilação. O refrigerador e congelador permaneceram com as portas abertas durante todo o tempo em que ficou ligado.

Posteriormente, o equipamento foi transportado para o quintal de uma residência no Bairro do Catolé. Neste novo local, o congelador foi retirado do refrigerador ficando exposto ao ar ambiente. O congelador foi utilizado no período de 30 de outubro de 2005 a 18 de fevereiro de 2006.

Na última etapa de uso do sistema de refrigeração, foi utilizada apenas a tubulação que envolve o congelador (evaporador), a qual foi retirada do refrigerador, ficando totalmente exposta ao ar ambiente (Figura 7).



Figura 7 – Compressor, condensador e evaporador, retirados do refrigerador.

A água produzida sobre a superfície refrigerada do tubo, com uma área total de aproximadamente $0,13\text{m}^2$, foi coletada em uma bandeja posicionada abaixo do congelador. O volume da água foi medido com o uso de uma proveta com capacidade de 2,0 litros. As medidas do consumo de energia elétrica foram feitas através de um medidor igual aos utilizados nas residências. Nestas duas últimas fases do experimento foram utilizados os instrumentos (d) e (e), mostrados na Figura 8, para a obtenção das medidas de umidade relativa, temperatura do ar e pressão atmosférica.

As dificuldades em se transportar o sistema de refrigeração para os diversos locais onde foram realizadas as experiências, fizeram com que a utilização do mesmo ficasse temporariamente suspensa. Para substituir o congelador como superfície de condensação, adotou-se o uso de um aparato experimental que pudesse ser facilmente transportado e manuseado.

O novo aparato foi construído de forma que o custo fosse o menor possível, sem prejuízo experimental, ou seja, que com ele se obtivesse resultados satisfatórios a fim de que a viabilidade de futuras pesquisas sobre o tema *produção de água pelo resfriamento do ar* fosse mantida. Na Figura 8 podem ser vistos os instrumentos usados para efetuar as medições da temperatura do ar, umidade relativa do ar, pressão atmosférica, massa de orvalho produzida e temperatura da superfície de condensação. Como superfícies condensadoras de vapor foram utilizadas garrafas confeccionadas a base de PET (Polietileno Tereftalato) com capacidade de 2,5 litros, com uma área da superfície lateral de aproximadamente $0,1 \text{ m}^2$. O suporte onde foram fixadas as garrafas PET, que também serve de duto para o escoamento da água produzida, foi confeccionado com tubos PVC (Poli Cloreto de Vinila). A medição da massa de água produzida foi efetuada por uma balança digital com resolução de um grama.

Para se efetuar as medições da temperatura da superfície de condensação foram utilizados termistores do tipo NTC (Negative Temperature Coefficient) acoplados a um multímetro digital. A calibração dos termistores foi realizada correlacionando valores da resistência elétrica R dos termistores, em k , com os valores das medidas de temperatura T , em $^{\circ}\text{C}$ (APÊNDICE B), obtidos com um multímetro digital e um termômetro de mercúrio de $0,2^{\circ}\text{C}$ de resolução, respectivamente. A equação da curva de calibração, obtida a partir de uma regressão logarítmica, é dada por:

$$T = -25,158 \ln(R) + 82,421 \quad (17)$$

Os dados coletados durante a realização das experiências eram anotados em formulários conforme o modelo apresentado no Apêndice C.

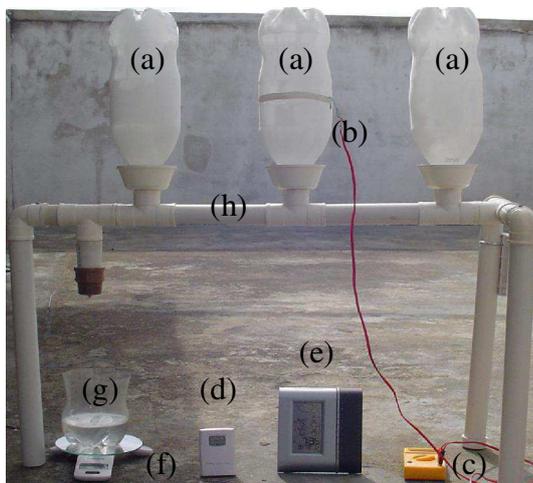


Figura 8 – Montagem experimental utilizada na condensação do vapor atmosférico. (a) Garrafas PET; (b) Termistor; (c) Multímetro digital; (d) e (e) Medidores de temperatura do ar, umidade relativa e pressão atmosférica; (f) Balança digital; (g) Recipiente coletor de orvalho; (h) Tubos de PVC utilizados como suporte para as garrafas PET e que também servem de duto para o escoamento do orvalho.

No decorrer das pesquisas, as medidas da massa de água condensada passaram a ser obtidas automaticamente com a inclusão de uma balança no experimento (Figura 9). A balança adaptada ao experimento envia os dados lidos por um dispositivo eletrônico munido de sensores infravermelhos a um computador, através da porta paralela. Os dados recebidos pelo computador são interpretados por um programa em linguagem de programação Basic e armazenados em um banco de dados (Apêndice D).



Figura 9 – Báscula adaptada ao aparato experimental.

Posteriormente, a bscula foi substituída por uma nova versão, de manuseio mais fácil, mostrada na Figura 10.



Figura 10 – Nova versão da bscula adaptada ao experimento.

Como foi visto anteriormente, o volume de orvalho formado está relacionado à umidade relativa do ar, temperatura do ar, temperatura da superfície do condensador, cobertura de nuvens e velocidade do vento. Nas primeiras experiências desta pesquisa optou-se por realizar medidas da temperatura do ar, umidade relativa do ar, pressão atmosférica e temperatura da superfície de condenso. Isso fez com que houvesse reduo no número de instrumentos utilizados na montagem experimental. No decorrer dos trabalhos, algumas experiências foram realizadas na estão meteorológica da UACA/UFCG onde também foram obtidas medidas da velocidade do vento, pois como foi visto, a presença do vento é um fator de grande influência no transporte de vapor e, portanto, no volume de orvalho produzido.

Com a substituio do congelador pelo aparato experimental mostrado na Figura 8, o resfriamento das garrafas PET é feito a partir do congelamento da massa de água contida nas mesmas com o uso de um freezer. Após o congelamento, as garrafas PET contendo gelo eram posicionadas no suporte e expostas ao ar.  medida que o ar úmido entra em contato com a superfície fria das garrafas PET, o vapor atmosférico é condensado. O

intervalo de tempo usado entre duas medidas consecutivas do orvalho formado foi de 10 minutos para os experimentos realizados na Estação Meteorológica da UACA/UFCG. Para os demais locais, os intervalos de tempo foram de trinta ou de sessenta minutos. A massa de orvalho formada foi medida através de uma balança digital com precisão de um grama. Com a inclusão da bscula no experimento, as medidas da massa de orvalho passaram a serem feitas apenas ao término de cada experiência, sendo a distribuio temporal da massa de água produzida feita a partir do número de medidas registrado a cada intervalo de tempo. Além da massa de orvalho produzida, foram feitas medidas da temperatura do ar, umidade relativa e pressão atmosférica. As temperaturas da superfície de condenso eram estimadas a partir das medidas das resistências elétricas dos termistores usados. Nos experimentos realizados na Estação Meteorológica da UACA/UFCG, foram feitas apenas medidas da massa de orvalho e da resistência elétrica dos termistores, já que os demais dados meteorológicos eram obtidos da própria esto.

Para serem utilizadas nos experimentos realizados na esto meteorológica da UACA/UFCG e no Sítio Farias no município de São João do Cariri, as garrafas PET contendo gelo eram conduzidas dentro de uma embalagem térmica (Figura 11) confeccionada com isopor.



Figura 11 – Caixa térmica utilizada no transporte das garrafas PET contendo gelo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ORVALHO PRODUZIDO

As diversas formas apresentadas como superfícies frias para a formação do orvalho (refrigerador, congelador retirado do refrigerador, tubo evaporador do congelador e garrafas PET) tiveram seus resultados resumidos em tabelas específicas.

A Tabela 2 exibe os valores do tempo de exposição da superfície de condensação (Δt), o volume condensado de água (ΔV), a umidade relativa do ar média (UR) e a energia elétrica (ΔE) consumida a cada intervalo de tempo. A superfície de condensação utilizada foi o congelador, em sua posição original dentro do refrigerador, com uma área de $0,36\text{m}^2$. A partir destes dados, foram calculadas as médias horárias do volume de água produzido e do consumo de energia. Também foram obtidas as médias do consumo de energia para cada litro de água produzido, bem como do volume de água produzido por metro quadrado, por hora. Por ter sido realizada em ambiente fechado, a condensação ocorreu sem a presença do vento. O consumo médio de energia necessário para se produzir um litro de água, nesta série inicial de medidas, foi de $1,88\text{ kWh/l}$, para uma produção média horária de $0,181\text{ l/m}^2$.

Tabela 2 - Dados obtidos em ambiente fechado (sala anexa ao Laboratório de Física Básica III da UEPB). Sendo Δt (h) o intervalo de tempo; ΔV (l) o volume de orvalho condensado; UR (%) a umidade relativa; ΔE (kWh) o consumo de energia elétrica; A (m^2) a área da superfície de condensação.

Data	Δt (h)	ΔV (l)	$\Delta V/\Delta t$ (l/h)	UR (%)	ΔE (kWh)	$\Delta E/\Delta t$ (kWh/h)	$\Delta E/\Delta V$ (kWh/l)	$\Delta V/A\Delta t$ (mm/h)
08/09/03	11,0	0,752	0,068	78	1,42	0,13	1,89	0,190
10/09/03	25,0	1,560	0,062	60	2,96	0,12	1,90	0,173
17/09/03	22,5	1,530	0,068	75	2,91	0,13	1,90	0,189
28/09/03	8,5	0,480	0,057	60	0,91	0,11	1,90	0,157
30/09/03	12,0	0,840	0,070	82	1,60	0,12	1,90	0,194
05/10/03	10,0	0,600	0,060	58	1,14	0,11	1,90	0,167
07/10/03	13,0	0,875	0,067	62	1,66	0,13	1,90	0,187
08/10/03	10,0	0,500	0,050	69	0,95	0,10	1,90	0,139
13/10/03	120,0	7,600	0,063	76	14,44	0,12	1,90	0,176
17/10/03	92,2	6,200	0,067	70	11,78	0,13	1,90	0,187
20/10/03	48,0	3,290	0,069	68	6,25	0,13	1,90	0,190
27/10/03	21,0	1,390	0,066	73	2,64	0,13	1,90	0,184
04/11/03	24,0	1,650	0,069	80	3,13	0,13	1,90	0,191
07/11/03	10,0	0,680	0,068	78	1,10	0,11	1,62	0,189
19/02/04	15,0	1,050	0,070	83	1,80	0,12	1,71	0,194
21/02/04	6,0	0,414	0,069	62	0,78	0,13	1,88	0,192
22/02/04	12,0	0,756	0,063	62	1,44	0,11	1,90	0,175
23/02/04	10,0	0,620	0,063	60	1,30	0,13	2,10	0,172
26/02/04	15,0	1,035	0,069	75	2,10	0,14	2,03	0,192
27/02/04	8,0	0,500	0,062	62	0,88	0,11	1,76	0,174
Médias	-	-	0,066	69,7	-	0,12	1,88	0,181

Com a transferência do experimento para o novo local no bairro do Catolé, foram obtidas as medidas cujo resumo está apresentado na Tabela 3. Nesta fase dos experimentos o congelador foi retirado do interior do refrigerador e exposto ao ar livre. Comparando os valores médios da produção horária do orvalho, em mm/h, e do consumo de energia para cada litro de orvalho produzido, em kWh/l, com os respectivos valores apresentados na Tabela 2, observa-se um acréscimo médio de 62% para a produção de orvalho e uma redução média de 40% no consumo de energia.

Tabela 3 – Condensação do vapor d’água usando o congelador retirado do refrigerador; q é a umidade específica. q é a umidade específica.

Data	Δt (h)	UR (%)	q (g/kg)	ΔV (l)	ΔE (kWh)	$\Delta E/\Delta V$ (kWh/l)	$\Delta V/\Delta t$ (l/h)	$\Delta V/A.\Delta t$ (mm/h)
07/11/05	12	79,2	14,04	1,25	1,44	1,15	0,104	0,29
09/11/05	12	85,0	15,12	0,90	1,44	1,60	0,075	0,21
11/11/05	10	90,4	15,16	1,00	1,20	1,20	0,100	0,28
14/11/05	11			0,88	1,32	1,50	0,080	0,22
15/11/05	12	86,5	14,71	1,27	1,44	1,13	0,106	0,29
19/11/05	6	94,0	15,42	0,64	0,72	1,13	0,107	0,30
24/11/05	12	83,0	16,00	1,47	1,44	0,98	0,123	0,34
25/11/05	12	81,5	14,69	0,97	1,44	1,48	0,081	0,22
27/11/05	13	80,0	15,09	1,73	1,56	0,90	0,133	0,37
29/11/05	13	90,0	15,65	1,15	1,56	1,36	0,088	0,25
02/12/05	10	90,3	16,02	1,01	1,20	1,19	0,101	0,28
15/01/06	7	80,5	15,80	0,78	0,84	1,08	0,111	0,31
23/01/06	12	74,0	15,70	1,70	1,44	0,85	0,142	0,39
24/01/06	8	76,5	15,35	0,90	0,96	1,07	0,113	0,31
26/01/06	14	71,4	15,61	1,97	1,68	0,85	0,141	0,39
Médias	-	83,0	15,31	-	-	1,12	0,107	0,30

O orvalho produzido com o tubo evaporador retirado do congelador, bem como as demais variáveis envolvidas no processo, são mostrados na Tabela 4. Comparando os resultados experimentais obtidos com esta versão aos obtidos com a versão anterior (Tabela 3), verifica-se um acréscimo na média do volume horário de orvalho produzido na ordem de 50%. A redução no consumo médio de energia para cada litro de água produzido foi de 33%.

Tabela 4 – Condensação do vapor d’água sobre o tubo evaporador.

Data	Δt (h)	UR (%)	q (g/kg)	ΔV (l)	ΔE (kWh)	$\Delta E/\Delta V$ (kWh/l)	$\Delta V/\Delta t$ (l/h)	$\Delta V/A\Delta t$ (mm/h)
06/02/06	9	86,7	15,87	1,560	1,08	0,69	0,173	1,33
08/02/06	6	86,5	15,86	0,972	0,72	0,74	0,162	1,25
11/02/06	16	77,2	16,16	2,350	1,92	0,82	0,147	1,13
13/02/06	10	85,2	16,59	1,700	1,20	0,71	0,170	1,31
Médias	-	82,6	16,16			0,75	0,161	1,23

A utilização direta de equipamentos de refrigeração como superfície de condensação do vapor de água torna fácil estimar o consumo de energia envolvido no processo.

Na Tabela 5 podem ser vistos os valores numéricos resultantes do experimento realizado em Campina Grande-PB, no decorrer da tarde do dia 20/05/2006, em ambiente fechado, utilizando a montagem experimental anteriormente mostrado na Figura 8. A realização do experimento ocorreu sem a presença de ventos. Isso fez com que a temperatura das garrafas PET se mantivesse praticamente constante, pois a transferência de calor entre o ar e a superfície fria ocorreu de maneira lenta.

Tabela 5 - Dados obtidos pelo experimento realizado em ambiente fechado em 20/05/2006 em Campina Grande-PB.

Parâmetros/ Hora	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00
T (°C)	24,8	25,1	25,4	25,3	25,1	25,0	24,3	24,2	22,7
UR (%)	80	78	78	79	77	76	80	80	76
P (mb)	955	954	954	954	954	954	954	954	955
T _s (°C)	8,5	9,7	10,8	11,5	11,0	11,2	11,2	11,9	15,7
m (g)	0	43	87	131	167	202	237	269	299
Δm (g)	-	43	44	44	36	35	35	32	30
<q-q _s > (g/kg)	-	8,85	8,33	8,03	7,72	7,34	7,20	7,02	4,42
Δh (mm)	-	0,14	0,15	0,15	0,12	0,12	0,12	0,11	0,10

A Figura 12 exibe a temperatura da superfície de condensação (T_s), o valor médio da diferença entre as umidades específicas <q-q_s> e o volume de orvalho produzido por metro quadrado de superfície de condensação, por hora (Δh), entre 12 e 18H, em 20/05/2006, para experimento em ambiente fechado realizado na cidade de Campina Grande-PB. Pode ser notado que a taxa de produção de orvalho manteve-se praticamente constante durante o experimento. Isso se deve ao fato de que, em experiências realizadas

em ambientes internos. A ausência de vento ou vento calmo dificulta o deslocamento de massas de ar úmido para a superfície fria onde ocorre a condensação do vapor. O deslocamento do ar ocorre apenas por convecção, pois a massa de ar frio próxima à superfície das garrafas PET torna-se mais densa adquirindo um movimento descendente dando lugar à massa de ar com temperaturas maiores. Como consequência dessa baixa circulação do ar envolvida no processo de condensação, a taxa de transferência de calor do ar para a superfície fria é baixa, e isso faz com que sua temperatura (T_s) se mantenha praticamente constante durante todo o tempo de observação.

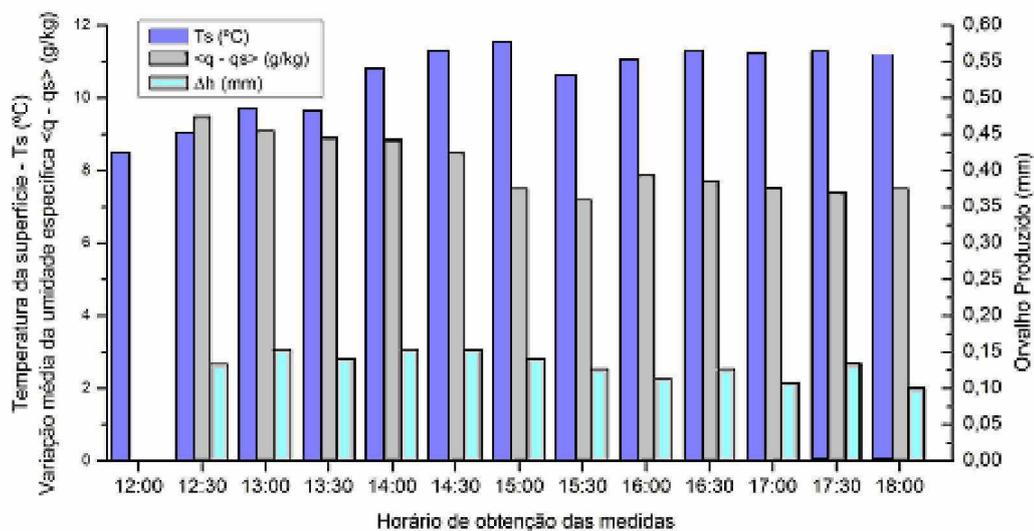


Figura 12 – Volume de orvalho produzido por metro quadrado (Δh), variação média da umidade específica $\langle q - q_s \rangle$ e temperatura da superfície de condensação (T_s).

Na Tabela 6 são mostrados os valores numéricos resultantes dos experimentos realizados também em Campina Grande-PB, no dia 21/05/2006, em ambiente aberto, utilizando a mesma montagem experimental. Por ter sido realizada ao ar livre, a presença do vento, mesmo que fraco, foi fator importante para o aumento do volume de orvalho produzido (na primeira hora, o volume duplicou, comparado com o resultado mostrado na Tabela 5), considerando que a temperatura ambiente e a umidade relativa, nos dois casos, foram semelhantes.

Tabela 6 - Dados obtidos pelo experimento realizado em ambiente aberto, em 21/05/2006, na cidade de Campina Grande.

Parâmetros/ Hora	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00	24:00
T (°C)	24,8	24,3	23,2	22,6	22,1	21,6	21,2
UR (%)	77	80	84	86	87	89	90
T _s (°C)	10,1	10,9	11,7	12,1	11,9	11,5	14,1
Δm (g)	-	83	70	57	55	55	44
<q-q _s > (g/kg)	-	7,61	7,07	6,48	6,17	6,15	5,28
Δh (mm)	-	0,28	0,23	0,19	0,18	0,18	0,15

Na Figura 13 são mostrados a temperatura da superfície de condensação (T_s), o valor médio da diferença entre as umidades específicas <q-q_s> e do volume de orvalho produzido por m² (Δh) entre 18 e 24 h do dia 21/05/2006, em experimento realizado em ambiente externo, na cidade de Campina Grande-PB. De acordo com os dados apresentados, pode se prevê que, em sendo mantida a temperatura das garrafas PET em torno de 10° C, com a temperatura do ar em torno de 25° C e umidade relativa do ar em cerca de 80%, é possível atingir uma produção diária de 6,7 litros de água por metro quadrado de superfície refrigerada. De um modo semelhante ao comportamento do gráfico exibido na Figura 12, (Δh) e <q(T)-q(T_s)> estão bem relacionados.

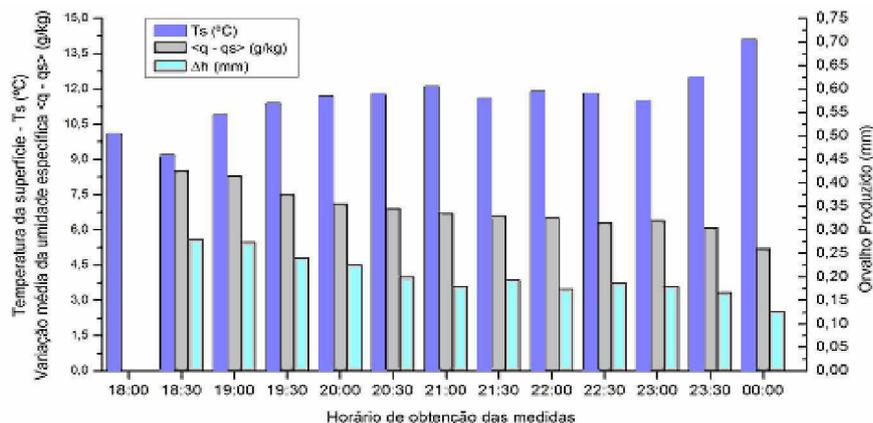


Figura 13 – Temperatura da superfície de condensação (T_s), diferença média entre as umidades específicas <q-q_s> e o volume de orvalho produzido por metro quadrado (Δh).

Na Tabela 7 estão apresentados os resultados experimentais, obtidos em ambiente aberto, no dia 27/05/2006, na localidade denominada de Sítio Farias, situada a aproximadamente 12 quilômetros da cidade de São João do Cariri – PB, região do Cariri Paraibano. Comparando o orvalho produzido no Sítio Farias com os valores produzidos em Campina Grande-PB (Tabela 6), nota-se que nas três primeiras horas de condensação houve um acréscimo de 77%.

Tabela 7 - Dados obtidos pelo experimento realizado em ambiente aberto, no dia 27/05/2006, no Sítio Farias – São João do Cariri-PB.

Parâmetros/Hora	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00	24:00
T (°C)	22,0	22,4	22,5	22,7	22,8	21,5
UR (%)	98	97	98	94	94	98
Ts (°C)	6,3	7,0	11,6	11,9	13,1	18,8
Δm (g)	-	102	119	150	135	51
$\langle q-q_s \rangle$ (g/kg)	-	11,0	10,0	8,6	7,9	5,0
Δh (mm)	-	0,34	0,40	0,50	0,45	0,17

A presença do vento observado e a alta umidade específica do ar foram fatores que influenciaram sobremaneira na obtenção desses resultados. Verifica-se na Figura 14 que a temperatura da superfície de condensação aumentou rapidamente em consequência, principalmente, da presença do vento e do volume de orvalho condensado.

Mantendo-se a temperatura da superfície das garrafas PET em torno de 12°C, sob condições meteorológicas semelhantes as do dia 27/05/2006, é possível a obtenção diária de 11 litros de água por metro quadrado de superfície refrigerada.

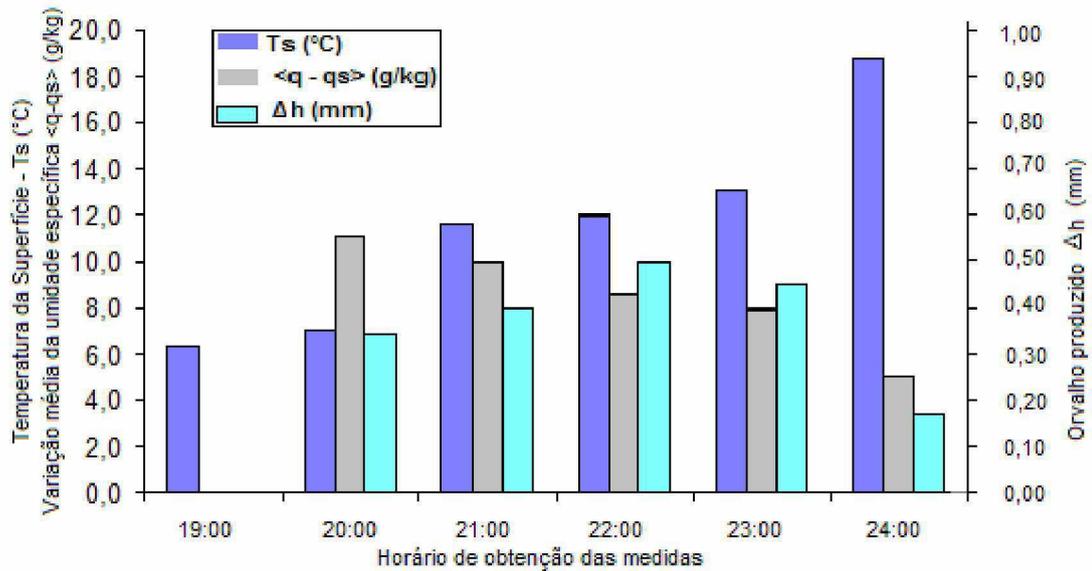


Figura 14 – Temperatura da superfície de condensação (T_s), diferença média entre as umidades específicas $\langle q - q_s \rangle$, e o volume de orvalho produzido por metro quadrado (Δh) em 27/05/2006, no Sítio Farias em São João do Cariri.

Na Tabela 8 é mostrado os resultados experimentais dos volumes médios de água produzidos simultaneamente nos municípios de Campina Grande e São João do Cariri, utilizando garrafas PET como superfície de condensação. Os dados foram obtidos através de experiências realizadas no dia 30 de outubro de 2006, em ambiente aberto. A presença do vento nas quatro primeiras horas da experiência em São João do Cariri aumentou a taxa de condensação. Devido ao vento fraco observado durante praticamente todo o tempo da realização do experimento em Campina Grande, às duas horas da manhã ainda restava gelo nas garrafas PET, o que não ocorreu em São João do Cariri.

Tabela 8 – Dados obtidos em experiências realizadas simultaneamente em Campina Grande (CG) e São João do Cariri (SJC), em 30/10/2006, em ambiente aberto.

HORA	20:00		21:00		22:00		23:00		24:00		01:00		02:00	
Parâmetros/Local	SJC	CG												
T (°C)	24,2	22,5	23,1	22,5	22,2	22,4	21,2	21,7	21,1	21,6	20,6	21,9	20,2	21,5
UR (%)	64	78	69	80	74	85	81	89	87	90	94	90	95	91
P (mb)	958	957	958	957	958	957	957	957	957	956	956	956	956	956
e _s (mb)	30,7	27,7	28,7	27,7	27,2	27,5	25,6	26,4	25,4	26,2	24,6	26,7	24,0	26,0
e (mb)	19,7	21,6	19,8	22,2	20,1	23,4	20,7	23,5	22,1	23,6	23,1	24,0	22,8	23,7
q (g/kg)	12,9	14,2	13,0	14,5	13,2	15,3	13,6	15,4	14,5	15,5	15,2	15,8	15,0	15,6
Δm (g)	0	0	110	52	80	78	70	70	60	62	60	52	20	54

A Figura 15 mostra os primeiros resultados comparativos entre a produção de orvalho nos experimentos iniciais realizados nos municípios paraibanos de Campina Grande e São João do Cariri. Esses resultados preliminares mostram a possibilidade de obtenção de água por resfriamento do ar na região do Cariri Paraibano.

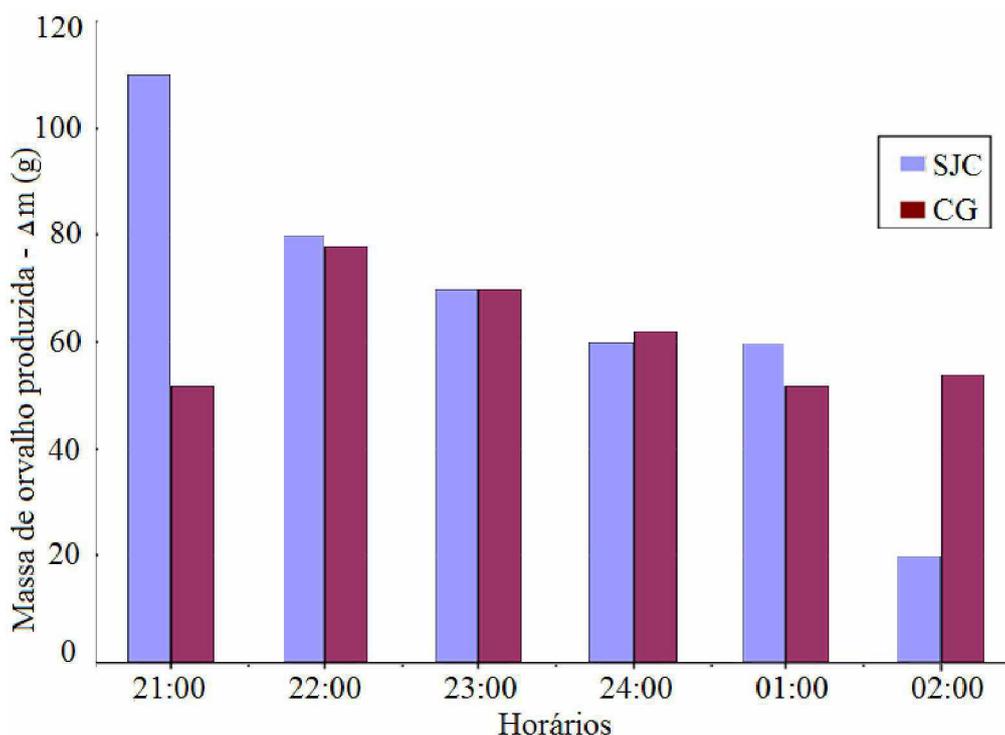


Figura 15 - Massa de orvalho produzida em experiências realizadas no dia 30/10/2006, simultaneamente em Campina Grande e em São João do Cariri.

A velocidade do vento e a diferença entre as pressões parciais de vapor d'água nas temperaturas do ar e da superfície de condensação são fatores que determinam a quantidade de orvalho produzida. A Tabela 9 mostra os valores das quantidades de orvalho produzidas em experiência realizada na Estação Meteorológica da UACA, no dia 13/12/2006, além dos demais dados obtidos da própria Estação.

Tabela 9 – Dados obtidos em 13/12/2006, na estação meteorológica da UACA/UFMG.

Data	Hora	e(T) (mb)	e(T _s) (mb)	Δm (g)	Δe (mb)	U (m/s)
13/12/06	19:30:00	23,76	13,71	0	-	-
13/12/06	19:40:00	23,76	16,30	58	10,05	3,16
13/12/06	19:50:00	23,67	15,15	43	7,46	3,19
13/12/06	20:00:00	23,52	15,63	39	8,52	3,35
13/12/06	20:10:00	23,32	17,40	35	7,89	2,85
13/12/06	20:20:00	23,45	17,79	31	5,92	3,00
13/12/06	20:30:00	23,84	17,02	31	5,66	2,81
13/12/06	20:40:00	23,97	17,59	27	6,82	2,69
13/12/06	20:50:00	23,76	17,21	35	6,38	2,98
13/12/06	21:00:00	23,75	16,48	23	6,55	2,74
13/12/06	21:10:00	23,73	15,00	31	7,28	2,48
13/12/06	21:20:00	23,74	18,39	27	8,73	3,02
13/12/06	21:30:00	23,82	17,02	27	5,34	2,89
13/12/06	21:40:00	23,85	17,79	31	6,80	3,51
13/12/06	21:50:00	23,78	17,79	31	6,06	3,00
13/12/06	22:00:00	23,72	17,79	27	5,99	3,40
13/12/06	22:10:00	23,73	17,40	27	5,94	2,70
13/12/06	22:20:00	23,70	18,39	23	6,33	2,52
13/12/06	22:30:00	23,70	17,99	23	5,31	2,49
13/12/06	22:40:00	23,71	19,04	16	5,72	2,20
13/12/06	22:50:00	23,76	19,94	16	4,68	2,17
13/12/06	23:00:00	23,83	21,96	12	3,82	2,20
13/12/06	23:10:00	23,83	22,24	8	1,87	2,33

A visualização dos dados da Tabela 9 é mostrada na Figura 16, onde se verifica que a partir das 20 horas ocorreu a maior concentração da massa de orvalho (Δm), e à medida que o tempo foi aumentando, ocorreu um decréscimo na mesma, enquanto que a velocidade do vento (em 1m) foi praticamente constante no mesmo período.

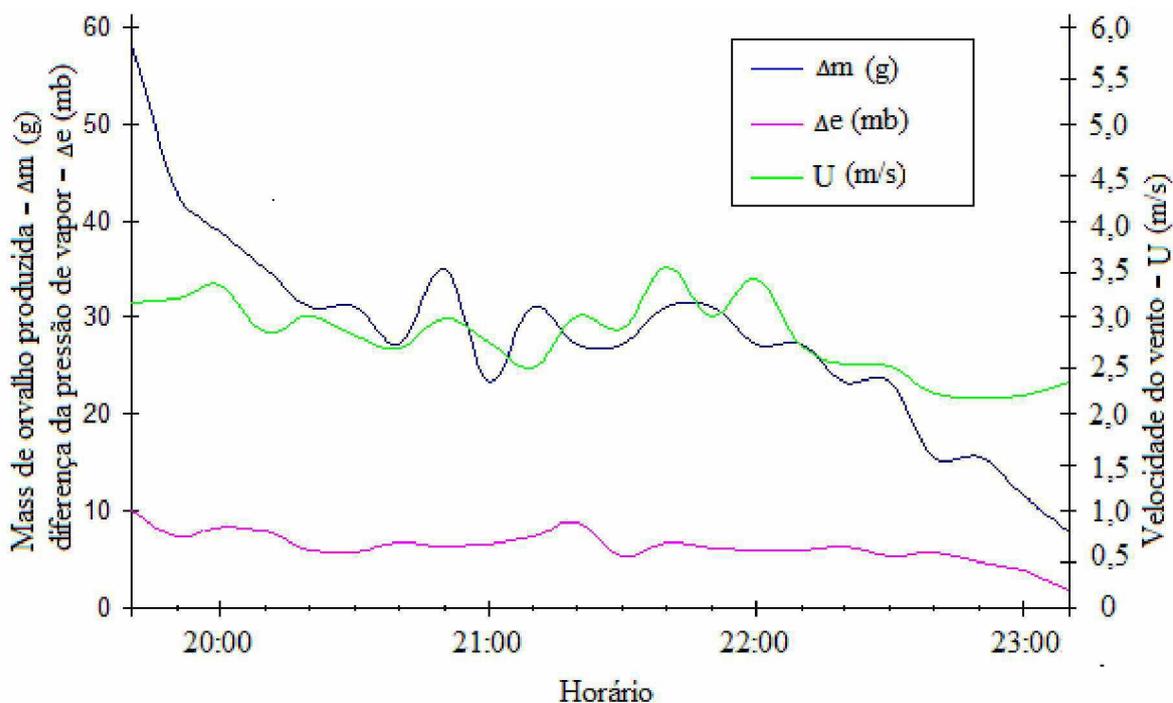


Figura 16 – Valores obtidos no experimento realizado na estação meteorológica da UACA/UFCG, em 13/12/2006.

A Tabela 10 mostra os valores das quantidades de orvalho produzidas em experiência realizada na Estação Meteorológica da UACA/UFCG, nos dias 21 e 22/12/2006. Verificou-se que o intervalo de tempo em que ocorreu a condensação no experimento realizado em 13/12/2006 (três horas e quarenta minutos) foi bem menor do que o verificado no experimento realizado nos dias 21 e 22/12/2006 (cinco horas). Essa diferença está relacionada com uma de maior intensidade do vento verificada no dia 13/12/2006. A área da superfície de condensação nesses dois experimentos era de $0,3\text{m}^2$.

Tabela 10 – Dados obtidos nos dias 21 e 22//12/2006, na Estação Meteorológica da UACA/UFCG.

DATA	HORA	e(T) (mb)	e(T _s) (mb)	Δm (g)	Δe (mb)	U (m/s)
21/12/06	20:00:00	21,7317	10,6946	0		
21/12/06	20:10:00	21,8765	11,9284	40	9,9	2,13
21/12/06	20:20:00	21,8821	13,7883	31	8,1	2,01
21/12/06	20:30:00	21,8494	13,9272	31	7,9	2,08
21/12/06	20:40:00	21,7720	14,0682	31	7,7	2,07
21/12/06	20:50:00	21,7904	15,7700	27	6,0	2,38
21/12/06	21:00:00	21,9154	16,8305	27	5,1	2,22
21/12/06	21:10:00	21,9574	15,1174	31	6,8	1,87
21/12/06	21:20:00	22,0103	14,8061	22	7,2	1,92
21/12/06	21:30:00	22,0476	15,1174	27	6,9	1,82
21/12/06	21:40:00	22,0318	14,2114	27	7,8	2,00
21/12/06	21:50:00	21,9238	14,2114	22	7,7	1,50
21/12/06	22:00:00	21,8405	13,9272	18	7,9	1,11
21/12/06	22:10:00	21,9006	14,3567	22	7,5	1,64
21/12/06	22:20:00	21,9983	14,2114	27	7,8	1,67
21/12/06	22:30:00	22,0674	14,3567	22	7,7	1,46
21/12/06	22:40:00	22,1619	14,8061	22	7,4	1,40
21/12/06	22:50:00	22,2474	14,2114	22	8,0	1,98
21/12/06	23:00:00	22,2821	14,2114	18	8,1	1,61
21/12/06	23:10:00	22,3418	14,6540	27	7,7	1,56
21/12/06	23:20:00	22,3875	14,6540	18	7,7	1,33
21/12/06	23:30:00	22,4578	14,9606	22	7,5	1,57
21/12/06	23:40:00	22,4612	14,9606	22	7,5	1,23
21/12/06	23:50:00	22,5387	15,4386	18	7,1	1,23
22/12/06	00:00:00	22,7165	15,7700	18	6,9	1,62
22/12/06	00:10:00	22,8002	16,1121	18	6,7	1,23
22/12/06	00:20:00	22,7610	18,2080	22	4,6	1,25
22/12/06	00:30:00	22,8815	18,8506	18	4,0	1,51
22/12/06	00:40:00	22,9123	20,0000	13	2,9	1,34
22/12/06	00:50:00	22,7602	20,7411	9	2,0	1,59
22/12/06	01:00:00	22,7120	21,7953	4	0,9	1,36

A Figura 17 mostra os valores da massa de orvalho produzida (Δm), da diferença entre as pressões de vapor (Δe) e da velocidade do vento (em 1m) U. Pode-se também verificar neste gráfico uma semelhança na variação da massa de orvalho produzida e na intensidade do vento.

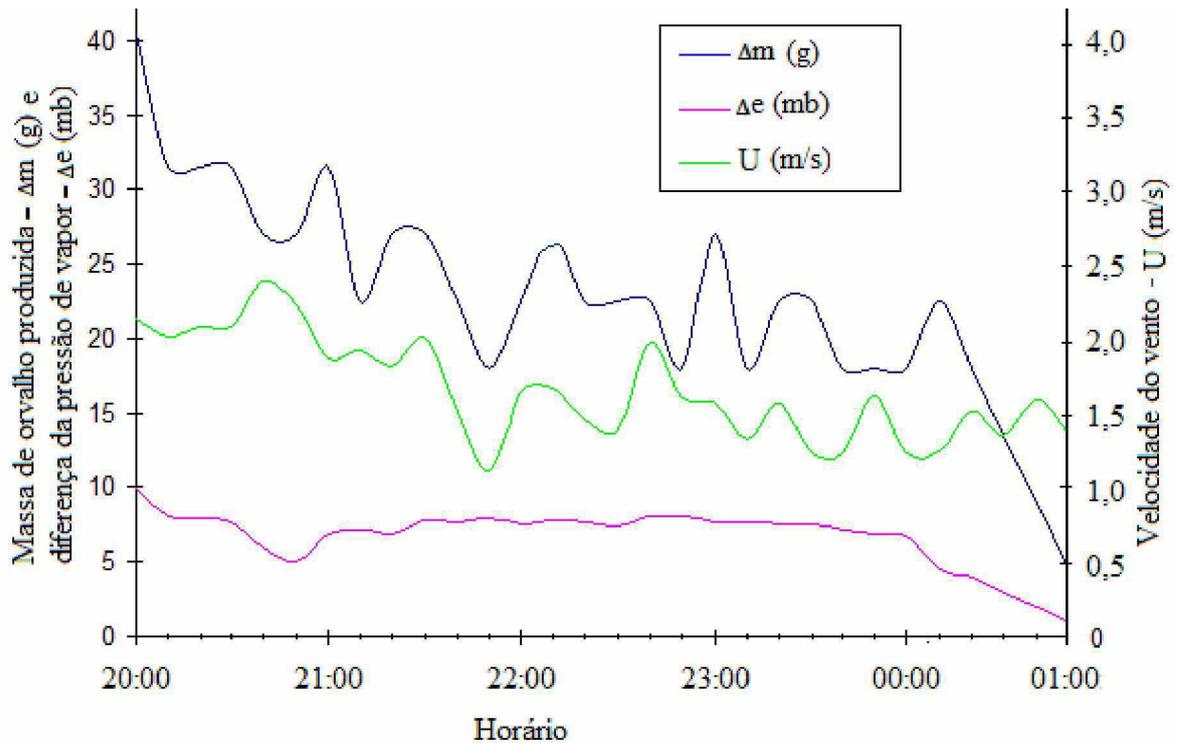


Figura 17 – Valores obtidos no experimento realizado na Estação Meteorológica da UACA/UFCG, em 21 e 22/12/2006.

4.2 CONSUMO DE ENERGIA

O consumo de energia para o resfriamento das superfícies de condensação tem se mostrado relativamente alto, considerando o volume de água produzido. A Tabela 11 resume o consumo médio de energia para a produção de um litro de água previsto pela Equação (14), como também os valores consumidos medidos durante as experiências realizadas com as diversas montagens experimentais.

A pesquisa de outros tipos de materiais usados na superfície de condensação e a utilização do ar frio e seco no resfriamento prévio do ar quente e úmido pode diminuir a quantidade de energia consumida para produzir um litro de água.

Tabela 11 – Consumo de energia para cada litro de água produzido.

Sistemas utilizados	Estimativa (Equação 14)	Refrigerador	Congelador exposto	Tubulação de resfriamento
Consumo (kWh/kg)	1,21	1,89	1,12	0,75

Levando-se em consideração a tarifa de energia elétrica cobrada dos consumidores da zona rural da Paraíba pela empresa concessionária de energia no valor de R\$ 0,2149 (vinte e um centavos e meio) por kWh elétrica (Fonte: SAELPA) e que são necessários aproximadamente 15 kWh de energia para se produzir 20 litros de água, o custo dessa produção é estimado em R\$ 3,22 (três reais e vinte e dois centavos). Nestes cálculos não estão incluídos os custos de fabricação do equipamento.

O Sol e o vento podem ser avaliados como fontes alternativas de energia utilizada nos equipamentos de refrigeração para a produção de água. Neste caso, a geração de energia seria feita a partir da implantação de parques eólicos ou da instalação de painéis fotovoltaicos nas localidades onde fossem realizadas as pesquisas.

Vale ressaltar que os equipamentos de produção de água só seriam postos em funcionamento quando a população não dispusesse mais das águas captadas durante o período chuvoso e armazenadas em cisternas e tanques.

4.3 ANÁLISES MICROBIOLÓGICAS E FÍSICO-QUÍMICAS

A água produzida no Sítio Farias, em São João do Cariri, foi analisada quanto aos aspectos bacteriológicos e físico-químicos pelo Departamento de Química da Universidade Estadual da Paraíba - UEPB. Os resultados das análises exibidos nos ANEXOS 1 e 2 atestam uma água isenta de contaminação por agentes bacteriológicos ou físico-químicos, não comprometendo a sua qualidade de potabilidade.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 CONCLUSÕES

1 - Utilizando-se superfícies refrigeradas, produziu-se 1,23 mm de orvalho (1,23 litros por metro quadrado) por hora. Esse valor, quando integrado no tempo, totaliza, aproximadamente, 10 litros de água por metro quadrado, em uma noite (oito horas) de funcionamento. O consumo de energia para essa produção é cerca de 7,5 kWh. O custo estimado para a produção desse volume de água é de R\$ 1,61 (um real e sessenta e um centavos).

2 - Análises microbiológicas e físico-químicas realizadas em amostra de orvalho produzido no município paraibano de São João do Cariri, não detectaram quaisquer indícios de contaminação que comprometam a potabilidade da água.

3 – Se forem utilizados equipamentos mais eficientes, fontes de energia alternativas, juntamente com a parceria de organizações que atuam na preservação do meio ambiente e na ação social de fixar o homem do campo em seu lugar de origem, evitando sua migração para a periferia das grandes cidades, é possível produzir água potável em quantidade

considerável a partir da condensação da umidade do ar. Essa metodologia poderá ser mais uma fonte alternativa de oferta de água para a região Semi-árida do Nordeste brasileiro.

5.2 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

1 - Pesquisar o potencial energético (solar e eólico) da região em estudo, como possíveis fontes de energia alternativa a serem utilizadas na refrigeração das superfícies de condensação.

2 - Diversificar os tipos de materiais utilizados como superfícies de condensação, analisando o volume de orvalho produzido em cada um deles.

3 – Apresentar projetos de pesquisas juntos aos órgãos de fomento para custear as futuras pesquisas.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALNASER, W. E., BARAKAT, A. Use of condensed water vapour from the atmosphere for irrigation in Bahrain. *Applied energy*. n. 65, p. 3-18, abr. 2000.

BEYSENS, D., MUSELLI, M., MILETA, M., MILIMOUK, I., OHAYON, C., SOYEUX, E. Is dew water potable? Physical, chemical and biological characteristics of dew on Atlantic coast (Bordeaux, France), Mediterranean coast (Zadar, Croatia) and Mediterranean island (Ajaccio, Corsica Island, France). The Third International Conference on Fog, Fog Collection and Dew. Cape Town, South Africa, oct. 2004.

BRASIL - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – PRODEEM – CPRN. Projeto Cadastro de Fontes de Abastecimento por Água Subterrânea – Estado da Paraíba – Diagnóstico do Município de São João do Cariri. Recife, set. 2005.

GARCEZ, L. N., ALVAREZ, G. A. *Hidrologia*. 2. ed. rev. atualizada. São Paulo: Edgard Blücher Ltda., 1988. p. 8.

GARCÍA, J. J. A., FIGUEROA, I. P., GUERRERO, H., JUÁREZ, E. M. Enfriamento radiativo Nocturno. Taller Siestemas de Enfriamento Aplicados a la Vivienda. Guadalajara, Jalisco, México, jul. 2002.

GOOGLE EARTH. Disponível em <http://earth.google.com/> Acesso em: 11 dez. 2006.

IRIBARNE, J. V. Atmospheric Thermodynamics. 2. ed. rev. Dordrecht: D. Reidel Publishing Company, 1985. p. 77 e 122.

MUSELLI, M., BEYSENS, D., MILIMOUK, I. A comparative study of two large radiative dew water condensers. Journal of arid environments. n. 64, p. 54-76, jan.2006.

NIKOLAYEV, V., BEYSENS, D., GIODA, A., MILIMOUK, I., KATIUSHIN, E., MOREL, J. P., Water recovery from dew. Journal of Hydrology. n. 182, p. 19-35, jul. 1996.

NOBREGA, R. S. ASPECTOS CLIMÁTICOS DA RECICLAGEM DO VAPOR D'ÁGUA SOBRE O BRASIL. 2003. 90 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, maio 2004.

SOCIEDADE ANÔNIMA DE ELETRIFICAÇÃO DA PARAÍBA – SAELPA. Disponível em www.saelpa.com.br. Acesso em: 15 fev. 2007.

SOUSA, J. T., LEITE, V. D. Tratamento e Utilização de Esgostos Domésticos na Agricultura. 2. ed. Campina Grande: EDUEPB, 2003. p. 21-22.

TUCCI, C. E. M. Hidrologia – Ciência e Aplicação. 2. ed. Porto Alegre: Editora da Universidade, 1997. p. 39.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE – CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS – UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS. Dados Climatológicos da Paraíba. Disponível em: <<http://www.dca.ufcg.edu.br/clima/dadospb.html>>. Acesso em: 24 mai. 2006.

VIANELLO, R. L., ALVES, A. R. Meteorologia Básica e Aplicações. 1. ed. Viçosa: UFV, 2004. p. 58 e 72.

WIKIPÉDIA – a enciclopédia livre. Ciclo Hidrológico. Disponível em: http://pt.wikipedia.org/wiki/Ciclo_hidrologico. Acesso em: 11 nov. 2006.

APÊNDICE A – ESTIMATIVAS DA MASSA DE ORVALHO PRODUZIDA E DA ENERGIA TRANSFERIDA PARA A SUPERFÍCIE FRIA DURANTE A FORMAÇÃO DO ORVALHO.

A estimativa da massa de orvalho condensada sobre uma superfície fria é estimada a partir da equação (14), ou seja:

$$LE = h_v [e(T) - e(T_s)] / \xi \Rightarrow E = \frac{h_v [e(T) - e(T_s)]}{L\xi},$$

sendo:

$E \rightarrow$ taxa de condensação de orvalho, dada em $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$;

$h_v \rightarrow$ coeficiente de transferência de vapor, dado em $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$;

$$h_v \cong h_a = 2,8 + 3,0U = 2,8 + 3,0 \times 3,0 = 11,8 \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}. U \text{ é a velocidade do vento.}$$

$e(T) \rightarrow$ pressão real de vapor, calculada por:

$$e(T) = e_s(T) \cdot UR = e_s(22^\circ\text{C}) \cdot 0,90 = 26,43 \text{mb} \cdot 0,90 = 23,787 \text{mb}.$$

Cálculo da temperatura do ponto de orvalho:

$$T_d = \frac{186,4905 - 237,31 \log e(T)}{\log e(T) - 8,2859} = 20,28^\circ\text{C}$$

$e(T_s) \rightarrow$ pressão real de vapor à temperatura da superfície de condensação (T_s);

Sabendo-se que à temperatura da superfície fria o ar está saturado ($T_s < T_d$), então:

$$e(T_s) = e_s(T_s).$$

$$\text{Logo: } e(10^\circ\text{C}) = e_s(10^\circ\text{C}) = 12,272 \text{mb}.$$

$L \rightarrow$ calor latente de vaporização ($= 2,501 \times 10^6 \text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$);

$\xi \rightarrow$ Constante psicrométrica ($= 66 \text{Pa} \cdot \text{K}^{-1}$).

Logo:

$$E = \frac{11,8W.m^{-2}K^{-1} (23,787hPa - 12,272hPa)}{2,501 \times 10^6 J.kg^{-1} \times 0,66hPa.K^{-1}} = 8,23 \times 10^{-5} kg.m^{-2}s^{-1}$$

A massa de orvalho condensada em uma hora, sobre uma superfície de $1,0 m^2$, é:

$$m = E.S.\Delta t = 0,00008kg.m^{-2}s^{-1}.1,0m^2.3600s = 0,296kg$$

A potência P absorvida pela superfície de condensação é estimada a partir das equações (13), (14) e (15):

$$P = LE + Q_a + Q_i = h_v [e(T) - e(T_s)] / \xi + (h_a + h_i)(T - T_s).$$

O coeficiente h_i para o isopor é calculado por:

$$h_i = k / L = 0,01Wm^{-1}K^{-1} / 5,0.10^{-2}m = 0,2Wm^{-2}K^{-1}.$$

Logo:

$$P = \frac{11,8W.m^{-2}K^{-1} (23,787hPa - 12,272hPa)}{0,66hPa.K^{-1}} + (11,8W.m^{-2}K^{-1} + 0,2W.m^{-2}K^{-1})(22^\circ C - 10^\circ C)$$

$$P = 349,87W.m^{-2}.$$

A energia total transferida para a superfície de condensação de $1,0 m^2$, em uma hora, é dada por:

$$Q_{total} = P.S.\Delta t = 349,87W.m^{-2}.1,0m^2.1,0h = 349,87Wh.$$

Estes cálculos mostram que para produzir um quilograma de orvalho é transferida para a superfície de condensação uma quantidade de energia estimada em 1,21kWh.

APÊNDICE B – CALIBRAÇÃO DO TERMISTOR TIPO NTC

A calibração do termistor do tipo NTC utilizado nas medidas de temperaturas das superfícies de condensação foi feita com os valores mostrados na Tabela B.1. A partir destes dados, foi construído o gráfico da curva de ajuste logarítmico (Figura B.1), onde estão mostrados a equação e o coeficiente de determinação.

Tabela B.1 – Valores de resistências elétricas apresentadas pelo termistor e as respectivas temperaturas.

R (kOhm)	T (°C)						
21,6	5,0	17,5	10,5	14,1	16,0	11,2	21,5
21,1	5,5	17,2	11,0	13,8	16,5	11,0	22,0
20,7	6,0	16,8	11,5	13,5	17,0	10,8	22,5
20,3	6,5	16,5	12,0	13,2	17,5	10,6	23,0
20,0	7,0	16,2	12,5	12,9	18,0	10,4	23,5
19,6	7,5	15,8	13,0	12,7	18,5	10,2	24,0
19,3	8,0	15,5	13,5	12,4	19,0	10,0	24,5
18,9	8,5	15,2	14,0	12,1	19,5	9,8	25,0
18,6	9,0	14,9	14,5	11,9	20,0	9,6	25,5
18,2	9,5	14,6	15,0	11,7	20,5	9,4	26,0
17,9	10,0	14,3	15,5	11,5	21,0	9,3	26,5

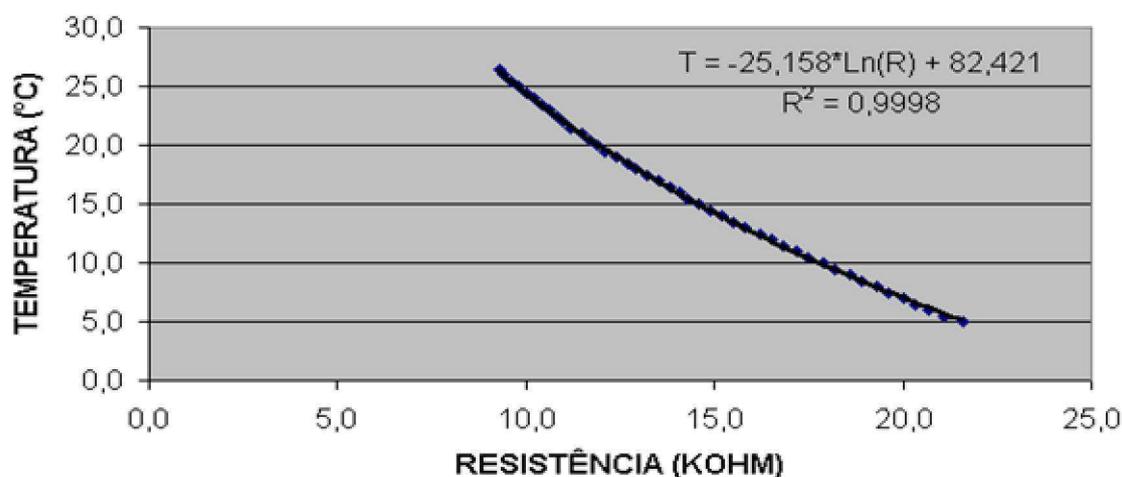


Figura B.1 – Curva de calibração do termistor do tipo NTC usado na medida de temperaturas das superfícies de condensação de orvalho.

APÊNDICE D – LISTAGEM DO PROGRAMA ORVALHO.BAS

Para se utilizar da bscula adaptada ao aparato experimental na medida da massa de orvalho  necessário o uso de um programa. O programa fonte ORVALHO.BAS, em linguagem Basic, cuja listagem é apresentada abaixo, faz a leitura dos movimentos da bscula conectada ao computador através da porta paralela.

```
*****          PROGRAMA ORVALHO.BAS          *****
```

```
' Este programa utiliza o pino 1 da porta paralela para medir a massa de  
' orvalho e armazena os dados no arquivo Arq$ cujo nome , formado por:  
' M + ano(AA) + DiaJuliano(DJ) + QuartodeHora (QH). Deste modo, arquivos  
' criados em intervalos de tempo igual ou superior a 15 minutos recebem  
' nomes diferentes.
```

```
CLS
```

```
*****Calculo do dia juliano*****
```

```
DIM DP(12)
```

```
AA$ = RIGHT$(DATE$, 2)
```

```
AA = VAL(AA$)
```

```
DD = VAL(MID$(DATE$, 4, 2))
```

```
DP(1) = 0
```

```
DP(2) = 31
```

```
DP(3) = 59: IF INT(AA / 4) = AA / 4 THEN DP(3) = 60
```

```
DP(4) = DP(3) + 31
```

```
DP(5) = DP(4) + 30
```

```
DP(6) = DP(5) + 31
```

```
DP(7) = DP(6) + 30
```

```
DP(8) = DP(7) + 31
```

```
DP(9) = DP(8) + 31
```

```

DP(10) = DP(9) + 30

DP(11) = DP(10) + 31

DP(12) = DP(11) + 30

MM = VAL(LEFT$(DATE$, 2))

DJ = DD + DP(MM)

DJ$ = RIGHT$(STR$(DJ), 3)

IF DJ < 100 THEN DJ$ = "0" + RIGHT$(STR$(DJ), 2)

IF DJ < 10 THEN DJ$ = "00" + RIGHT$(STR$(DJ), 1)

QH = INT(TIMER / 900)

QH$ = RIGHT$(STR$(QH), 2)

IF QH < 10 THEN QH$ = "0" + RIGHT$(QH$, 1)

*****Criando o nome do arquivo*****

ARQ$ = "M" + AA$ + DJ$ + QH$ + ".csv"

LOCATE 8, 14

PRINT "NOME DO ARQUIVO GERADO: "; ARQ$

OPEN ARQ$ FOR OUTPUT AS #1 'abre o arquivo arq$ para escrita

OUT &H37A, 32

LOCATE 3, 26

PRINT "MEDIDA DA MASSA DE ORVALHO";

*****Gerando a tela de entrada dos dados iniciais*****

LOCATE 10, 14

INPUT "Registrar os dados em intervalos de quantos minutos <1 - 60>"; TR

TR = TR * 60

LOCATE 12, 14

INPUT "Quantos minutos de espera para sair do programa <1 - 30>"; TE

TE = TE * 60

*****Cabeçalho da planilha*****

PRINT #1, "Data"; CHR$(44); "Hora"; CHR$(44); "Medidas"; CHR$(44);

PRINT #1, "Massa (g)"; CHR$(44); "UR (%)"; CHR$(44); "P (mb)"; CHR$(44);

PRINT #1, "T (C)"; CHR$(44); "R (k )"; CHR$(44); "Ts (C)" CHR$(44); "u (m/s)"

```

```

a = INP(&H378) 'Identifica a posição inicial do coletor de orvalho

nm = 0

SOUND 300, 5

DO WHILE cr = 0

    IF INT(TIMER / TR) = INT(TIMER) / TR THEN

        PRINT #1, DATE$, CHR$(44); TIME$, CHR$(44); nm; CHR$(44)

        LOCATE 14, 14

        PRINT "                                "

        LOCATE 14, 14

        PRINT "Hora: "; TIME$, " - Número de medidas realizadas: "; nm

        SLEEP 2 'impede repetição de registro (mesmo horário)

    END IF

    T = TIMER

    DO WHILE INP(&H378) = a AND cr = 0      'Aguarda a mudança de posição do coletor

        IF T > TIMER THEN T = T - 86400    'Corrige o tempo na mudança de data

        IF TIMER - T > TE THEN cr = 1      'Verifica se o tempo de espera , superado

        IF INT(TIMER / TR) = INT(TIMER) / TR THEN 'Registra dados a cada 10 minutos

            PRINT #1, DATE$, CHR$(44); TIME$, CHR$(44); nm; CHR$(44)

            LOCATE 14, 14

            PRINT "                                "

            LOCATE 14, 14

            PRINT "Hora: "; TIME$, " - Número de medidas realizadas: "; nm

            SOUND 1000, 5

            SLEEP 2 'impede repetição de registro (mesmo horário)

        END IF

    LOOP

    SOUND 2000, 3

    T = TIMER

    nm = nm + 1

    DO WHILE INP(&H378) <> a AND cr = 0    'Aguarda a mudança de posição do coletor

```

```

IF T > TIMER THEN T = T - 86400      'Corrige o tempo na mudança de data
IF TIMER - T > TE THEN cr = 1      'Verifica se o tempo de espera , superado
IF INT(TIMER / TR) = INT(TIMER) / TR THEN 'Registra dados a cada 10 minutos

    PRINT #1, DATE$, CHR$(44); TIME$, CHR$(44); nm; CHR$(44)

    LOCATE 14, 14

    PRINT "                                "

    LOCATE 14, 14

    PRINT "Hora: "; TIME$, " - Número de medidas realizadas: "; nm

    SOUND 300, 5

    SLEEP 2 'impede repetição de registro (mesmo horário)

END IF

LOOP

SOUND 2000, 3

nm = nm + 1

LOOP

CLOSE #1

*****Gera um som de sirene informando o fim do processamento*****

FOR x = 500 TO 100 STEP -1

    SOUND x, 1

NEXT x

END*****Fim do programa ORVALHO.BAS*****

```

A execução do programa ORVALHO.BAS gera um arquivo de dados com extensão csv, no formato apresentado na Tabela D.1. A massa de orvalho para cada hora apresentada na referida tabela é obtida pelo produto da coluna Medidas pela massa total de orvalho dividido pelo número total de medidas. Os valores da temperatura da superfície de condensação (T_s) são obtidos a partir dos valores de R e da Equação (17):

$$T_s = -25,158Ln(R) + 82,421.$$

Os demais valores são obtidos através de medições realizadas com instrumentos apropriados ou através de dados obtidos junto às estações meteorológicas automáticas.

Tabela D.1 – Formato da tabela de dados gerada pelo programa ORVALHO.BAS.

Data	Hora	Med.	m (g)	UR (%)	P (mb)	T (°C)	R (k)	T _s (°C)	U (m/s)
.
.
.

ANEXO 1 – RESULTADOS DAS ANÁLISES MICROBIOLÓGICAS REALIZADAS
NO ORVALHO PRODUZIDO EM SÃO JOÃO DO CARIRI



Universidade Estadual da Paraíba – UEPB
Av. Marechal Floriano Peixoto, 718 – Centro
58100-001 – Campina Grande – Paraíba
CGC:12.671.814/0001-37
CXA. Postal 781/791 – TELEX: 833226
Fone: (83) 3341-3300 (PABX) FAX: (83) 3341-4509

BOLETIM DE ANÁLISES

AMOSTRA: 157/2006

Campina Grande, 28 de novembro de 2006

Dados do cliente:

Nome do solicitante: Genival da Silva
Nome ou razão social: Genival da Silva
CGC/ Nº Inscrição: 086.382.844-20
Endereço: Departamento de Física - UEPB
Produto: **Água de Orvalho**
Data da fabricação/ data de validade:
Data da coleta: 21/11 /2006
Data da Entrega no Laboratório:
Data da análise: 23/11/2006
Tipo da Amostra:

ANÁLISES MICROBIOLÓGICAS

Parâmetros	Resultados	VMP	Unidade de Medida
Coliformes Totais	Ausente	Ausente	NMP/100mL
Coliformes Termotolerantes	Ausente	Ausente	NMP/100mL
E. coli.	Ausente	Ausente	NMP/100mL

CONCLUSÃO: A amostra analisada atende aos limites bacteriológicos citados acima para água potável, estabelecidos pelo Ministério da Saúde , através da PORTARIA/ 36/MS//GM de 19 de setembro de 1990.

LEGENDA: VMP = valor máximo permitido pela legislação
NMP = número mais provável

NOTA: Métodos de análise baseados na 19ª edição do Standard "METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTERWATER" – APHA – AWWA – WEF (1995).

Alfredina dos Santos Araújo

Responsável pelas análises bacteriológicas

ANEXO 2 – RESULTADOS DAS ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS REALIZADAS NO ORVALHO PRODUZIDO EM SÃO JOÃO DO CARIRI



UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA

Amostra: Água de Orvalho.
Solicitante: Prof. Genival da Silva –DF/CCT/UEPB.
Data da análise: 15/12/06

PARECER TÉCNICO

As determinações físico - químicas das amostras de água foram realizadas pelo Laboratório de Saneamento Ambiental do DQ/CCT/UEPB.

AO: água de orvalho;

P: água de poço;

AP: água de poço artesiano.

Tabela 1. Magnitude dos parâmetros físico-químicos caracterizados.

Amostra	pH	AT	Cloretos	DT	DCa	DMg	Nitrito	Nitrato	CE
AO	6,1	10,0	14,2	15,0	10,0	5,0	21,3	0,2	38,0
P	7,2	800,8	9.940,0	8008,0	4.504,5	3.503,5	43,1	0,44	17,5
PA	7,6	41,0	35,5	75,0	55,0	20,0	9,0	0,08	212,0

AT: alcalinidade total ($\text{mgCaCO}_3 \text{ L}^{-1}$); Cloretos: Cloretos totais ($\text{mgCl} \text{ L}^{-1}$); DT: dureza total ($\text{mgCaCO}_3 \text{ L}^{-1}$); DCa: dureza advinda de Cálcio ($\text{mgCaCO}_3 \text{ L}^{-1}$); DMg: dureza advinda de Magnésio ($\text{mgCaCO}_3 \text{ L}^{-1}$); Nitrito: (mg.L^{-1}). Nitrato: (mg. L^{-1}); CE: condutividade elétrica ($\mu\text{mho. cm}^{-1}$).

Analisando os dados advindos das análises físico-químicas das amostras de água de orvalho, água de poço e água de poço artesiano, pode-se constatar que:

1. A água de orvalho apresentou concentração de cloreto total de $14,2 \text{mg. L}^{-1}$, alcalinidade total com concentração em torno de $10,0 \text{mgCaCO}_3 \text{ L}^{-1}$ e reduzida concentração de dureza total. Da dureza total, 66% em média corresponde à dureza advinda de Cálcio e 34% dureza magnesiana.
2. A água do poço artesiano apresentou características dentro dos padrões normais esperados, podendo ser utilizada para diversos fins sem determinadas restrições.
3. A água de poço (não foi especificado o tipo de poço) apresentou características neutra, porém, continha elevada concentração de dureza total, passando a exigir o processo de abrandamento antes de sua utilização para determinados fins.

Campina Grande, 14 de Fevereiro de 2007.

Prof. Valderi Duarte Leite