

## *Dissertação de Mestrado*

# **DESENVOLVIMENTO DE UM DESTILADOR SOLAR PARA TRATAMENTO DE ÁGUAS DE PRODUÇÃO DE PETRÓLEO COM VISTAS A SUA UTILIZAÇÃO NA AGRICULTURA E GERAÇÃO DE VAPOR**

**Magna Angélica dos Santos Bezerra**

**Natal, setembro de 2004**

BEZERRA, Magna Angélica dos Santos Bezerra - Desenvolvimento de um Destilador Solar para Tratamento de Águas de Produção de Petróleo com Vistas a sua Utilização na Agricultura e Geração de Vapor, Dissertação de Mestrado, UFRN, Programa de Pós-Graduação na Engenharia Química, Área de Concentração: Aplicação da Engenharia Ambiental na Preservação de Recursos Naturais do Rio Grande do Norte.

Orientador: Josette Lourdes de Sousa Melo

Co-orientador: Henio Normando de Souza Melo.

---

RESUMO: A produção de petróleo é realizada freqüentemente com grandes volumes de água, que é carregada do subsolo junto com o óleo. É desafio do presente século o desenvolvimento de tecnologias que possibilitem o uso ou reuso de efluentes para outros fins. A destilação solar é uma alternativa de tecnologia limpa para dessalinização de águas salobras e salinas. Esse estudo visa desenvolver um Destilador Solar para tratamento da água de produção de petróleo, com vistas a se obter um efluente passível de utilização na agricultura e geração de vapor. A metodologia para conservação e análise dos parâmetros físico-químicos obedeceu a preconização do APHA (1995). A amostragem foi do tipo composta. Foram realizados experimentos no destilador solar piloto e simulação em banho termostático. A operação foi em sistema de batelada e por períodos de 4, 6 e 12 h. O destilador desenvolvido é do tipo simples efeito de duas águas. Testou-se ainda dois ângulos de inclinação para cobertura; 20° e 45°. O destilador apresentou rendimentos mínimo de 2,50 L/m<sup>2</sup>d e máximo de 7,5 L/m<sup>2</sup>d. As remoções de sais foram superiores a 98%. A remoção de TOC na simulação foi superior a 90%. De acordo com os dados dos balanços energético e de massa, verificou-se que o destilador solar desenvolvido apresentou rendimentos compatíveis com os encontrados na literatura para seus similares. Enfatiza-se que o isolamento utilizado não estava nas condições de otimização, logo, esse rendimento pode ser melhorado. Pode-se inferir que a água destilada obtida atende aos requisitos CONAMA em quase todos os pontos, podendo ser utilizada, com ressalvas, na irrigação de culturas não comestíveis como o algodão e a mamona. Como a água destilada tem características de água doce pode ser utilizada na geração de vapor.

---

Palavras-Chave: Águas de Produção, Destilação Solar, Reuso de Águas, Padrões de Qualidade da Água para Irrigação, Geração de Vapor.

---

BANCA EXAMINADORA E DATA DA DISSERTAÇÃO: 02 de setembro de 2004.

Presidente: Prof<sup>a</sup> Dra. Josette Lourdes de Sousa Melo (DEQ-UFRN)

Membros: Prof. Dr. Henio Normando de Souza Melo

Prof. Dr. Tarcílio Viana Dutra Junior (DEQ-UFRN)

Prof. Dr. Maurício Luiz Sens (ENS-UFSC)

---

BEZERRA, Magna Angélica dos Santos Bezerra - Development of a Solar Distillator for Treatment of Produced Water of Oil with aims its Use in the Agriculture and Vapor Generation, MSc. Dissertation, UFRN, Post-Graduate Program in Chemical Engineering, Subject Field: Application of the Environmental Engineering in the Preservation of Natural Resources of RN.

---

ABSTRACT - The production of petroleum is frequently accomplished with great volumes of water, that it is carried of the underground with the oil. It is a challenge of the present century the development of technologies that allow the use of waste water for purposes that consume great amounts of water and don't demand as rigid as the one of the drinking water requirements. The solar distillation has been configuring as an alternative of clean technology for desalination of brine and saline. Besides causing the minimum possible damage to the environment, it takes advantage of an abundant and free energy source: the solar energy. That study aims to develop a Solar Distillator for treatment of the produced water of the oil wells, to obtain an effluent to use in agriculture and vapor generation. The methodology for collection, conservation and analysis of the physical-chemical parameters obeyed the norms in APHA (1995). The sampling was of the composed type. Experiments were accomplished in the solar distillation pilot and simulation in thermostatic bathing. The operation was in batch system and for periods of 4, 6 and 12 h. The developed Distillator is of the type simple effect of two waters. It was still tested two inclination angles for covering; 20° and 45°. The Distillator presented minimum of 2,85 L/m<sup>2</sup>d revenues and maximum of 7,14 L/m<sup>2</sup>d. The removals of salts were great than 98%. The removal of TOC in the simulation was great than 90%. In agreement with the data of energy and mass balance, it was verified that the developed solar Distillator presented compatible revenues with those found in literature for similar types. It can be inferred that the obtained distilled water assists to the requirements CONAMA in almost all the points and could be used for irrigation of cultures such as cotton and mamona. As the distilled water has characteristics of fresh water it can be used in the generation of vapor.

---

Key-word: Produced Water, Solar Distillation, Use of Waste Waters, Patterns of Quality of the Water for Irrigation, Vapor Generation.

---

## **Dedicatória**

**Ao meu Senhor e Salvador por Seu muito Amor e porque:**  
“Quer comais, quer bebais, ou façais outra qualquer coisa, fazei tudo para a glória de Deus” I  
Cor. 10.31

---

# Agradecimentos

A Mainha, por seu amor e atenção por sempre ter me apoiado em todas as minhas decisões.

A José Francisco, meu esposo e companheiro por todas as noites de sono que passou ao meu lado ajudando no que era preciso e por ter agüentado todos os meus humores nessa trajetória.

Aos meus irmãos porque sempre pude contar com sua compreensão para o desenvolvimento desse trabalho.

Aos professores Josette Lourdes de Sousa Melo e Henio Normando de Souza Melo, meus orientadores que aceitaram abraçar comigo esse desafio.

Ao PPGEQ e PRH/14-ANP por terem me aceito no programa e pela concessão da bolsa e todo apoio financeiro.

A PETROBRAS pelo fornecimento das amostras.

Ao Químico do Petróleo Antonio Faria Lima pelo incentivo e ajuda na obtenção das amostras

Ao Químico do Petróleo Avelino Neto, por sempre nos ter recebido tão bem e facilitado o acesso as dependências da UTPF para coleta das amostras.

A bolsista PIBIC-IC Thaísa Daniella de Araújo Jucá, por toda ajuda na realização das análises.

Ao professor Eduardo por todo o trabalho que teve junto conosco, contribuindo com o desenvolvimento do Destilador.

Aos professores Osvaldo Chiavone Filho (porque sempre acreditou no projeto), Sebastião Ribeiro (por toda orientação passada) e Everaldo.

As minhas amigas Anita Maria, Elisângela, Leila, Patricia, Fabíola (Fabiboa), por todo companheirismo e constante colaboração nos momentos difíceis e bons, e por todas as boas risadas que demos juntas.

A todos que compõem o LEACQ, Carla, Liberta, Paula, Jakelan por sua atenção, préstimos e companhia.

Aos colegas Aristides e tantos outros que derramaram suor pelo destilador.

---

## SUMÁRIO

<b>1. Introdução</b>	<b>2</b>
<b>2. Aspectos teóricos</b>	<b>7</b>
2.1 – O petróleo e os mecanismos de produção	7
2.2 – Água de produção de petróleo	7
2.3 – O problema ambiental	10
2.4 – Parâmetros analisados	12
2.5 – A energia Solar	16
2.6 – Destilação convencional	19
2.7 – A destilação solar.	20
2.7.1 – Mecanismos da destilação solar e balanços de massa e energia	22
2.7.2 – Tipos de destiladores solares	27
2.7.3 – Eficiência e rendimentos da destilação solar	29
2.7.4 – Resíduos da destilação solar	30
2.7.5 – Desvantagens da destilação solar	31
2.7.6 – Vantagens da destilação solar	32
<b>3. Estado da arte</b>	<b>34</b>
3.1 – Destilação Solar	34
<b>4. Metodologia</b>	<b>42</b>
4.1 – Coleta e conservação das amostras	42
4.2 – Tipo de amostragem e definição dos pontos a serem analisados	42
4.3 – Materiais e métodos	43
4.4 – Projeto e descrição do destilador solar	45
4.5 – Modos de operação	48
4.6 – Testes de destilação em banho termostático com simulação das temperaturas atingidas pela água na destilação solar	49
<b>5. Resultados e discussões</b>	<b>54</b>
5.1 – Balanço energético e de massa no destilador solar: cálculo de coeficientes e perfis de temperatura.	54
5.2 – Eficiência do destilador solar na remoção de contaminantes e modificação nas características da água de produção após a destilação solar	68
5.3 – Resultados dos testes de simulação no banho termostático	79

---

*5.4 – Comparação dos resultados obtidos na destilação solar com os obtidos na simulação e com os valores preconizados na Legislação* \_\_\_\_\_ 81

*6. Conclusões e sugestões para trabalhos futuros* \_\_\_\_\_ 85

*7. Referências bibliográficas* \_\_\_\_\_ 87

*8. Anexos* \_\_\_\_\_

---

*8.1 - Anexo 1: Resolução CONAMA n°20 de 18 de junho de 1986*

---

## Índice de figuras

FIGURA 1: DESTILADOR SOLAR PROPOSTO POR DACACH, 1979.....	4
FIGURA 2: POÇOS PRODUZINDO PETRÓLEO E ÁGUA. (FONTE AZEVEDO, 1998) .....	8
FIGURA 3: DISTRIBUIÇÃO DA RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA NO PLANETA (UV - PLANETA TERRA, 2004).....	21
FIGURA 4: Destilador solar do tipo multiestágio.....	27
FIGURA 5: Destilador solar do tipo filme capilar.....	28
FIGURA 6: Destilador solar do tipo mecha.....	28
FIGURA 7: Destilador solar tipo condensação separada.....	29
FIGURA 8: Destilador solar <i>multiwick</i> estudado por Tiwari e Sing (1991).....	36
FIGURA 9: Funil de Separação usado contendo amostra e clorofórmio.....	44
FIGURA 10: da base do destilador em perspectiva com cotas.....	46
FIGURA 11: VISTA POSTERIOR DA BASE DO EQUIPAMENTO .....	47
FIGURA 12: VISÃO FRONTAL DO DESTILADOR E DOS DISPOSITIVOS DE COLETA E ÁGUA DESTILADA E RESÍDUO .....	47
FIGURA 13: VISÃO FRONTAL DO BANHO TERMOSTÁTICO .....	49
FIGURA 14: DETALHE DO BANHO TERMOSTÁTICO, SISTEMA DE CONTROLE DA TEMPERATURA..	50
FIGURA 15: VISTA SUPERIOR DO BANHO TERMOSTÁTICO ABERTO .....	50
FIGURA 16A: DETALHE DA CONDENSAÇÃO.....	51
FIGURA 16B: DETALHE DA CONDENSAÇÃO.....	51
FIGURA 17: DETALHE DO RECOLHIMENTO DA ÁGUA DESTILADA .....	52
FIGURA 18: VARIAÇÃO DE TEMPERATURA DO DIA 13/11/03 PARA UMA OPERAÇÃO DE 4 HORAS. .....	55
FIGURA 19: VARIAÇÃO DE TEMPERATURA DO DIA 19/11/03 PARA UMA OPERAÇÃO DE 4 HORAS. .....	55
FIGURA 20: VARIAÇÃO DE TEMPERATURA DO DIA 20/11/03 PARA UMA OPERAÇÃO DE 6 HORAS. .....	56
FIGURA 21: VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DO DIA 11/02/04 PARA UMA OPERAÇÃO DE 3 HORAS .....	57
FIGURA 22: VARIAÇÃO DE TEMPERATURA DO DIA 18/02/04 PARA UMA OPERAÇÃO DE 4 HORAS. .....	57
FIGURA 23: PERFIL DE TEMPERATURAS PARA A COBERTURA DE 20 ° DE INCLINAÇÃO E 4 H DE OPERAÇÃO .....	58
FIGURA 24: PERFIL DE TEMPERATURAS PARA A COBERTURA DE 20 ° DE INCLINAÇÃO E 6 H DE OPERAÇÃO .....	59
FIGURA 25: PERFIL DE TEMPERATURAS PARA A COBERTURA DE 20 ° DE INCLINAÇÃO E 4 H DE OPERAÇÃO .....	60
FIGURA 26: PERFIL DE TEMPERATURAS PARA A COBERTURA DE 45 ° DE INCLINAÇÃO E 4 H DE OPERAÇÃO .....	60
FIGURA 27: PERFIL DE TEMPERATURAS PARA A COBERTURA DE 45 ° DE INCLINAÇÃO E 4 H DE OPERAÇÃO .....	61
FIGURA 28: PERFIL DE TEMPERATURAS PARA A COBERTURA DE 45 ° DE INCLINAÇÃO E 6 H DE OPERAÇÃO .....	61
FIGURA 29: PERFIL DE TEMPERATURAS PARA A COBERTURA DE 45 ° DE INCLINAÇÃO E 6 H DE OPERAÇÃO .....	62
FIGURA 30: PERFIL DE TEMPERATURAS PARA A COBERTURA DE 20 ° DE INCLINAÇÃO E 6 H DE OPERAÇÃO .....	62
FIGURA 31: PERFIL DE TEMPERATURAS PARA A COBERTURA DE 20 ° DE INCLINAÇÃO E 6 H DE OPERAÇÃO .....	63



FIGURA 32: PERFIL DE TEMPERATURAS PARA A COBERTURA DE 45 ° DE INCLINAÇÃO E 6 H DE OPERAÇÃO .....	63
FIGURA 33: GOTAS DE ÁGUA CONDENSADAS NA COBERTURA DO DESTILADOR.....	64
FIGURA 34: PERFIL DE TEMPERATURAS PARA A COBERTURA DE 45 ° DE INCLINAÇÃO OPERAÇÃO FULL TIME.....	65
FIGURA 35: PERFIL DE TEMPERATURAS PARA A COBERTURA DE 20 ° DE INCLINAÇÃO OPERAÇÃO FULL TIME.....	66
FIGURA 36: TAXAS DE CONDENSAÇÃO NOS MODOS OPERACIONAIS.....	66
FIGURA 37: COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES DE PH NOS TRÊS PONTOS AMOSTRAIS.....	71
FIGURA 38: COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DE CONDUTIVIDADE NOS TRÊS PONTOS AMOSTRAIS .....	72
FIGURA 39: COMPARAÇÃO ENTRE OS PONTOS AMOSTRAIS PARA O PARÂMETRO DE CLORETOS	72
FIGURA 40: COMPARAÇÃO ENTRE OS PONTOS AMOSTRAIS PARA O PARÂMETRO DE SULFATOS..	73
FIGURA 41: COMPARAÇÃO ENTRE A TURBIDEZ DA AMOSTRA BRUTA, DESTILADO E RESÍDUO. ...	73
FIGURA 42: COMPARAÇÃO ENTRE OS NÍVEIS DE DUREZA ANTES E DEPOIS DA DESTILAÇÃO.....	74
FIGURA 43: RESULTADOS DE ALCALINIDADE PARA OS TRÊS PONTOS AMOSTRAIS.....	75
FIGURA 44: RESULTADOS DE NITRATO OBTIDOS NOS EXPERIMENTOS .....	75
FIGURA 45: GRÁFICO DA REDUÇÃO DO TOG NO DESTILADO .....	76
FIGURA 46: RESULTADOS DE CARBONO TOTAL (TC) .....	77
FIGURA 47: APRESENTAÇÃO DA REMOÇÃO DO CARBONO INORGÂNICO (IC) .....	78
FIGURA 48: RESULTADOS DE TOC PARA OS TRÊS PONTOS AMOSTRAIS.....	78

---

## Índice de tabelas

TABELA 1: Relações para determinação dos TDS em função da condutividade.....	14
TABELA 2: Classificação das águas quanto a dureza geral.....	14
TABELA 3: Quadro geral dos resultados para os três pontos amostrais e percentual de redução.....	68
TABELA 4: Resultados para o destilador operando com inclinação de 20° na cobertura...69	
TABELA 5: Resultados para o destilador operando com inclinação de 45° na cobertura....69	
TABELA 6: Comparação entre as reduções geral, para 20° e para 45°.....	70
TABELA 7: Resultados médios para médio para as frações de carbono via simulação.....	79
TABELA 8: Quadro geral dos parâmetros analisados e as reduções obtidas.....	80
TABELA 9: Resultados dos parâmetros na água de produção antes da destilação.....	80
TABELA 10: Resultados dos parâmetros na água de produção destilada.....	81
TABELA 11: Quadro comparativo dos valores obtidos na destilação e valores padrões.....	82

---

## NOMENCLATURA

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente;

COT- Carbono Orgânico Total (mg/L);

CT - Carbono Total (mg/L);

DBO - Demanda Bioquímica de Oxigênio (mg/L O<sub>2</sub>);

DQO - Demanda Química de Oxigênio (mg/L O<sub>2</sub>);

EDTA - Ácido Etileno Diamino Tetra-acético;

ELV - Equilíbrio Líquido-Vapor;

GLP - Gás Liquefeito de Petróleo;

IC - Inorganic Carbon (carbono inorgânico)- mg/L;

OD - Oxigênio Dissolvido - (mg/L O<sub>2</sub>);

OFFSHORE - produção de petróleo no mar;

ONSHORE - produção de petróleo em terra;

Set-up - ponto de ajustamento do sistema;

TDS - Total Dissolved Solids - sólidos dissolvidos totais (mg/L);

TOC - Total Organic Carbon (mg/L);

TOG - Teor de Óleos e Graxas (mg/L);

UTPF - Unidade de Tratamento e Processamento de Fluidos.

0 - amostra bruta - água de produção do emissário antes da destilação;

1 - água de produção destilada;

2 - resíduo da destilação.

---

---

---

# **CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO**

---

---

# 1. Introdução

O petróleo é a fonte energética que move o mundo. Seu uso remonta à antiguidade, onde o homem usava o betume para impermeabilizar suas navegações. Entretanto, ainda hoje é a principal fonte energética contemporânea, de forma que sem esse mineral o mundo moderno pára. Guerras se iniciaram e finalizaram por causa do chamado ouro negro.

O Brasil possui consideráveis reservas dessa fonte energética. E, o crescimento da produção foi de fundamental importância para o posicionamento do país no cenário mundial. Essa fonte energética é responsável por, aproximadamente, 34% da energia utilizada no Brasil.

O Rio Grande do Norte é o terceiro produtor nacional de óleo, e o primeiro quando se considera apenas a produção *onshore*. Logo, cabe aos pesquisadores conciliar todo esse progresso com as necessidades sociais e ambientais.

Do petróleo, pode-se obter os mais variados produtos como plásticos, fertilizantes, ração animal, além, é claro, dos derivados petroquímicos e de seu uso como combustível. Ele é o componente básico de mais de 6000 produtos.

Como todo processo industrial, as operações da indústria petrolífera (da produção até a distribuição dos derivados de petróleo ao consumidor) consomem recursos naturais e geram rejeitos que, se lançados *in natura* no meio ambiente, podem acarretar a degradação ambiental.

Dentre todos os recursos afetados, destacam-se os recursos hídricos. A água está presente em todas as fases do processo produtivo da indústria petrolífera. Essas águas tendem a formar emulsões estáveis com o óleo que dificultam a sua separação. Assim sendo, os rejeitos líquidos da indústria petrolífera requerem tratamentos específicos e muitas vezes dispendiosos para que se possa dar uma destinação final aos mesmos, e ainda assim, não se consegue fazer uso dessa água.

O Estado do RN sofre constantemente com a falta de água e nos anos de seca é comum que os sertanejos percam sua produção e o gado morra de sede. Mesmo em épocas de bom inverno, a produção agropecuária, em algumas regiões do Estado, só se processa através de sistemas de irrigação que obtém água de poços artesianos, com água comumente salobra e passível de ser dessalinizada para que sua utilização seja viável. Nesses casos, além de se gastar recursos financeiros para disponibilização dessas águas, se contribui para a degradação ambiental de um bem não renovável.

---

A produção de petróleo é realizada freqüentemente com grandes volumes de água, que é carreada do subsolo junto com o óleo, além da água de injeção usada para aumentar a produção do petróleo. No Rio Grande do Norte, os volumes de água de produção são elevados, porque além dos fatores citados anteriormente, os campos são maduros. Segundo Thomas *et al.* (2001), a produção de água em campos maduros pode chegar a mais de 90 % do que é produzido nos poços. De acordo com Silva (2002), só na UTPF (Unidade de Tratamento e Processamento de Fluidos) de Guamaré eram produzidos nesse ano 60.000 m<sup>3</sup>/dia de água de produção e a previsão era que até o final daquele ano a vazão atingiria os 120.000 m<sup>3</sup>/dia. Azevedo (1998), destaca que as águas de produção estão presentes tanto nas operações onshore quanto *offshore* e são consideradas o rejeito de maior volume em todo o processo de exploração e produção de petróleo. Onde se percebe ser grande o montante de água desperdiçada. Além disso, se gasta energia para lançar essa água no mar.

Dos mais diversos usos que a água tem lugar nas atividades do homem, apenas 20 % é utilizado para dessedentação humana e cocção de alimentos, além da higiene da casa e pessoal. (Melo, 1997). O maior consumo de água é na agricultura seguido pelos usos industriais, entre eles a geração de vapor (von Sperling, 1995). O vapor é uma das utilidades mais comuns nos mais diversos processos industriais e água para gerar esse insumo é um bem precioso e que necessita atender a requisitos bastante rígidos, como não ser agressiva nem corrosiva às tubulações e equipamentos. Nas indústrias que utilizam vapor em algum de seus processos ou operações, também se lança mão da escavação de poços para obtenção desse mineral, encarecendo o processo e mais uma vez desperdiçando esse recurso natural utilizando-o em usos menos nobres que a dessedentação humana.

É desafio do presente século o desenvolvimento de tecnologias que possibilitem ou uso ou reuso de efluentes para fins que consomem grandes quantidades de água e não exigem requisitos tão rígidos quanto os da potabilidade.

A destilação solar tem se configurado como uma alternativa de tecnologia limpa para dessalinização de águas salobras e salinas. Isso porque, além de causar o mínimo prejuízo possível ao meio ambiente, aproveita uma fonte energética abundante e gratuita: a energia solar.

Em muitos países a destilação solar tem sido usada como única forma de obtenção de água potável através da dessalinização da água do mar. No Brasil, apesar de quase não se ter notícias do emprego da dessalinização de águas por destilação solar, sabe-se que a Ilha de Fernando de Noronha usa a destilação por evaporação solar para seu abastecimento (Macedo, 1996)

---

Dentro desse contexto, o desenvolvimento de um equipamento que utilize a energia solar para tratamento das águas residuárias que seriam descartadas vem ao encontro dos anseios e expectativas para o desenvolvimento sustentável.

Segundo Melo (1997), o destilador solar clássico é conhecido do homem há muito tempo. Esse modelo de destilador repete o ciclo hidrológico natural, e consiste de uma câmara (de fundo negro) com água, coberta com vidro transparente, levemente inclinado, a luz do sol atravessa o vidro e é absorvida pelo fundo negro. A água aquecida evapora e condensa na parte interna do vidro, escoando para uma calha, onde é recolhida. A Figura 1 apresenta um modelo de destilador solar clássico, proposto por Dacach (1979).

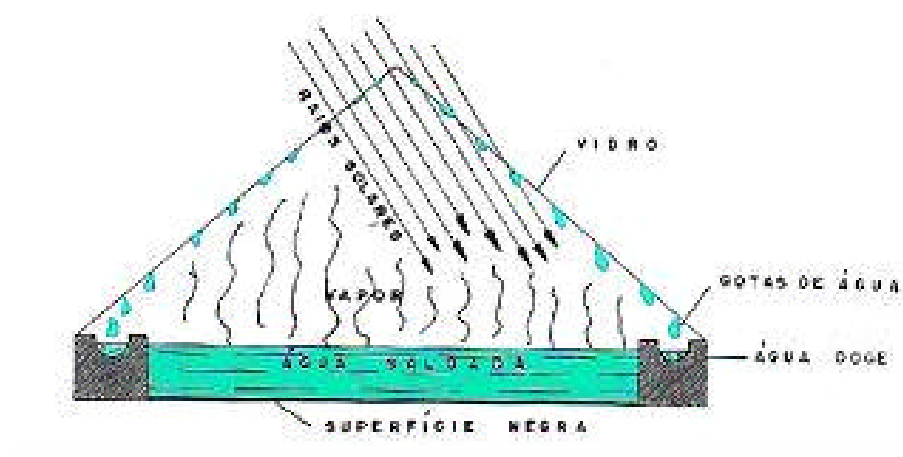


Figura 1: Destilador Solar proposto por Dacach, 1979.

Assim, promover o tratamento dessa água de produção, possibilitando o seu aproveitamento para atender esses usos é algo tão desejável quanto necessário frente ao panorama atual, onde já se vislumbra a escassez de água em poucos anos. Além, é claro, de tirar o ônus ambiental e trazer benefícios sociais para a comunidade, com os custos minimizados pela adoção de uma tecnologia limpa e de uma fonte energética gratuita.

Objetivos gerais:

Esse estudo visa desenvolver um Destilador Solar para tratamento da água de produção dos poços de petróleo, com vistas a se obter um efluente passível de utilização na agricultura e geração de vapor.

Os objetivos específicos são:

- verificar a eficiência do destilador solar a ser utilizado no tratamento da água de produção;
- reduzir o Teor de Óleos e Graxas (TOG) do efluente, que varia entre 5 a 20 mg/L;

- reduzir a Dureza da água de produção, de modo que ela passe de uma água muito dura para classificação de água branda;
  - e reduzir a quantidade dos demais constituintes que impossibilitam o uso dessas para outros fins, de modo que venha a satisfazer os requisitos do CONAMA quanto às características da água para agricultura, bem como atender às especificações para geração de vapor.
-



---

## **CAPÍTULO II: ASPECTOS TEÓRICOS**

---

## 2. Aspectos teóricos

### 2.1 – *O petróleo e os mecanismos de produção*

O petróleo é definido como uma mistura complexa de hidrocarbonetos gasosos, líquidos e sólidos e vários outros componentes orgânicos como fenóis, ácidos graxos e enxofre. Sua composição de parafinas vai desde as de cadeia C1 até C30<sup>+</sup>, sendo que até C12 é chamado gás natural.

Dentre suas características pode-se dizer que é uma substância menos densa que a água (densidade média), e composição variada que inclui hidrocarbonetos com outros elementos como oxigênio, enxofre, nitrogênio, etc. Sua coloração também pode assumir diversos aspectos do castanho claro ao preto, passando pelo verde ou rosa. Todas essas propriedades são decorrentes do campo onde o óleo é produzido. Podem-se ter óleos pesados (baixo API) ou muito leves (alto API). Os mais interessantes economicamente são os leves, por serem mais facilmente explorados e recuperados, além de originarem produtos de maior valor agregado.

O petróleo é utilizado pelo homem desde a antiguidade, onde era usado para impermeabilizar as embarcações, mais tarde começou a ser utilizado como combustível para o acendimento de lamparinas e lampiões. Até então era obtido de exudações ou de poços denominados surgentes.

Com o advento dos motores a diesel e das descobertas das potencialidades dessa substância, se começou a desenvolver métodos de exploração e exploração desse mineral, surgindo aí os métodos tradicionais de produção. Junto com a produção do óleo, começou também a produção de água.

O desenvolvimento tecnológico possibilitou a recuperação de óleo em poços maduros que já estavam ou seriam abandonados. Entre esses métodos estão os que utilizam a injeção de água (seja só ou junto com tensoativos e surfactantes) e injeção de vapor, aumentando os volumes de água produzida.

### 2.2 - *Água de produção de petróleo*

Como já foi mencionada, a produção do petróleo exige a manipulação de volumes de água proporcionais ao volume de petróleo produzido, sendo que esses volumes tendem a

---

aumentar à medida que se caminha para a fase madura da vida dos campos de produção. Devem-se então fornecer equipamentos, softwares e desenvolver procedimentos para que se gerencie a injeção, o tratamento, a reinjeção e o descarte de água produzida.

É denominada água de produção toda água produzida (carreada) junto com o óleo, seja ela proveniente da formação geológica (água de formação) ou água de injeção. Pode estar presente na forma livre, em fase diferente do óleo, ou em emulsão (Fernandes Júnior, 2002). Observa-se na Figura 2 as ocorrências da água de produção, onde no caso da produção de GLP (Gás Liquefeito de Petróleo), as águas produzidas são águas de condensação (Azevedo, 1998).

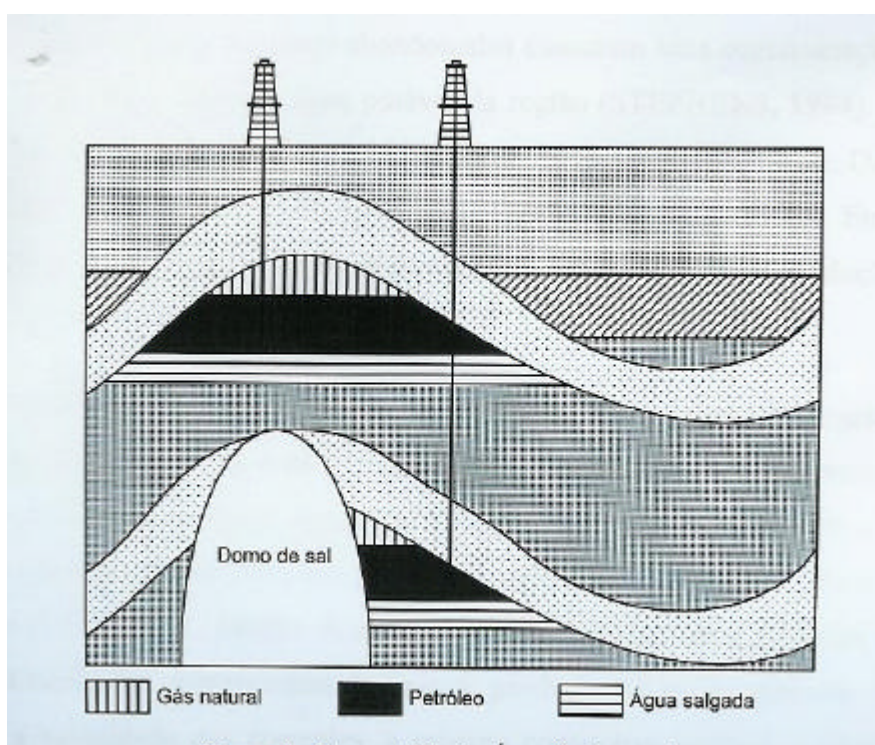


Figura 2: Poços produzindo petróleo e água. (Fonte Azevedo, 1998)

Segundo Azevedo (1998) as águas de produção são consideradas o rejeito de maior volume em todo processo de exploração e produção do petróleo, configurando-se assim como um grande problema ambiental, operacional e gerencial.

Lima (1996) referencia que as causas para produção de água contida no reservatório são os poços de petróleo perfurados próximos à interface óleo/água, poços produtores de óleo em etapa posterior de produção (campos maduros), em que houve avanço da frente de água até a coluna produtora, falhas no revestimento dos poços, recuperação secundária, onde água na forma líquida ou de vapor é injetada no reservatório para aumentar ou mesmo manter a produção.

Segundo Thomas *et al.* (2001), a quantidade de água produzida associada com o óleo varia muito, podendo alcançar valores superiores a 90 % do que é produzido ao fim de vida produtiva do poço.

Águas oriundas de formações produtoras de hidrocarbonetos apresentam sais, microorganismos, gases dissolvidos e materiais em suspensão, entre eles cálcio, magnésio, sulfato, bário e estrôncio. Geralmente tem pH menor que 7. Entretanto essa composição varia de acordo com a formação de onde o óleo foi captado. Logo, águas com essas características são nocivas ao meio ambiente, quando nele lançadas, sem tratamento prévio. De acordo com Bessa *et al.* (2001), as águas de produção da Bacia de Campos (Rio de Janeiro) possuem um médio de Teor de Óleos e Graxas (TOG) de 218,25 mg/L, enquanto o teor de Sólidos Dissolvidos (TDS) é da ordem de 80.000 mg/L.

Fernandes Jr (2002) comenta que os sólidos dispersos nas águas de produção são areia, lodo, argila, outros silicatos e gipsita e que os teores de sais podem variar entre 15.000 mg/L a 300.000 mg/L. Frisa ainda, que a corrosividade dessas águas está associada aos cloretos e que o poder incrustante está relacionado aos sulfatos e carbonatos. Além disso, a presença de grandes volumes de água de produção é sempre indesejável, pois aumenta os custos com transporte, energia, armazenamento e os problemas de incrustação e corrosão às tubulações e equipamentos.

Azevedo (1998) aponta que a composição das águas de produção varia ao longo da vida útil de um campo produtor, apresentando os componentes dissolvidos divididos em três classes: compostos inorgânicos, incluindo metais pesados e radionuclídeos; compostos orgânicos, incluindo alifáticos (polares ou não), aromáticos (polares ou não) e ácidos graxos e aditivos (os quais podem ser orgânicos ou inorgânicos).

Segundo Curbelo (2002), a corrosividade da água de produção está relacionada aos teores de gás carbônico, H<sub>2</sub>S e oxigênio.

Araújo apud Lima (1996) fala que a solubilidade dos hidrocarbonetos na água aumenta com a temperatura e diminui com o aumento da salinidade.

Estudos realizados por Silva (2002) nas águas de produção da Bacia Potiguar que são recebidas na Unidade de Tratamento e Processamento de Fluidos (UTPF) de Guamaré dão conta que a estação de tratamento recebe essa mistura água-óleo (basicamente) com um TOG médio de 100 mg/L.

Com respeito ao comportamento das águas de produção, Silva *et al.* (2002), fizeram um estudo sobre dados de Equilíbrio Líquido-Vapor (ELV) para esse sistema aquoso. Eles compararam resultados experimentais com dados da literatura para o sistema água-decano,

---

água bidestilada, decano puro e água de produção. Foi observado que o coeficiente de distribuição para o sistema decano-água foi de 0,4 (com uma variação de 0,02), evidenciando que a maior parte do hidrocarboneto fica na fase líquida. Esses resultados dão suporte para admitir que na destilação da água de produção, apenas 40% dos compostos de hidrocarbonetos devem passar para a fase vapor, reduzindo significativamente a quantidade de contaminantes na água destilada, visto que os mesmos autores encontraram semelhanças nas curvas de pressão de vapor para os quatro sistemas estudados.

O tipo de tratamento dado às águas de produção é variado, mas pode ser basicamente de quatro tipos: Físicos, Físico-químicos (que são os mais convencionais), Fotoquímicos ou Biológicos ou ainda, uma combinação entre eles. O sistema de tratamento adotado em Guamaré é do tipo Físico-químico e consiste de um sistema decanto-flotador mais a adição de um polieletrólito e posterior passagem por um separador Eletrostático (Silva, 2002). O efluente, já dentro dos padrões de lançamento estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 20 (1986), é encaminhado através de emissários submarinos para disposição final no mar.

O sistema de tratamento sugerido nesse estudo é a adoção da destilação solar para polimento no efluente a ser descartado, de modo que o mesmo possa ser aproveitado para outros fins.

### ***2.3 - O problema ambiental***

O lançamento de efluentes no meio ambiente é regulamentado pelos órgãos ambientais e de saúde pública. Qualquer que seja o destino final do rejeito, ele deve passar por algum tipo de tratamento e se adequar aos requisitos para disposição final no ambiente a que se destina.

As águas de produção devem ser tratadas de modo a se extrair a máxima quantidade de óleo possível e diminuir a concentração dos demais constituintes. Neff *et al.* (1988) *apud* Azevedo (1998) relata que o efeito do descarte em um corpo de água depende da localização do duto de descarte, sua profundidade e da energia deste corpo de água (razão pela qual a destinação final comumente empregada é o descarte no mar), visto que esta energia tem grande influência na taxa de diluição dos componentes da água de produção no meio ambiente. O impacto do descarte da água de produção diretamente no mar pode ser genericamente caracterizado pela toxicidade da água e pela sua carga orgânica. A carga orgânica da água de produção, que pode ser medida de forma indireta como Carbono

---

Orgânico Total (TOC), pode representar um problema bastante significativo para o meio ambiente. Muitas plataformas de produção de petróleo descartam um nível de DQO equivalente ao produzido por uma cidade de 300.000 habitantes (Hansen & Davis (1994) *apud* Azevedo, 1998). Então, é necessário e obrigatório seu tratamento antes do lançamento.

Após o tratamento, a água de produção da UTPF de Guamaré envia seu efluente tratado por meio de um emissário submarino de 20 km de extensão. Pois, apesar dessa água ter tido seu teor de óleos e graxas reduzido de, aproximadamente, 100 mg/L para valores entre 5 a 15 mg/L, ainda configura-se como tóxica para ser lançada em lagoas, rios ou solo.

De acordo com Curbelo (2002), os órgãos que cuidam da preservação do meio ambiente têm se manifestado contra o descarte das águas produzidas tanto nos oceanos quanto na terra, estabelecendo critérios rígidos em relação aos teores de óleo, presença de metais pesados e produtos químicos usados na recuperação avançada dos poços.

A Legislação vigente, Resolução nº 20 do CONAMA de 1986 (Vide anexo 1 onde são listados os padrões para lançamento de efluentes), estabelece que o limite máximo de TOG em efluentes para lançamento em corpos d'água é de 20 mg/L (sendo que a Legislação mundial é mais rigorosa).

De acordo com von Sperling (1995) os requisitos de qualidade para uma água ser usada na agricultura é que ela seja isenta de substâncias químicas prejudiciais à saúde, ao solo e às plantações e que não possua salinidade excessiva. Nesse trabalho, escolheu-se comparar os resultados obtidos às normas estabelecidas para águas de classe 3 (CONAMA).

Pela resolução CONAMA n.º 20, de 18 de junho de 1986, as águas destinadas a irrigação se enquadram nas classes 1 a 3. Sendo que as Classes 1 e 2, enquadram as águas que deverão ser utilizadas na irrigação de hortaliças e plantas frutíferas. Os requisitos de qualidade dessa água são mais rigorosos. A Classe 3, trata das águas que possam ser usadas na irrigação de culturas arbóreas, cerealistas e forrageiras e estabelece o seguinte critério:

- a) materiais flutuantes, inclusive espumas não naturais: virtualmente ausentes;
  - b) óleos e graxas: virtualmente ausentes;
  - c) substâncias que comuniquem gosto ou odor: virtualmente ausentes;
  - d) não será permitida a presença de corantes artificiais que não sejam removíveis por processo de coagulação, sedimentação e filtração convencional;
  - e) substâncias que formem depósitos objetáveis: virtualmente ausentes;
  - f) número de coliformes fecais até 4.000 por 100 mililitros em 80% ou mais de pelo menos 5 amostras mensais colhidas em qualquer mês; no caso de não haver, na região, meios
-

disponíveis para o exame de coliformes fecais, índice limite será de até 20.000 coliformes totais por 100 mililitros em 80% ou mais de pelo menos 5 amostras mensais colhidas em qualquer mês;

g) DBO<sub>5</sub> dias a 20°C até 10 mg/L O<sub>2</sub>;

h) OD, em qualquer amostra, não inferior a 4 mg/L O<sub>2</sub>

1) Turbidez: até 100 UNT;

j) Cor: até 75 mg Pt/L;

1) pH: 6,0 a 9,0.

As concentrações de Sulfato e Cloretos devem ser inferiores a 250 mg/L e a concentração de Sólidos Dissolvidos Totais é limitada a 500 mg/L; Nitrato e Nitrito não podem ter concentrações superiores a 10 mg/L NO<sub>3</sub> - N e 1 mg/L NO<sub>2</sub> -N, respectivamente, enquanto o Nitrogênio amoniacal não pode estar presente em concentrações maiores que 1,0 mg/L N. Com respeito aos metais pesados, essa mesma resolução do CONAMA estabelece teores de Ferro solúvel e Zinco não superiores a 5,0 mg/L. Os limites para Cádmiu, Chumbo, Cobre e Mercúrio são 0,01 mg/L Cd, 0,05 mg/L Pb, 0,5 mg/L Cu e 0,002 mg/L Hg, respectivamente.

Já as especificações necessárias da água para geração de vapor, é que ela não seja incrustante, nem corrosiva e não cause problemas ao processo produtivo. Para tanto, essas águas passam por diversos pré-tratamentos como gradeamento, filtração grosseira, sedimentação natural, clarificação, filtração, cloração, aeração, abrandamento por precipitação, desmineralização e desaeração, que têm os objetivos principais de remover sólidos suspensos e finos dissolvidos, além de retirar a dureza da água provocada por sais de cálcio e magnésio, principalmente, que poderia acarretar os problemas de corrosão ou incrustação, danificando a planta.

#### ***2.4 – Parâmetros físico-químicos analisados***

Nesse estudo foram analisados parâmetros físico-químicos na água destilada, afluenta e no resíduo da destilação. Esses parâmetros analisados permitem caracterizar as amostras e monitorar a operação do destilador:

---

- Temperatura – a temperatura é um dos parâmetros de grande importância. No processo de destilação solar, quanto maior for a temperatura maior será a taxa de evaporação da água, conduzindo a maiores rendimentos. Mas essa não é a única importância do parâmetro nesse estudo. Como a amostra utilizada é uma mistura complexa de substância com vários pontos de ebulição diferentes, diferentes volatilidades, a faixa de temperatura em que vai ocorrer a evaporação é seletiva e terminará por definir a qualidade do destilado. van Ness (1996) descreve que temperatura é o grau de calor ou aquecimento de um corpo, na prática isto significa que quanto maior a temperatura maior o grau de agitação das moléculas de determinado sistema. Esse parâmetro tem influência direta também na determinação de vários outros. As pressões de saturação atingidas no destilador serão função da temperatura da água ou vapor. Além disso, os gases normalmente dissolvidos na água perdem solubilidade com a elevação no grau de aquecimento, por isso é tão importante que após a destilação a temperatura do destilado não esteja muito elevada para que seu teor de OD (oxigênio dissolvido) não caia abaixo dos limites desejados.
  - pH - potencial hidrogeniônico – mede a concentração de íons  $H^+$  presentes. A definição formal de pH é o logaritmo decimal do inverso da concentração hidrogeniônica. Nas condições padrão (25 °C, 1 atm) pH igual a 7 corresponde a neutralidade. Valores inferiores indicam uma água ácida e superiores uma água básica. Os valores de pH tem muita relação com a dureza e quantidade de carbonatos em uma amostra.
  - Condutividade – está relacionada com a capacidade de conduzir corrente elétrica. A água pura é uma má condutora de corrente elétrica em face de sua fraca ionização. Logo, a condutividade das águas está associada a quantidade de sólidos dissolvidos, notadamente sais, presentes na mesma. Quanto maior for a condutividade tanto maior a salinidade da água.
  - TDS – Sólidos Totais Dissolvidos – representa todos os sólidos dissolvidos na amostra e é usado como padrão na Legislação para classificação de águas. Tem relação com a condutividade, sendo-lhe diretamente proporcional. Águas de produção têm valores elevados de TDS por causa dos sais presentes nas mesmas. Segundo o Manual Buckman, pode-se determinar os TDS através de relações matemáticas em função da condutividade. Observando a Tabela 1, pode-se verificar o modo dessa determinação.
-



Tabela 1: Relações para determinação dos TDS em função da condutividade

Condutividade (mS/cm)	TDS (mg/L)
Menor que 1000	0,68 x condutividade
De 1000 a 4000	0,75 x condutividade
De 4000 a 10000	0,82 x condutividade

Deve ficar claro que esse método de determinação de TDS é aproximado, visto estar baseado numa relação, configurando-se como uma medida indireta de obtenção desses dados. De modo que a maneira mais usual de determinar os TDS é por gravimetria.

- Alcalinidade – a alcalinidade indica a capacidade de reação de um meio às alterações de pH, em face da adição de ácido. É seu poder de tamponamento. Embora seja desejável via de regra, pode ser um problema quando atinge valores muito elevados.
- Dureza – é a denominação genérica dada à soma das concentrações dos íons de metais polivalentes presentes na água, como cálcio, magnésio, ferro, alumínio, manganês, entre outros. Entretanto, os elementos principais na constituição da dureza de uma água são os sais de cálcio e magnésio. Águas duras apresentam vários inconvenientes às atividades humanas. Na indústria, o uso de águas duras danifica os equipamentos e tubulações, diminuindo sua vida útil e eficiência, podendo até mesmo provocar acidentes com o passar dos anos, porque os sais que constituem a dureza, tendem a precipitar a altas temperaturas, acumulando-se e causando incrustações e entupimento. As águas podem ser classificadas quanto à dureza em brandas e duras conforme Tabela 2 retirada do Manual Buckman:

Tabela 2: Classificação das águas quanto a dureza total

Dureza Total (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	Classificação
Até 15	Muito branda
De 15 a 50	Branda
De 50 a 100	Moderadamente dura
De 100 a 200	Dura
Acima de 200	Muito dura

Devido os sais de cálcio e magnésio serem os principais responsáveis pela dureza de uma água, esse parâmetro fica dividido em três categorias: dureza total que representa a soma

de todas as espécies de dureza; dureza cálcica que é a parcela da dureza constituída pelos sais de cálcio e dureza magnésiana. Para obtenção das frações que causam a dureza, determina-se a dureza total e a cálcica e por diferença obtém-se a magnésiana.

- Cloretos – os ânions cloretos estão presentes em grandes concentrações em águas salinas, principalmente sob a forma de cloreto de sódio. Segundo Macedo (1996) os cloretos, com exceção dos de prata, mercurioso e de chumbo, são altamente solúveis em água e por isso encontram-se nas águas de produção. A alta concentração de cloretos em água para irrigação pode levar à salinização do solo e prejudicar o bom desenvolvimento das culturas ali presentes.
  - Sulfatos – os sulfatos são uma das formas mais estáveis do enxofre, em grandes concentrações em águas para consumo humano têm efeito laxativo. Na indústria, os sulfatos encontrados na água podem ser reduzidos a sulfetos ocasionando corrosão nas tubulações. A irrigação com águas contendo teores de sulfato acima do que a norma determina tem efeito semelhante ao dos cloretos.
  - Turbidez – a turbidez de uma água é ocasionada pela presença de sólidos em suspensão. Elevada turbidez em corpos de água dificulta a passagem da radiação solar, o que é altamente indesejável pois prejudica a fauna e a flora aquática.
  - TOG – Teor de Óleos e Graxas – o teor de óleos e graxas de uma água ou efluente é função de todas as substâncias solúveis em hexano. Nas águas de produção, os óleos e graxas que estão presentes são de origem mineral e por isso de mais difícil remoção e biodegradabilidade. A presença de óleos e graxas em efluentes da indústria petrolífera representa um dos principais contaminantes a serem removidos nos processos de tratamento. As empresas produtoras de óleo precisam obedecer a normas cada vez mais rígidas para descarte de seus efluentes, de forma que existe a necessidade do constante monitoramento de seus rejeitos. Esses óleos formam emulsões estáveis com a água que são difíceis de quebrar. Tratamentos para remoção desse parâmetro são onerosos e nem sempre dão o resultados esperado. Nos corpos de água, os óleos e graxas dificultam as trocas gasosas e a passagem da luz, provocando danos a esses ecossistemas.
  - COT – ou TOC - o Carbono Orgânico Total é a medida de todos os carbonos orgânicos que estão presentes em determinada amostra de água. Esse foi o principal parâmetro de controle usado neste trabalho.
  - DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio - a DBO é a medida da quantidade de oxigênio consumida pelos microorganismos na oxidação da matéria orgânica. Trata-se de uma medida indireta da quantidade da matéria biodegradável. Águas de produção não
-

costumam ter DBO elevada quando comparada a DQO, pois dificilmente a matéria presente ali (óleos e graxas) é biodegradável.

- DQO – Demanda Química de Oxigênio – essa determinação foi criada para indicar o potencial poluente de efluentes que possuem baixa DBO por não serem degradáveis. A DQO é uma medida indireta da matéria quimicamente degradável por um oxidante forte em presença de catalisador. Sua determinação é mais simples e rápida que a DBO. Para verificação da biodegradabilidade de um sistema faz-se a relação DQO/DBO, quanto menor for essa relação mais biodegradável é o sistema. O valor da DQO é sempre superior a DBO. Se a relação for 1, significa que o sistema é totalmente biodegradável.
- OD - Oxigênio Dissolvido – o oxigênio é um dos gases fundamentais a vida. Águas muito poluídas são pobres nesse gás porque sua solubilidade diminui com o aumento da concentração de sais e da temperatura. Além disso, águas muito turvas, também são pobres em oxigênio, por terem suas trocas gasosas dificultadas. Quanto maior a poluição, ou quantidade de matéria orgânica de uma água maior o consumo de oxigênio pelos microorganismos aeróbios.

## ***2.5 - A energia Solar***

A energia solar tem sido usada pelo homem desde a antiguidade. A História registra que em 212 a.C., a cidade de Siracusa foi defendida por Arquimedes que, utilizando espelhos côncavos formados por segmentos de espelhos planos, incendiara a esquadra de Marcelus. A invasão romana havia sido derrotada pelo sol. Esta é provavelmente a primeira aplicação bélica da energia solar que se tem notícia em toda a História da Humanidade.

Foi na verdade a partir do século XVI que os estudos para a utilização da energia solar foram aprofundados. Data de 1560 a construção de um alambique solar pelo cirurgião francês Ambroise Paré.

O Sol, fonte de vida e origem dos outros modos de energia pode satisfazer as necessidades energéticas da humanidade, se for desenvolvida tecnologia para tanto. Bezerra (2001) afirma que o sol é, em última análise, a fonte de energia responsável pela maior parte da energia existente na superfície do globo terrestre. Ainda de acordo com esse autor a quantidade de energia solar é caracterizada pela constante solar que, fora da atmosfera terrestre, é da ordem de  $1,37 \text{ kW/m}^2$ . Ao atingir a superfície terrestre, a energia solar já se

---

encontra bastante diluída, motivo pelo qual os sistemas de captação da energia do sol ocupam áreas tão grandes. Com respeito à qualidade dessa energia, sua convertibilidade em trabalho é de aproximadamente 95 %, e que, segundo o mesmo autor, ela é praticamente idêntica à radiação do corpo negro a 6000 K.

A radiação eletromagnética vinda do sol incide sobre a terra distribuída entre radiação ultravioleta (3 %), visível (42 %) e infravermelha (55 %).

A energia solar pode ser considerada inesgotável do ponto de visto humano, apesar da massa de sol diminuir cerca de 5 Gg/s.

No Brasil em cada metro quadrado de solo, irradia em um ano aproximadamente 1.500 quilowatt-hora de energia. Esta energia pode ser transformada em outras formas úteis como, por exemplo, em eletricidade.

Entretanto, esta energia é sujeita a flutuações e variações. Sabe-se que, a radiação é menor no inverno, assim é de fundamental importância buscar tecnologia de recepção, acumulação e distribuição da energia solar. Durante o presente ano, o Sol irradiará na Terra quatro mil vezes mais energia que o consumo. O Brasil possui os mais elevados índices mundiais dessa fonte energética.

A energia solar pode ser obtida através de uma placa solar. Existe o tipo que utiliza a luz do sol apenas para aquecimento de água. Consiste em uma superfície escura que absorve a energia do sol e a transforma em calor. Um segundo tipo converte a energia do sol diretamente em eletricidade. É composta de células solares feitas de materiais semicondutores. São as chamadas células fotovoltaicas. Quando as partículas da luz solar (fótons) colidem com os átomos desses materiais, provocam o deslocamento dos elétrons, gerando uma corrente elétrica, usada para carregar uma bateria. Cada metro quadrado de coletor fornece 170 watts.

A energia solar demora aproximadamente 9 minutos para chegar a Terra em ondas curtas e médias. Quando chega na atmosfera 30% dessa energia é refletida devido à presença de uma camada de proteção natural de ozônio.

O Sol mantém todo sistema solar aquecido, variando, entretanto as temperaturas entre os planetas mais distantes e os mais próximos, e mantendo a temperatura da Terra em torno de 300K. A energia produzida pelo Sol é devida às fusões nucleares que ocorrem em seu interior. A energia então chega à Terra através dos fótons, os quais interagem com a atmosfera, a superfície terrestre e todos os corpos sobre ela.

Esta energia que chega à Terra é variável devido à distância entre o Sol e a Terra que é variável assim como características de convecção do calor dentro do próprio Sol. A energia

---

solar interage com os oceanos e a atmosfera da Terra causando correntes de convecção térmica em ambos, e são estas correntes de convecção na atmosfera que determinam as condições meteorológicas no mundo inteiro. Estas correntes de convecção são responsáveis também pelos ventos, os quais eram utilizados desde a antiguidade para mover navios e moinhos.

Todos os corpos emitem ou refletem energia radiante. Quanto maior a sua temperatura, maior a emissão.

O Sol está a 5770K (mais ou menos 5500°C). Sua superfície emite 68 milhões de Watts por cada metro quadrado. A Terra se encontra a 150 milhões de Kilômetros de distância, de forma que a radiação que chega a sua órbita é apenas 1360 Watts/m<sup>2</sup>.

Os continentes, os oceanos, as nuvens e os gases atmosféricos absorvem a radiação de ondas curtas, emitindo e absorvendo radiação térmica (ou de onda longa), de acordo com suas temperaturas e sua composição física e química e trocam calor entre si de diversas formas: misturando massas de ar, transportando massas de vapor e calor sensível, evaporando e precipitando água (processos termodinâmicos).

No Brasil, embora a geração de energia solar ainda seja pequena, estima-se que a produção gere anualmente cerca de 20 milhões de Megawatts-hora de eletricidade, o suficiente para abastecer 15 mil residências de dois cômodos. Ainda é pouco, visto que o nosso país é um dos mais ricos no mundo em incidência de raios solares. Alguns municípios do Nordeste, como Petrolina (PE), Floriano (PI) e Bom Jesus da Lapa (BA), por exemplo, recebem intensidade de luz solar comparável à registrada em Dongola no Sudão, o ponto do planeta onde o Sol incide com maior potência.

A energia solar está se tornando cada vez mais competitiva em relação às hidrelétricas e a tendência é que esse custo de produção diminua ainda mais.

São diversas as aplicações da energia solar, das mais simples às mais sofisticadas. Os coletores solares têm sido muito usados principalmente após a crise energética que o país enfrentou recentemente. Além dos coletores destaca-se a aplicação da energia solar nos secadores, fogões solares e ainda destiladores solares.

---

## 2.6 - Destilação convencional

A destilação é uma operação unitária que consiste na separação de duas ou mais substâncias líquidas por diferença de seus pontos de ebulição. Esse tipo de operação é muito usado nas indústrias, de um modo geral, para purificação de produtos.

Um dos usos mais comuns da destilação é a dessalinização da água nos laboratórios de química do mundo, sendo a água destilada um elemento básico para se realizar análises. Nesse uso a destilação cumpre bem seu papel retirando os sais da água, qualidade que é medida pela redução da condutividade. Teoricamente, a destilação é capaz de remover toda matéria não volátil (Macedo, 1996), entretanto segundo Lorch (1987) *apud* Macedo (1996), gases dissolvidos tais como dióxido de carbono e amônia podem estar presentes no destilado.

Um fluido pode existir sob as formas líquida, gasosa ou de vapor. Para um fluido puro, a uma dada pressão, a transição do líquido para o vapor ocorre à mesma temperatura, a qual é denominada temperatura de saturação ou de equilíbrio (Kern, 1980).

A temperatura normal de ebulição ( $T_{eb}$ ) da água é de 100 °C. Entretanto devido a sua pressão de vapor, moléculas de água começam a evaporar bem antes que sua temperatura atinja a  $T_{eb}$ , na pressão de 1 atm. Na realidade, a massa de água líquida que se encontra no planeta e seu vapor, estão no denominado equilíbrio dinâmico. Contudo, se em determinado sistema, um gás puro entra em contato com um líquido, esse retira vapor do líquido (Himmelblau, 1984).

Nos processos de destilação, procura-se sempre manter uma corrente de líquido, comumente mais fria que a de vapor, de modo a deslocar-se o equilíbrio e obterem-se as maiores eficiências de separação. Esses processos são regidos pelas transferências de calor e quanto maior for o coeficiente de transferência de calor global, mais eficiente será o fluxo de energia, possibilitando a diminuição das áreas necessárias à instalação das plantas de destilação.

Segundo van Ness e Smith (1980), ocorre equilíbrio de fases quando, na ebulição da água líquida à pressão atmosférica, o líquido e o vapor estejam intimamente misturados. Quando se suspende o fornecimento de calor e se isola completamente o sistema, não há tendência de modificação, de modo que a taxa média de passagem de moléculas entre as fases é a mesma em ambas as direções, assim não há transferência líquida de substâncias entre as fases.

Um dos principais problemas com a destilação é o seu consumo de energia, tornando o uso dessa operação proibitivo para tratamento de efluentes, visto que a energia é uma das

---

utilidades mais caras de uma planta química. A principal característica desse tipo de operação é a vaporização de um ou mais constituintes de uma solução através do calor. O vapor obtido é condensado através do resfriamento.

## 2.7 - A destilação solar.

Como citado anteriormente, os processos de destilação, via de regra, são realizados às custas de muita energia. Esse tipo de utilidade é bastante dispendioso em qualquer indústria. Entretanto como a destilação é uma operação de separação eficiente, principalmente entre a água e sais nela dissolvidos, costuma ser economicamente viável obter água purificada por destilação, principalmente quando as quantidades envolvidas são pequenas. Quando se precisa de grandes quantidades de água, os gastos com energia aumentam demais e torna-se necessário lançar mão de fontes energéticas mais econômicas.

A radiação solar tem sido pesquisada como alternativa para suprimento energético na destilação de água para consumo humano. O processo de destilação solar consiste na evaporação da água numa espécie de estufa, de fundo negro e cobertura transparente, geralmente de vidro. O vapor de água ao tocar na cobertura se condensa, e o acúmulo das gotas provoca o escoamento da água para canaletas dispostas para esse fim.

Os destiladores solares comumente usados são reservatórios de grande área e pequena altura, com cobertura de vidro ou matéria plástica, a qual permite a livre passagem dos raios solares. Inicialmente a água é introduzida nesses reservatórios e fica exposta aos raios solares, resultando na formação de vapor. Este se condensa na cobertura inclinada para converter-se em água doce que, através de canaletas, é encaminhada para os reservatórios de armazenamento. Na realidade a destilação além de remover os sais, também separa os elementos que tenham ponto de ebulição superior ao da água.

Segundo Esteban *et al.* (2000) a cobertura de vidro do equipamento é transparente à radiação solar incidente, permitindo sua passagem, porém é opaca à radiação infravermelha emitida pela água quente.

Fuentes e Roth (1997) afirmam que na destilação solar a transferência de calor por convecção não é desejada sendo inútil ao processo. Quando se diminui o ar presente, as transferências de calor por convecção e radiação tendem a zero, por outro lado, quando a temperatura da água se aproxima de sua temperatura de saturação, a transferência de energia

---

por evaporação tende a 1, desde que a fração transferida por convecção tenda a zero. Nesses casos, obtém-se a melhoria nos rendimentos da destilação solar.

Em coletores solares planos a temperatura pode chegar a 80 °C e seu rendimento diminui de forma linear com a temperatura de operação (Fuentes e Roth, 1997).

Segundo Bezerra (2001), a destilação solar é uma aplicação da energia solar bastante promissora, principalmente em regiões distantes dos centros urbanos e onde o custo das fontes convencionais é bastante alto. De acordo com o mesmo autor, o índice de radiação da energia solar no Nordeste brasileiro, particularmente no Estado da Paraíba, é de 5,2 kWh/m<sup>2</sup> dia (valor sem considerar as perdas térmicas), sendo Natal a cidade onde o índice de radiação solar é o maior de país, logo, é bastante evidente a potencialidade dessa fonte energética. Observe a Figura 3 que mostra a distribuição da radiação solar no planeta.

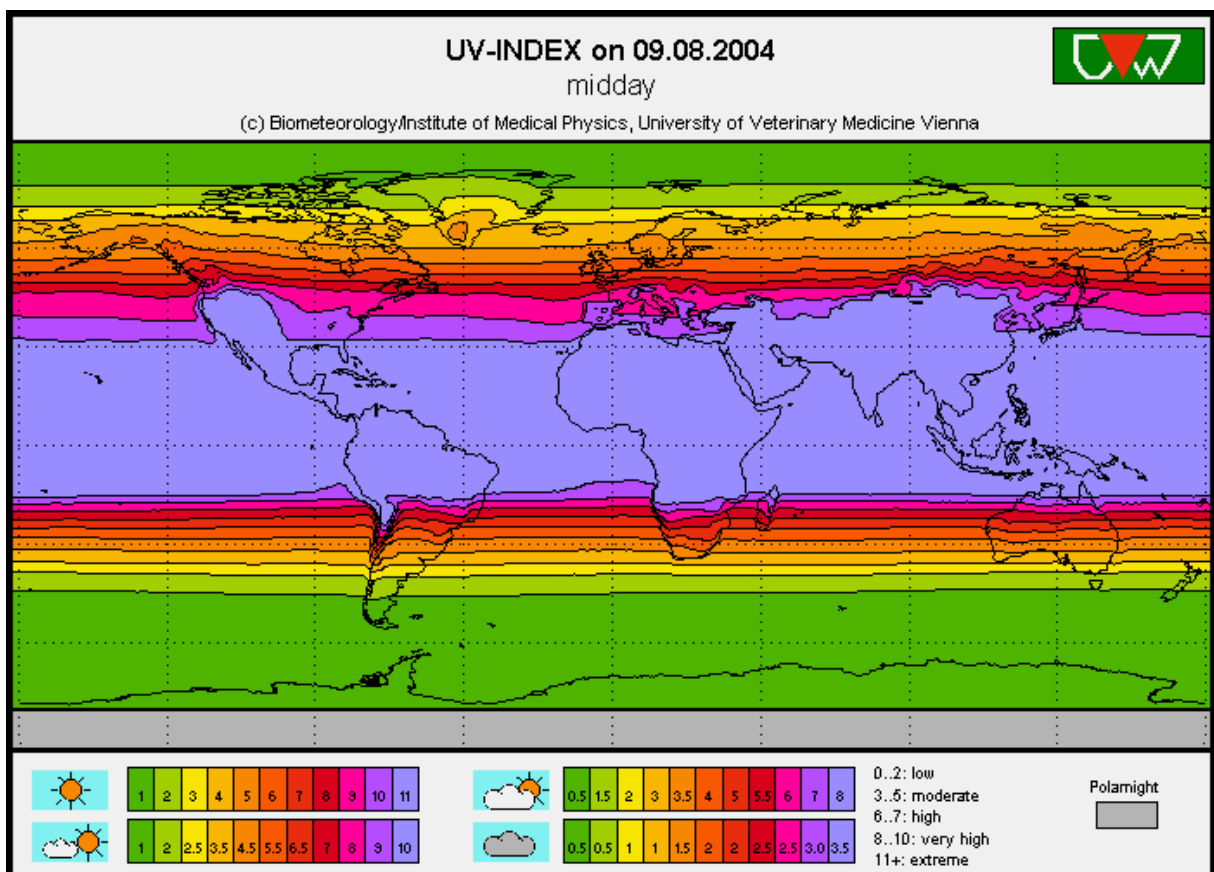


Figura 3: Distribuição da radiação ultravioleta no planeta (UV - Planeta terra, 2004)

Da Figura 3, verifica-se que a faixa central do mapa, mais próxima da linha do Equador, é a que tem mais alto grau de radiação solar. Na realidade a linha do Equador é a região de máxima insolação.



Boucekima (2002) destaca as vantagens da destilação solar para dessalinização de águas, salientando o fato dessa tecnologia utilizar uma fonte energética limpa e gratuita e que não prejudica o meio ambiente. Segundo ele, a destilação solar parece ser um método promissor e uma forma alternativa para o suprimento de água de pequenas comunidades de áreas remotas, como os desertos, enfatizando que o potencial da energia solar em áreas com grande insolação pode ser mais bem desenvolvido e otimizado.

### 2.7.1 – Mecanismos da destilação solar e balanços de massa e energia

De Paul (2000) verificou, através do estudo fluidodinâmico de um destilador de bandeja simples, que o meio dentro do equipamento é uma mistura de ar, vapor de água e água condensada em forma de gotas, em movimento turbulento, para toda faixa de temperatura testada. Esse fluxo turbulento provocaria a homogeneização da temperatura no interior do volume de controle.

De acordo com Fuentes y Roth (1997), as Equações de conservação de energia aplicadas à água (w) e ao vidro (g), respectivamente, para o modelo do destilador de bandeja simples são:

$$m_w C_{pw} \frac{dT_w}{dt} = (Q_{abs} + Q_i) - (Q_c + Q_e + Q_r) - (Q_o + Q_l + Q_b + Q_f) \quad (1)$$

$$m_g C_{pg} \frac{dT_g}{dt} = Q_{abs}^g + Q_c + Q_e + Q_r - (Q_{cga} + Q_{rgs} + Q_d) \quad (2)$$

Em que os termos  $Q_c$ ,  $Q_e$  e  $Q_r$  correspondem a transferência de calor por convecção do ar, transferência de calor por evaporação da água e transferência de calor por radiação entre a água e o vidro. Os símbolos  $m_w$  e  $m_g$  representam os fluxos de massa na superfície aquosa e vítrea, respectivamente e  $C_p$  é o calor específico. As formas para obtenção desses fluxos são mostradas nas Equações (3), (4) e (5):

$$Q_c = h_c A_w (T_w - T_g) \quad (3)$$

$$Q_e = h_e A_w (T_w - T_g) \quad (4)$$

$$Q_r = \sigma \epsilon A_w (T_w^4 - T_g^4) \quad (5)$$

Sendo  $h_c$  e  $h_e$  os coeficientes de convecção e evaporação obtidos experimentalmente, e  $\sigma$  e  $\epsilon$  são a constante de Boltzman e a emissividade.  $A_w$  é a área superficial da lâmina de água.

O coeficiente de transferência por convecção  $h_c$  pode ser obtido pela Equação (6):

$$h_c = 0,075 \left[ \frac{\rho^2 g \beta C_p k^2}{\mu} \right]^{\frac{1}{3}} \left[ (T_w - T_g) + \frac{(P_w)_w - (P_w)_g}{\left( \frac{M_a P}{(M_a - M_w) - (P_w)_w} \right)} T_w \right]^{\frac{1}{3}} \quad (6)$$

Em que:

$\rho$  (kg/m<sup>3</sup>) é a densidade da água salgada;

$g$  (m/s<sup>2</sup>) é a aceleração da gravidade;

$\beta$  é o coeficiente de expansão volumétrica

$C_p$  (J/kgK) é o calor específico;

$k$  (W/mK) é a condutividade térmica;

$\mu$  (Ns/m<sup>2</sup>) é a viscosidade;

e  $P_i$  (Pa) são as pressões parciais.

E  $M_a$  e  $M_w$  são os pesos moleculares do ar e da água, respectivamente.

Para a determinação do coeficiente de transferência por evaporação, Fuentes y Roth (1997) usaram o modelo desenvolvido por Shawaqfeh y Farid, que é função das pressões parciais de vapor da água. Ver Equação (7).

$$h_e = \frac{M_w h_{fg}}{2M_{mix} C_{pmix}} \left[ \frac{1}{(P_a)_w} + \frac{1}{(P_g)} \right] h_c \quad (7)$$

Sendo que nessa expressão  $M_{mix}$  é dado pelo quociente entre as pressões de vapor da água e do ar multiplicadas por suas massas moleculares e a pressão total. E  $C_{pmix}$  é o quociente entre os calores específicos da água e do ar multiplicadas por suas pressões parciais e a pressão total.

As equações para os coeficientes de transferência apresentados aqui foram desenvolvidas baseadas na Relação de Dunkle e nos adimensionais de Nusselt, Prandtl e Grashof.

Al-Hinai *et al.* (2002) apresentam modelos matemáticos para os balanços de massa e energia como uma função da intensidade de radiação solar, admitindo o caráter transiente desse sistema. A Equação (8) mostra o balanço para a cobertura de vidro por unidade de área:

$$m_g C_g \frac{dT_g}{dt} = (a_g I_b + a_{gd}) + (q_{ev+} + q_{r,w-g} + q_{c,w-g}) - q_{r,g-a} - q_{c,g-a} \quad (8)$$

A transferência de calor entre a água e o vidro é apresentada como descrito na Equação (9):

$$q_{ev} = 16,28 h_c (p_w - p_g) \quad (9)$$

em que as pressões de vapor são dadas por funções exponenciais das temperaturas (índice w para água e índice g para o vidro) como nas Equações (10) e (11):

$$p_w = e^{\left( \frac{25317 - 5144}{T_w} \right)} \quad (10)$$

$$p_g = e^{\left( \frac{25327 - 5144}{T_g} \right)} \quad (11)$$

A transferência de calor da água para o vidro por radiação é dada por Dunkle:

$$q_{r,w-g} = 0,9s (T_w^4 - T_g^4) \quad (12)$$

A Equação (12) é similar a Equação (5) do estudo de Fuentes e Roth (2002), sendo que aqui, a emissividade já está substituída e não há considerações sobre a área.

As transferências de calor convectiva entre a base e a cobertura e a perda de calor do vidro para atmosfera são conforme as Equações (13) e (14):

$$q_{c,w-g} = h_c (T_w - T_g) \quad (13)$$

$$q_{r,g-a} = 0,9s (T_g^2 - T_{sky}^4) \quad (14)$$

Al-Hinai *et al.* (2002) usaram métodos computacionais para resolver as equações propostas.

Esses modelos são similares aos apresentados por Bezerra (2001) no sentido de que aqui os balanços também são função da intensidade da radiação solar. O balanço térmico está descrito na Equação (15):

$$\mathbf{a}_v I_r + \mathbf{a}_a I I_r = q_{va} + q_b + C_{as} \frac{dT_a}{dt} \quad (15)$$

onde  $I_r$  é a radiação solar global.

A transferência de calor entre o vidro da cobertura e a água depositada no destilador é dada pela soma das quantidades de calor radioativo, convectivo e evaporativo conforme a Equação (16).

$$q_{va} = q_r + q_c + q_e + \mathbf{a}_v I_r \quad (16)$$

Sendo que o produto  $\alpha_v I_r$  representa a parcela de energia solar que foi absorvida pelo vidro. Bezerra (2001) expressa ainda as perdas térmicas para o ambiente devido as laterais e o fundo do equipamento. Ver equação (17).

$$q_b = K_b (T_a - T_{amb}) \quad (17)$$

Trayford e Welch (1975) *apud* Bezerra (2001) fornecem expressões para a determinação dos  $q_c$ ,  $q_r$ , e  $q_e$ , as quais estão transcritas nas Equações (18), (19) e (20).

$$q_r = 0,9s \left| (T_a + 460)^4 - (t_v + 460)^4 \right| \quad (18)$$

$$q_c = 0,128 \left[ T_a - t_v + \left( \frac{P_a - P_{av}}{39 - P_v} \right) (T_a + 460) \right]^{\frac{1}{3}} (T_a - t_v) \quad (19)$$

$$q_c = 0,0254 \left[ T_a - t_v + \left( \frac{P_a - P_{av}}{39 - P_a} \right) (T_a + 460) \right]^{\frac{1}{3}} (P_a - P_{av}) h_a \quad (20)$$

em que  $t_v$  é a temperatura do vidro de cobertura.

A determinação dos coeficientes de transferência geralmente é feita de modo experimental. Entretanto, essa determinação consome muito trabalho e tempo que poderia ser usado no estudo de outros fatores.

De Paul (2000), determinou o coeficiente convectivo  $h$  para um destilador solar de bandeja com duas águas e ângulo de inclinação de  $20^\circ$  com a horizontal. A relação obtida é uma exponencial função da temperatura da água. (Equação (21)).

$$h = 12,705 \exp(0,0369T_{\text{água}}) \quad (21)$$

Essa relação foi determinada para um range de temperatura variando entre 35 a 66 °C e teve como coeficiente de correlação um  $R^2$  igual a 0,9967.

Para uma faixa de temperatura entre 35 e 55 °C, De Paul (2000), verificou uma relação linear, cujo coeficiente de correlação foi de 0,9863. A relação está apresentada na Equação (22).

$$h = 2,93T_{\text{água}} - 41,26 \quad (22)$$

### 2.7.2 – Tipos de destiladores solares

Existem vários tipos de destiladores solares desde os convencionais, também denominados de destiladores de simples efeito, que podem ter cobertura do tipo uma ou duas águas, até os modelos que foram desenvolvidos a partir desses com o objetivo de otimização e aumento nos rendimentos com diminuição nos custos. Nessa última categoria encontram-se os destiladores solares de multiestágio, os do tipo filme capilar, os capilares com tecido ou tipo mecha, de condensação separada, com aquecimento suplementar e mais uma grande variedade de modelos, todos baseados no princípio do aumento na taxa de evaporação de água pelo aquecimento através de energia solar e a condensação da água destilada e sua recuperação.

#### 2.7.2.1 – Destilador solar do tipo multiestágio

Configura-se pelo aproveitamento do calor latente de condensação da bandeja anterior. A Figura 4 mostra um dos tipos de configuração que este equipamento pode apresentar.

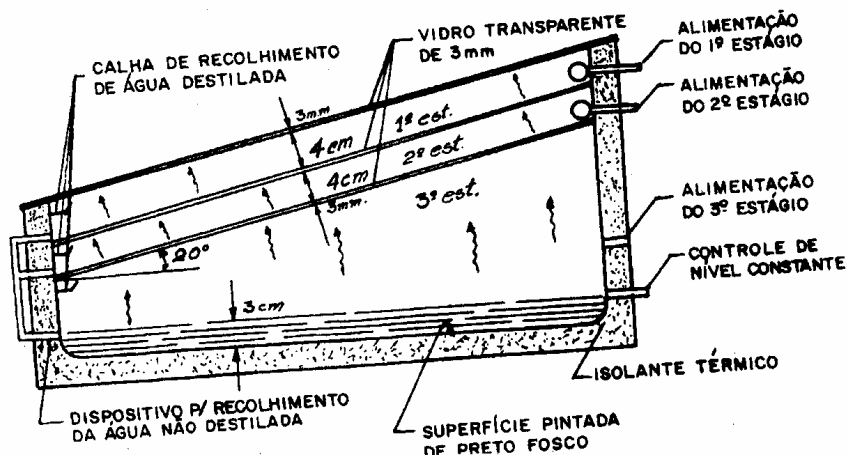


Figura 4: Destilador solar do tipo multiestágio (Bezerra, 2001)

### 2.7.2.2 – Destilador solar do tipo filme capilar

Os destiladores do tipo filme capilar podem ser semelhantes ao tipo multiestágio, aproveitando o calor latente, mas isto não é obrigatório. A principal característica desse destilador é o uso da propriedade de capilaridade da água. A Figura 5 apresenta um modelo desse tipo de destilador.

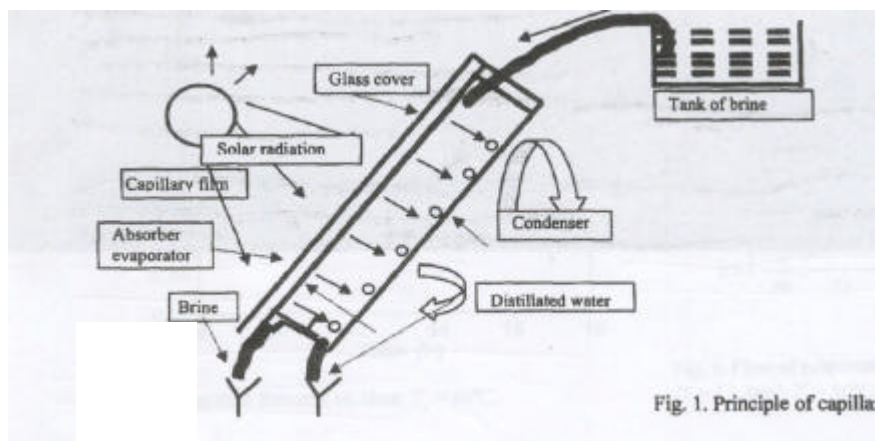


Figura 5: Destilador solar do tipo filme capilar (Boucekima, 2002)

### 2.7.2.3 – Destilador solar do tipo mecha

Os destiladores solares do tipo mecha ou *multiwick* caracterizam-se por possuir uma espécie de tecido recobrendo sua superfície de evaporação que fica embebido da água a ser destilada. Observe Figura 6 um modelo de destilador tipo mecha.

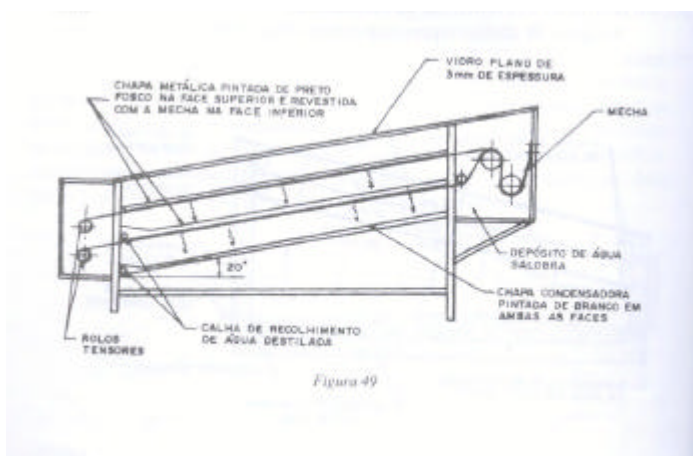


Figura 6: Destilador solar do tipo mecha (Bezerra, 2001)

Os destiladores do tipo mecha também utilizam o princípio da capilaridade.

#### 2.7.2.4 – Destilador solar do tipo condensação separada

É o destilador convencional ao qual foi acoplado um condensador.

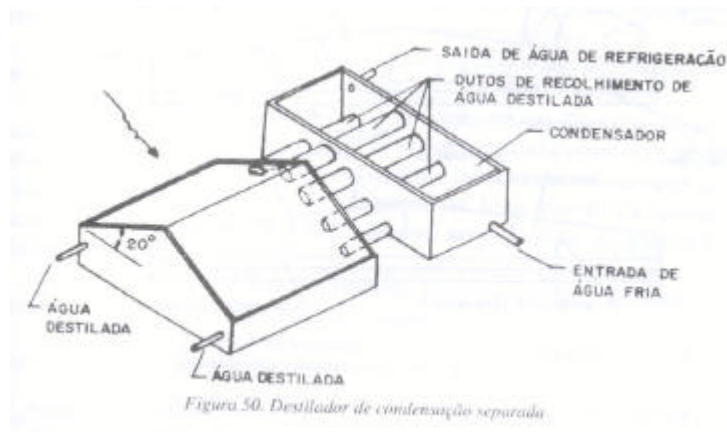


Figura 7: Destilador tipo condensação separada (Bezerra, 2001)

O presente trabalho estudou tratamento de águas de produção em um destilador solar de simples efeito duas águas.

#### 2.7.3 – Eficiência e rendimentos da destilação solar

Os conceitos de eficiência e rendimento de um destilador solar apresentam diferenças sutis entre si, enquanto eficiência faz menção sobre o aproveitamento energético, o rendimento está relacionado com produção.

De Paul (2000), afirma que os modelos teóricos para o cálculo do rendimento de um destilador solar de bandeja não considera a natureza do meio que está fechado no equipamento, nem as características fluidodinâmicas da circulação em seu interior.

Em um destilador solar de bandeja simples o rendimento raramente excede 60% (Fuentes y Roth, 1997), com uma produção diária de até 3,4 L/m<sup>2</sup>dia, sendo necessários estudos e pesquisas a fim de otimizar esse processo. Estes autores estudaram o uso dos destiladores para dessalinização de água marinha ou simplesmente salobra.



Estudos desenvolvidos por Al-Hinai *et al.* (2002) apresentaram rendimentos de 6,78 kg/m<sup>2</sup>d (máximo) e 3,17 kg/m<sup>2</sup>d (mínimo) para o destilador solar de simples efeito, com 0,10 m de isolamento e lâmina de água de 0,05 m; e rendimentos de 10,24 e 3,02 kg/m<sup>2</sup>d para um destilador solar duplo efeito (máximo e mínimo, respectivamente), com os mesmos profundidade de água e isolamento. A média anual para o destilador de simples efeito foi de 4,15 kg/m<sup>2</sup>d, enquanto para o de duplo efeito ficou em 6,1 kg/m<sup>2</sup>d, aumentando em 39% o rendimento anual. Esses autores verificaram ainda que aproximadamente 70% da produção diária ocorria até às 14 horas, isso válido para sua região, visto que a inclinação do sol e os horários de pico do mesmo variam geograficamente.

Macedo (1996) cita exemplos de destiladores na África e na Índia que apresentam rendimentos de 16,4 e 32 L/m<sup>2</sup>d, respectivamente, atingindo eficiência de 50 % no aproveitamento da energia solar incidente.

Dados relacionados ao Brasil, mais precisamente na região Nordeste, mostram como rendimento máximo para o destilador de bandeja de simples efeito uma produção de 7,87 L/m<sup>2</sup>d, tendo como base a entalpia de vaporização da água e o valor médio da energia solar, no Estado da Paraíba. Entretanto como existem as perdas térmicas por condução, convecção e radiação, além de certa perda de água que entra em equilíbrio dinâmico no destilador, admite-se que esse rendimento ficaria em torno dos 4,8 L/m<sup>2</sup>d. (Bezerra, 2001). Vale salientar, no entanto, que a produção de água destilada é função de inúmeros fatores, entre eles os climáticos (ventos, insolação, temperaturas ambientes), os quais o homem não pode controlar e ainda os de aspecto construtivo do equipamento. O modelo do equipamento deve ser de tal modo que possibilite, durante a operação, a minimização dos efeitos climáticos negativos e o melhor aproveitamento das condições desejadas. Essa é a excelência que se deve buscar no projeto e execução dos destiladores solares e para isso deve ser desenvolvida pesquisa para que se possa chegar a esses resultados.

#### ***2.7.4 – Resíduos da destilação solar***

Os resíduos da destilação solar configuram-se como uma questão a mais quando se sugere o uso dessa técnica para o tratamento de efluentes. O fato de se escolher uma tecnologia limpa para minimização de um problema ambiental é algo desejável sem dúvida, e a destilação solar atende esse princípio. Entretanto, como toda atividade produtiva, essa

operação vai gerar um resíduo, que pode ser mais ou menos concentrado, dependendo do tempo de residência da água de produção no equipamento.

#### **2.7.4.1 –Características dos resíduos da destilação solar**

As características do resíduo da destilação solar são função da água de produção original. Sua composição certamente vai ser rica em sais e ainda óleos e graxas, além de metais pesados, o que inviabiliza, *a priori*, o uso do resíduo seco para ração animal.

A proposta desse trabalho é a recirculação do resíduo ao sistema (enquanto possível) e o estudo da composição da matéria seca, para estimativa de sua melhor deposição. E ainda, a possibilidade de seu reuso no cultivo de *Atriplex* como destinação final.

#### **2.7.4.2 –A poluição da destilação solar**

Um outro resíduo produzido pela destilação solar que poderia ser considerado por alguns poluição, é o calor. Na realidade, esse é o tipo de poluição gerada por sistemas que usam a energia solar.

Em grandes plantas de destilação solar ou outra técnica que use a energia do sol é comum o aumento na temperatura ambiente nas vizinhanças do sistema. Contudo, esse problema é mínimo quando se considera o prejuízo causado por combustíveis fósseis. Além do mais, essa poluição não traz prejuízo à fauna ou flora da região, podendo apenas causar o afastamento de algumas espécies de insetos no em torno da planta.

#### **2.7.5 –Desvantagens da destilação solar**

As desvantagens da destilação solar são poucas, sobretudo quando se considera seus benefícios. Entretanto elas existem e estão enumeradas a seguir:

- demanda de grandes áreas para sua instalação;

---

- baixos rendimentos, o que a torna, via de regra, economicamente inviável para implantação em grandes escalas;
- altos custos de investimento para seu *start-up*;
- necessidade de remoção periódica dos resíduos depositados no fundo dos destiladores sob pena de perda de rendimento.

### ***2.7.6 – Vantagens da destilação solar***

As vantagens da destilação solar excedem sobremaneira suas desvantagens:

- baixo custo de manutenção e operação;
  - simplicidade de operação e manutenção, requerendo para sua manutenção apenas a limpeza periódica;
  - uso de uma fonte energética não poluente, abundante e gratuita;
  - altas eficiências de remoção de sais, sempre superiores a 90 %.
-

---

---

**CAPÍTULO III:**  
**ESTADO DA ARTE**

---

---

## 3. Estado da arte

### 3.1 - Destilação Solar

Harding (1872) *apud* Bezerra (2001), construiu na Região Las Salinas no Chile, um grande destilador que durante 25 anos consecutivos produzia diariamente 23 mil litros de água destilada. Cem anos depois, foi feita a comemoração desta instalação de destilação solar, fato ocorrido em Antofagasta no Chile, ocasião em que foi criada a ASSOCIAÇÃO LATINO-AMERICANA DE ENERGIA SOLAR.

Em 1920 o Japão destilava águas do mar (Macedo, 1996) e durante a Segunda Guerra foi desenvolvido um *kit* para sobrevivência dos soldados, que era capaz de dessalinizar pequenas quantidades de água do mar por meio da energia solar (Spiegler *apud* Macedo, 1996).

No Brasil, algumas experiências com destilação solar foram realizadas em 1970, sob os auspícios do ITA- Instituto Tecnológico da Aeronáutica, em São José dos Campos (Dacach, 1990).

Dacach (1979) propôs o uso do destilador solar para resolver o problema da salinidade da água em localidades onde não existe água potável. Em seu livro, ele cita exemplo de países que usam a água marinha para se abastecer dessalinizando-a por meio do destilador solar.

Garcias (1985) testou o uso da destilação solar para obtenção de água potável da água do mar. Para tanto, foram implantados 16 módulos de destilação solar convencional na comunidade de Tibicanga, localizada na Ilha das Peças na Baía de Laranjeiras, Município de Guaraqueçaba. A comunidade (de 132 habitantes na época) era formada por pescadores e tinha carência de água potável.

Cada módulo de destilação possuía área de 10 m<sup>2</sup>, perfazendo uma área total de 160 m<sup>2</sup>. O vidro utilizado na cobertura tinha 3 mm de espessura e operava-se com uma lâmina de água de 0,03 m e ângulo de inclinação de 20 °. A água a ser dessalinizada era água do mar bombeada por bomba do tipo pistão, a qual era conduzida a um reservatório com capacidade para 500 L, de forma que a alimentação dos destiladores era feita por gravidade. O sistema também recebia água de chuva, de modo a aproveitar mais esse recurso hídrico. Os módulos eram montados em paralelo e o sistema operava de forma contínua para água destilada.

---

Nesse trabalho, Garcias (1985) analisou amostras de água antes da destilação e de água destilada para determinar a remoção dos sais e demais contaminantes à água potável. Os resultados apresentaram remoções de sais superiores a 99 %. Os valores médios para alcalinidade, dureza total e pH na água destilada obtidos foram de 5,33 mg/L CaCO<sub>3</sub>, 4,50 mg/L CaCO<sub>3</sub> e 5,33. A concentração de cloretos foi de 0,93 mg/L Cl. Observou-se aqui que a concentração final de sais na água destilada independia de sua concentração na água original, motivo pelo qual não analisou-se a eficiência dessas remoções. Além disso, esses valores variaram bastante ao longo do período de estudo. Como conclusões, ficou evidenciado que o processo de destilação reduz excessivamente o teor de sais na água e que devem ser intensificados os estudos no sentido de aprimorar os modelos procurando soluções mais econômicas e de maior produtividade, além de se procurar determinar a permanência ou não de metais pesados e outros elementos tóxicos nessas águas após a destilação.

Toyama *et al.* (1987), desenvolveram o trabalho ‘*Dynamic Characteristics of a Multistage Thermal Diffusion Type Solar Distillator*’, que trata de um estudo teórico prático, onde os pesquisadores simularam as condições de operação do destilador multi-estágio, através de testes de laboratório em uma planta contendo 5 estágios de 1 m<sup>2</sup> de área e em campo através de uma planta com 10 estágios de 3 m<sup>2</sup> de área. O objetivo era desenvolver um modelo computacional que pudesse prever os rendimentos e os parâmetros físicos envolvidos. Estes autores constaram que as perdas de calor e vazamentos existentes eram desprezíveis. O modelo matemático por eles desenvolvido é composto por equações diferenciais de primeira ordem, as quais foram resolvidas usando o método de Runge-Kutta. O modelo de laboratório foi aquecido por meio de lâmpadas. Os testes de campo foram conduzidos em Okinawa (Japão), onde a temperatura ambiente sofreu uma variação entre 21,6 a 22,9 °C, e os índices de radiação variaram entre 125 W/m<sup>2</sup> das 16 às 17 h e 779 W/m<sup>2</sup> das 13 às 14 h. Os modelos computacionais se adequaram aos dados experimentais.

Tiwari e Singh (1991) derivaram uma expressão analítica para um destilador solar *multiwick* (do tipo mecha) e otimizaram sua operação no tocante a vazão de alimentação e disposição dos tubos perfurados (Figura 8). A inovação nesse trabalho é o uso de fibra plástica como material construtivo, além do controle das vazões de alimentação da água a ser destilada. O sistema opera em regime permanente tanto para alimentação como para as saídas de destilado e resíduo. O trabalho teve por base experimental os resultados pesquisados por Tiwari e Salim. O equipamento pesquisado é composto por cobertura de duas águas de vidro e sistema de tubos perfurados para alimentação. A superfície de evaporação é feita em tecido de juta preto, onde a água a ser destilada percola e umidifica formando um filme capilar.

---

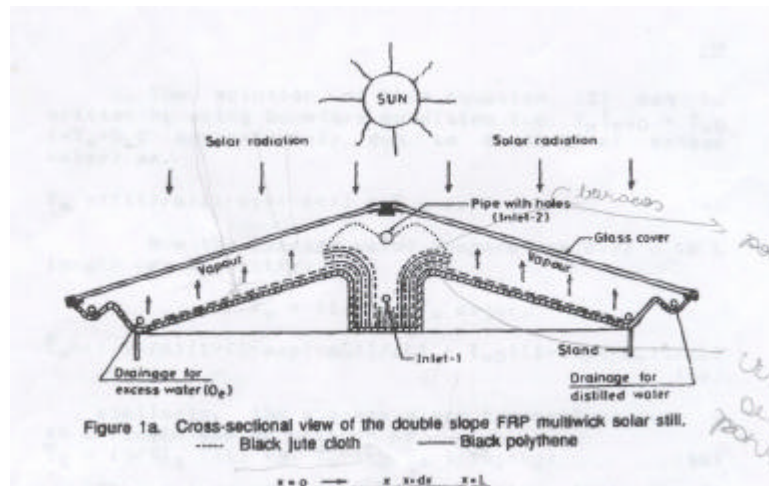


Figura 8: Destilador solar *multiwick* estudado por Tiwari e Sing (1991)

Foram admitidas as seguintes hipóteses na construção da expressão analítica:

- as capacidades caloríficas do vidro e da água são desprezíveis;
- a relação de Dunkle é válida devido as superfícies paralelas da água e do vidro no sistema fechado.

Os problemas advindos desse tipo de operação foram:

- o tecido ficava seco durante as horas de pico da radiação solar devido a ação capilar;
- havia desperdício de água quente nas horas iniciais e finais do dia de operação.

Para resolver esses problemas providenciou-se o aumento da coluna de água no reservatório nas horas de pico e mudanças na conexão do sistema de purga do excesso de água.

A expressão analítica (ver Equação (23)) desenvolvida baseou-se nos fatores climáticos e balanço de energia, bem como os efeitos do fluxo de massa e dos coeficientes de transferência de calor.

$$\left(\frac{dT_w}{dx}\right) + aT_w = f(t) \quad (23)$$

Na equação (23)  $f(t)$  é uma função da intensidade da radiação solar, do coeficiente global de transferência de calor, da absorvidade da superfície negra e da temperatura ambiente instantânea. E o parâmetro é dado pela Equação (24):

$$a = b \frac{(U_{12} + h_b)}{m_w c_w} \quad (24)$$

$U$  (W/m<sup>2</sup>°C) é o coeficiente global de transferência de calor;

$b$  (m) é a largura da base do destilador;

$m_w$  (kg/s) é o fluxo mássico da água e

$c_w$  (J/kg°C) é o calor específico da água.

Devido à modificação proposta no sistema de controle de vazão de alimentação no destilador, observou-se um aumento na eficiência térmica do equipamento. Os resultados teóricos tiveram boa concordância com os resultados obtidos por Tiwari e Salim.

Macedo (1996) fez um trabalho de pesquisa procurando avaliar os melhores métodos para tratamento de águas com altas concentrações de cloretos tanto do ponto de vista técnico quanto econômico. A destilação por evaporação solar foi citada como alternativa viável. Em seu trabalho é destacado que os métodos de dessalinização também poderiam ser empregados na desmineralização de águas efluentes de processos industriais que se destinam ao reuso, o que proporcionaria economia em termos de quantidade de água consumida, prevenindo sobretudo em área de conflitos e escassez própria dos períodos de estiagem e oferecendo maior proteção em termos de qualidade das águas para corpos receptores.

Macedo sugere a rotação na superfície receptora continuamente de modo a manter a incidência da radiação solar sempre normal à mesma. Esse expediente proporciona aumento na captação de energia. Ele destaca ainda que as perdas de energia dependem das condições meteorológicas, como irradiação, temperatura do ar, velocidade dos ventos e do projeto do evaporador. Incluídos nesse item tipo de material, forma e orientação do evaporador e profundidade da camada a evaporar, que afeta a variação diária da temperatura da água salina, o que tem influência decisiva nas perdas. A destilação solar tem sua maior aplicação na dessalinização de águas marinhas.

Melo (1997) fez uma detalhada revisão bibliográfica sobre os diversos tipos de destiladores, que utilizassem energia solar ou não e descreveu o destilador solar atmosférico do tipo regenerativo, o qual poderia ser aquecido por coletores solares. Esse tipo de destilador usa o princípio do filme capilar em tecido, assemelhando-se ao tipo de destilador mecha. O principal foco desse trabalho foi o cálculo das Relações de Economia (RE), utilizadas para determinar a viabilidade econômica do processo de destilação.



Em 1997, Fuentes e Roth utilizaram a destilação a vácuo (um trabalho teórico) para dessalinização de águas salobras e compararam os resultados com a destilação em bandeja simples. Verificaram rendimentos superiores a 60 % e conseguiram anular o efeito da transferência de calor por convecção. A redução da transferência de calor por convecção do ar permite a obtenção de altos rendimentos de destilação em cada uma das bandejas. Visto que, ao eliminar a convecção, só participam do processo de transferência de calor a evaporação e a radiação, de modo que nas vizinhanças, as condições de saturação da água, a eficiência do destilador é próxima de 1. O modelo matemático desenvolvido prevê uma grande fração de transferência de calor por evaporação-condensação (calor latente). Finalmente, a destilação da água em uma torre de bandejas em vácuo com energia solar prediz uma produção de destilado cerca de 20 vezes maior que a produção dos destiladores solares à pressão atmosférica.

Montero *et al.* (2000) estudaram o uso da energia solar para melhoria na qualidade de vida de uma comunidade de baixa renda. Entre os projetos propostos, estava a destilação solar para o abastecimento de água da comunidade em unidades individuais para cada família. O equipamento a ser instalado deveria ter 8 m<sup>2</sup> de superfície de destilação, isolamento de 0,05 m em poliestireno expandido e deveria ser capaz de fornecer 15,2 L/d no inverno e 30,4 L/d no verão, sendo que a radiação solar na região varia entre 13,5 MJ/m<sup>2</sup>d no inverno a 25,5 MJ/m<sup>2</sup>d no verão. Os rendimentos deveriam ser de no mínimo 1,9 e 3,8 L/m<sup>2</sup>d para inverno e verão, respectivamente.

Bezerra (2001) tem realizado estudos sobre o uso de destiladores solares para dessalinização de água salobra no Laboratório de Energia Solar (LabSol) na UFPB. Em seu trabalho ele já construiu um destilador com 60 m de comprimento. De acordo com ele, o Brasil tem grande potencial no uso da energia solar, devido as suas altas taxas de radiação e insolação, destacando ser a região Nordeste privilegiada nessa fonte energética.

Os vitrais dos destiladores duas águas devem sempre ter a orientação norte – sul, com uma das faces voltadas ao nascente e a outra ao poente, de modo a melhor aproveitar a incidência dos raios solares. A inclinação sugerida por Bezerra é de 20°. A produção dos destiladores pesquisados no LabSol variou de 1,9 kg/m<sup>2</sup>d em junho a 3,9 kg/m<sup>2</sup>d em fevereiro. A investigação desses rendimentos se deu entre os meses de janeiro e junho. A inovação nesse estudo foi adoção de filtro de brita na entrada do destilador para remoção dos sólidos e minimização do acúmulo de impurezas na base do equipamento. Essa alternativa tem possibilitado que o sistema opere por períodos mais prolongados sem necessidade da limpeza interna do destilador mais acentuada.

Bouhekima (2002), apresenta um estudo no qual a destilação solar é utilizada para dessalinização de água salobra de modo a suprir as necessidades de água para a população de áreas áridas no sul da Algeria.

O destilador usado nesse trabalho é do tipo filme capilar. As vantagens desse tipo de destilador em relação aos demais seria a recuperação de calor, visto que se usa o calor do vapor de condensação para aquecer outra quantidade de água. Os experimentos foram conduzidos no verão a uma temperatura ambiente de 40 °C. A alimentação do equipamento se deu com água subterrânea geotérmica cuja temperatura na fonte varia entre 65 e 75 °C. A eficiência total dos sistemas de destilação solar é obtida pelo produto entre a eficiência da taxa de absorção da irradiação solar e a utilização da energia absorvida.

Segundo Bouhekima (2002), o modelo de filme capilar apresentou-se superior aos convencionais. Devido à alimentação com águas geotérmicas se conseguiu obter água destilada também à noite, aumentando o rendimento do equipamento.

Al-Hinai *et al.* (2002) fizeram uma investigação paramétrica entre um destilador solar de simples efeito e um de duplo efeito. No estudo, é descrito o uso de duas equações matemáticas para comparar as produtividades nos dois destiladores, além da determinação do ângulo de inclinação ótimo e da espessura do isolamento. Os modelos desenvolvidos além de acharem expressões para o balanço de massa e energia determinaram expressões para o cálculo das pressões de vapor, conforme visto nos Aspectos teóricos. O modelo computacional empregado indicou como inclinação ótima um ângulo de 23° com a horizontal e uma espessura de isolamento de 0,10 m com uma lâmina de água de 0,05 m. Além disso, foi realizada uma análise de custos para os dois modelos de destilador, a qual indicou que o destilador solar de duplo efeito pode produzir água destilada a custos até 15% menores que o convencional.

Ainda em 2002, em artigo apresentado por Saitoh e El-Ghetany é destacado o uso da radiação solar para desinfecção de águas residuárias. Apesar do trabalho não tratar de destilação solar, enfatiza a utilização dessa fonte energética na destruição de microorganismos. De acordo com o citado artigo, a residência de águas contaminadas por determinado tempo em bandejas a temperaturas superiores a 65 °C, proporcionam uma pasteurização, inativando os microorganismos patogênicos.

De Paul e Quintana (2003) apresentaram o estudo do funcionamento não estacionário de um destilador solar. Essa pesquisa é inovadora, porque, para fins de simplificação se costuma admitir que os destiladores solares operam em regime permanente nos balanços de massa e energia e modelos matemáticos estimados. Para tanto, se reproduziram em

laboratório as condições reais de aquecimento do destilador solar. O aquecimento era elétrico e variava a corrente, de hora em hora, a fim de reproduzir as curvas de aquecimento da água observadas em destilador real funcionando num dia claro de inverno. Foram estudados diversos parâmetros a fim de determinar quais tinham mais influência no Destilado Total Diário (DTD). Foi verificado que a temperatura da água é o parâmetro que mais exerce influência, de modo que quanto mais alta é a temperatura máxima da água, maior é o DTD. Além disso, o coeficiente de transferência térmica convectiva ( $h$ ) apresenta comportamento diferente do obtido nas condições de estacionariedade, com valores mais baixos a baixa temperatura da água e maiores a temperaturas mais altas, sendo que a dependência de  $h$  com a temperatura da água, sugere que próximo dos 45 °C pode haver uma mudança no regime de circulação do fluxo no interior do destilador.

---

---

**CAPÍTULO IV:  
METODOLOGIA**

---

## 4. Metodologia

A metodologia utilizada na realização do trabalho está dividida entre a coleta e conservação das amostras, materiais e métodos, projeto do equipamento, determinação do número de experimentos solares a serem conduzidos e dos modos de operação e modo de operação dos testes no banho termostático para simulação das temperaturas obtidas em campo e metodologia para cálculo dos rendimentos e coeficientes de transferência.

### *4.1 – Coleta e conservação das amostras*

As amostras foram fornecidas pela PETROBRAS e são oriundas dos emissários submarinos da UTPF de Guamaré da UN-RNCE. As mesmas eram coletadas em recipientes plásticos com capacidade para 20 L e trazidas até Natal à temperatura ambiente. Aqui, elas eram conservadas em freezer a 4 °C.

Na véspera do experimento, a amostra era retirada do freezer para que estivesse a temperatura ambiente na hora de começar a operação do equipamento.

### *4.2 – Tipo de amostragem e definição dos pontos de amostragem*

A amostragem adotada é do tipo composta. Foram definidos três pontos de amostragem assim denominados:

- 0 para a amostra bruta (afluente do destilador);
- 1 para o destilado;
- 2 para o efluente do sistema (resíduo).

A definição desses pontos baseou-se na necessidade de se determinar o índice de remoção dos parâmetros físico-químicos a serem analisados. Para tanto, era necessário o conhecimento das características da amostra que entrava no destilador para posterior comparação com o destilado. Além disso, existe a necessidade de se conhecer o resíduo da destilação para melhor proposição de sua destinação final.

---

### 4.3 – *Materiais e métodos*

O procedimento para análise dos parâmetros físico-químicos avaliados estão conforme preconizado pelo APHA (1995).

Materiais:

Destilador Solar;

Termômetros de mercúrio e digital e cronômetro;

Banho termostático da marca Tecnal modelo TE – 053;

Estufa, mufla e cápsulas de porcelana;

Membranas para determinação de sólidos suspensos de 45  $\mu\text{m}$  da Milipore;

Freezers e geladeiras;

TOC - 5000 da Shimadzu;

Os parâmetros físico-químicos avaliados foram:

Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) – a medição da temperatura foi realizada por termômetros de mercúrio nas áreas internas do destilador e ambiente e por termômetro digital a temperatura da cobertura;

Taxa de condensação ( $\text{mL}/\text{min}$ ) – a taxa de condensação foi determinada através da medição do escoamento em proveta graduada de 10 mL e cronômetro. Cronometrava-se um minuto de escoamento e media-se o volume obtido;

Rendimento ( $\text{L}/\text{m}^2\text{dia}$ ) – a determinação do rendimento da destilação solar observou o volume evaporado no período de operação pelo balanço de massa e a correção desse volume pela área superficial disponível. O resultado obtido expressava o rendimento correspondente as horas de operação, logo para se determinar o rendimento diário fazia-se uma aproximação dividindo-se o valor obtido por 0,7, pois segundo Al-Hinai *et al.* (2002), até às 14 horas se tem processado 70% da destilação.

pH - análise potenciométrica –pHmetro digital da Digimed DM-21;

Condutividade ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) – análise eletrométrica –condutivímetro digital da Digimed DM-31.;

Turbidez (NTU) – método nefelométrico em turbidímetro digital da Hach;

$\text{DBO}_5$  ( $\text{mg}/\text{L O}_2$ )– Demanda Bioquímica de Oxigênio– Método Oximétrico - em Oxitop, a determinação é baseada na diferença de pressão de uma amostra acondicionada a 20  $^{\circ}\text{C}$  sob agitação e na ausência de luz entre os cinco dias. A reação de combustão da glicose consome oxigênio e libera  $\text{CO}_2$  de forma a causar mudança nas pressões parciais. O equipamento utilizado é dotado de um sensor que acompanha essa modificação;

TOG (mg/L) – Teor de Óleos e Graxas - método do clorofórmio (Curbelo, 2002) – A determinação do Teor de Óleos e Graxas (TOG) pode ser feita por vários métodos, que estão agrupados em gravimétricos ou espectrofotométricos. Os métodos gravimétricos são os mais antigos. Estes apresentam o inconveniente do longo tempo necessário para taragem dos tubos e extração do óleo pelo solvente. Além disso, para baixas concentrações de óleos e graxas, os métodos gravimétricos perdem precisão. Os métodos espectrofotométricos são mais precisos e mais comumente usados nas grandes indústrias petrolíferas, destacando-se as determinações por infravermelho que utilizam um CFC como solvente. Esses métodos além de utilizarem um freon, do qual é notadamente conhecido o potencial poluidor e efeito deletério na camada de ozônio, são de custo elevado. A determinação do TOG na região do ultravioleta tem sido pesquisada como uma alternativa, por oferecer menor custo e a mesma rapidez dos métodos que trabalham na região do infravermelho. Henderson *et al.* (1999) determinaram concentrações de óleo em fase aquosa, na região do ultravioleta, no pico de 260 nm. Com esse comprimento de onda, Curbelo (2002), determinou o TOG de águas produzidas utilizando clorofórmio como solvente. Consiste na extração dos óleos e graxas presentes pelo clorofórmio e posterior leitura em espectrofotômetro na região do UV. O procedimento para realização desta análise está descrito a seguir:

a) 100 mL da amostra e 10 mL de clorofórmio são colocados em um funil de separação e agitados durante 5 minutos (Figura 9). Após a separação de fases, a fase solvente é centrifugada a velocidade de 2500 rpm, por 2 min. A absorbância é lida em espectrofotômetro ULTRASPEC III da Pharmacia Biotech no comprimento de onda de 260 nm.



Figura 9 – Funil de Separação usado contendo amostra e clorofórmio.

COT (mg/L) – Carbono Orgânico Total – TOC Shimadzu 5000 – Esse método é baseado na combustão catalítica a alta temperatura seguida da quantificação de  $\text{CO}_2$ , os volumes de amostra injetado foram de 5  $\mu\text{L}$  e *range* utilizado foi 30;

OD (mg/L  $\text{O}_2$ ) – Método de Winkley – consiste na titulação do oxigênio existente na amostra com tiosulfato de sódio em presença de amido.

Cloretos (mg/L  $\text{Cl}$ )– Método de Mohr – consiste na titulação com nitrato de prata para precipitação de sais de cloreto de prata em presença de cromato de potássio;

Sulfatos (mg/L  $\text{SO}_4$ )– método espectrofotométrico – consiste na precipitação de sais de sulfato de bário e leitura da turbidez. O equipamento utilizado é o DR2000 e o comprimento de onda adotado é de 420 nm;

TDS (mg/L) – método gravimétrico- para determinação dos TDS, filtra-se a amostra em membrana de 45  $\mu\text{m}$  e leva-se o filtrado a evaporação em cápsula de porcelana previamente tarada;

Nitratos (mg/L  $\text{NO}_3 - \text{N}$ ) – método espectrofotométrico – reação dos nitratos presentes na amostra com ácido sulfalínico na presença de Cádmio, comprimento de onda de 500 nm, determinação realizada no DR2000;

Dureza total (mg/L  $\text{CaCO}_3$ ) – método titulométrico - a dureza é determinada pela reação de complexação dos sais com o EDTA;

Alcalinidade (mg/L  $\text{CaCO}_3$ ) – método titulométrico;

#### ***4.4 – Projeto e descrição do destilador solar***

O equipamento de destilação solar desenvolvido é um destilador de simples efeito convencional de duas águas que consta de um prisma triangular reto com uma das faces voltada para baixo, na qual está acoplada uma bandeja e duas calhas para alimentação e recolhimento de água (destilada) de produção tratada.

Foi escolhido o modelo mais simples de destilador, devido a falta de dados na literatura sobre destilação solar para águas de produção, assim optou-se pelo modelo convencional para simplificar o estudo. Além disso, se o modelo mais simples for eficiente, os otimizados certamente o serão.







Figura 11: Vista posterior da base do equipamento

O equipamento possui abertura para alimentação e três saídas (uma do rejeito e uma em cada calha de recolhimento da água destilada), conforme visualizado na Figura 12.



Figura 12: Visão frontal do destilador e dos dispositivos de coleta e água destilada e resíduo

A determinação da vazão do condensado se deu por medida de 1 min em cronômetro ao passo que a água destilada escoava em proveta graduada de 10 cm.

A princípio havia sido determinado um planejamento experimental, no qual foram definidos três fatores para operação em batelada: tempo (com três níveis), ângulo de

inclinação da cobertura e variação climática, ambos em dois níveis. O planejamento a ser usado seria um fatorial  $2^3$  (Barros Neto *et al.*, 2001), de forma que seriam necessários no mínimo 17 experimentos, com reprodução em triplicata no ponto central. Entretanto, o atraso na construção do destilador impossibilitou que esse intento fosse atingido.

Ao todo foram realizados 16 experimentos de abril a junho/2004 assim distribuídos:

- 2 experimentos com cobertura de 20 ° por um período de operação de 4 horas (das 10 as 14 h);
- 3 experimentos com cobertura de 20 ° por um período de operação de 6 horas (das 9 as 15 h);
- 2 experimentos com cobertura de 45 ° por um período de operação de 4 horas (das 10 as 14:00) ;
- 3 experimentos com cobertura de 45 ° por um período de operação de 6 horas (das 9 as 15 h) ;
- 1 experimento com cobertura de 20 ° *full time* –12 horas - (das 7 h do primeiro dia as 17 h do terceiro dia, fornecendo dados equivalentes a três experimentos) ;
- 1 experimento com cobertura de 45 ° *full time* – 12 horas - (das 7 h do primeiro dia as 17 h do terceiro dia, fornecendo dados equivalentes a três experimentos) ;

Além desses experimentos de forma contínua foram realizados cinco experimentos piloto para conhecimento do destilador e variação climática. Três em novembro e dois em fevereiro. Nesses experimentos foram analisados os parâmetros físico-químicos de Temperatura, pH, Condutividade e TOC e os pontos de monitorização da temperatura foram o vapor e a temperatura ambiente.

#### **4.5 – Modos de operação**

O sistema foi operado em regime de batelada para alimentação da amostra e saída da mesma e de forma contínua para captação da água destilada.

Os tempos de operação foram de 4 e 6 horas e 12 horas, durante as quais a leitura das temperaturas eram realizadas em intervalos de 1 h mais leitura às 12:30 h para se verificar em que período ocorria a inversão na curva do perfil de temperatura. Os modos de operação contemplaram ângulos de cobertura variáveis de 20 e 45°. O valor desses ângulos foi definido em função da literatura (Bezerra, 2001) e de cálculo para determinar qual inclinação privilegiaria o escoamento.

Devido à variação dos ângulos e intensidade da radiação solar o sistema tem regime transiente com respeito aos fenômenos de transporte que ocorrem em seu interior, com

---

variação da taxa de evaporação e condensação ao longo do dia que foi medida nos experimentos de operação 12 horas.

A temperatura externa do vidro foi medida com termômetro digital com sensor do tipo K (faixa de variação de temperaturas de  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) e as demais com termômetro de mercúrio (faixa de  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

#### ***4.6 – Testes de destilação em banho termostático com simulação das temperaturas atingidas pela água na destilação solar***

Foi necessária aplicação de testes de destilação conduzidos em laboratório utilizando-se um banho termostático nas temperaturas atingidas no sistema para comprovação das remoções que poderiam ser atingidas nas condições ótimas de funcionamento do destilador solar.

Foram realizados experimentos em duplicata para as temperaturas de  $50$  a  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ , com  $\Delta t$  de  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  e um ponto extra de  $67\text{ }^{\circ}\text{C}$ , que foi a máxima temperatura atingida pelo equipamento.

As Figuras de 13 a 17 mostram o banho termostático em funcionamento, onde se podem observar as gotículas de água destilada condensada e a forma de recolhimento de amostras para análises.



Figura 13: Visão frontal do banho

A Figura 13 mostra o banho termostático utilizado numa visão frontal. A temperatura no banho era controlada via sistema de *set up* (ponto de ajustamento) que apresentava variações de 0,5 °C. Pode-se visualizar um detalhe desse sistema na Figura 14.



Figura 14: Detalhe do banho termostático, sistema de controle da temperatura

A alimentação no banho era via superior e o funcionamento era no sistema de batelada. Na Figura 15 tem-se uma visão superior do banho aberto.



Figura 15: Vista superior do banho termostático aberto

Percebe-se pela Figura 15 que o equipamento usado nos testes possui sistema de agitação, mas o mesmo não foi utilizado.

A amostra era colocada no banho a temperatura ambiente. O mesmo era coberto e só então ligado. As Figuras 16a e 16b apresentam detalhes da formação das gotas pelo processo de condensação na cobertura.



Figura 16a: Detalhe da condensação



Figura 16b: Detalhe da condensação

Desprezava-se a primeira amostra condensada logo após o banho atingir a temperatura de *set up* (que variaram de 50 a 70 °C). Pode-se visualizar na Figura 17 a forma de recolhimento da água destilada



Figura 17: Detalhe do recolhimento da água destilada

Como se pode observar a cobertura do banho, a qual é confeccionada em acrílico, era inclinada e a água que estava condensada juntava-se em um dos cantos. Então, era recolhida em um erlemeyer de 250 mL.

Os parâmetros físico-químicos analisados nessa simulação caso foram TOC, pH e condutividade que foram realizadas em todos os testes. E ainda cor, TOG, turbidez e nitratos.

---

**CAPÍTULO V:**  
**RESULTADOS E DISCUSSÕES**

---



## 5. Resultados e discussões

Os resultados obtidos estão divididos em quatro partes: a) balanço de massa e energético no destilador solar com apresentação dos perfis de temperatura e o cálculo dos rendimentos; b) resultados dos parâmetros analisados e eficiência do destilador; c) resultados experimentais no banho termostático (simulação das temperaturas ambientais) e comparação dos resultados obtidos no destilador solar e banho termostático com a Legislação (CONAMA) e requisitos da água para geração de vapor.

### *5.1 – Balanço energético e de massa no destilador solar: cálculo de coeficientes e perfis de temperatura.*

A operação do destilador para efeito de determinação da eficiência de remoção de contaminantes e indesejáveis se deu entre abril e junho. Entretanto, existe a necessidade de conhecer o comportamento térmico do equipamento durante todos os meses do ano, de forma que se possa avaliar seu rendimento nos meses ótimos de operação (verão ou estação quente aqui no Nordeste) que seriam os meses de novembro (final da primavera e início da estação de calor) a fevereiro (último mês antes das temperaturas e níveis de radiação solar começarem a diminuir). Deste modo, foram realizados cinco experimentos pilotos, três em novembro e dois em fevereiro. Esses experimentos serviram também para uma familiarização com o destilador e como teste, no sentido de verificar possíveis vazamentos e problemas de execução do projeto, além do estabelecimento das temperaturas máximas de operação (que se acredita, ocorra nesse período).

As Figuras 18, 19 e 20 mostram o comportamento das temperaturas ambiente e interna do destilador, para os experimentos realizados em novembro.

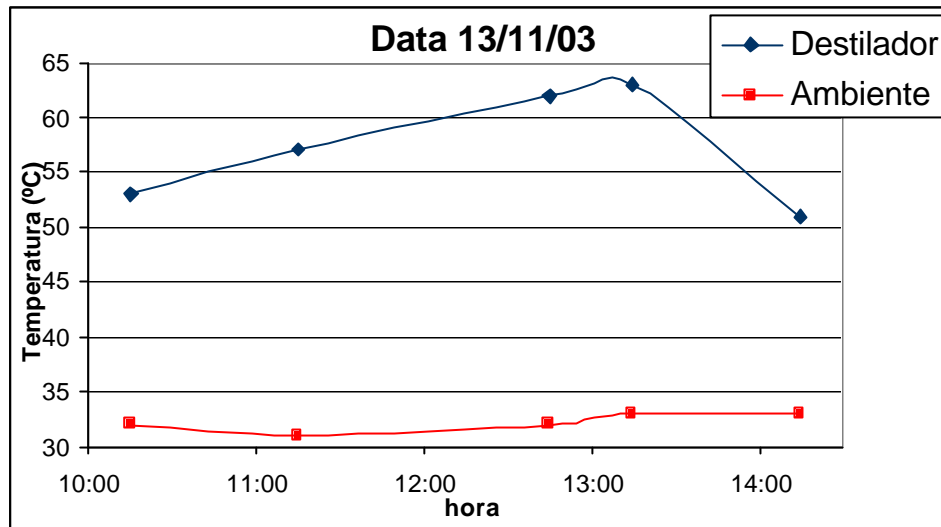


Figura 18: Variação de temperatura do dia 13/11/03 para uma operação de 4 horas.

Nessa primeira Figura 18 da série pode-se verificar que a temperatura ambiente sofreu oscilações entre 31 e 33 °C. A curva para temperatura interna do destilador não acompanhou a mesma tendência de queda e alta, ela subiu sempre até atingir um máximo por volta das 13 h, para só então começar a cair. Mais que indicar a independência do sistema em relação à temperatura ambiente medida nas vizinhanças do equipamento, esse fato evidencia que o calor interno é função da radiação solar e como se tratava de um dia claro de sol, sem nebulosidade, pequenas variações nas temperaturas do entorno não ocasionava reação no destilador. Tal situação reapareceu nas outras repetições de operação no mês de novembro, como pode ser visualizada nas Figuras 19 e 20.

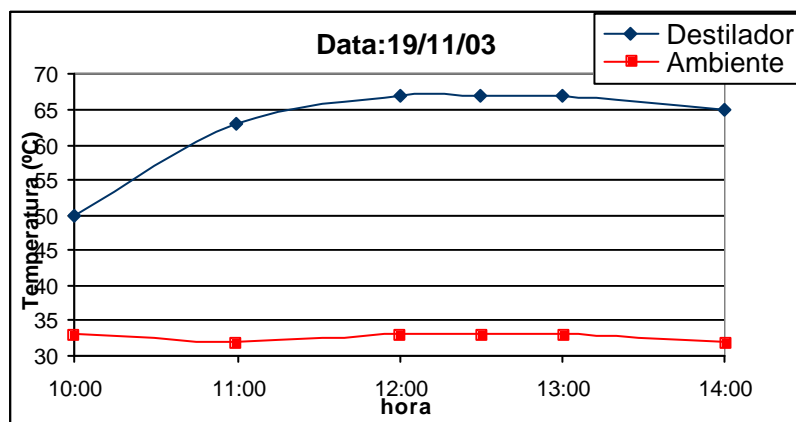


Figura 19: Variação de temperatura do dia 19/11/03 para uma operação de 4 horas.

Verifica-se aqui a mesma situação anterior, com exceção para temperatura ambiente mínima, que neste dia foi de 32 ° C.

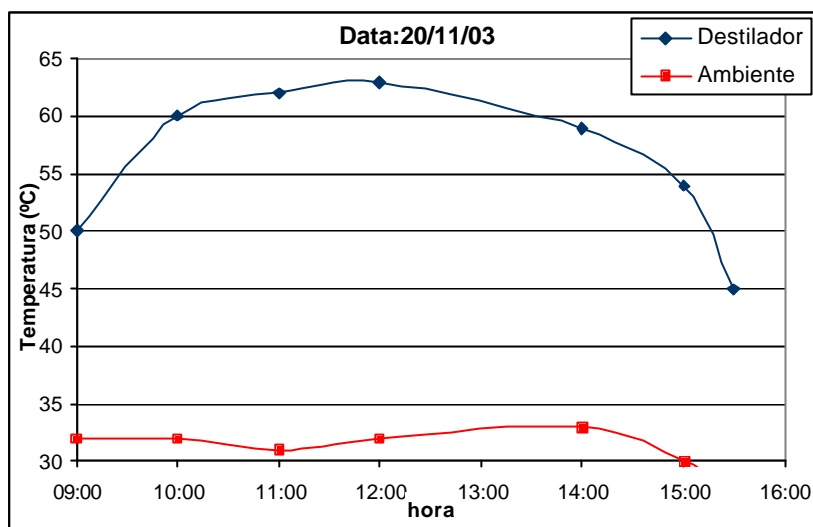


Figura 20: Variação de temperatura do dia 20/11/03 para uma operação de 6 horas.

Ainda na Figura 20 percebe-se a maior variação de temperatura no mês de novembro. Aqui, a queda na temperatura ambiente durante o período de elevação da temperatura do destilador tem sua correspondente queda no interior do equipamento, certamente porque, a hora da observação desse fato o céu não estava límpido, e sim com nuvens que encobriam parcialmente o sol, diminuindo o nível de insolação momentaneamente.

Deve-se salientar que as amostras dos três primeiros experimentos testes permaneceram no destilador durante a noite e por isso as temperaturas iniciais já foram superiores ou iguais a 50 ° C.

Nas medições realizadas nos experimentos de fevereiro, verifica-se uma maior constância nas temperaturas ambiente, como pode ser visualizado nas Figuras 21 e 22.

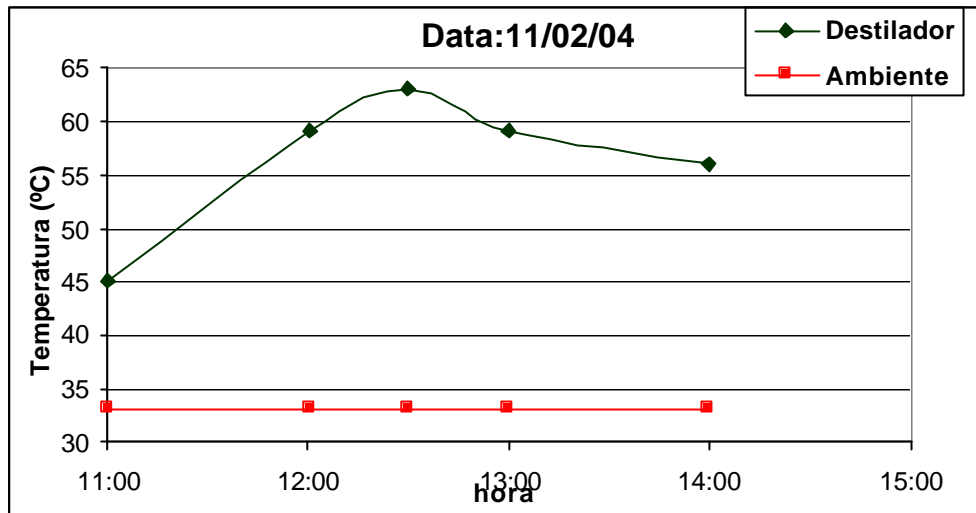


Figura 21: Variação da temperatura do dia 11/02/04 para uma operação de 3 horas

Nas duas situações a temperatura ambiente manteve-se constante em 33 °C durante todo o tempo de operação, enquanto a temperatura interna do equipamento evoluiu de um mínimo de 45 °C a máximo de 67 °C (Figura 22). Neste último experimento foi introduzida temperatura externa do vidro de cobertura.

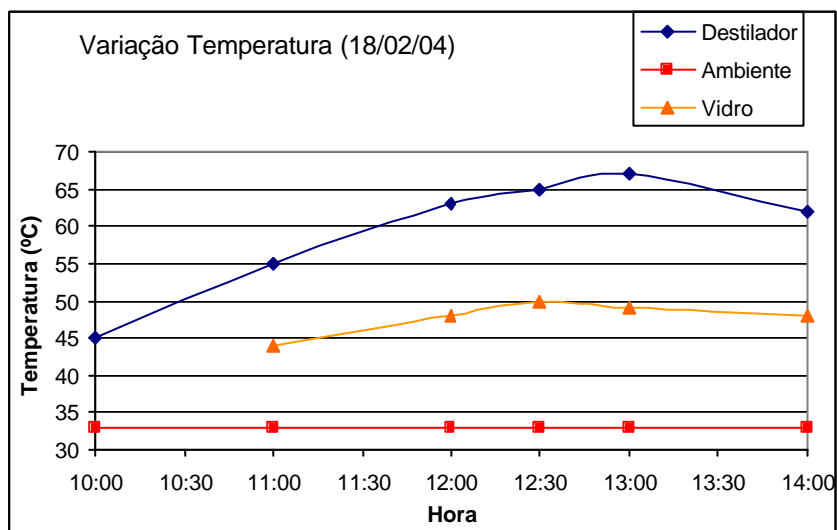


Figura 22: Variação de temperatura do dia 18/02/04 para uma operação de 4 horas.

Durante esses cinco experimentos de sondagem, foram realizadas determinações de pH, condutividade, nitrato e frações de carbono que poderão ser observadas nos gráficos da seção seguinte. O ponto da medida dessa temperatura no equipamento é o mesmo que nos experimentos seguintes é denominado vapor.

Os experimentos contínuos para determinação da viabilidade técnica da destilação solar no tratamento de águas de produção começaram efetivamente em abril e foram realizados de forma aleatória.

Nesses experimentos seguintes, apesar das amostras não “dormirem” no equipamento e serem administradas no mesmo à temperatura ambiente, verifica-se que elas aumentam rapidamente de temperatura.

As Figuras 23 e 24 mostram os perfis de temperatura para os dois primeiros experimentos realizados nessa nova série.

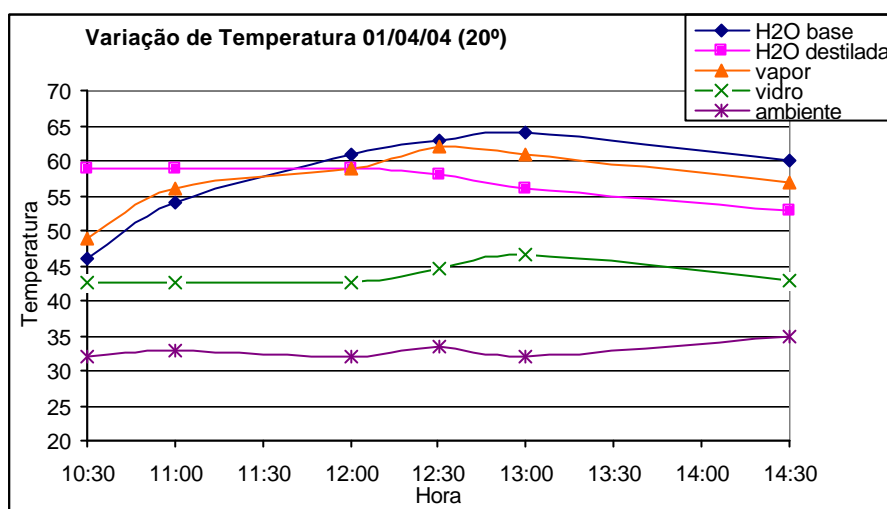


Figura 23: Perfil de temperaturas para a cobertura de 20 ° de inclinação e 4 h de operação

Nas Figuras 23 e 24 é possível perceber a inversão de posição entre as temperaturas do vapor no interior do destilador e a temperatura da amostra na base (H<sub>2</sub>O base). Inicialmente, como o destilador fica fechado e isolado, a temperatura do vapor é maior que a temperatura da água na base, visto que a amostra ainda não entrou em equilíbrio térmico com a superfície de contato. Após a primeira hora o sistema já se estabilizou em seu equilíbrio dinâmico e a temperatura da base é maior que a temperatura do vapor, o que é lógico pois a água está recebendo calor da fonte mais quente do equipamento que é a superfície negra. Em experimentos subsequentes, ocorrerá, por vezes, várias inversões desse tipo, as quais serão ocasionadas por mudanças nas condições climáticas.

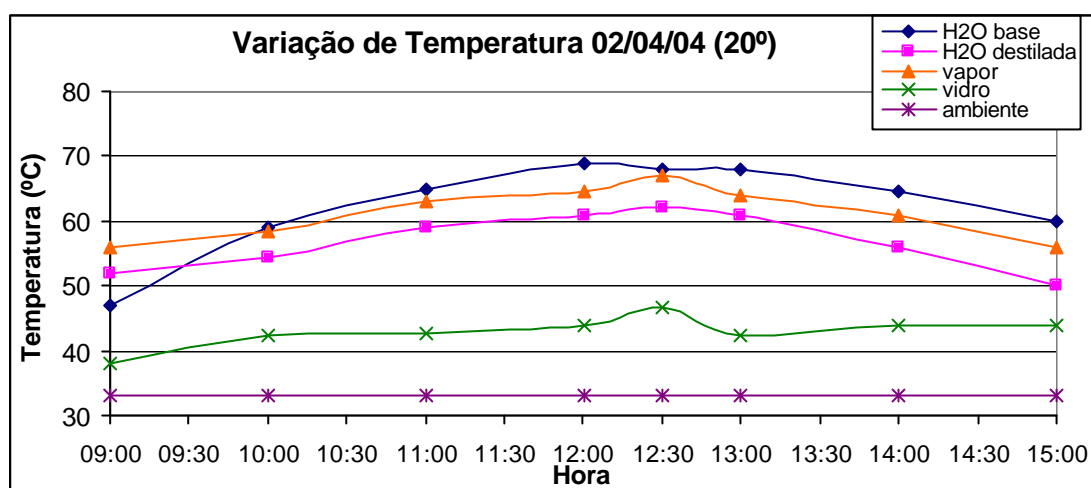


Figura 24: Perfil de temperaturas para a cobertura de 20° de inclinação e 6 h de operação

Como pode ser visto as curvas das duas Figuras (23 e 24) são bastante semelhantes, sendo que o experimento realizado no dia 02/04/04 (Figura 24) apresentou a maior temperatura de operação de todo o estudo que foi de 69 °C .

A temperatura do destilador tende acompanhar a conformação do vapor, tendo por vezes valor mais elevado, como se pode observar na maioria das Figuras. Esses resultados correspondem a experimentos com ângulos de 20 e 45 °, sendo mais comum nos de 45 °, onde existe um maior gradiente de temperatura. Isto, apesar dos dados da literatura consultada ressaltar o regime turbulento no interior do destilador (De Paul, 2000), o que faria homogeneizar a temperatura. Na realidade essa homogeneidade deve seguir o modelo dos reatores pistão, onde numa mesma seção transversal todas as propriedades são iguais. No caso do destilador solar, duas águas, essas seções transversais seriam horizontais e paralelas ao solo, visto que em seções perpendiculares a temperatura apresenta variação.

A ocorrência da temperatura do destilado alta e até superior à temperatura do vapor é altamente indesejada, pois essa água que já foi destilada tende naturalmente a entrar em equilíbrio com o sistema saturado, voltando a evaporar e essa elevação na temperatura provoca o deslocamento do equilíbrio no sentido da evaporação. Na Figura 25 o tempo que o vapor levou para superar a temperatura do destilado foi muito alto (quase duas horas de operação), visto que essa situação geralmente ocorre na primeira hora do experimento. A explicação para esse fato deve-se ao dia estar nublado no início da manhã.

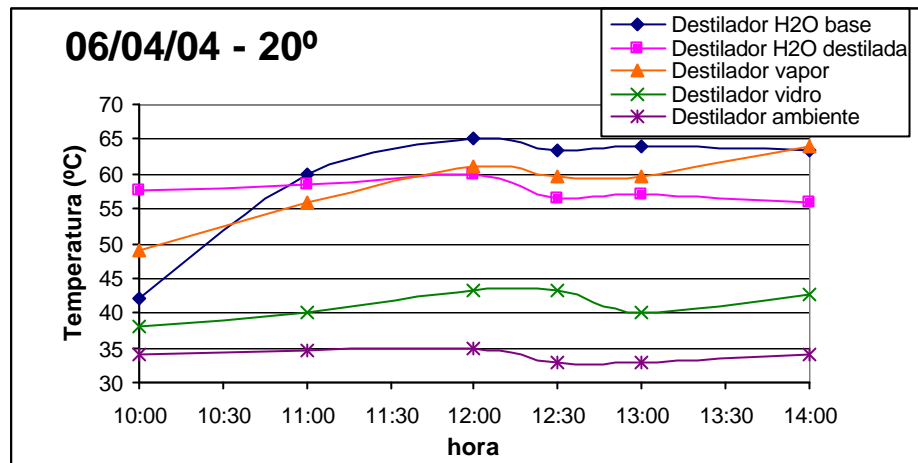


Figura 25: Perfil de temperaturas para a cobertura de 20 ° de inclinação e 4 h de operação

Na Figura 26 verifica-se que as temperaturas de vapor e destilado quase se confundem e esse fato deve ser evitado através da engenharia e do projeto do destilador. Observado isso, se deverão buscar alternativas que desloquem o equilíbrio no sentido da condensação, entre eles a retirada instantânea das amostras condensadas do sistema.

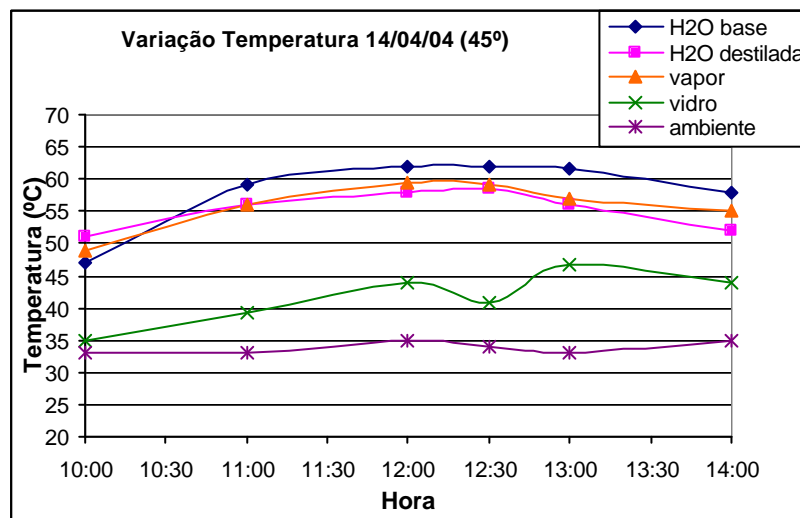


Figura 26: Perfil de temperaturas para a cobertura de 45 ° de inclinação e 4 h de operação

Pode ser visualizado na Figura 27 um dos momentos em que a temperatura do vapor superou a temperatura da água na base depois do sistema já haver se estabilizado. Percebeu-se que mudanças nas condições climáticas são primeiro sentidas na superfície do destilado, fato este que possivelmente explica essa situação.

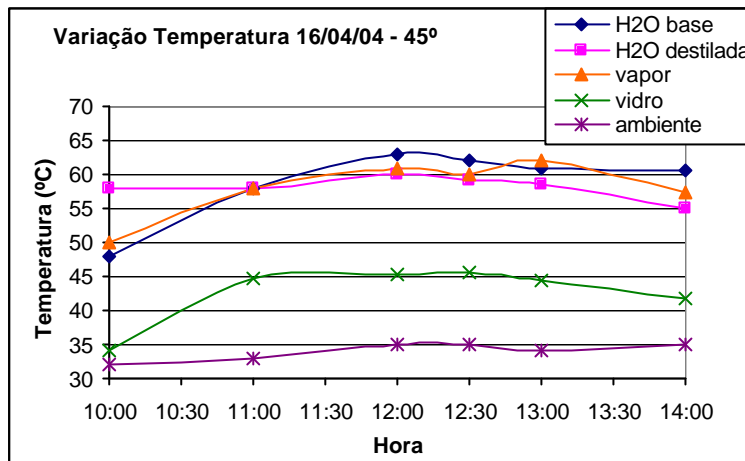


Figura 27: Perfil de temperaturas para a cobertura de 45 ° de inclinação e 4 h de operação

Das Figuras já observadas, verifica-se ainda que as temperaturas do vidro e do ambiente apresentam relação mais íntima, sendo que pequenas variações na temperatura ambiente gera grandes variações na temperatura do vidro, apesar das curvas apresentarem a mesma conformação.

Deve-se diferenciar os efeitos das condições climáticas que mais afetam o interior do equipamento, como nebulosidade e umidade, com as condições que são primeiro e mais fortemente sentidas no ambiente e na superfície externa do vidro, como ventos.

É também interessante notar como as temperaturas e condições climáticas podem variar em apenas 48 h conforme apresentado nas Figuras 28 e 29, evidenciando a necessidade do constante monitoramento do sistema, em estudo, para um maior aprendizado.

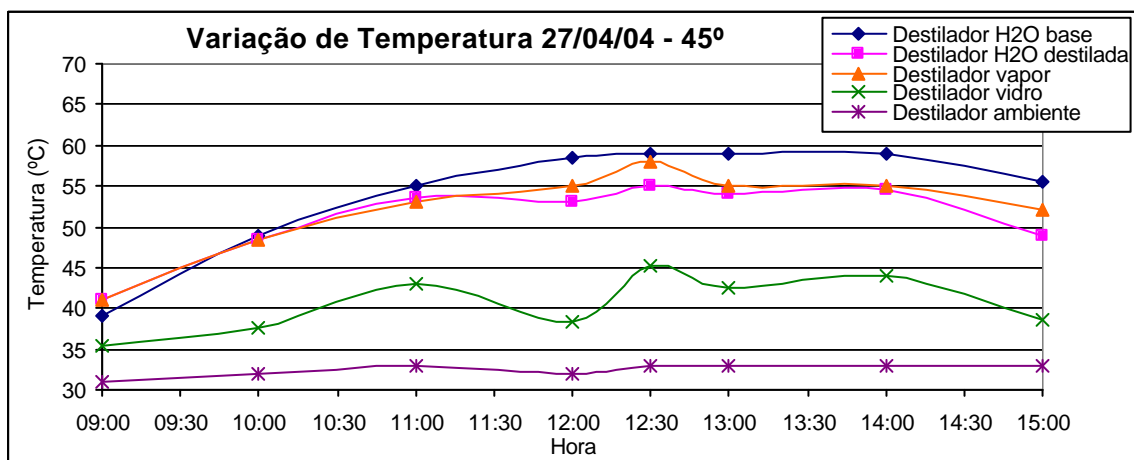


Figura 28: Perfil de temperaturas para a cobertura de 45 ° de inclinação e 6 h de operação



Embora na prática, fora da vida acadêmica, os destiladores solares requerem o mínimo trabalho de manutenção.

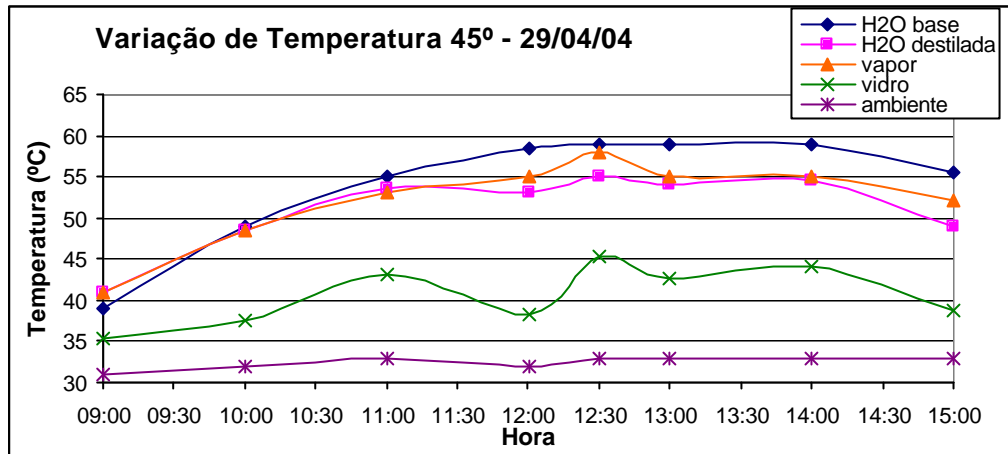


Figura 29: Perfil de temperaturas para a cobertura de 45 ° de inclinação e 6 h de operação

Outra questão a ser observada é que, a partir de meados de abril, apesar das temperaturas ambientes apresentarem-se mais elevadas (Figura 27) onde, em dado momento, a temperatura ambiente atingiu os 35 ° C, isso não foi refletido na temperatura interna do sistema, indicando mais uma vez que altas temperaturas ambientais, não implicam, via de regra, em altos índices de insolação, sendo que o pico de temperatura interna (69 °C) ocorreu no experimento do dia 02/04/04 (Figura 24) e a maior e única temperatura ambiente registrada naquele dia foi 33 °C.

A Figura 30 apresenta o perfil de temperaturas para o experimento realizado no dia 12/05/04 com a cobertura de 20 °.

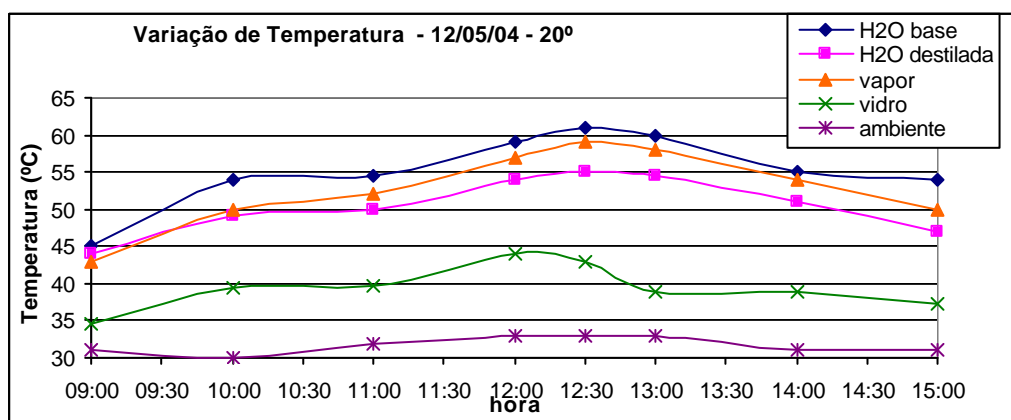


Figura 30: Perfil de temperaturas para a cobertura de 20 ° de inclinação e 6 h de operação

Verificou-se nas Figuras 30 e 31 uma grande variação, enquanto a primeira mantém a média das anteriores, verifica-se na segunda uma queda brusca nas temperaturas por volta das 12:30 h, horário em que geralmente têm sido registrados os picos de temperatura.

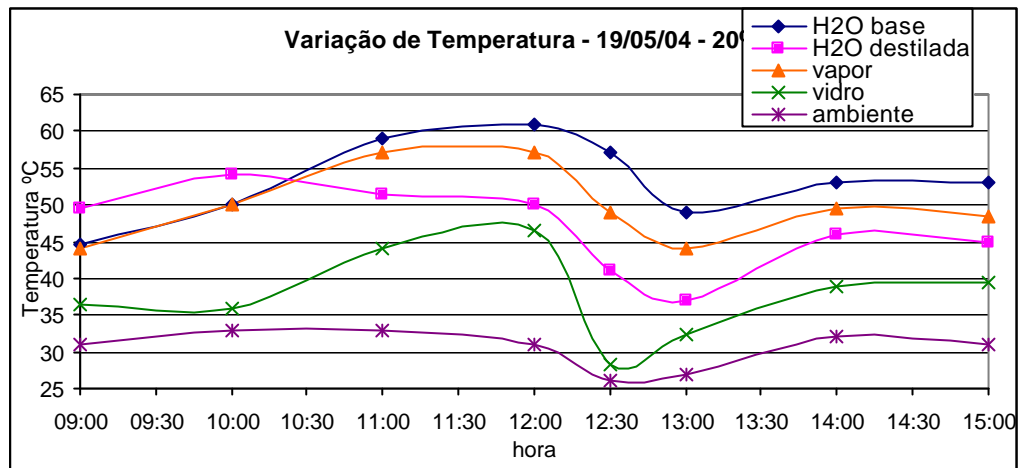


Figura 31: Perfil de temperaturas para a cobertura de 20° de inclinação e 6 h de operação

Essa modificação nas condições do sistema é atribuída mais uma vez a mudanças nas condições climáticas, como nebulosidade momentânea, visto o sistema se recuperar logo depois. A Figura 31 também marca a chegada das temperaturas menos elevadas no Nordeste. Ainda não se havia atingido temperaturas ambientais inferiores a 30 ° C nos experimentos anteriores. Nesse experimento, essa temperatura chega a 26° C.

Na Figura 32 também se encontram novidades com respeito ao início da operação do sistema. Verifica-se que todas as temperaturas internas partem do mesmo valor, enquanto as temperaturas externas também são, de início, quase iguais.

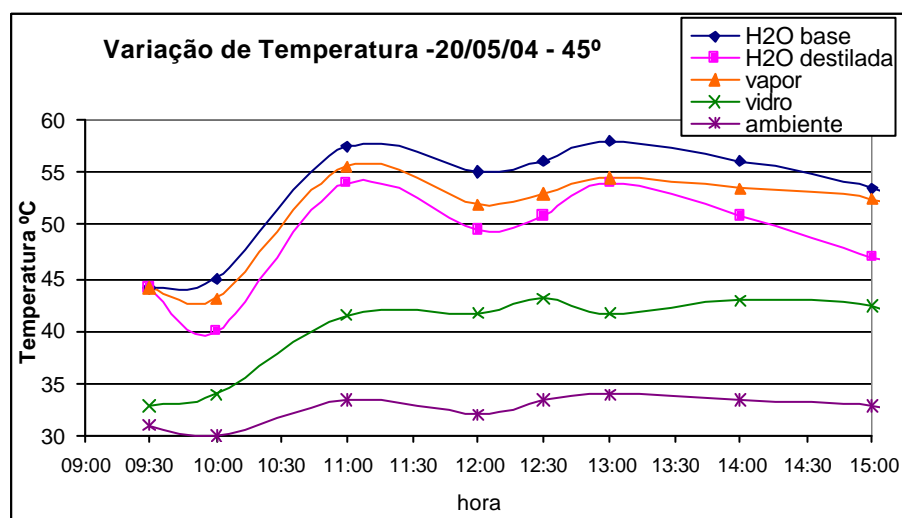


Figura 32: Perfil de temperaturas para a cobertura de 45° de inclinação e 6 h de operação

A evaporação é instantânea e após cinco minutos de operação já pode ser visualizado o vapor. Entretanto a condensação só começa a ser percebida aproximadamente uma hora depois de iniciado o experimento. Observe as gotas de água condensada na cobertura do destilador na Figura 33.



Figura 33: Gotas de água condensadas na cobertura do destilador

Após essa fase, realizaram-se dois experimentos operando *full time* por um período de 60 h para os dois ângulos de inclinação. Nesses experimentos foram determinadas as taxas de condensação. Os resultados obtidos podem ser observados nas Figuras 33 a 36. Os perfis de temperatura para os dois experimentos estão expressos em gráficos de linha, de modo a facilitar a visualização das curvas no decorrer do tempo de operação. Não foram realizadas leituras de temperatura à noite. O monitoramento se iniciava às 7:30 h e finalizava às 17 h de cada dia.

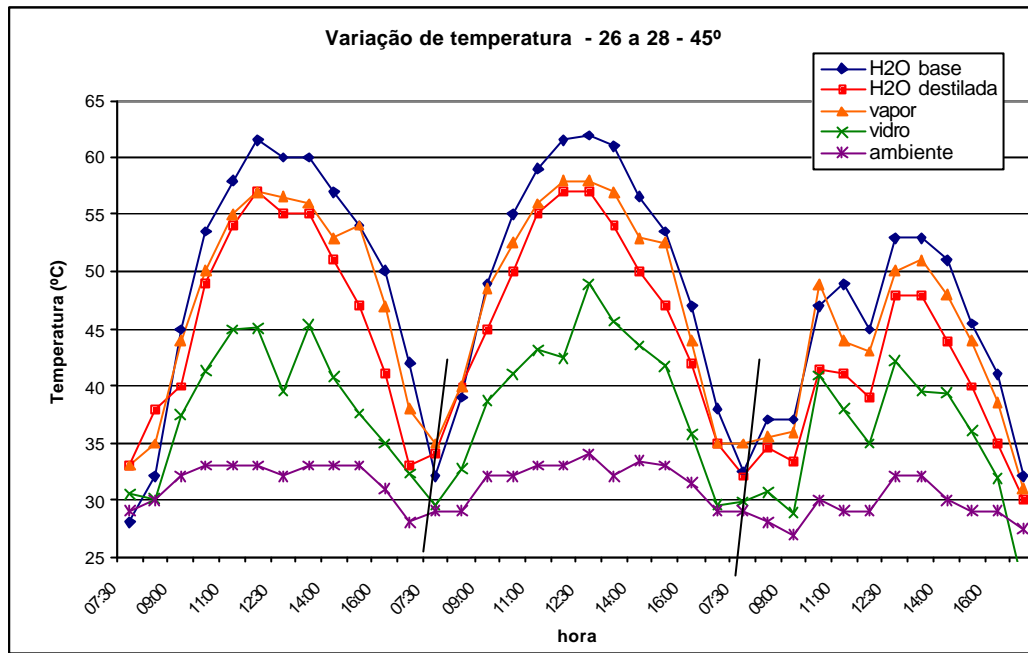


Figura 34: Perfil de temperaturas para a cobertura de 45 ° de inclinação operação *full time*

Na Figura 34 estão apresentados os perfis de temperatura para a operação com a cobertura de 45 °. Nota-se que os dois primeiros dias de operação apresentaram curvas de alta semelhança e com os mesmos picos. No último dia, no entanto, as temperaturas caem bastante e oscilam muito. A explicação para essa situação foi a precipitação pluviométrica no último dia do experimento. Nesse período, o dia passou nublado e com alta umidade devido à ocorrência de chuvas esparsas.

A Figura 35 mostra os perfis de temperatura para operação com a cobertura de 20 °. Nesse caso, como não ocorreu precipitação pluviométrica durante a monitorização (embora tenha chovido à noite e no início da manhã, a umidade ainda estava muito alta), a não ser por fracas e passageiras neblinas que não chegaram a influenciar o sistema. Aqui, apesar da uniformidade dos perfis, verifica-se que o segundo dia apresentou maiores temperaturas. Esses últimos experimentos foram levados a efeito no final de maio e início de junho, já no período do ano de menores índices de radiação e onde a destilação solar apresenta os menores rendimentos.

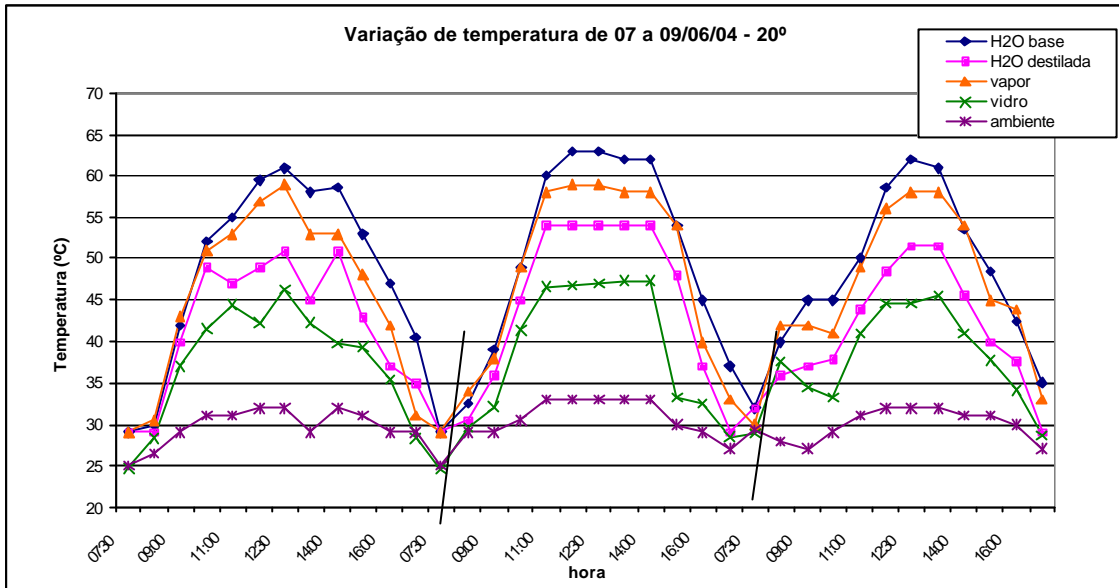


Figura 35: Perfil de temperaturas para a cobertura de 20 ° de inclinação operação *full time*

Deve ficar claro que as hipóteses formuladas com respeito às variações de temperatura no destilador e meio ambiente e sua ligação com o nível de insolação, seriam melhor amparadas se fosse medida a radiação solar concomitantemente e as temperaturas fossem acompanhadas *full time* durante a realização do experimento e não a cada hora, onde devido as fases lag, uma modificação nas condições climáticas ocorridas no presente, poderão só ser refletidas no sistema cerca de meia hora depois.

Como citado anteriormente, nos últimos experimentos foram medidas as taxas de condensação instantânea. A Figura 36 apresenta os resultados obtidos em gráfico de linha, fazendo uma comparação entre os valores encontrados para as inclinações de 20 e 45 °.

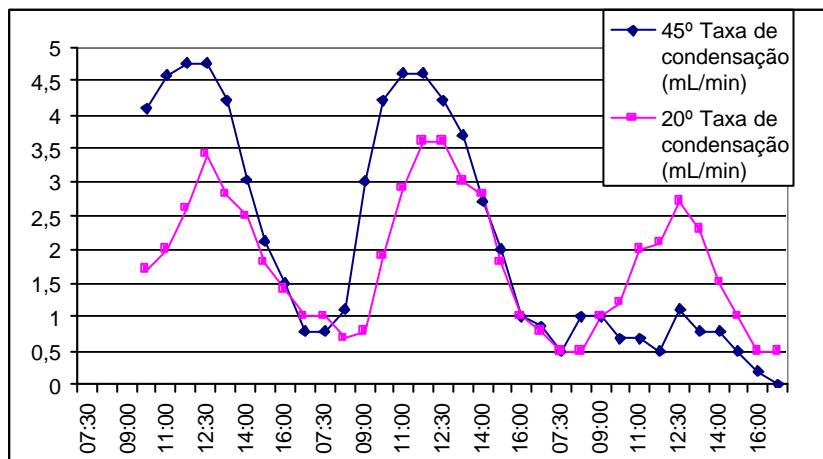


Figura 36: Taxas de condensação para os dois modos de operação

Verifica-se que as taxas de condensação só começaram a ser registradas na segunda hora dos experimentos nos dias iniciais. Essa falta de dados foi decorrência do sistema de medição das vazões destiladas, o qual, por ser rústico, não permitia a leitura de vazões muito baixas (inferiores a 0,01 mL/min).

A observação da Figura 36 permite visualizar que a operação do destilador com o ângulo de inclinação de 45 ° forneceu maiores taxas de condensação. Esse fato poderia ser explicado, entre outros fatores, pela maior área disponível para condensação que essa cobertura tem em relação à outra. Essa observação é corroborada pela afirmação de Burmeister *apud* Franco (2002) que baseada na relação de  $Nu \times Ra$  mostra que a energia térmica transferida de uma superfície é independente de seu ângulo de inclinação, de forma que, Franco conclui que maiores produções de destilado em coberturas de maiores inclinações estão relacionadas ao maior calor sensível acumulado pela maior disponibilidade de área. Entretanto, essa afirmação não pode ser feita aqui porque os experimentos não foram concomitantes, logo as condições climáticas apresentadas são diferentes e a comparação no sentido de ressaltar um e diminuir o outro não deve ter lugar, necessitando investigações mais detalhadas dessa possibilidade. Além disso, a literatura consultada (Macedo, 1996, Bezerra, 2001) ressalta a importância de se captar maior quantidade de energia para melhorar as eficiências energéticas e essa captação de energia solar é maior quando a radiação do sol é normal à superfície receptora.

O decréscimo nas taxas de condensação para cobertura de 45° no último dia é função da precipitação pluviométrica que ocorreu nesse período.

É também interessante destacar que o efeito que provoca a mudança de fases na água de produção é sua pressão de vapor. A quantidade de energia necessária para tanto pode ser determinada pela entalpia de vaporização que devido o sistema ser monovariante (Regra de Gibbs), como explicitado na metodologia, pode ser facilmente obtido de tabelas de vapor saturado.

Com as entalpias de vaporização e pressões de saturação equivalentes determina-se via modelo empírico desenvolvido por De Paul (2000) os coeficientes convectivos.

Do balanço de massa empregado, constatou-se que o destilador solar desenvolvido apresenta rendimentos que variam entre 2,85 a 7,14 L/m<sup>2</sup>d, estando em conformidade com os valores encontrados na literatura para esse tipo de destilador. Deve se salientar que, os resultados para rendimento aqui mostrados não foram obtidos nas condições ótimas de operação, que seriam os meses de maior radiação solar. Além disso, o isolamento aqui

empregado, é bem inferior (0,01 m) ao que a literatura estabelece como ótimo (Al-Hinai *et al.*, 2002) que seria de 0,10 m.

## 5.2 – Eficiência do destilador solar na remoção de contaminantes e modificação nas características da água de produção após a destilação solar

As características originais das águas de produção do emissário configuram um efluente de alta dureza e alcalinidade, com tendência básica (pH superior a 7). O destilado obtido tem características sensivelmente diferentes em relação ao efluente original.

A Tabela 3 mostra os resultados obtidos através da destilação solar. Os valores que aparecem na Tabela são valores médios sem considerar a diferença entre as inclinações da cobertura.

Tabela 3: Quadro geral dos resultados para os três pontos amostrais e percentual de redução

<b>Parâmetros físico-químicos</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>Redução (%)</b>
pH	7,86	7,66	8,43	
Condutividade ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	3972,50	92,37	5194,00	97,67
Cloretos (mg/L Cl)	1074,83	6,27	1407,56	99,42
Sulfatos (mg/L $\text{SO}_4$ )	53,08	0,67	79,88	98,74
Dureza Total (mg/L $\text{CaCO}_3$ )	446,5	25,50	509,57	94,29
Alcalinidade (mg/L $\text{CaCO}_3$ )	209,77	21,96	162,71	89,53
TOG (mg/L)	18,85	11,78	16,17	37,52
TC (mg/L)	96,69	53,53	107,62	44,74
TOC (mg/L)	43,80	49,92	65,10	-13,99
IC (mg/L)	52,82	3,52	42,51	93,33
Turbidez (NTU)	18,42	2,00	10,71	89,14
Cor (PtCo)	41,82	9,50	43,80	77,29
Nitrato (mg/L $\text{NO}_3\text{-N}$ )	0,79	0,79	1,34	0,00

Da observação da Tabela verifica-se a alta remoção de sais e modificação no pH do destilado e resíduo. Apesar do pH ainda se manter acima de 7, percebe-se que ele é reduzido no destilado e aumenta no resíduo. Essa é uma característica comum em processos de destilação de águas salinas.

O parâmetro que apresentou pior resultado foi o TOC, onde a remoção média ficou negativa, evidenciando problema de contaminação. O resultado encontrado para os nitratos também foi ruim, onde a redução média é de zero, conforme Tabela 1. Entretanto, apesar de em boa parte dos experimentos, as concentrações de TOC e nitrato terem aumentado, invés de

diminuírem, conseguiu-se verificar remoções desses parâmetros, como poderá ser visualizado mais adiante.

As Tabelas 4 e 5 apresentam os resultados médios divididos entre os experimentos realizados com a inclinação de 20 ° e 45°.

Tabela 4: Resultados para o destilador operando com inclinação de 20 ° na cobertura

<b>Parâmetros físico-químicos</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>Redução (%)</b>
pH	7,87	7,62	8,62	
Condutividade ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	3793,19	94,88	5204,86	97,50
Cloretos ( $\text{mg}/\text{L Cl}$ )	955,15	4,49	1318,11	99,53
Sulfatos ( $\text{mg}/\text{L SO}_4$ )	48,63	1,01	93,74	97,92
Dureza Total ( $\text{mg}/\text{L CaCO}_3$ )	419,44	30,56	505,89	92,72
Alcalinidade ( $\text{mg}/\text{L CaCO}_3$ )	203,83	21,92	168,78	89,25
TOG ( $\text{mg}/\text{L}$ )	14,86	7,74	16,03	47,91
TC ( $\text{mg}/\text{L}$ )	92,96	72,65	123,77	21,85
TOC ( $\text{mg}/\text{L}$ )	37,71	38,48	81,35	-81,60
IC ( $\text{mg}/\text{L}$ )	55,25	4,24	42,41	92,33
Turbidez (NTU)	14,67	1,83	14,33	87,50
Cor (PtCo)	38,67	10,67	40,67	72,41
Nitrato ( $\text{mg}/\text{L NO}_3\text{-N}$ )	0,70	0,74	1,34	-6,35

Pode-se perceber que aparecem aqui dois valores negativos para os mesmos parâmetros que haviam apresentado problemas antes, só que agora mais acentuado.

Tabela 5: Resultados para o destilador operando com inclinação de 45 ° na cobertura

<b>Parâmetros físico-químicos</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>Redução (%)</b>
pH	7,96	7,70	8,57	
Condutividade ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	3931,25	82,32	4468,33	97,91
Cloretos ( $\text{mg}/\text{L Cl}$ )	1048,29	4,14	1379,51	99,61
Sulfatos ( $\text{mg}/\text{L SO}_4$ )	56,72	0,08	71,26	99,86
Dureza Total ( $\text{mg}/\text{L CaCO}_3$ )	455,75	22,21	505,75	95,13
Alcalinidade ( $\text{mg}/\text{L CaCO}_3$ )	220,92	23,63	178,42	89,31
TOG ( $\text{mg}/\text{L}$ )	16,69	14,94	16,09	10,48
TC ( $\text{mg}/\text{L}$ )	105,15	48,28	115,86	54,08
TOC ( $\text{mg}/\text{L}$ )	52,27	44,63	72,58	14,62
IC ( $\text{mg}/\text{L}$ )	52,86	3,64	43,28	93,12
Turbidez (NTU)	22,33	3,00	11,00	86,57
Cor (PtCo)	45,00	8,33	48,50	81,48
Nitrato ( $\text{mg}/\text{L NO}_3\text{-N}$ )	0,90	0,80	1,37	10,65



Na Tabela 5, verifica-se que todos os parâmetros apresentaram índices de remoção, embora que baixos nos parâmetros que apareceram negativos nas anteriores.

Para uma melhor comparação deve-se observar a Tabela 6, onde estão expressas as reduções do quadro geral e para as coberturas de 20 e 45°.

Tabela 6: Comparação entre as reduções geral, para 20 ° e para 45 °

Parâmetros	Reduções (%)		
	Geral	20°	45°
Condutividade ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	97,67	97,50	97,91
Cloretos (mg/L Cl)	99,42	99,53	99,61
Sulfatos (mg/L $\text{SO}_4$ )	98,74	97,92	99,86
Dureza Total (mg/L $\text{CaCO}_3$ )	94,29	92,72	95,13
Alcalinidade (mg/L $\text{CaCO}_3$ )	89,53	89,25	89,31
TOG (mg/L)	37,52	47,91	10,48
TC (mg/L)	44,74	21,85	54,08
TOC (mg/L)	-13,99	-81,60	14,62
IC (mg/L)	93,33	92,33	93,12
Turbidez (NTU)	89,14	87,50	86,57
Cor (PtCo)	77,29	72,41	81,48
Nitrato (mg/L $\text{NO}_3\text{-N}$ )	0,00	-6,35	10,65

Observando a Tabela 6, verifica-se que os resultados para os experimentos realizados com a inclinação de 45 ° possuem uma discreta tendência a serem melhores, excetuando-se os parâmetros de TOG e turbidez. Entretanto, desconsiderados os parâmetros de TOC e  $\text{NO}_3$ , não se pode inferir que existam diferenças qualitativas significantes entre os dois modos de operação. Esse fato dá a impressão que a qualidade do destilado não depende do ângulo de inclinação da cobertura do destilador. Mas, como se trata de uma mistura onde os componentes possuem larga faixa de temperatura nos pontos de ebulição e nesse caso, a qualidade do destilado é dependente da temperatura de evaporação da água e se um dos modos construtivos oferece mais eficiência no aproveitamento energético, então deveria sim haver variações na qualidade do destilado.

Contudo, como foi observado na discussão sobre os perfis de temperatura apresentados, não se identificou entre eles, constância de variações que pudessem ser explicadas pela diferença nos ângulos. O que se observou, foi que os dois sistemas chegaram

a atingir as mesmas temperaturas. De forma de que se volta à questão inicial, da independência da qualidade do destilado com a configuração geométrica da cobertura do equipamento. Não se tendo uma conclusão decisiva do porquê os experimentos realizados no destilador com inclinação de 45 ° apresentaram remoções onde o de 20 ° levou a acréscimos.

Para que se pudessem tecer afirmações conclusivas a respeito seria necessária a operação concomitante de dois destiladores idênticos que diferissem apenas nos ângulos de inclinação de suas coberturas. Assim sendo, as análises das remoções nos parâmetros foram feitas considerando todos os experimentos como um só bloco.

A Figura 37 traz uma comparação entre os valores de pH nos três pontos amostrais durante os experimentos. Os valores médios do pH 7,86, 7,66 e 8,43.

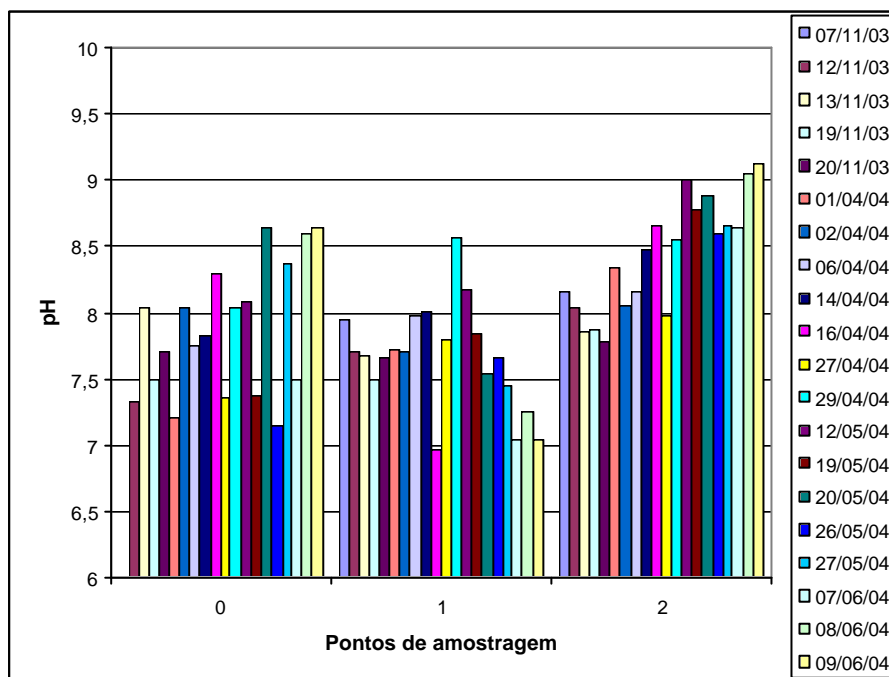


Figura 37: Comparação entre os valores de pH nos três pontos amostrais

Essa redução no pH ocorre devido a perda de carbonatos e outros sais básicos que não são evaporados e vão enriquecer o resíduo do destilado.

Na Figura 38 encontram-se os resultados para condutividade.

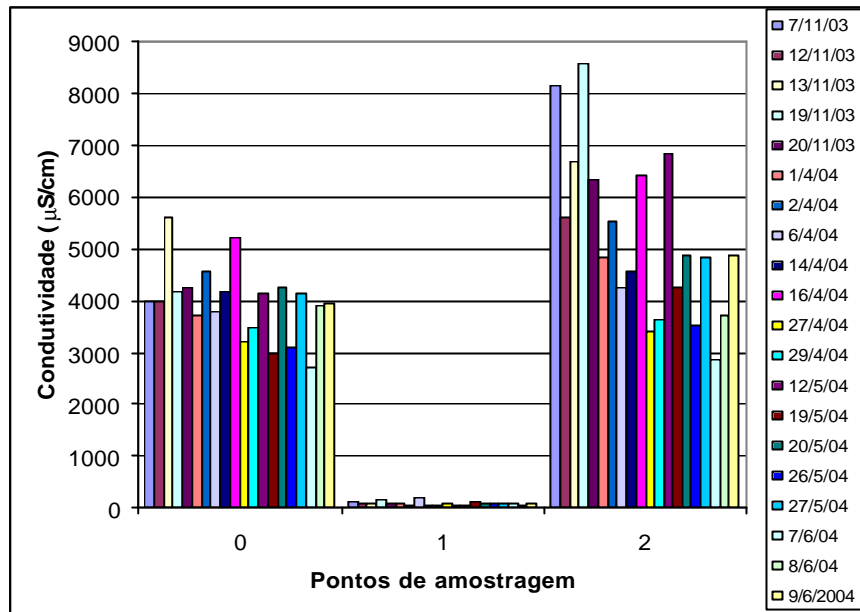


Figura 38: Comparação dos resultados de condutividade nos três pontos amostrais

É evidente a redução de condutividade no destilado e seu acréscimo no resíduo, haja vista que a destilação solar fornece uma água com características de água doce. As reduções obtidas independiam da qualidade da água original, de modo que não obedeceram os mesmos índices de eficiência. Às vezes uma amostra que entrava no destilado com 4.000 µS/cm poderia sair com 160 µS/cm enquanto outra que entrasse com 6.000 µS/cm poderia resultar em um destilado com condutividade inferior a 60 µS/cm, e vice-versa.

A Figura 39 expressa as reduções no teor de cloretos.

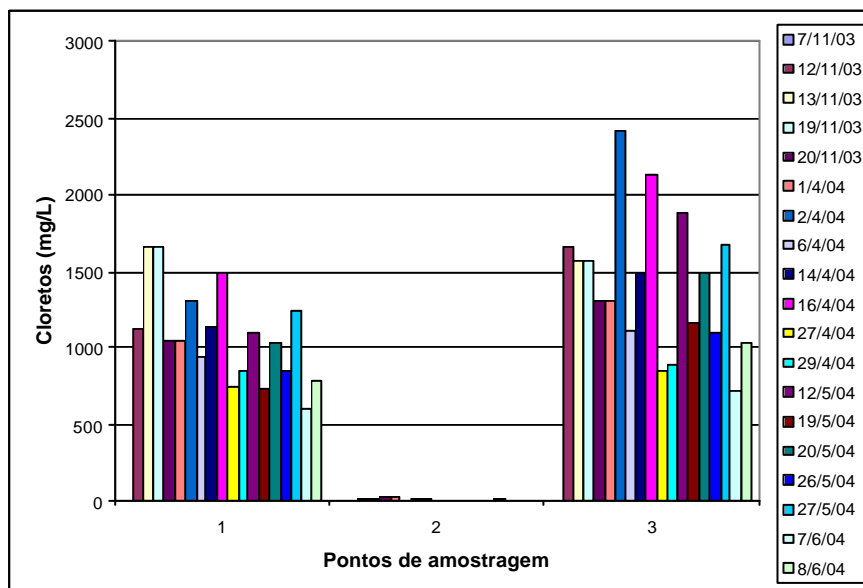


Figura 39: Comparação entre os pontos amostrais para o parâmetro de cloretos

Verifica-se que os teores de cloretos no destilado apresenta valores ao nível da linha de base (abscissa). Esse resultado é idêntico para as concentrações de sulfatos da Figura 40 onde os resultados obtidos para estes parâmetros estão em consonância com a redução de condutividade.

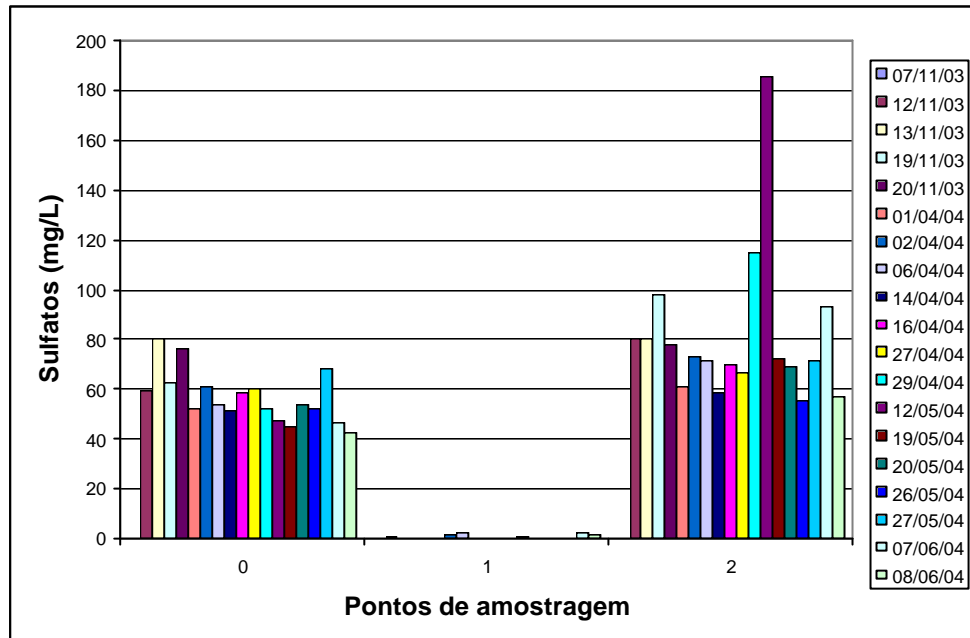


Figura 40: Comparação entre os pontos amostrais para o parâmetro de sulfatos

As análises dos teores de sulfato e cloreto são de acentuada importância em águas de uso industrial, valores altos nesses parâmetros indicam possíveis problemas com incrustação e até corrosividade nos equipamentos e tubulações industriais.

A Figura 41 apresenta os resultados para as determinações da turbidez das amostras.

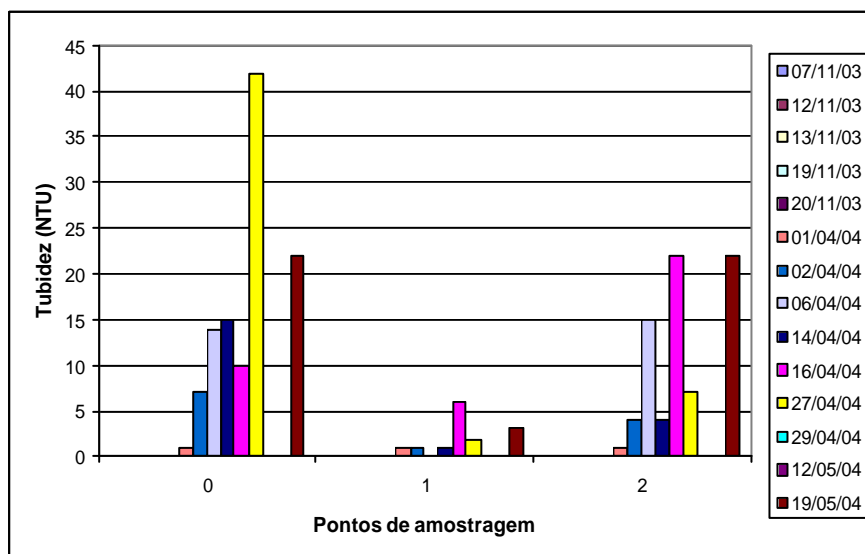


Figura 41: Comparação entre a turbidez da amostra bruta, destilado e resíduo.

Da Figura 41 observa-se que a turbidez da água de produção cai no destilado e aumenta no resíduo. Isso ocorre porque a água destilada é uma água mais pura e, portanto, livre de material em suspensão (principal causador da turbidez). O acréscimo da turbidez no resíduo se deve principalmente a dois fatores: o material em suspensão na água de produção original tende a concentrar-se pela perda de água por evaporação e essa mesma concentração leva ao rejeito ficar saturado de sal, aumentando a turbidez da amostra. Além dos sólidos em suspensão a turbidez também é causada pelo óleo, o qual não é solúvel na água, que diminui no destilado e aumenta no resíduo.

Outro parâmetro de fundamental importância para águas a serem usadas na indústria é a dureza total, águas de dureza elevada são incrustantes e mais prejudiciais que os ânions de cloretos e sulfatos. A Figura 42 apresenta os resultados de remoção da dureza.

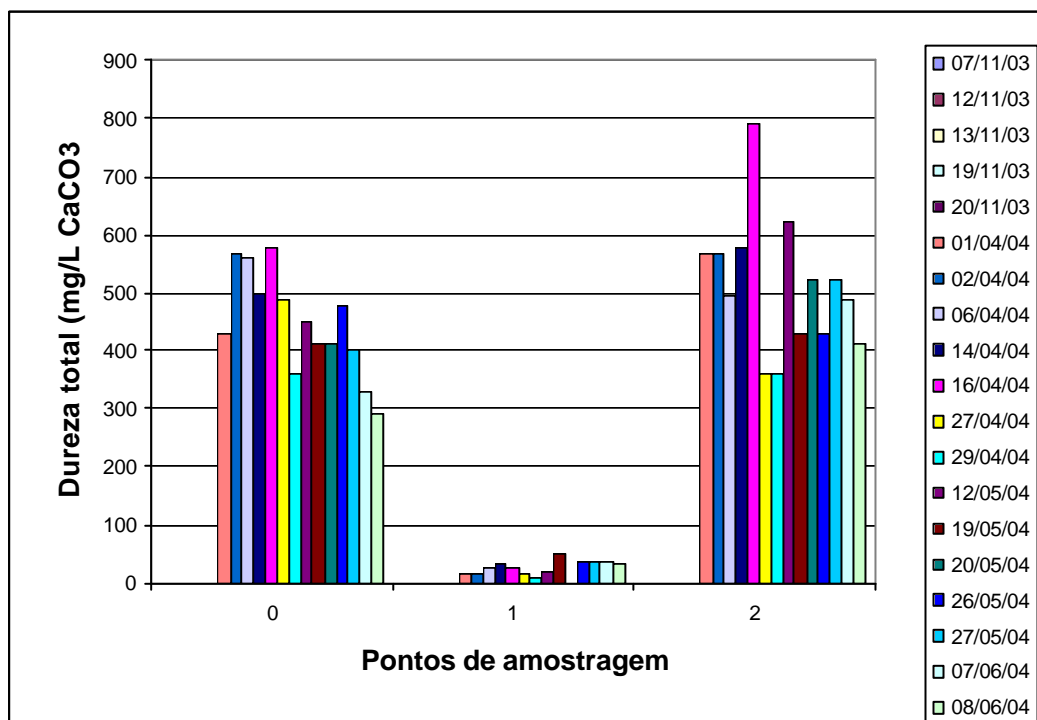


Figura 42: Comparação entre os níveis de dureza antes e depois da destilação

Como pode ser visto a dureza cai fortemente. A água de produção a ser destilada poderia ser classificada com muito dura, dureza superior a 500 mg/L  $\text{CaCO}_3$ . O destilado obtido possui dureza inferior a 50 mg/L  $\text{CaCO}_3$ , o que lhe possibilita ser classificado como branda.

A alcalinidade de uma água é geralmente desejável. Contudo águas que são muito alcalinas, via de regra também são duras. Assim esses parâmetros podem ser analisados juntamente. Na Figura 43 estão expressos os resultados para o parâmetro de alcalinidade, o qual também diminuiu após a destilação.

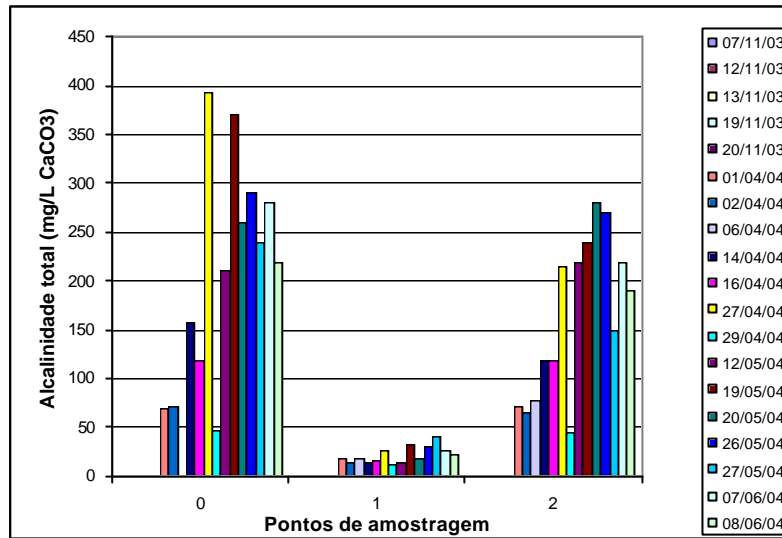


Figura 43: Resultados de alcalinidade para os três pontos amostrais

A alcalinidade do destilado ficou em torno das 25 mg/L CaCO<sub>3</sub>, o que significa uma água com poder de tamponamento, sem, no entanto, ser dura.

A Figura 44 mostra os resultados obtidos para os teores de nitratos. Verifica-se que as concentrações de nitrato oscilaram muito no destilado, ora aumentando ora diminuindo.

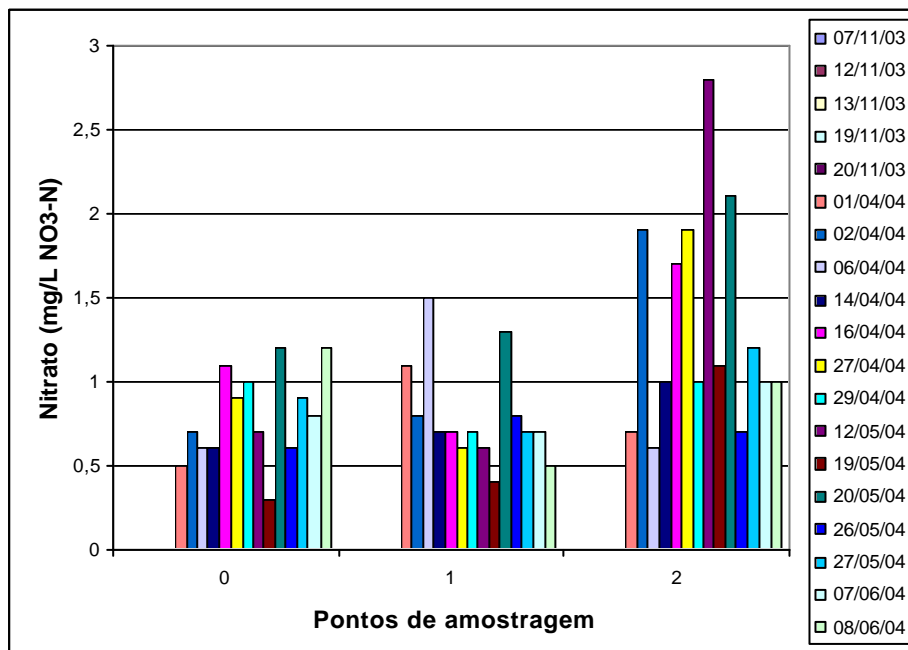


Figura 44: Resultados de nitrato obtidos nos experimentos

Uma observação mais apurada no gráfico revela que de início as concentrações de nitrato no destilado eram maiores que na água de produção e, com o passar do tempo, verifica-se uma tendência a redução das concentrações desse ânion. A explicação para esse fato é a contaminação da água de produção ao entrar em contato com a base de destilação, visto que o gel utilizado na confecção da mesma é base de nitratos.

Entretanto, excetuando-se os primeiros valores, mesmo quando há o incremento no teor do nitrato, as concentrações obtidas ainda estão dentro do que determina a Legislação para águas de classe 3.

A diminuição da contaminação com passar do tempo é atribuída a maturação do material construtivo, que com a exposição ao sol e o uso apresenta volatilização dos contaminantes.

Os parâmetros físico-químicos de maior importância a serem analisados nesse estudo para determinação da viabilidade técnica da utilização da destilação solar para tratamento de águas de produção são concentrações de carbono (TC, TOC e IC) e os teores de óleos e graxas (TOG).

Pois apesar da importância que tem a remoção de sais dessas águas, a literatura já comprova o potencial da destilação solar para dessalinização de águas. A originalidade desse trabalho consiste na proposição da destilação solar para tratamento de águas produzidas com os objetivos de remover não só os sais, bem como a matéria orgânica presente nessa mistura, principalmente representada pelos óleos e graxas, visto que essa classe de substância configura-se como a de remoção mais difícil.

Os resultados encontrados para a remoção de TOG estão apresentados na Figura 45.

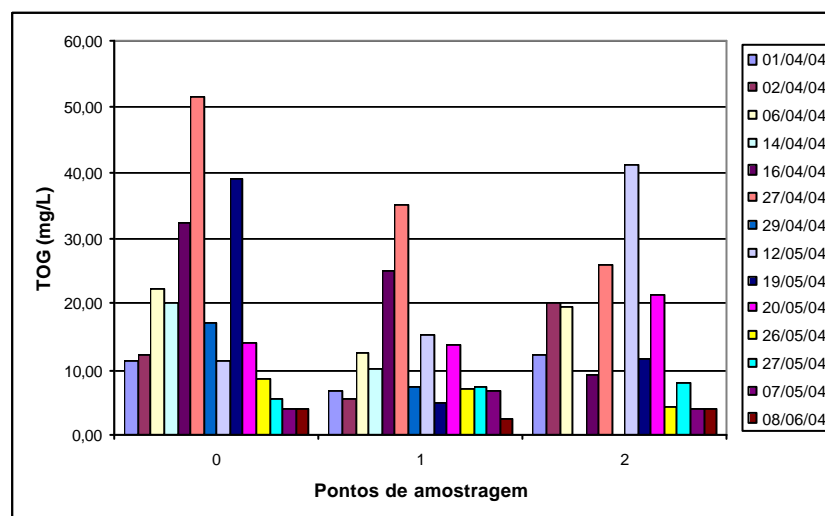


Figura 45: Gráfico da redução do TOG no destilado

Aqui, de forma semelhante ao que ocorreu com o parâmetro de nitrato, verificam-se alguns pontos de acréscimo em lugar de remoção. Contudo, a frequência e os valores dos aumentos são bem menores que anteriormente.

Os cálculos realizados apresentam remoções de TOG de até 87 %, apontando a viabilidade da destilação solar para remoção de TOG tão logo se resolvam os problemas de contaminação.

As análises dos parâmetros de TC, TOC e IC evidenciaram esse problema de contaminação e a tendência é a diminuição do problema no decorrer do tempo. Observe as Figuras 46, 47 e 48, as quais contêm os resultados de TC, TOC e IC para os pontos amostrais pesquisados.

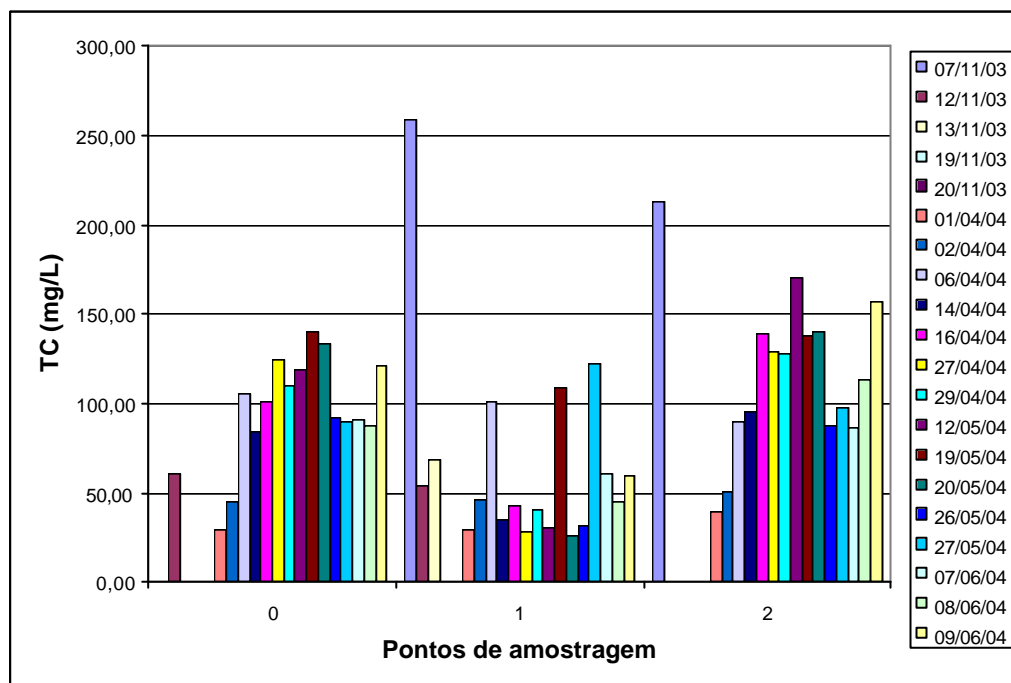


Figura 46: Resultados de Carbono Total (TC)



A análise desses resultados mostra que o TC sempre foi reduzido, isso se deve a remoção dos sais removidos, que estão expressos nos teores de IC das amostras. Compare com a Figura 47 onde estão explicitados os resultados de IC.

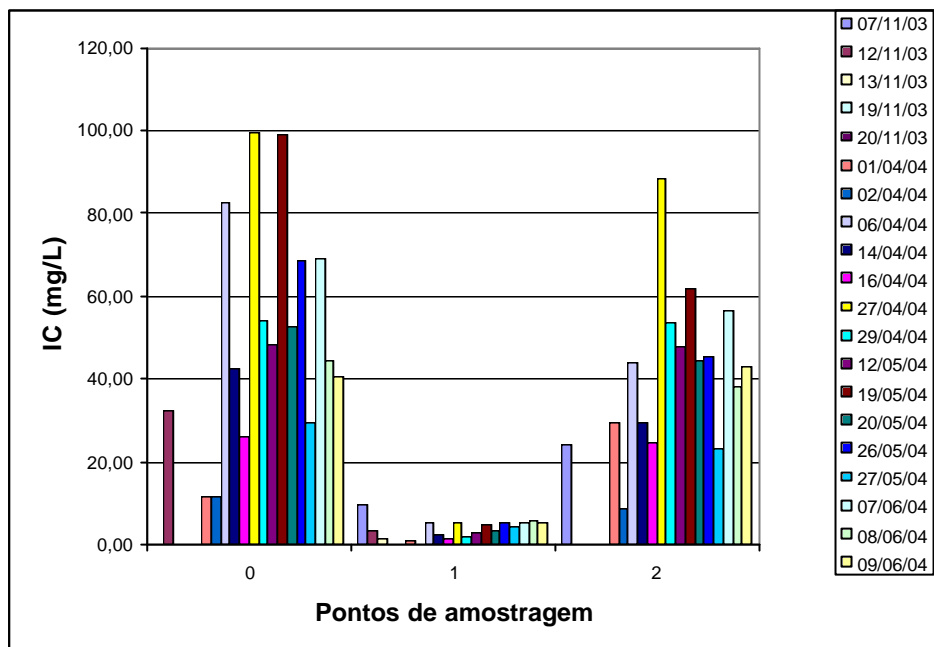


Figura 47: Apresentação da remoção do Carbono Inorgânico (IC)

Entretanto, comprovando a questão da contaminação os resultados para o Carbono Orgânico Total (TOC), mostram a elevação dos teores de TOC em muitos experimentos realizados, como pode ser visualizado na Figura 48.

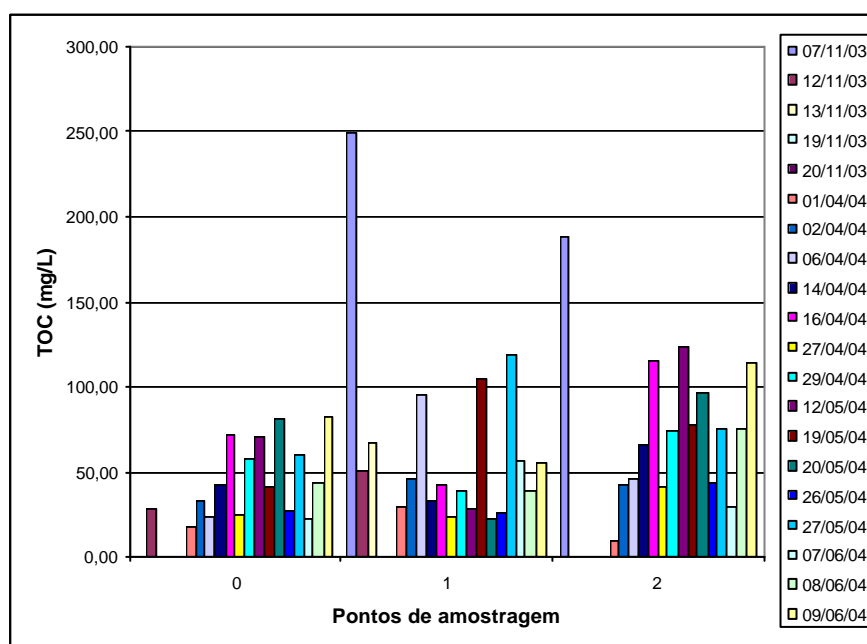


Figura 48: Resultados de TOC para os três pontos amostrais

Com base nos resultados de nitratos, TOG e TOC se aventou a possibilidade da existência de contaminantes no destilador que, em contato com as amostras, a contaminavam. Entretanto, poderia não ser contaminação, mas, simplesmente o comportamento da destilação solar para tratamento de um sistema tão complexo quanto as águas de produção.

Para responder essas perguntas e determinar a potencialidade do destilador solar na separação dos óleos e demais constituintes orgânicos das águas de produção se procedeu a realização de testes de destilação em banho termostático simulando a destilação solar com base nas temperaturas atingidas no destilador real.

### 5.3 – Resultados dos testes de simulação no banho termostático

A amostra a ser destilada no banho recebeu os mesmos procedimentos dados às amostras que faziam parte dos experimentos de campo. Os principais parâmetros de controle nesse caso foram as análises de carbono realizadas no TOC, que foram avaliadas em todas as amostras dos testes realizados, TOG e nitrato (que foram analisados em menor número de amostras). Além dessas análises para determinação da remoção ou não de orgânicos pelo destilador solar, analisaram-se parâmetros de pH, condutividade, a título de comparação.

Nesses testes com controle de temperatura obteve-se remoções de TOC superiores a 90 % como pode ser visualizado na Tabela 7.

Tabela 7: Resultados médios para as frações de carbono via simulação

Parâmetros Físico-químicos	Pontos amostrais			Redução (%)
	0	1	2	
TC (mg/L)	71,43	5,40	60,04	92,43
TOC (mg/L)	33,06	2,92	32,64	91,17
IC (mg/l)	37,30	2,48	27,50	93,36

Os resultados obtidos no TOC, revelam que processos de destilação que se processem na faixa de temperaturas de 50 a 70 °C são eficientes na remoção de carbono orgânico.

A Tabela 8 apresenta os valores médios obtidos para os parâmetros analisados.

Tabela 8: Quadro geral dos parâmetros analisados e as reduções obtidas

<b>Parâmetros Físico-químicos</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>Redução (%)</b>
<b>pH</b>	7,99	7,75	
<b>Condutividade (mS/cm)</b>	3888,00	37,12	99,05
<b>TOG (mg/L)</b>	39,89	5,61	85,94
<b>TC (mg/L)</b>	71,43	5,40	92,43
<b>TOC (mg/L)</b>	33,06	2,92	91,17
<b>IC (mg/L)</b>	37,30	2,48	93,36
<b>Nitrato (mg/L NO<sub>3</sub> – N)</b>	1,68	0,25	85,12

De posse dessa Tabela, verifica-se que todos os parâmetros apresentaram reduções superiores a 85 %, demonstrando que o processo de destilação é eficiente também na remoção de óleos e graxas e nitrato.

Os estudos das faixas de temperaturas não evidenciaram que alguma das faixas entre os 50 e 70 ° C seja mais eficiente que o outro. Estão explicitados nas Tabelas 9 e 10 os resultados divididos por faixa de temperatura. As células com coloração cinza correspondem aos valores que não foram analisados.

Tabela 9: Resultados dos parâmetros na água de produção antes da destilação

		<b>0</b>					
<b>Temperatura</b>		<b>50</b>	<b>55</b>	<b>60</b>	<b>65</b>	<b>67</b>	<b>70</b>
<b>Parâmetros Fís-quí</b>							
<b>pH</b>		7,94		7,89	7,83	8,10	8,19
<b>Condutividade (mS/cm)</b>		3940,00		3110,00	3190,00	6220,00	2980,00
<b>Nitrato (mg/L NO<sub>3</sub>-N)</b>			1,60	2,85			0,60
<b>TC (mg/L)</b>		33,12	111,21	94,75	73,37	64,33	51,80
<b>TOC (mg/L)</b>		28,28	26,19	38,50	25,40	48,88	31,08
<b>IC (mg/L)</b>		4,83	85,04	50,58	47,99	14,65	20,71

Pode-se verificar que a água de produção é muito variável, principalmente nas concentrações dos carbonos. Na Tabela 10 se visualizará os resultados para a água destilada.

Tabela 10: Resultados dos parâmetros na água de produção destilada

	1					
Temperatura	50	55	60	65	67	70
Parâmetros Fís-quí						
pH	7,87		7,65	7,73	7,43	8,05
Condutividade (mS/cm)	50,80		37,00	44,37	23,43	30,00
Nitrato (mg/L NO <sub>3</sub> -N)		0,50	0,20			0,00
TC (mg/L)	6,43	6,55	4,96	4,57	5,41	4,51
TOC (mg/L)	4,09	2,33	1,88	1,89	4,68	2,65
IC (mg/L)	2,35	4,17	3,08	2,68	0,73	1,86

A variação dos resultados para a água destilada estão em consonância com a variabilidade da água de produção. Verifica-se ainda na água destilada via banho termostático que os valores para as frações de carbono são mínimos, apresentando por vezes, valores compatíveis aos de água destilada para análise, o qual é por volta dos 2 mg/L.

#### ***5.4 – Comparação dos resultados obtidos na destilação solar com os obtidos na simulação e com os valores preconizados na Legislação***

Como se pode perceber, a destilação solar apresenta-se eficiente para tratamento de águas produzidas. Entretanto, para se verificar a adequação ou não dessas águas para outros usos, deve-se comparar os valores encontrados com o que estabelece a Legislação vigente. A Legislação aqui usada é a resolução CONAMA n° 20 para águas de classe 3, como já foi citado anteriormente.

Para efetivação dessa comparação observe a Tabela 11.

Tabela 11: Quadro comparativos dos valores obtidos na destilação e valores padrões

<b>Parâmetros físico-químicos investigados</b>	<b>Resultados destilação solar</b>	<b>Resultados simulação</b>	<b>Padrões CONAMA</b>
<b>pH</b>	7,66	7,75	6 a 9
<b>Condutividade (mS/cm)</b>	92,37	37,12	
<b>Cloretos (mg/L Cl)</b>	6,27		250
<b>Sulfatos (mg/L SO<sub>4</sub>)</b>	0,67		250
<b>Dureza Total (mg/L CaCO<sub>3</sub>)</b>	25,50		
<b>Alcalinidade (mg/L CaCO<sub>3</sub>)</b>	21,96		
<b>TOG (mg/L)</b>	11,78	5,61	virtualmente ausente
<b>TC (mg/L)</b>	53,43	5,40	
<b>TOC (mg/L)</b>	49,92	2,92	
<b>IC (mg/L)</b>	3,52	2,48	
<b>Turbidez (NTU)</b>	2,00		100
<b>Cor (PtCo)</b>	9,50		75
<b>Nitrato (mg/L NO<sub>3</sub>-N)</b>	0,70	0,25	10
<b>DBO (mg/L O<sub>2</sub>)</b>	5,00		até 10
<b>OD (mg/L O<sub>2</sub>)</b>	5,88		não < 4
<b>TDS (mg/L)</b>	123,00		500

Na Tabela 11 as áreas hachuradas em cinza indicam os parâmetros físico-químicos que não foram analisados na simulação. As áreas hachuradas com pontinhos indicam que os limites para esses parâmetros não estão nas normas.

Observando os resultados pode-se constatar que a amostra destilada obedece todos os requisitos estabelecidos na Legislação, exceto o que se refere ao teor de óleos e graxas. Entretanto a indicação virtualmente ausente é algo muito vago e está relacionada a metodologia adotada para sua determinação. Conferindo-se o TOG obtido na simulação, nota-se que se trata de um valor baixo de TOG, 5,61 mg/L. Caso a análise tivesse sido realizada via metodologia gravimétrica, como o método do soxhlet, dificilmente esse valor teria sido detectado, visto o range dessa metodologia ser superior a 40 mg/L de TOG, configurando-se assim como virtualmente ausente.

---

Mas como um dos usos propostos para essa água é a agricultura, estudos devem ser intensificados no sentido de se investigar a toxidez ou não para as culturas de algodão, mamona, entre outras.

Os valores para as frações orgânicas obtidas na simulação revelam a potencialidade da destilação solar para o uso a que se propõe, pois se compararmos os teores de TOC com os das águas potáveis (água do Campus da UFRN) se perceberá que os mesmos são similares.

---

---

**CAPÍTULO VI:**  
**CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA**  
**TRABALHOS FUTUROS**

---

## 6. Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

De acordo com os dados dos balanços energético e de massa, verificou-se que o destilador solar desenvolvido apresentou rendimentos compatíveis (2,85 a 7,14 L/m<sup>2</sup>d) com os encontrados na literatura para seus similares. Enfatizando que o isolamento utilizado não estava nas condições de otimização, logo, esse rendimento tende a ser melhorado.

A remoção média de TOG no destilador solar foi de 37,52%, enquanto na simulação experimental ficou em torno dos 85,94%.

O destilador solar operando com a inclinação na cobertura de 45° apresentou melhores resultados em termos de rendimento e eficiência de remoção de TOG e nitrato. Entretanto os experimentos para 45° e 20° aconteceram em dias diferentes.

Pode-se inferir que a água destilada obtida atende aos requisitos CONAMA em quase todos os pontos, podendo ser utilizada, com ressalvas, na irrigação de culturas não comestíveis como o algodão e a mamona.

Com os resultados obtidos com a simulação confirmou-se que o equipamento de destilação solar encontrava-se com problemas de contaminação e pode-se verificar a real potencialidade da destilação solar para o tratamento de águas produzidas. Essa contaminação, certamente é advinda do material utilizado na fibra do qual a base foi construída, mas também tem relação com a borracha de vedação utilizada.

Propõe-se que seja deslocado no equilíbrio no sentido da condensação, recolhendo a água destilada com mais eficiência. Para tanto, uma maior inclinação nas canaletas de recolhimento daria bons resultados.

Como sugestões para trabalhos futuros propõe-se:

- Estudo da viabilidade técnico-econômica da destilação solar para tratamentos de efluentes oleosos;
  - Fazer um *scale-up*;
  - Estudo dos efeitos da irrigação de culturas não comestíveis com a água destilada obtida;
  - Estudar as duas inclinações ao mesmo tempo;
  - Estudar durante o ano todo;
  - Avaliar o uso de Destiladores Solares para remoção de metais.
  - Estudo de um sistema híbrido de tratamento de efluentes oleosos por fotoquímica e destilação solar, que poderia ser misto ou em série.
-



---

**CAPÍTULO VII:  
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

---

## 7. Referências bibliográficas

AL-HINAI, H., AL-NASSRI, M. S., JUBRAN, B. A. Parametric investigation of a double-effect solar still in comparison with a single-effect solar still, 2002. *Desalination*, 150 (2002)75-83

APHA, AWWA, WEF. Standard methods for examination of water and wastewater. 19. ed. Washington: American Public Health Association, 1995.

AZEVEDO, E. B. *Aplicação da fotocatalise para a degradação de poluentes das águas de produção de petróleo*. 1998. 94f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Química), COPPE, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio de Janeiro.

BARROS NETO, B., SCARMINIO, I. S., BRUNS, R. E. Como Fazer Experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria. Editora da UNICAMP, Campinas, SP, 2001.

BESSA, E. SANT'ANNA Jr. e DEZOITTI, M. Photocatalytic/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> treatment of oil field produced waters. *Applied Catalysis*, Elsevier, 29 (2001) 125-134.

BEZERRA, Arnaldo Moura. *Aplicações Térmicas da Energia Solar*. Editora Universitária UFPB, 4ª edição, João Pessoa, PB, 2001.

BOUCHEKIMA, Bachir. A Solar Desalination Plant for Domestic Water Needs in Arid Areas of South Algeria. *Desalination* 153 65-69, 2002.

CONAMA 20, RESOLUÇÃO CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) N° 20, de 18 de junho de 1986, Publicado no Diário Oficial da União de 30/07/1986. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res86/res2086.html>>

CURBELO, F. D. da S. *Estudo da Remoção de Óleo em Águas Produzidas na Indústria de Petróleo, por Adsorção em Coluna Utilizando a Vermiculita Expandida e Hidrofobizada*. 2002. 93f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Centro Tecnológico,

Departamento de Engenharia Química, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN.

DACACH, Nelson Gandur (1979). *Sistemas Urbanos de Água*. Rio de Janeiro. Editora Livros Técnicos e Científicos. XII, 490p. Cap. 19.10.

DACACH, Nelson Gandur. *A água em nossas vidas*. . Editora Livros Técnicos e Científicos, Salvador, BA. 1990.

De PAUL, I. Propuesta de modelo de un destilador tipo batea. *AVERMA*, Vol. 4, 02-21, 2000.

De PAUL, I. Coeficiente de transferencia convectiva h en el interior de um destilador tipo batea, *AVERMA*, Vol. 4, 03-27, 2000.

De PAUL, I. QUITANA, J. M. Características Del Funcionamiento no Estacionário de um Destilador Solar, *AVERMA*, Vol. 7, nº 1, 2003.

ESTEBAN, C. FRANCO, J. FASULO, A. Destilador Soalr Asistido con Colector Solar Acumulador. Vol. 4, 03-39, 2000.

FERNANDES JR., W. E. *Planejamento Experimental Aplicado a um Novo Separador Líquido-líquido Utilizado no Tratamento de Águas Residuais Contaminadas com Petróleo*. 2002. 125f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN.

FUENTES, R., ROTH, P. Teoría de La Destilación Solar en Vacío. *Revista Facultad de Ingeniería, U. T. A., Chile*, vol. 4, 1997.

GARCIAS, C. M. *Potabilidade da Água Obtida por Destilação Solar da Água do Mar*. 1985. 72f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.

---

HENDERSON, S. B.; GRIGSON, S. J. W.; JOHNSON, P. and RODDIE. Potential Impact of Production Chemicals on the Toxicity of Produced Water Discharges from North Sea Oil Platforms. *Marine Pollution Bulletin*, vol. 38, 12, pp. 1141-1151, 1999.

HIMMELBLAU, David M. Engenharia Química: Princípios e Cálculos. Prentice-Hall, Rio de Janeiro, RJ, 1984.

KERN, Donald Q. Processos de Transmissão de Calor. Editora Guanabara Dois S. A., Rio de Janeiro, RJ, 1980.

LIMA, A. F. *Caracterização e Estudo da Bioconversão da Matéria Orgânica Dissolvida em Efluentes da PETROBRÁS*. 1996. 131f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN.

MACEDO, H. *Tratamento de águas com altas concentrações de cloretos*. 1996. f. 79. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

MELO, A. G. F. *Estudo Experimental de um Destilador de Água do Tipo Atmosférico Regenerativo*. 1997. 94f. Dissertação (Mestrado em Ciência, na área de Concentração de Fontes Renováveis de Energia) – Programa de Pós-graduação em Tecnologias Energéticas Nucleares, UFPE, Recife, PE.

MONTERO, M. T., TORRES, D. M. R., ROBREDO, P., QUIROGA M. Mejoras en la calidad de vida de pobladores de un caserío en la localidad de Cafayate mediante el uso de energía solar...2000...

SAITOH, T. S., EL-GHETANY, H. H. A pilot solar water disinfecting system: performance analysis and testing. *Solar Energy*. V. 72, nº3, pp. 261-269, 2002.

SILVA, D. N. *Degradação fotoquímica de hidrocarbonetos de gasolina em efluentes aquosos*. 2002. 106f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Tecnologia,

---

Departamento de Engenharia Química, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

SILVA, D. N., OLIVEIRA, J. D., OLIVEIRA, H. N. M., CHIAVONE FILHO, O. Determinação de Dados de Equilíbrio Líquido-Vapor (ELV) para Sistemas Aquosos Contendo Hidrocarbonetos Utilizando um Ebuliômetro de Othmer. COBEQ, 2002.

SMITH, J. M., van NESS, H. C., ABBOTT, M. M. Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics, 5<sup>th</sup> ed., McGraw-Hill, 1996.

THOMAS, J. E. Fundamentos de Engenharia de Petróleo. Petrobrás, Rio de Janeiro, 2001.

TIWARI, G. N. and SING, A. K. Thermal Efficiency of Double Slope FRP Solar Distiller: An Analytical and Experimental Studies. Desalination, 82 (1991), 223-232.

TOYAMA, S., ARAGAKI, T., SALAH, H. M., MURASE, K. Dynamic Characteristics of a Multistage Thermal Diffusion Type Solar Distillator. Desalination, 67 (1987)21-32.

UV- Planeta terra, UV index forescat, Institute of medical physics and biostatistics, University of Veterinary Medicine Vienna. Disponível em <[http://i115srv.vu-wien.ac.at/uv/uv\\_online.htm](http://i115srv.vu-wien.ac.at/uv/uv_online.htm)>, 08 de agosto de 2004.

van NESS, H. C. and SMITH, J. M. Introdução a Termodinâmica da Engenharia Química. Editora Guanabara Koogan S. A. Rio de Janeiro, RJ, 1980.

von SPERLING, Marcos (1995). Introdução a Qualidade de Águas e do Tratamento de Esgotos (Princípios de Tratamento Biológico de Águas Residuárias). DESA,UFGM.

---

---

**ANEXOS**

---

---

**ANEXO 1: Resolução CONAMA nº 20 de 18 de  
junho de 1986**

---

Anexo 1: Resolução nº 20 CONAMA de 18 de junho de 1986

Art. 17 - Não será permitido o lançamento de poluentes nos mananciais sub-superficiais.

Art. 18 - Nas águas de Classe Especial não serão tolerados lançamentos de águas residuárias, domésticas e industriais, lixo e outros resíduos sólidos, substâncias potencialmente tóxicas, defensivos agrícolas, fertilizantes químicos e outros poluentes, mesmo tratados. Caso sejam utilizadas para o abastecimento doméstico deverão ser submetidas a uma inspeção sanitária preliminar.

Art. 19 - Nas águas das Classes 1 a 8 serão tolerados lançamentos de despejos, desde que, além de atenderem ao disposto no Art. 21 desta Resolução, não venham a fazer com que os limites estabelecidos para as respectivas classes sejam ultrapassados.

Art. 21 - Os efluentes de qualquer fonte poluidora somente poderão ser lançados, direta ou indiretamente, nos corpos de água desde que obedeçam às seguintes condições:

a) pH entre 5 a 9;

b) temperatura: inferior a 40°C, sendo que a elevação de temperatura do corpo receptor não deverá exceder a 3 °C;

c) materiais sedimentáveis: até 1 mL/litro em teste de 1 hora em cone Imhoff. Para o lançamento em lagos e lagoas, cuja velocidade de circulação seja praticamente nula, os materiais sedimentáveis deverão estar virtualmente ausentes;

d) regime de lançamento com vazão máxima de até 1,5 vezes a vazão média do período de atividade diária do agente poluidor;

e) óleos e graxas:

- óleos minerais até 20 mg/l

- óleos vegetais e gorduras animais até 50 mg/l;

f) ausência de materiais flutuantes

A Tabela 1 apresenta os valores máximos admissíveis de algumas substâncias nos padrões para lançamento de efluentes preconizados pela resolução CONAMA nº 20.

---



Tabela 1: valores máximos admissíveis para lançamento de efluentes (Fonte CONAMA)

Amônia:	5,0 mg/l N
Arsênio total:	0,5 mg/l As
Bário:	5,0 mg/ Ba
Boro:	5,0 mg/l B
Cádmio:	0,2 mg/l Cd
Cianetos:	0,2 mg/l CN
Chumbo:	0,5 mg/l Pb
Cobre:	1,0 mg/l Cu
Cromo hexavalente:	0,5 mg/l Cr
Cromo trivalente:	2,0 mg/l Cr
Estanho:	4,0 mg/l Sn
Índice de fenóis:	0,5 mg/l C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> OH
Ferro solúvel:	15,0 mg/l Fe
Fluoretos:	10,0 mg/l F
Manganês solúvel:	1,0 mg/l Mn
Mercúrio:	0,01 mg/l Hg
Níquel:	2,0 mg/l Ni
Prata:	0,1 mg/l Ag
Selênio:	0,05 mg/l Se
Sulfetos:	1,0 mg/l S
Sulfito:	1,0 mg/l SO <sub>3</sub>
Zinco:	5,0 mg/l Zn
Compostos organofosforados e carbonatos totais:	1,0 mg/l em Paration
Sulfeto de carbono:	1,0 mg/l
Tricloroetano:	1,0 mg/l
Clorofórmio :	1,0 mg/l
Tetracloroeto de Carbono:	1,0 mg/l
Dicloroetano:	1,0 mg/l
Compostos organoclorados não listados acima (pesticidas, solventes, etc):	0,05 mg/l

