

**Universidade Federal de Santa Catarina  
Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental**

**REMOÇÃO DO CARBOFURANO POR MEIO DA DESTILAÇÃO  
SOLAR NATURAL**

**Fernanda Souza Lenzi**

**FLORIANÓPOLIS, (SC)  
FEVEREIRO/2009**

**Universidade Federal de Santa Catarina  
Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental**

**REMOÇÃO DO CARBOFURANO POR MEIO DA DESTILAÇÃO  
SOLAR NATURAL**

**Fernanda Souza Lenzi**

**Trabalho apresentado à Universidade  
Federal de Santa Catarina para Conclusão  
do Curso de Graduação em Engenharia  
Sanitária e Ambiental**

**Orientador  
Prof. Dr. Maurício Luis Sens  
Co-orientadora  
MSc. Denise Conceição de Gois Santos Michelin**

**FLORIANÓPOLIS, (SC)  
FEVEREIRO/2009**

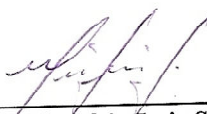
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

REMOÇÃO DO CARBOFURANO POR MEIO DA DESTILAÇÃO SOLAR  
NATURAL

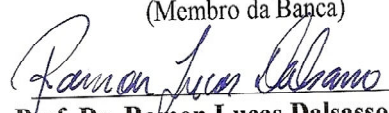
FERNANDA SOUZA LENZI

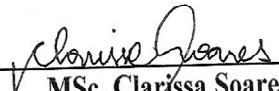
Trabalho submetido à Banca Examinadora como parte dos requisitos  
para Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e  
Ambiental-TCC II

BANCA EXAMINADORA :

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Maurício Luis Sens  
(Orientador)

  
MSc. Denise de Conceição Gois Santos Michelan  
(Membro da Banca)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Ramon Lucas Dalsasso  
(Membro da Banca)

  
\_\_\_\_\_  
MSc. Clarissa Soares  
(Membro da Banca)

FLORIANÓPOLIS, (SC)  
MARÇO/2009

*Dedico este trabalho aos meus pais Maria Helena e Arcanjo,  
aos meus irmãos Marcos e Luiz,  
e ao meu namorado George,  
que sempre me apoiaram em todas as minhas escolhas.*

## AGRADECIMENTOS

Ao Professor Maurício por tornar possível a realização desta pesquisa e por ter me aceito no Laboratório de Potabilização de Águas (LAPOA).

À amiga e colega de trabalho Denise, que acompanhou todas as etapas deste trabalho e não mediu esforços para me orientar e ajudar nas análises de Carbofurano.

Aos amigos do LAPOA que sempre contribuíram com novas idéias e na discussão dos resultados: Bruno, Marcus, Bianca, Denise, Zacarias, Dimas, Luis, Alex, Renata e Ramon. Obrigada pela amizade e pelos bons momentos durante estes dois anos no LAPOA.

Aos meus pais, por todo apoio e carinho, que foram essenciais para minhas conquistas durante a faculdade. Agradeço também aos meus irmãos, que por estarem na área de engenharia também me ajudaram na construção do sistema-piloto e discussão dos resultados obtidos.

Agradeço especialmente as amigas Elisandra, Larissa e Marina, com quem compartilhei inúmeros momentos de alegria.

Ao George, pelo companheirismo e paciência ao longo dos últimos anos, mesmo que às vezes à distância.

À Karoline, que colaborou na etapa de execução do piloto de destilação solar.

Todo meu reconhecimento aos amigos de faculdade Viviane e Karybian, que me ajudaram na realização das análises e na obtenção de resultados essenciais para conclusão deste trabalho.

À assistente operacional Luciana, pelo apoio no monitoramento do destilador solar e na medição das temperaturas durante o funcionamento do mesmo.

À doutoranda Isabel, que forneceu os dados de radiação solar utilizados no trabalho.

Aos membros integrantes do Laboratório Integrado do Meio Ambiente (LIMA), principalmente à Arlete, pela disponibilidade no esclarecimento de dúvidas.

Ao técnico Edevaldo e ao bolsista Duda do Laboratório de Termodinâmica (LABTERMO), pela construção da bandeja metálica utilizada nos experimentos e pelos conselhos dados antes da construção do destilador.

## RESUMO

Em áreas rurais, o uso inadequado de agrotóxicos em plantações vem comprometendo os corpos receptores dessas regiões. Além disso, a demanda por uma tecnologia de tratamento de água de baixo custo e de fácil operação e manutenção é muito grande. Como alternativa para solucionar esta problemática, tem-se a destilação solar. A tecnologia da destilação solar é um processo extremamente simples, onde a água é tratada por meio dos mecanismos naturais de evaporação e condensação. O objetivo desta pesquisa é tratar, através da destilação solar, a água proveniente do rio Itajaí do Sul – SC que contém considerável concentração de agrotóxico pertencente ao grupamento químico dos carbamatos, cujo princípio ativo é o Carbofurano. O destilador solar também foi testado posteriormente com água da Praia dos Ingleses – SC, para verificar a eficiência e a aplicabilidade do destilador na remoção de um composto inorgânico com ponto de ebulição bem maior que o do Carbofurano. Todos os parâmetros físico-químicos das amostras de água destilada atenderam aos padrões de potabilidade da Portaria N°518/2004 do Ministério da Saúde. Houve remoção do Carbofurano nos ciclos de destilação solar analisados, entretanto a eficiência de remoção variou bastante entre os ciclos, ocorrendo desde remoção pequena de 12% até remoção total de 100%. As águas tratadas pelo destilador solar apresentaram concentração do Carbofurano inferior ao limite máximo determinado pela *World Health Organization* (WHO). Quanto aos experimentos realizados com água do mar, houve remoção completa de 100% da salinidade (condutividade) nas amostras, evidenciando que é mais fácil remover compostos inorgânicos do que orgânicos por meio desta tecnologia.

*Palavras-chave:* Destilação Solar, Água Potável, Carbofurano.

## ABSTRACT

In rural areas, the inappropriate use of pesticides in plantations has compromised many sources of fresh water, and consequently the need for a simple low-cost technique to treat water is significant. Solar distillation technology is an extremely simple process, where by water is treated by the natural mechanisms of evaporation and condensation. The aim of this research is to treat water from the Itajaí do Sul river in Santa Catarina by Solar Distillation. This water contains a considerable concentration of a pesticide in the carbamate group, which contains the active ingredient Carbofuran. The solar still was also later tested with the water from Ingleses beach – SC, in order to verify the still's efficiency and applicability to remove an inorganic compound with a boiling point much higher than that of Carbofuran. After distillation the water met the required safety standards set by the Brazilian Ministry of Health – Portaria N°518/2004, proving it was safe to drink. Carbofuran removal was observed in the solar distillation cycles, however the removal efficiency varied considerably between cycles, from a low level of 12% to a complete removal of 100%. Distilled water samples were shown to possess a Carbofuran concentration below the maximum limit determined by the World Health Organization (WHO). For the experiments with salt water samples, there was a 100% successful rate in the complete removal of salinity (conductivity). This shows that it is easy to remove inorganic than organic compounds by this process.

*Keywords:* Solar distillation, Drinking water, Carbofuran.

## ÍNDICE

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>11</b>
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>12</b>
2.1. Objetivo Geral.....	12
2.2. Objetivos Específicos .....	12
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>13</b>
3.1. Energia solar .....	13
3.2. Radiação solar.....	14
3.3. Efeito estufa .....	16
3.4. Histórico da destilação solar .....	16
3.5. Técnica da destilação solar na produção de água potável .....	17
3.5.1. <i>Produção e Eficiência</i> .....	18
3.5.2. <i>Aspectos Econômicos</i> .....	20
3.5.3. <i>Operação e Manutenção</i> .....	21
3.6. Trabalhos desenvolvidos no Laboratório de Potabilização de Águas – LAPOA ....	22
3.7. Qualidade da água potável.....	23
3.8. Qualidade da água destilada .....	23
3.9. Microcontaminantes.....	24
3.9.1. <i>Considerações gerais</i> .....	24
3.9.2. <i>Histórico</i> .....	24
3.9.3. <i>Definição e Classificação</i> .....	25
3.10. Carbofurano .....	26
3.10.1. <i>Propriedades físico-químicas</i> .....	26
3.10.2. <i>Tempo de meia-vida</i> .....	27
3.10.3. <i>Constante da Lei de Henry</i> .....	27
3.10.4. <i>Uso agrônômico do Carbofurano</i> .....	27
3.10.5. <i>Efeitos na saúde</i> .....	28
3.10.6. <i>Legislação</i> .....	29
<b>4. METODOLOGIA.....</b>	<b>29</b>
4.1. Caracterização da área de estudo .....	29
4.2. Sistema piloto de tratamento de água – Destilador Solar .....	30
4.3. Análise da concentração do carbofurano .....	34
4.3.1. <i>Coleta e preservação da água bruta</i> .....	34
4.3.2. <i>Extração e purificação</i> .....	35
4.3.3. <i>Eluição e concentração</i> .....	36
4.3.4. <i>Técnica cromatográfica – CLAE/UV</i> .....	37
4.4. Experimento com chaleira metálica.....	39
4.5. Determinação da água salina .....	39
4.5.1. <i>Coleta e preservação da água bruta</i> .....	39
4.6. Parâmetros para análise da qualidade da água.....	41
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>42</b>
5.1. Avaliação econômica do sistema piloto de destilação solar .....	42



5.2. Avaliação quantitativa do sistema piloto de destilação solar .....	44
5.3. Avaliação dos parâmetros físico-químicos da água bruta e tratada.....	47
5.4. Remoção do Carbofurano nas amostras de água do Rio Itajaí do Sul.....	50
5.5. Balanço de massa do Carbofurano.....	52
5.6. Remoção do Carbofurano através da chaleira metálica.....	53
<b>6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>54</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>55</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Classificação Toxicológica .....	26
Tabela 3.2 – Classificação pelas cores dos rótulos.....	26
Tabela 3.3 – Propriedades físico-químicas do carbofurano.....	27
Tabela 3.4 – Sinais e Sintomas das intoxicações por inseticidas carbamatos.....	28
Tabela 4.1 – Equipamentos utilizados para análise da qualidade da água.....	41
Tabela 5.1: Avaliação econômica do destilador solar proposto.....	43
Tabela 5.2: Comparação qualitativa das amostras de água do Rio Itajaí do Sul.....	47
Tabela 5.3: Comparação qualitativa das amostras de água da Praia dos Ingleses.....	48
Tabela 5.4: Concentrações do Carbofurano nas amostras de água bruta e destilada.....	51
Tabela 5.5: Balanço de massa do Carbofurano em três ciclos.....	53

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Fusão nuclear.....	14
Figura 3.2 – Radiação solar.....	15
Figura 3.3 – Espectro eletromagnético.....	15
Figura 3.4 – Funcionamento de um destilador solar.....	17
Figura 3.5 – Balanço energético do destilador solar.....	19
Figura 3.6 – Fórmula estrutural do Carbofurano.....	26
Figura 4.1– Localização do sistema piloto de destilação solar.....	30
Figura 4.2 – Destilador solar antes e durante sua operação, respectivamente.....	30
Figura 4.3 – Desenho esquemático da altura da pirâmide.....	31
Figura 4.4 – Desenho esquemático de uma das faces da cobertura de vidro.....	31
Figura 4.5 – Perspectivas do destilador solar e vista superior da cobertura piramidal...	32
Figura 4.6 – Vista lateral do destilador solar e representação de detalhes construtivos.	32
Figura 4.7 – Representação do reservatório de água bruta.....	33
Figura 4.8 – Tratamento de água por meio do sistema piloto construído.....	33
Figura 4.9 – Localização do ponto de coleta.....	34
Figura 4.10 – Sistema de filtração da amostra.....	35
Figura 4.11 – Sistema (Manifold) para extração e purificação da amostra líquida.....	36
Figura 4.12 - Evaporador rotativo e banho Maria aquecido.....	36
Figura 4.13 – Processos de extração, purificação, eluição e concentração da amostra..	37
Figura 4.14 – Cromatógrafo HPLC/UV .....	37
Figura 4.15 – Esquema do funcionamento do CLAE/UV.....	38
Figura 4.16 – Simulação do processo da destilação solar com chaleira metálica.....	39
Figura 4.17-Localização do ponto de coleta da água bruta na Praia dos Ingleses.....	40
Figura 5.1 – Avaliação econômica do sistema piloto de destilação solar.....	42
Figura 5.2 – Avaliação econômica do sistema piloto de destilação solar, considerando as despesas médicas economizadas e manutenção.....	43
Figura 5.4 – Relação entre a produção de água destilada e a temperatura da água.....	45
Figura 5.5 – Relação entre a produção de água e a temperatura média do ambiente.....	45
Figura 5.6 – Relação entre a produção de água destilada e a radiação global média.....	46
Figura 5.9 - Parâmetros de controle da água do mar.....	49
Figura 5.13 – Comparação das concentrações de Carbofurano com a legislação.....	52

## 1. INTRODUÇÃO

A escassez de água é um problema de dimensão global, uma vez que afeta inúmeros países e é motivo de conflitos entre eles. O rápido crescimento industrial e o aumento da população são os principais responsáveis pela grande demanda de água na atual sociedade. A falta de água é acompanhada da deterioração da qualidade de água disponível, em função da poluição e da degradação do meio ambiente.

Dados do Fundo das Nações Unidas para a Infância (Unicef, 2005) constataam que mais de um bilhão de pessoas não tem acesso à água potável. O fato de uma grande parcela da população não ter acesso a água de boa qualidade e em quantidade suficiente, implica na concentração de pessoas ao redor das mesmas fontes de água potável já conhecidas, baixas condições de saneamento e baixa qualidade de vida (MALUF, 2005).

Diante destes problemas, o desenvolvimento e necessidade de métodos alternativos de tratamento de água se tornam cada vez mais evidente. A destilação solar é um processo simples de purificação da água, e segue o mesmo princípio do ciclo hidrológico que ocorre na natureza. A água contaminada é aquecida até formar o vapor de água, que é então condensado e transformado novamente em água (fase líquida), e finalmente é escoado para um sistema de recolhimento. Os contaminantes ali presentes não evaporam junto com a água, permitindo assim a remoção deles através dessa forma de tratamento.

Em regiões de boa insolação, a prática da destilação solar vem se expandindo, uma vez que este processo utiliza como fonte de energia, o Sol, sendo este uma fonte inesgotável, gratuita e que não agride ao meio ambiente. Por outro lado, mesmo em lugares frios ou com falta de espaço, a destilação pode ser realizada, gerando-se calor através de outra forma de energia.

Atualmente encontram-se diversos modelos de destiladores solares, construídos com diferentes materiais, todos buscando maior eficiência na produção de água potável. Com base em vários estudos já realizados, um destilador solar é capaz de remover uma série de contaminantes da água, tais como: metais pesados, bactérias, agrotóxicos, algas, entre outros (FLENDRIG *et al.*, 2008; HANSON *et al.*, 2004).

Para o desenvolvimento deste estudo, projetou-se um destilador solar de vidro com cobertura em forma de pirâmide, com o intuito inicial de remover agrotóxicos através da destilação solar natural e avaliar a potabilidade da água produzida. O objetivo da pesquisa é analisar a água proveniente do rio Itajaí do Sul – SC que contém considerável concentração de agrotóxico pertencente ao grupamento químico dos carbamatos, cujo princípio ativo é o Carbofurano. A escolha pelo Carbofurano foi devido a sua larga utilização nas culturas de milho e cebola na Região de Ituporanga.

Para manter ou aumentar a produtividade agrícola e também para proteger as culturas de pragas, muitos agricultores utilizam agrotóxicos em suas plantações. Devido ao uso inadequado dos agrotóxicos, imprecisão da tecnologia empregada e a falta de segurança individual, cerca de 50 a 80% do que é aplicado vai para o ambiente, contamina o ar, o solo e, conseqüentemente, a água e os organismos vivos, principalmente a população rural. Isto faz com que trabalhadores rurais fiquem mais expostos ao Carbofurano, podendo ficar contaminados (ITUPORANGA, 2003).

Por outro lado, a literatura traz que a técnica da destilação solar possui capacidade limitada na remoção de compostos voláteis, como agrotóxicos, que são

removidos com sucessos variados. A capacidade de remover compostos orgânicos com um destilador solar depende principalmente da solubilidade e do ponto de ebulição do composto (FLENDRIG *et al.*, 2008).

Para avaliar ainda a eficiência e a aplicabilidade do sistema piloto de destilação solar proposto, foram analisadas também amostras de água coletadas na Praia dos Ingleses, situada no norte da cidade de Florianópolis, a fim de verificar a remoção de um composto não volátil e com ponto de ebulição muito maior que o do Carbofurano.

O desenvolvimento da tecnologia da destilação solar pode fazer com que pequenas comunidades ultrapassem as crises causadas por períodos de seca, por contaminação das águas e até mesmo em situações de emergência, onde o abastecimento de água pode estar comprometido.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo Geral**

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a eficiência da remoção do Carbofurano em águas contaminadas através da destilação solar natural.

### **2.2. Objetivos Específicos**

- Projetar e monitorar o funcionamento de um destilador solar com cobertura piramidal de vidro com inclinação de 25°.
- Avaliar a qualidade da água produzida através da destilação solar natural e comparar com os padrões de potabilidade estabelecidos pelo Ministério da Saúde, através da Portaria nº 518 (BRASIL, 2004).
- Verificar a remoção do Carbofurano contido em amostras de água do rio Itajaí do Sul - Ituporanga/SC, por meio da destilação solar natural, e comparar com os limites estabelecidos pela *World Health Organization* (WHO, 2004).
- Verificar a remoção do Carbofurano contido em amostras de água do abastecimento público da Companhia Catarinense da Água e Saneamento-CASAN, através de uma chaleira metálica e aquecimento artificial, a fim de simular o processo de destilação solar natural e comparar com os limites estabelecidos pela WHO (2004).
- Verificar a remoção do sal contido em amostras de água coletadas na Praia dos Ingleses, situada no norte de Florianópolis/SC, através do processo da destilação solar.
- Avaliar a eficiência do sistema piloto, através da quantificação diária da produção de água por metro quadrado da área do destilador solar, em função da temperatura ambiente, temperatura da água de alimentação e radiação global média diária.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. Energia solar

Com a Revolução Industrial em meados do século XVIII, os seres humanos começaram a requerer mais energia para consumo. Portanto, fontes de energia não-renováveis na forma de carvão, óleo e madeira tornaram-se insuficientes com o tempo. Suas reservas limitadas e seus potenciais de poluição ambiental levaram a busca por fontes de energia alternativas e renováveis (ŞEN, 2004).

Acredita-se hoje que as energias renováveis desempenharão um papel importante no futuro, já que são ambientalmente limpas, não produzem gases do efeito estufa e deveriam ter recursos suficientes para uso em larga escala.

Entre as fontes de energia renovável, a energia solar é a de maior significância, devido a sua abundância, além da sua distribuição na natureza, quando comparada com outras formas de energia renováveis, tais como a eólica, geotérmica, hidráulica, ondas e marés.

O sol é a estrela mais próxima da Terra e sua energia radiante é praticamente a única fonte de energia que influencia os movimentos atmosféricos e o clima (IQBAL, 1983). A densidade média do sol de  $1,4 \text{ g/cm}^3$  é ligeiramente maior que a da água de  $1,0 \text{ g/cm}^3$ . Esta baixa densidade é devido ao fato de o sol ser composto predominantemente pelos mais leves elementos químicos, o hidrogênio (70%) e o hélio (27%), e o restante da matéria solar é formada por elementos não conhecidos (ŞEN, 2004).

Duffie e Beckman (1975) definem o sol como esfera de matéria gasosa e intensamente quente, com um diâmetro de  $1,39 \times 10^6 \text{ km}$ . O sol está  $1,5 \times 10^8 \text{ km}$  distante da Terra. Sua superfície atinge uma temperatura de  $6000^\circ\text{C}$ , em contraste com a temperatura no seu interior, que pode chegar a  $40 \times 10^6^\circ\text{C}$ .

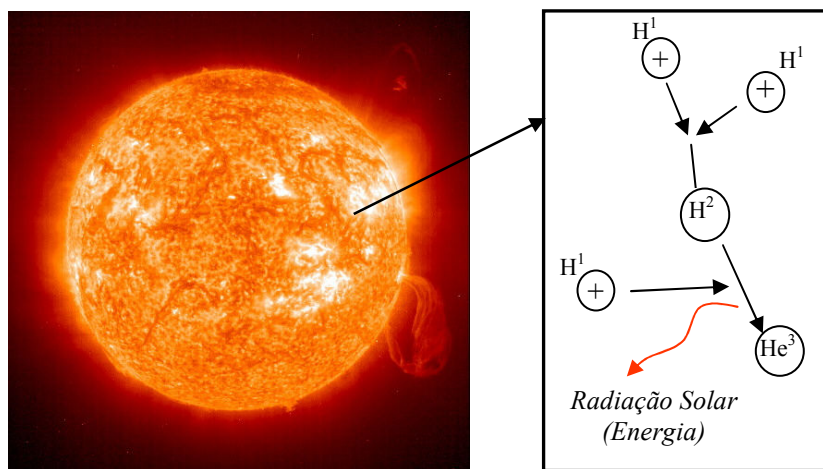
Segundo Iqbal (1983), a constante solar é a taxa de energia solar total em todos os comprimentos de onda, incidente em uma unidade de área exposta aos raios solares. A radiação na distância média entre o sol e a Terra foi medida por diversos pesquisadores e os valores encontrados variam entre 1338 a  $1368 \text{ W/m}^2$ .

A utilização da energia solar ganhou maior interesse em 1970, devido a crise do petróleo e o conseqüente aumento do custo da energia proveniente dessas fontes convencionais. De acordo com Şen (2004), muitos estudos tecnológicos e científicos foram desenvolvidos na tentativa de converter a continuidade da energia solar em sustentabilidade para o conforto humano.

A energia solar está sendo aplicada principalmente no aquecimento de água e na produção de energia elétrica a partir de células fotovoltaicas. A potabilização da água através da energia solar também é uma técnica promissora, sendo favorável a regiões ensolaradas e subdesenvolvidas, como pode ser observada em algumas regiões do Brasil.

### 3.2. Radiação solar

A origem da radiação solar que é recebida na Terra é dada pela conversão do hidrogênio em hélio através da fusão solar. Em temperaturas e pressões normais do interior do sol, um núcleo de hélio é formado pela união de quatro núcleos mais leves de hidrogênio. Durante esta conversão, um único núcleo de hidrogênio instável pelo calor e pressão pode formar um duplo núcleo de hidrogênio, que então se une a um terceiro núcleo de hidrogênio para formar o hélio-3, com liberação de energia eletromagnética (Figura 3.1). O hélio-3 pesa um pouco menos que o hélio formado por quatro átomos de hidrogênio, e esta pequena diferença de matéria é convertida diretamente em radiação eletromagnética, ou seja, a fonte inesgotável de energia solar (ŞEN, 2004).

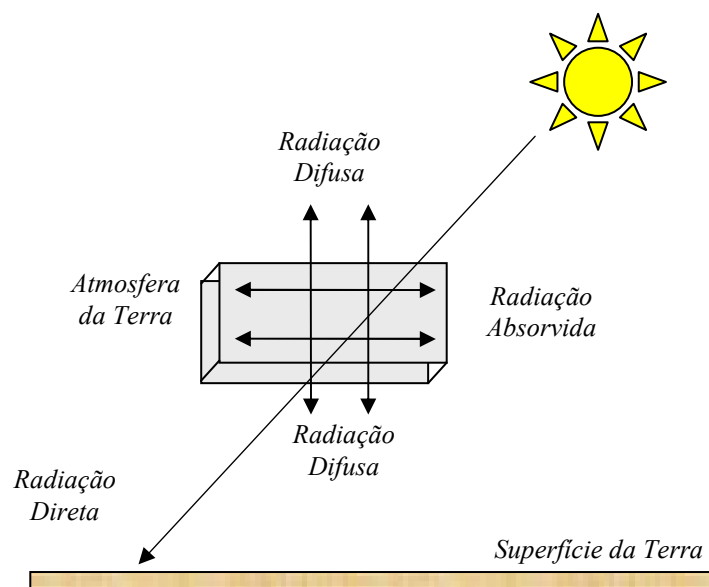


**Figura 3.1 – Fusão nuclear.**

**Fonte: NASA (2008) e adaptado de Şen (2004), respectivamente.**

Quando a radiação solar entra na atmosfera da Terra, uma parte da energia incidente é removida pela dispersão e outra parte pela absorção, como é mostrado na Figura 3.2. Da parte dispersa, também chamada de radiação difusa, uma parcela volta para o espaço e a parcela restante atinge a Terra. Já a radiação solar que chega diretamente na Terra sem qualquer perturbação é chamada de radiação direta.

A radiação difusa é inicialmente interceptada por constituintes do ar como vapor de água, dióxido de carbono, nuvens, poeiras, para depois ser liberada em várias direções. Com isso, as proporções relativas às radiações difusa e direta vão depender do local, estação do ano, elevação do nível médio do mar e período do dia (ŞEN, 2004).

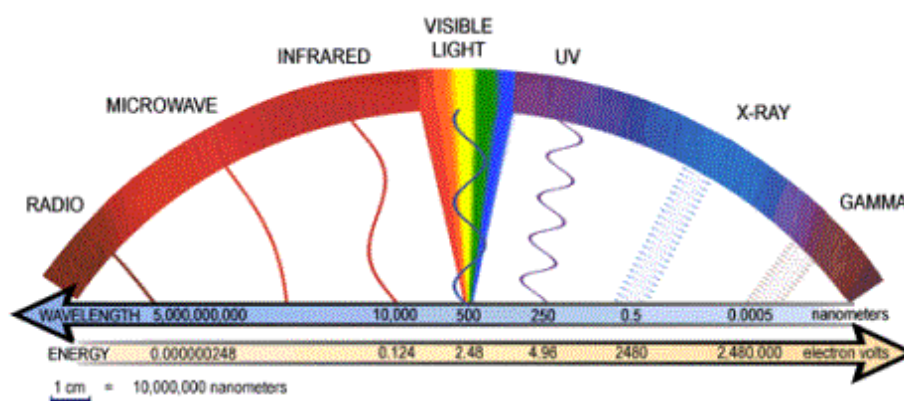


**Figura 3.2 – Radiação solar.**  
**Fonte: adaptado de Şen, 2004.**

Em dias claros, a radiação solar da parte difusa representa cerca de 10 a 20% da radiação total que chega a superfície da Terra, porém em um dia coberto com nuvens, esta proporção pode chegar até a 100% (ŞEN, 2004).

O sol apresenta uma alta variação de temperatura entre suas regiões, assim como há uma contínua emissão e absorção de energia de uma região para outra. Os ciclos das manchas solares, formados pela redução de temperatura e pressão do interior do sol, produzem variações espaciais e temporais na distribuição espectral da energia radiante que deixa o sol (IQBAL, 1983).

Desta forma, o espectro eletromagnético pode ser dividido em faixas conforme os comprimentos de onda ( $\lambda$ ) das radiações (DUFFIE e BECKMAN, 1975): radiação ultravioleta ( $\lambda < 0,38 \mu\text{m}$ ); radiação visível ( $0,38 \mu\text{m} < \lambda < 0,78 \mu\text{m}$ ) e radiação infravermelha ( $\lambda > 0,78 \mu\text{m}$ ), conforme pode ser observado na Figura 3.3.



**Figura 3.3 – Espectro eletromagnético.**  
**Fonte: NASAexplores, 2008.**

### 3.3. Efeito estufa

De acordo com Tiwari (2008), os raios-X e os raios UV extremos são altamente absorvidos na ionosfera pelo nitrogênio, oxigênio e outros gases atmosféricos. O ozônio e os vapores de água absorvem largamente raios ultravioletas e infravermelhos. Existe uma quase completa absorção de raios de pequeno comprimento de onda na atmosfera.

Este fenômeno atmosférico de bloqueio dos raios ultravioleta ocorreu há aproximadamente 420 milhões de anos e permitiu o crescimento das plantas no planeta Terra. Sem o chamado efeito estufa, a Terra seria um planeta congelado com temperatura média de  $-18^{\circ}\text{C}$ . Portanto, para a sobrevivência das plantas, é necessário um ambiente favorável controlado por raios ultravioletas de pequeno comprimento de onda transmitidos pela atmosfera (TIWARI, 2008).

Um efeito similar pode ser observado em vários ambientes artificiais, basta haver um ambiente fechado que permita a incidência de raios solares. Uma cobertura de vidro ou plástico pode representar o papel da atmosfera e o ambiente fechado, a Terra. O mesmo princípio do efeito estufa é verificado no processo da destilação solar natural (MURAKAMI, 2005).

### 3.4. Histórico da destilação solar

Ao longo dos últimos séculos, as técnicas de destilação solar vêm sendo usadas como uma forma de tratamento de água. Acredita-se que o primeiro uso de destiladores solares foi em 1551, quando alquimistas árabes usaram recipientes de vidro e espelhos côncavos para destilar água (MALIK *et al*, 1982).

A primeira aplicação moderna da destilação solar foi em 1872, pelo engenheiro sueco Charles Wilson, que construiu um destilador solar no norte do Chile para abastecer água a uma população mineira. Este destilador era composto por unidades paralelas, abrangendo uma superfície total de  $4700\text{m}^2$ , e produzia mais de 23000L de água potável por dia. Para absorver a luz do sol, foi colocada uma bacia rasa pintada de preto (TLEIMAT, 1979).

Durante a Segunda Guerra Mundial, o interesse pela destilação solar foi reavivado quando Maria Telkes desenvolveu destiladores solares infláveis de plástico destinados às balsas salva-vidas. Com mais de 200.000 unidades, foi a maior produção de destiladores solares ocorrida até hoje (HOWE *et al*, 1977).

No período entre 1958 e 1965, a “Estação de Pesquisa sobre Destilação Solar” (do inglês, *Solar Distillation Research Station*) testou na Flórida um grande número de destiladores solares, e chegou à conclusão de que os custos associados à construção de grandes destiladores não seriam compensados pela economia resultante da energia solar gratuita (CHAIBI, 2000). Logo, a pesquisa hoje tem enfoque para construção de destiladores solares de pequeno porte.

Apesar dos diversos modelos de destiladores existentes, assim como pesquisas referentes à destilação solar, esta simples técnica de tratamento de água não é vastamente aplicada. Segundo Chaibi (2000), isto evidencia o fato de alguns fatores serem fundamentais na aceitação da destilação solar. Tais fatores são: baixa produção de água potável por metro quadrado de área do destilador solar,



necessidade de compromisso local para adequada operação e manutenção do destilador, e investimento inicial relativamente alto.

### 3.5. Técnica da destilação solar na produção de água potável

A destilação solar tem como objetivo produzir água própria para o consumo humano a partir de águas salinas ou contaminadas, através da incidência de raios solares. É um processo simples de purificação da água e segue o mesmo princípio do ciclo hidrológico que ocorre na natureza, ocasionados pelos fenômenos de vaporização (mudança do estado líquido para o gasoso) e condensação (mudança do estado gasoso para o líquido) (MURAKAMI, 2005).

O destilador solar consiste em um recipiente formado por uma cobertura transparente de vidro e uma bandeja geralmente pintada de preto, onde é colocada a água a ser tratada. A radiação solar atravessa esta cobertura transparente e é absorvida pela água e principalmente pela área da bandeja escurecida. Conseqüentemente, a água contida na bandeja é aquecida e evaporada continuamente até alcançar um estado de saturação dentro do destilador (BOUCHEKIMA, 2002). Os vapores de água sobem até entrarem em contato com a área interna fria da cobertura de vidro. Assim, os vapores de água são condensados em água destilada, que escoam ao longo da cobertura através de sua inclinação, e é coletada por um sistema de recolhimento, como pode ser observado na Figura 3.4.

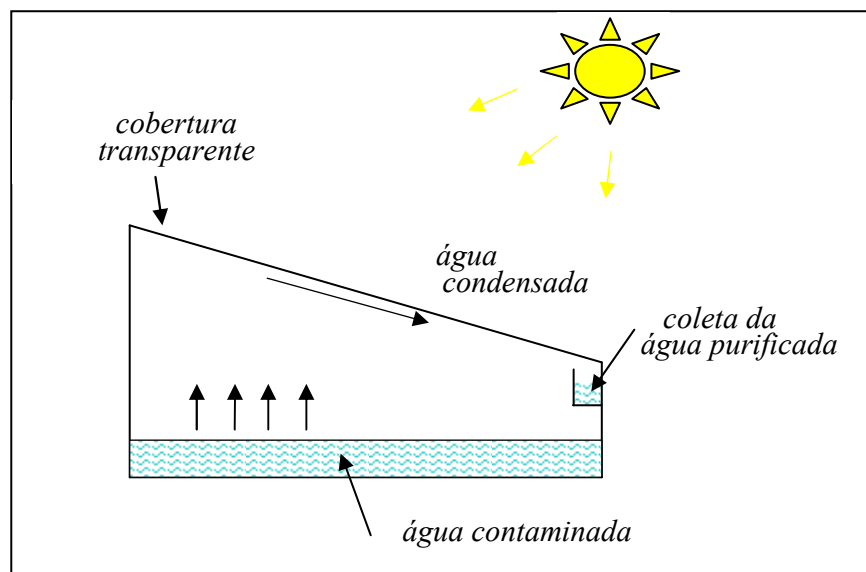


Figura 3.4 – Funcionamento de um destilador solar.

Fonte: adaptado de Flendrig *et al*, 2008.

Quando a água é evaporada, as impurezas são deixadas para trás na água contaminada ou salobra. O sal, por exemplo, necessitaria de uma temperatura de 1400°C para evaporar. O destilador solar realiza o mesmo trabalho que a fervura, produzindo uma água talvez até mais pura, pois quando as bolhas da fervura estouram, elas podem contaminar a água destilada com pequenas frações de água contaminada, que são lançadas no vapor (MALUF, 2005).

As unidades de destilação solar são empregadas para tratar diversas fontes de água, como água salmoura, água doce e águas contaminadas. A destilação é eficiente na remoção de compostos inorgânicos como metais e nitrato, dureza (cálcio e magnésio) e particulados da água contaminada. O processo de ebulição também elimina microorganismos como bactérias (EXTOXNET, 2008).

Uma limitação da destilação solar é ainda sua capacidade de remover compostos orgânicos, que são removidos com sucessos variados. É visto que a capacidade de remover compostos orgânicos com uma unidade de destilação solar depende das características do composto, como solubilidade e ponto de ebulição (FLENDRIG *et al.*, 2008).

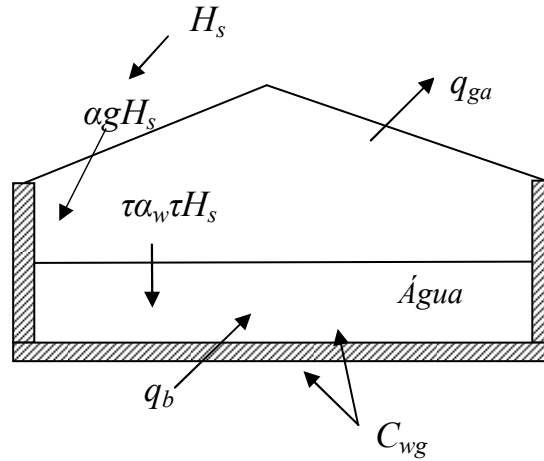
Os compostos orgânicos que evaporam a temperaturas maiores que o ponto de ebulição da água, são removidos de maneira eficiente pela destilação solar. Alguns compostos nocivos, como o benzeno e o tolueno, possuem ponto de ebulição menor que o da água, logo não são removidos pela condensação e contaminam a água destilada (EXTOXNET, 2008).

### 3.5.1. Produção e Eficiência

O desempenho de um destilador solar pode ser descrito através de um balanço energético, que indica a distribuição da energia solar incidente em ganho de energia útil e várias perdas (DUFFIE e BECKMAN, 1991). Para a unidade de área de um destilador solar e uma intensidade de radiação solar  $H_s$ , os seguintes parâmetros são considerados (SOARES, 2004):

- Transmitância da cobertura:  $\tau$
- Absorbância da cobertura:  $\alpha_g$
- Absorbância da bandeja:  $\alpha_w$
- Capacidade térmica do sistema:  $C_{wg}$
- Energia absorvida pelo vidro:  $\alpha_g H_s$
- Energia transmitida pelo vidro:  $\tau H_s$
- Energia absorvida pela bandeja:  $\tau H_s \times \alpha_w$
- Energia estocada pelo sistema:  $C_{wg} \times \frac{dT_w}{dt}$

O balanço energético de um destilador solar está esquematicamente representado na Figura 3.5. Observa-se que foram incluídas as perdas de calor através da cobertura de vidro ( $q_{ga}$ ) e através das paredes laterais e do fundo ( $q_b$ ).



**Figura 3.5 – Balanço energético do destilador solar.**  
**Fonte: adaptado de Soares, 2004.**

Para a determinação da energia estocada pelo sistema, Duffie e Beckman (1991) apresentam a Equação 1.

$$C_{wg} \times \frac{dT_w}{dt} = \alpha g H_s + \alpha_w + H_s - q_{ga} - q_b \quad (1)$$

O calor total transferido da água bruta para a cobertura de vidro ( $q_t$ ) é representado pela soma dos calores transferidos pela radiação ( $q_r$ ), por convecção ( $q_c$ ) e por evaporação-condensação ( $q_e$ ), conforme mostra a Equação 2.

$$q_t = q_r + q_c + q_e \quad (2)$$

O calor total transferido para o meio externo, através do vidro, é calculado através da soma anterior acrescida da energia absorvida pelo vidro (SOARES, 2004), de acordo com a Equação 3.

$$q_{ga} = q_r + q_c + q_e + \alpha g H_s \quad (3)$$

As perdas de calor através das paredes laterais e do fundo do destilador solar são calculadas, levando-se em conta a condutividade do material ( $k_w$ ), a temperatura da água interna ( $T_w$ ) e a temperatura do ambiente externo ( $T_a$ ), conforme a Equação 4.

$$q_b = k_w (T_w - T_a) \quad (4)$$

O rendimento  $\eta$  de um destilador solar é calculado em função da produção de água destilada  $P$  (kg/m<sup>2</sup>dia), radiação solar incidente  $H_s$  (kcal/m<sup>2</sup> dia) e do calor latente de evaporação da água (kcal/kg), como é mostrado na Equação 5.

$$\eta = \frac{P \times \lambda}{H_s} \quad (5)$$

A produção de água potável por meio da destilação solar depende drasticamente da intensidade da radiação solar (AL-HAYEK e BADRAN, 2004). Por esta razão, muitos países localizados em regiões áridas e semi-áridas vêm adotando a destilação solar para superar o problema da escassez de água. O abastecimento de água dos Emirados Árabes, Kwait e Arábia Saudita, por exemplo, é quase 100% proveniente de dessalinizadores da água do mar (NASSAR *et al.*, 2007).

De acordo com Malik *et al.* (1982), a quantidade de água destilada que pode ser produzida varia muito com a posição geográfica, posição do sol, condições meteorológicas, modelo do destilador solar e técnicas operacionais.

Cappelletti (2002) traz que um destilador solar convencional produz aproximadamente 5L/m<sup>2</sup>.dia em um dia quente de verão e 2L/m<sup>2</sup>.dia em um dia de inverno com radiação difusa. Já Tiwari (2008) afirma que, em climas quentes, os destiladores solares produzem geralmente entre 2 e 3L/dia para cada m<sup>2</sup> de área.

Soares (2004) construiu vários sistemas piloto para determinar a melhor inclinação da cobertura piramidal de um destilador solar, avaliando-se o escoamento da água condensada e a produção de água destilada. Para este experimento, quatro pirâmides de vidro foram construídas com inclinações de 15°, 25°, 30° e 45°, conservando-se a mesma área da base de 35x35cm. Entre os resultados obtidos, verificou-se que a água escoou 100% a partir da inclinação de 15°, e a pirâmide com 25° de inclinação mostrou-se mais eficiente na produção de água destilada.

Al Hayek e Badran (2004) avaliaram a produtividade de um destilador solar assimétrico e outro simétrico, utilizando diferentes lâminas de água bruta (1,5, 3,0 e 4,0cm). A produção de água destilada aumentou com a diminuição da lâmina de água, devido ao aumento de radiação solar absorvida pela base dos destiladores. A adição de uma tinta preta na base também contribuiu para uma maior produção.

A espessura da lâmina de água também interfere significativamente na eficiência de inativação de microorganismos. O aumento da profundidade da água implica em menor eficiência do processo, considerando um tempo fixo de exposição (SOMMER *et al.*, 1997 *apud* PROSAB, 2001).

### 3.5.2. Aspectos Econômicos

A seleção de um destilador solar depende de vários parâmetros, tais como a quantidade de água requerida, condições locais de tempo, disponibilidade de mercado, e, sobretudo a disponibilidade de capital (DELYANNIS e BELESSIOTIS, 1995).

Dependendo do material empregado para a construção do destilador solar, o custo inicial pode ser relativamente alto, quando comparado com sua pequena capacidade de produção de água. Entretanto, quando se utiliza a energia gratuita proveniente do Sol, o capital investido inicialmente é recuperado ao longo dos anos, chegando a produzir água destilada com custo zero.

Khanna *et al.* (2008) realizaram um estudo sobre a avaliação econômica de um conjunto de dez destiladores solares, com uma produção total de 15-20 L/dia,

localizados em uma cidade desértica da Índia. Assumindo que a operação e a manutenção do destilador solar não exigem especialização técnica, e considerando como zero o custo referente ao terreno utilizado, a água destilada teria um custo de 2 rúpias/L (aproximadamente R\$0,095/L) ainda no primeiro ano de funcionamento do destilador, já que as despesas médicas dos habitantes seriam economizadas.

De acordo com Bouchekima *et al* (1998), a tecnologia de destilação solar é ideal para comunidades isoladas com demanda de água menor que 50m<sup>3</sup>/dia. Outras tecnologias, tais como osmose reversa, desinfecção com cloro e troca iônica, apresentam um custo mais elevado quando aplicadas em pequena escala.

### 3.5.3. Operação e Manutenção

Diversos autores, como Al-Hayek e Badran (2004), consideram que as unidades de destilação solar são de fácil manutenção e operação. Entretanto, Delyannis e Belessiotis (1995) relataram suas desastrosas experiências, quando seus destiladores solares projetados para uma capacidade de 12-40 m<sup>3</sup>/d foram destruídos, uma vez que eram operados por pessoas leigas e totalmente inaptas, sem um adequado programa de manutenção e reparo.

Delyannis e Belessiotis (1995) recomendam que a água de alimentação do destilador solar seja retirada e recolocada a cada 2-3 dias. Esta operação deve ser realizada no início da manhã quando a água está fria, evitando assim a perda de energia. Os destiladores solares devem estar em operação o ano inteiro, mesmo no inverno, porque em certas regiões há muitos dias ensolarados com considerável radiação solar.

Além dos problemas econômicos e sociológicos associados à operação de sistemas de destilação solar, alguns problemas técnicos podem causar dificuldades operacionais, que reduzem a eficiência do destilador. Um bom projeto para dispositivos de destilação solar deve considerar os seguintes aspectos (CHAIBI, 2000):

- Fuga de vapor: Para funcionar de forma eficiente, os destiladores solares devem ser razoavelmente herméticos para evitar a perda de vapor de água antes da condensação.
- Capacidade de absorção de calor: É desejável manter a temperatura da bandeja (contendo a água contaminada) o mais alto possível, o que aumentará a transferência de calor por evaporação-condensação do que por convecção e radiação.
- Acumulação de sal e organismos: O crescimento de algas e outras partículas de microflora na superfície da água contaminada, geralmente reduzem a transferência de calor para esta água.
- Disponibilidade de objetos de reserva: A falta de objetos de reserva pode afetar o sistema de operação e contribuir para o abandono ou destruição das instalações de destilação solar.

### 3.6. Trabalhos desenvolvidos no Laboratório de Potabilização de Águas – LAPOA

Soares (2004) desenvolveu um equipamento de destilação solar em forma de uma pirâmide, com faces de vidro, e avaliou a eficiência do equipamento através da produção e da qualidade da água (análises físico-químicas e bacterianas) e temperatura. Os estudos iniciais foram realizados no Laboratório de Potabilização de Águas - LAPOA/UFSC, em Florianópolis/SC, onde a maior produção de água foi registrada em um dia do mês de março de 2004, no valor de 6,2 L/m<sup>2</sup>.dia, e a produção média mensal do mesmo mês ficou entre 3,1 e 3,7 L/m<sup>2</sup>.dia. Posteriormente o equipamento foi encaminhado para uma região do nordeste brasileiro, onde obteve-se uma produção média mensal entre 3,0 e 3,7 L/m<sup>2</sup>.dia, testado em um período muito chuvoso. Quanto a análise qualitativa da água, todos os parâmetros analisados apresentaram-se de acordo com os limites estabelecidos pela Portaria n°518/2004, com exceção dos ensaios realizados com água bruta muito contaminada.

Murakami (2005) avaliou o tratamento de água salgada, de chuva e doce contaminada com flúor, através de um destilador solar em forma de pirâmide invertida com dimensões 40 x 40 x 14,5 cm, com inclinação de 25°. Os estudos foram desenvolvidos no Laboratório de Potabilização de Águas – LAPOA/UFSC, e a produção média de água destilada obtida foi de 0,88 L/m<sup>2</sup>.dia. Os resultados obtidos de qualidade de água foram satisfatórios em relação aos padrões de potabilidade da Portaria n° 518/2004, com exceção para a água doce contaminada com flúor.

Reif (2006) avaliou um estudo sobre a eficiência de um equipamento de destilação solar metálico. As faces da pirâmide eram metálicas e pintadas de preto, e a inclinação da cobertura foi de 25°. A quantidade de água destilada produzida foi inicialmente entre 1,3 e 1,9 L/m<sup>2</sup>.dia. Um dos problemas apresentados com o uso de uma pirâmide metálica é o fato de o metal esquentar muito com a radiação solar e não permitir a condensação do vapor de água. Diante desse problema, foi estudado posteriormente a coleta de água evaporada através de uma mangueira para captação do vapor de água e conduzida até uma garrafa de vidro. Entretanto, não foi obtida uma quantidade significativa de água, devido a falta de pressão suficiente para que o vapor fosse encaminhado até a garrafa coletora de água.

Ferrari (2008) construiu um equipamento de destilação solar com dimensões de 1,55 x 1,55m e o material escolhido para a fabricação do mesmo foi a fibra de vidro. A produção de água destilada esperada era entre 7,45 e 8,89 L/m<sup>2</sup>.dia, mas devido a problemas construtivos a produção obtida foi muito menor, oscilando entre 1,5 e 2,4 L/dia. Após a resolução do problema, a produção passou para aproximadamente 7 L/m<sup>2</sup>.dia O mesmo equipamento apresentou problemas quanto ao gosto e odor transferidos à água, devido à resina aplicada no interior dos reservatórios de água bruta e potável do equipamento de destilação solar. O objetivo inicial do trabalho era avaliar a eficiência do destilador solar proposto na remoção de cianotoxinas, mas não foram obtidos resultados satisfatórios, devido a um problema desconhecido na análise de cromatografia líquida de alta eficiência.

### **3.7. Qualidade da água potável**

Muitos elementos e substâncias químicas podem ser encontrados naturalmente na água, entretanto, as atividades agrícolas e industriais podem elevar a concentração de alguns produtos a valores impróprios ao consumo humano (DI BERNARDO e DANTAS, 2005).

O Ministério da Saúde estabelece através da Portaria nº 518 (BRASIL, 2004), os procedimentos e responsabilidades referentes ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade.

Conforme descrito nessa portaria, água potável é a água destinada ao consumo humano cujos parâmetros microbianos, físicos, químicos e radioativos atendam ao padrão de potabilidade e que não ofereçam riscos à saúde.

O padrão de potabilidade da água consiste no conjunto de valores máximos permissíveis das características de qualidade da água, acima da qual ela é considerada não potável (FREITAS, 2001).

Em relação aos padrões de ordem estética, a água potável deve ser isenta de propriedades organolépticas e deve possuir baixos valores de cor e turbidez. Quanto aos padrões de ordem biológica, não deve conter microorganismos patogênicos, tais como bactérias, vírus, protozoários, vermes e outros. Os padrões de ordem química estabelecem limites de substâncias nocivas ou tóxicas, como é o caso dos agrotóxicos e cianotoxinas. Por último, a água potável também deve estar em conformidade com o padrão de radioatividade definido pela presente portaria.

### **3.8. Qualidade da água destilada**

Água destilada é a água pura que possui somente os elementos oxigênio e hidrogênio. Não contém nenhum material sólido, é isenta de componentes químicos, físicos e biológicos, portanto é inodora e sem gosto (MURAKAMI, 2005). Como já foi visto anteriormente, a obtenção da água destilada consiste na evaporação da água contaminada, o que deixa as impurezas na bandeja, e depois ocorre a condensação nas paredes do vidro.

O uso da água destilada para o consumo humano é ainda muito questionado em relação aos efeitos que podem ser causados no organismo humano, sendo motivo de controvérsias entre pesquisadores.

A Sociedade Alemã para Nutrição-DGFE (1993) explica que a água no corpo humano sempre contém eletrólitos, como o potássio e o sódio, em determinadas concentrações controladas pelo corpo. A reabsorção de água pelo intestino é também possibilitada pelo transporte de sódio. Assim, quando a água destilada é ingerida, o intestino precisa adicionar primeiramente eletrólitos a essa água, removendo estes das reservas do corpo humano. Como o corpo humano também nunca elimina líquidos na forma de água pura, mas sempre juntamente com sais, uma adequada ingestão de eletrólitos deve ser assegurada, podendo ser obtida através da alimentação.

Muitos pesquisadores são favoráveis ao consumo de água destilada, Banik (1989), por exemplo, aponta que o corpo humano utiliza apenas minerais orgânicos para suas funções físicas e bioquímicas. Desta forma, a água contendo minerais inorgânicos pode não ser uma boa fonte de minerais para o organismo humano, já

que o corpo utiliza menos de 10% dos minerais inorgânicos. O restante dos minerais inorgânicos absorvidos pelo organismo é depositado nas células, tecidos e órgãos, desencadeando os processos de mineralização e calcificação nessas estruturas biológicas, causando problemas de saúde (PATTRON, 2008).

### **3.9. Microcontaminantes**

#### *3.9.1. Considerações gerais*

Dentre os microcontaminantes existentes, os agrotóxicos são abordados neste estudo. O termo agrotóxico é empregado por ecologistas, ambientalistas e sanitaristas. As indústrias preferem a expressão “defensivos agrícolas”, assim como praguicidas e biocidas. O termo pesticida também se aplica para fungicidas, herbicidas e outras substâncias usadas no controle de pragas (DALSASSO, 1999).

#### *3.9.2. Histórico*

A utilização de agrotóxicos vem desde a antiguidade. Por volta de 1550 a.C., os egípcios usavam uma substância desconhecida para eliminar pulgas nas residências. Os escritos do poeta grego Homero (880 a.C.) mostram que o herói mitológico Odysseus usava enxofre ardente para purgar as entradas e salas das cortes (FREEDMAN, 1980 *apud* LEÃO, 1997).

A utilização mais generalizada dos agrotóxicos seguiu o progresso da química mineral. No século XIX, por exemplo, os fungicidas eram à base de sulfato de cobre ou mercúrio. Alguns inseticidas como o arsênico de cobre e o arsênico de chumbo também surgiram nesta época, assim como as piretrinas naturais, que foram introduzidas como inseticidas de origem vegetal (ORP, 2008).

Com o término da Segunda Guerra Mundial, e suas conseqüências políticas e econômicas, a agricultura passou a sofrer grandes mudanças, tais como o emprego de equipamentos agrícolas mais sofisticados e a prática de monoculturas em áreas de grande porte. Isto desencadeou o uso maciço de agrotóxicos, com o surgimento de inseticidas organofosforados e organoclorados como grande promessa tecnológica a esta nova agricultura (POLASTRO, 2005).

No Brasil, os agrotóxicos foram utilizados primeiramente em programas de saúde pública, no combate a vetores e controle de parasitas, passando a ser utilizados mais intensivamente na agricultura a partir de 1960 (OPAS, 1996).

Em 1975, o Plano Nacional de Desenvolvimento (PND), responsável pela abertura do Brasil ao comércio de agrotóxicos, condicionou o agricultor a comprar o agrotóxico com recursos do crédito rural, ou seja, foi definida uma cota de agrotóxicos para cada financiamento, o que contribuiu ao fato de o Brasil ser um dos maiores consumidores de agrotóxicos do mundo (OPAS, 1996).



### 3.9.3. Definição e Classificação

Com base na Lei nº 7.802 do Ministério da Saúde, de 11 de julho de 1989, regulamentada pelo Decreto Federal nº 4.074 de 2002 (BRASIL, 2002) os agrotóxicos são definidos a seguir:

- “Os produtos e os agentes de processos físicos, químicos ou biológicos, destinados ao uso nos setores de produção, no armazenamento e beneficiamento de produtos agrícolas, nas pastagens, na proteção de florestas, nativas ou implantadas, e de outros ecossistemas e também de ambientes urbanos, hídricos e industriais, cuja finalidade seja alterar a composição da flora ou da fauna, a fim de preservá-las da ação danosa de seres vivos considerados nocivos”;
- “Empregados como desfolhantes, dessecantes, estimuladores e inibidores de crescimento.”

Devido a grande diversidade de agrotóxicos, existe cerca de 300 princípios ativos em mais de 2 mil formulações comerciais diferentes no Brasil. É importante conhecer a classificação dos agrotóxicos em função de sua ação e do grupo químico a que pertencem (OPAS, 1996).

De acordo com Mortari (1995), os agrotóxicos podem ser classificados conforme o agente nocivo que se deseja controlar: Insetos (Inseticida), Fungos (Fungicida), Ervas Daninhas (Herbicidas), Ácaros (Acaricidas) e Roedores (Rodenticidas).

Os inseticidas são ainda classificados por sua composição química em quatro grandes grupos, sendo os organoclorados, organofosforados, carbamatos e piretróides.

Os organoclorados são compostos à base de carbono, com radicais de cloro. Do grupo dos inseticidas, os organoclorados são os mais persistentes no meio ambiente (DALSASSO, 1999). Estes foram muito utilizados na agricultura e nas campanhas de saúde, como inseticidas, porém seu emprego tem sido gradativamente restringido, como é o caso do DDT, que é proibido no Brasil desde 1983 (STOPPELLI, 2005).

Os organofosforados são compostos derivados do ácido fosfórico, ácido tiosfosfórico ou ácido ditiofosfórico (STOPPELLI, 2005). São biodegradáveis e tem persistência de algumas semanas no meio ambiente. Fazem parte deste grupo os seguintes princípios ativos: Paration, Malation, Azodrin, Diazinon.

Os carbamatos são compostos derivados do ácido carbâmico. São altamente solúveis em água. A estabilidade deles sob certas condições ambientais representa sérias ameaças para o tratamento de água destinada ao consumo humano. A persistência dos carbamatos na água pode variar de alguns dias até vários anos (DALSASSO, 1999).

Por último, os piretróides são compostos sintéticos que apresentam estruturas semelhantes à piretrina, substância existente nas flores do gênero *Chrysanthmun (pyrethrum) cinenariaefolium* (OPAS, 1996). As piretrinas sintéticas têm boa estabilidade sob luz e temperatura, e são rapidamente degradadas por microorganismos do meio ambiente.

Os agrotóxicos também podem ser divididos em função do seu grau de toxicidade ao ser humano. Esta classificação leva em conta a Dose Letal 50%, sendo

esta a dose de uma substância química que provoca a morte de 50% dos organismos-teste. A Tabela 3.1 apresenta esta classificação.

**Tabela 3.1 – Classificação Toxicológica**

<i>Substância Química</i>	<i>DL50% (mg/kg)</i>	<i>Dose letal ao ser humano</i>
Extremamente tóxica	5	Algumas gotas
Altamente tóxica	5-50	Algumas gotas a 1 colher de chá
Medianamente tóxica	50-500	1 colher de chá a 2 colheres de sopa
Pouco tóxica	500-5000	2 colheres de sopa a 2 copos
Levemente tóxica	>5000	2 copos a 1 litro

Fonte: Di Bernardo (1993).

Conforme descrito em ANVISA (2008), as classes toxicológicas dos agrotóxicos são indicadas por meio das cores dos rótulos, como é observado na Tabela 3.2.

**Tabela 3.2 – Classificação pelas cores dos rótulos.**

<i>Classe toxicológica</i>	<i>Toxicidade</i>	<i>Rótulo</i>
Classe I	Extremamente tóxico	Faixa vermelha
Classe II	Altamente tóxico	Faixa amarela
Classe III	Medianamente tóxico	Faixa azul
Classe IV	Pouco ou muito pouco tóxico	Faixa verde

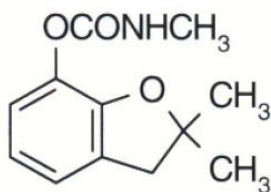
Fonte: ANVISA (2008).

### 3.10. Carbofurano

#### 3.10.1. Propriedades físico-químicas

O carbofurano é um inseticida do grupo químico dos carbamatos, sendo conhecido pelo nome químico 2,3-dihidro-2,2-dimetil-benzofurano-7-yl-metilcarbamato IUPAC (*International Union of Pure and Applied Chemistry*) e seu número de registro no CAS (*American Chemical Society*) é 1563-66-2 (WHO, 2004). O carbofurano apresenta classificação toxicológica I – extremamente tóxico (ANVISA, 2008).

Em seu estado natural, o carbofurano é um sólido branco cristalino e com odor levemente fenólico. É estável sob condições neutras e ácidas, mas se decompõe sob condições alcalinas. Sua fórmula molecular é  $C_{12}H_{15}NO_3$  (Figura 3.6) e apresenta um peso molecular de 221,3 (EPA, 2006). Outras propriedades físico-químicas do carbofurano definidas por sua estrutura molecular são apresentadas na Tabela 3.3.



**Figura 3.6 – Fórmula estrutural do Carbofurano.**

Fonte: ANVISA, 2008.

**Tabela 3.3 – Propriedades físico-químicas do carbofurano.**

<b><i>Propriedade</i></b>	<b><i>Valor</i></b>
Pressão de Vapor	2,7 mPa a 33°C
Ponto de Fusão	150°C
Ponto de Ebulição	200°C
Coefficiente de partição octanol-água	1.6 – 2.3
Solubilidade em água	350 mg/L a 25°C
Densidade	1,18 g/cm <sup>3</sup>

Fonte: WHO (2004).

### 3.10.2. Tempo de meia-vida

De acordo com Gallo (1988), a persistência dos agrotóxicos é expressa com o fator de meia-vida, sendo este o tempo necessário para que a concentração do ingrediente ativo seja reduzida pela metade, estimando-se assim, a sua permanência no ambiente sob determinadas condições.

Segundo Howard (1989, citado por MEZZARI, 2000), o tempo de meia-vida do carbofurano na água é de 8, 2, 1 semana para pH 6,0, 7,0 e 8,0 respectivamente. Contudo, o tempo de meia-vida do carbofurano varia ainda conforme as condições abióticas do meio, degradando-o ou mantendo-o ativo, como é o caso da acidez do meio. TOMLIN (2001) mostra que a meia-vida do carbofurano na água (22°C) pode chegar a um ano a pH 4,0 e até 31 horas a pH 9,0.

### 3.10.3. Constante da Lei de Henry

Uma medida comum da volatilidade de um contaminante orgânico, como os pesticidas, é a constante da Lei de Henry. Esta constante pode ser definida como a relação entre a concentração do composto na fase gasosa e a concentração do composto na fase líquida, quando este composto está dissolvido na água. Um valor alto da constante da Lei de Henry indica que maior porcentagem do composto existirá no ar em relação à água (HANSON *et al.*, 2004). A constante da Lei de Henry ( $K_H$ ) do Carbofurano é igual a  $3,9 \times 10^{-9} \text{ atm m}^3 \text{ mol}^{-1}$  (TOMLIN, 2001).

### 3.10.4. Uso agrônômico do Carbofurano

O carbofurano é geralmente aplicado no solo nas culturas de algodão, amendoim, arroz, banana, batata, café, cana-de-açúcar, cebola, cenoura, feijão, milho, repolho, tomate e trigo (ANVISA, 2008). Os produtos comerciais com ingrediente ativo carbofurano mais conhecidos são Furadan, Diafuran e Curaterr, utilizados em formulação granulada e em formulação de suspensão líquida (GALLO, 1988).

### 3.10.5. Efeitos na saúde

Os riscos à saúde humana por agrotóxicos na agricultura são decorrentes principalmente do seu uso inadequado. É importante que sejam tomados os devidos cuidados na aplicação e no manuseio dos agrotóxicos, assim como deve ser dado o destino adequado às embalagens. Além de eventual contaminação direta no campo, o ser humano ainda fica exposto aos resíduos de agrotóxicos através de diversos compartimentos ambientais, como a água, o ar e o solo (SANTOS, 2007).

Segundo a classificação toxicológica dos agrotóxicos, o carbofurano faz parte da Classe I, ou seja, é extremamente tóxico ao ser humano. As intoxicações mais graves por carbofurano ocorrem por inalação ou ingestão, e as mais moderadas por absorção cutânea (EXTOXNET, 1996).

A ação do carbofurano, como dos demais carbamatos, se dá pela inibição da enzima colinesterase, especialmente a acetilcolinesterase, o que leva a um acúmulo de acetilcolina nas sinapses nervosas, desencadeando diversos efeitos parassimpaticomiméticos. Diferentemente dos organofosforados, os carbamatos são inibidores reversíveis das colinesterases, mas as intoxicações podem ter a mesma gravidade (OPAS, 1996).

A recuperação completa de uma intoxicação aguda é possível, caso a exposição da vítima ao carbofurano seja rápida. Para isso, os carbamatos são excretados rapidamente pelo metabolismo, geralmente através das vias urinárias, não ocorrendo bioacumulação nos organismos. Desta forma, a vítima pode recuperar o nível normal de acetilcolinesterase no metabolismo em menos de 24 horas (EXTOXNET, 1996).

Os sinais e sintomas usualmente observados na saúde humana provenientes de elevadas intoxicações por inseticidas carbamatos são brevemente apresentados na Tabela 3.4.

**Tabela 3.4 – Sinais e Sintomas das intoxicações por inseticidas carbamatos.**

LOCAL	SINAIS E SINTOMAS	
	<i>Precoces</i>	<i>Tardios</i>
<i>Sistema Nervoso Central</i>	Tensão; ansiedade; inquietude.	Dificuldade de concentração; comprometimento de memória.
	Cefaléia; tonteira e vertigens.	Convulsões; tremores; torpor e coma; soluços e manifestações como: tremores involuntários e incoordenação dos movimentos.
<i>Sistema Nervoso Autônomo</i>	Aumento do ritmo respiratório; tosse.	Secreção bronquiolar excessiva; edema pulmonar; dispnéia; opressão torácica.
	Perda de apetite.	Náuseas; vômitos; dores abdominais; diarreia; defecação involuntária; diurese freqüente e involuntária.
	Pulso diminuído	Bloqueio auriculoventricular; parada cardíaca.
	Visão enfraquecida	Pupilas sem reação.

Fonte: LARINI (1997).

### 3.10.6. Legislação

O Decreto nº 4.074, de 04 de janeiro de 2002 ressalta que, o Ministério da Saúde é responsável pela avaliação e classificação toxicológica dos agrotóxicos, e juntamente com os ministérios da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, deve estabelecer o limite máximo de resíduos (LMR) e o intervalo de segurança de cada ingrediente ativo de agrotóxico para cada cultura agrícola (ANVISA, 2008).

No Brasil ainda não foram estabelecidos os limites máximos de resíduos de carbofurano tanto para água potável como para proteção de vida aquática. As normas internacionais já mostram maior preocupação em relação ao carbofurano e os efeitos que este pode causar na saúde humana e no meio ambiente (SANTOS, 2007).

A Organização Mundial de Saúde estabelece um limite máximo de carbofurano de  $7\mu\text{g/L}$  como padrão para água destinada ao consumo humano (WHO, 1998). De acordo com a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos, os padrões de água potável permitem um nível máximo de carbofurano de  $40\mu\text{g/L}$  (USEPA, 2008). No Canadá, o padrão de potabilidade de água tolera concentração máxima de carbofurano de  $90\mu\text{g/L}$  (HEALTH CANADA, 2008). Por fim, os países europeus limitam todo e qualquer princípio ativo em  $0,1\mu\text{g/L}$ , sendo que a soma total de agrotóxicos na água não deve ultrapassar a  $0,5\mu\text{g/L}$  (SANTOS, 2007).

## 4. METODOLOGIA

### 4.1. Caracterização da área de estudo

O sistema piloto de destilação solar projetado foi instalado em uma unidade residencial situada no bairro Santa Mônica, em Florianópolis/SC. Conforme os dados da Prefeitura Municipal de Florianópolis (2008), o município possui uma área de  $463,5\text{ km}^2$  e está localizado entre os paralelos de  $27^{\circ}50'$  de latitude sul e entre os meridianos de  $48^{\circ}25'$  de longitude oeste. Na Figura 4.1 pode ser observado o local na ilha de Florianópolis onde está instalado o sistema piloto.

Segundo a classificação climática de Köppen, a região de Florianópolis está situada na zona intermediária subtropical e é pertencente ao grupo mesotérmico úmido, com chuvas distribuídas uniformemente ao longo dos anos. A insolação apresenta um valor médio anual de 2025,6 horas, o que corresponde a 46% do total possível; conclui-se então que mais da metade do ano o sol permanece encoberto (PMF, 2008).

O mês mais quente de Florianópolis é o mês de fevereiro com temperatura média mensal de  $24,5^{\circ}\text{C}$ , em contraste com o mês mais frio do ano, julho, com  $16,5^{\circ}\text{C}$ . O período de funcionamento do sistema piloto de destilação solar abrangeu os meses de maio a dezembro de 2008, período caracterizado por temperaturas mais baixas.



Figura 4.1– Localização do sistema piloto de destilação solar.  
Fonte: NASA (2008) e própria, respectivamente.

#### 4.2. Sistema piloto de tratamento de água – Destilador Solar

Para o desenvolvimento deste trabalho, construiu-se um sistema piloto de destilação solar, com cobertura de vidro em forma de pirâmide (Figura 4.2). O material escolhido para construção deste sistema piloto foi o vidro (4 mm de espessura), uma vez que é um material inerte, impermeável e isolante. Entre as faces de vidro, foram colocadas cantoneiras de alumínio e silicone para melhor vedação do sistema piloto.



Figura 4.2 – Destilador solar antes e durante sua operação, respectivamente.

Soares (2004) traz que, a inclinação dos coletores solares é determinada através da latitude da região, onde o equipamento será instalado, acrescida de 10 graus. Portanto, para a região de Florianópolis, a inclinação da pirâmide deveria ser de 36°; entretanto optou-se pela inclinação de 25°, de modo que o equipamento pudesse ser utilizado em todos os estados brasileiros.

Considerando a inclinação da pirâmide de 25° e tendo sua base dimensões de 500 x 500 mm, calculou-se por trigonometria as medidas das faces da cobertura de vidro, como pode ser observado na Figura 4.3 e demonstrado a seguir:

Determinação da altura da pirâmide:  $tg 25^\circ = \frac{\text{altura}}{\text{lado}/2} = 117 \text{ mm}$

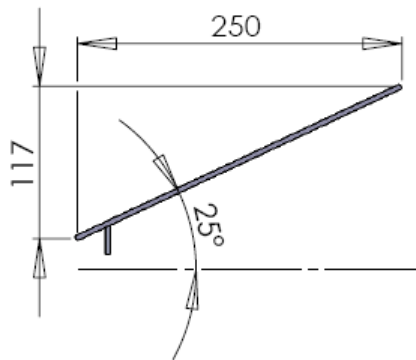


Figura 4.3 – Desenho esquemático da altura da pirâmide.

Determinação das dimensões das faces da cobertura de vidro:

$$\text{altura da face} = \frac{\text{altura da pirâmide}}{\text{sen } 25^\circ} = \frac{117}{\text{sen } 25^\circ} = 276 \text{ mm}$$

$$(\text{aresta lateral})^2 = (\text{altura da pirâmide})^2 + (\text{lado}/2)^2$$

$$(\text{aresta lateral})^2 = (0,276)^2 + (0,25)^2$$

$$\text{aresta lateral} = 372 \text{ mm}$$

As dimensões, altura da face e a aresta lateral do vidro, podem ser observados na Figura 4.4.

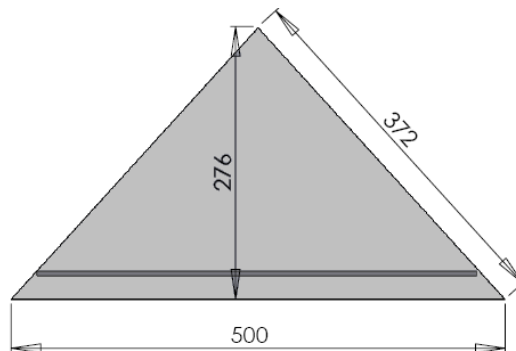
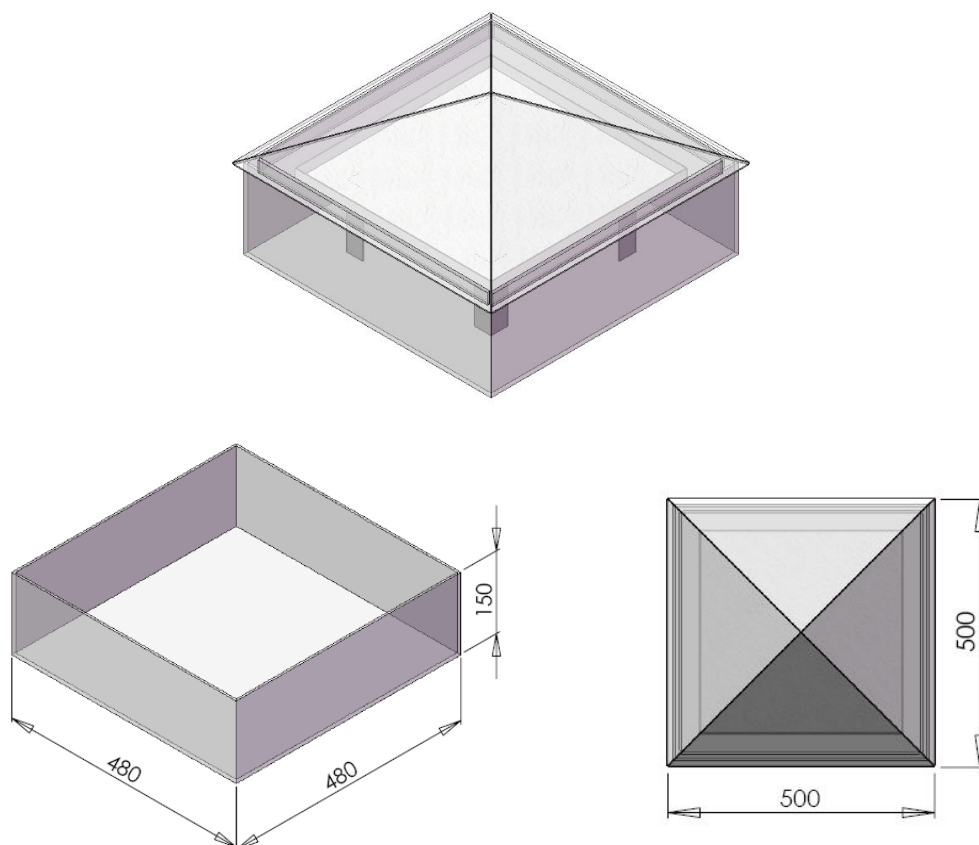


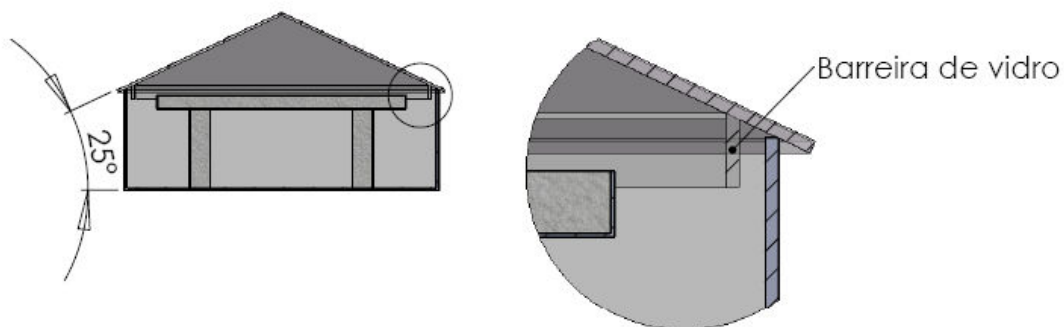
Figura 4.4 – Desenho esquemático de uma das faces da cobertura de vidro.

A base do destilador solar consiste em uma base quadrada de dimensão 480 x 480 mm e 150 mm de altura, sendo também fabricada de vidro. Esta base funcionará como reservatório da água destilada produzida pelo processo de evaporação e condensação, sendo que sua coleta é realizada manualmente. A base do equipamento e sua cobertura de vidro são representadas na Figura 4.5.



**Figura 4.5 – Perspectivas do destilador solar e vista superior da cobertura piramidal.**

Foi colocada também uma pequena barreira de vidro junto à cobertura piramidal, visando o bom encaminhamento da água condensada até a base do equipamento, evitando assim vazamentos de água. A barreira de vidro construída pode ser observada na Figura 4.6.



**Figura 4.6 – Vista lateral do destilador solar e representação de detalhes construtivos.**



A água contaminada é colocada em uma bandeja de alumínio (1 mm de espessura) com dimensão de 380 x 380 mm, apoiada em quatro suportes de alumínio de 120 mm, como mostra a Figura 4.7. A escolha por um material de alumínio se deve a sua grande capacidade de absorver calor, não havendo a necessidade de escurecer a base da bandeja.

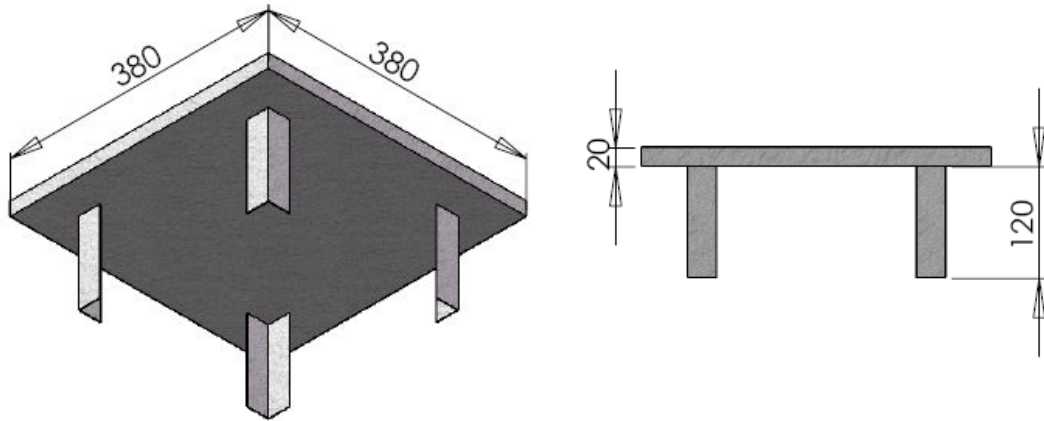


Figura 4.7 – Representação do reservatório de água bruta.

Após a colocação da água contaminada na bandeja de alumínio, os vapores de água evaporam com a incidência de raios solares até a cobertura piramidal de vidro. Em contato com o vidro, os vapores de água são condensados e escoados até a barreira de vidro, que os encaminha até a base do equipamento. A água destilada é então recolhida manualmente, uma vez que a cobertura e a base do destilador não são coladas uma na outra. A Figura 4.8 ilustra o caminho de tratamento de água por meio do sistema piloto construído.

Quanto a limpeza dos equipamentos do destilador (bandeja e faces de vidro), foram realizadas 5 lavagens com água do abastecimento público, 5 lavagens com água destilada e 5 lavagens com água ultra-pura, antes da colocação da água de alimentação.

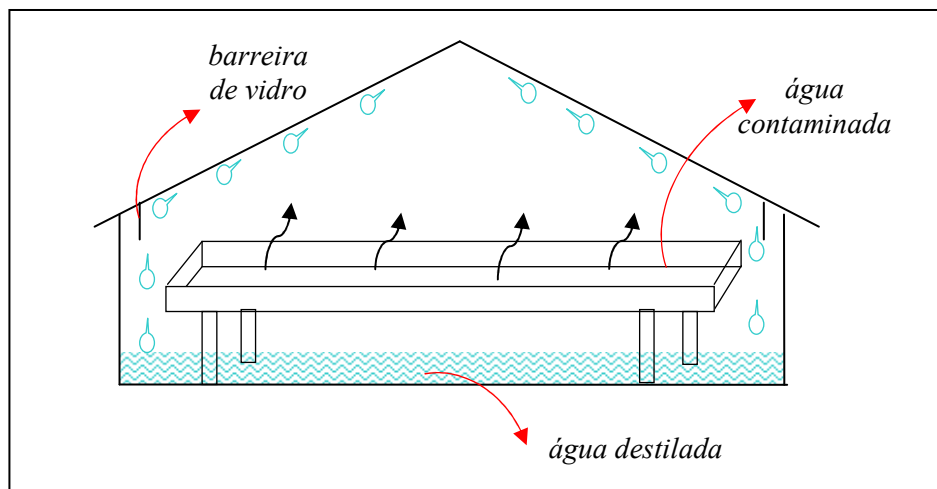
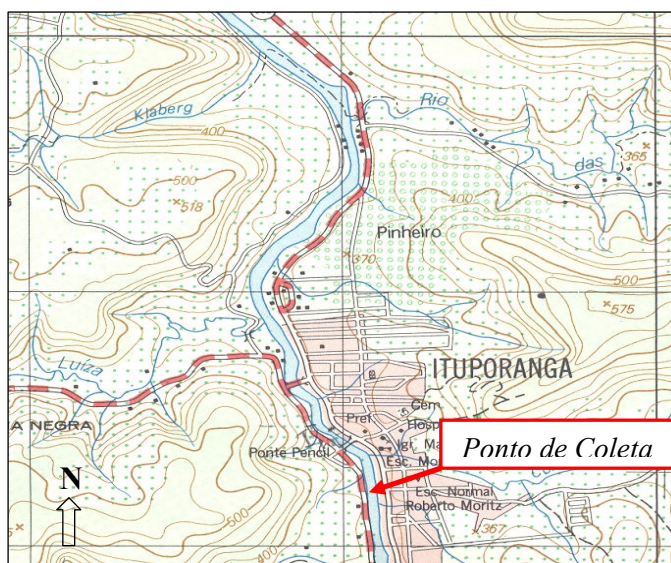


Figura 4.8 – Tratamento de água por meio do sistema piloto construído.

### 4.3. Análise da concentração do Carbofurano

#### 4.3.1. Coleta e preservação da água bruta

Para avaliação da remoção de agrotóxicos através do destilador solar proposto, foram coletadas amostras de água do rio Itajaí do Sul – principal curso de água do município de Ituporanga/SC. A escolha deste local foi devido a larga utilização do agrotóxico Furadan, cujo princípio ativo é o carbofurano, nas culturas de cebola e milho da região. A Figura 4.9 indica o ponto de coleta das amostras.



**Figura 4.9 – Localização do ponto de coleta.**  
**Fonte: IBGE, 2002.**

As amostras foram periodicamente coletadas em um frasco com tampa de rosca e vedação para um volume de 1,5 litros. Para este volume de água, adicionou-se 3  $\mu\text{L}$  de carbofurano com uma seringa de vidro, a fim de obter maior concentração de Carbofurano nos experimentos realizados com o destilador solar. Após homogeneização do volume de água com bastão de vidro, foi retirada uma amostra de 100 mL para análise, e o complemento do volume foi inserido na bandeja do destilador solar.

A preservação da amostra foi realizada com adição do ácido cloroacético a 1N até a faixa de pH entre 3,5 e 4,0. Em seguida, a amostra foi transportada em uma caixa de isopor com gelo até o laboratório, onde foi filtrada em membrana de acetato de celulose com diâmetro de 47 mm e porosidade de 0,22  $\mu\text{m}$ .

É recomendável que o sistema de filtração da amostra seja todo de vidro, uma vez que o carbofurano pode ficar armazenado em material plástico. Utiliza-se bomba a vácuo para auxiliar o processo de filtração, como pode ser visto na Figura 4.10.

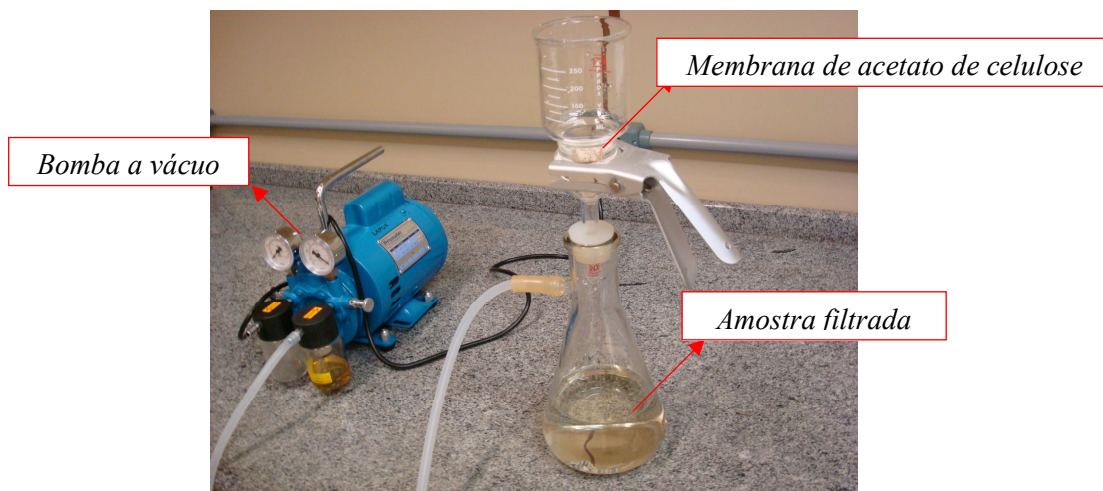


Figura 4.10 – Sistema de filtração da amostra.

Do volume de água destilada produzida, retira-se também uma amostra de 100 mL para análise. O procedimento para determinação do carbofurano nestas amostras é o mesmo utilizado para a água bruta.

#### 4.3.2. Extração e purificação

A técnica de extração por fase sólida consiste na passagem da amostra por uma minicoluna (cartucho) constituída por um solvente apropriado para retenção de determinado analito. Além da extração do analito, esta técnica possibilita sua pré-concentração e pré-purificação (SANTOS, 2007).

Para a extração da amostra, inicialmente ativa-se o cartucho de 500 mg de octadecil-C18 com 3 mL de solvente acetonitrila. De acordo com Santos (2007), o C-18 apresenta baixa polaridade e é largamente empregado para análise de carbofurano.

Em seguida a amostra de 100 mL é percolada pela minicoluna, que por sua vez está conectada ao sistema de extração 'Manifold' junto à bomba a vácuo, para proporcionar a passagem da amostra de água pela minicoluna sob pressão e à velocidade constante de 1 mL/min.

Quando o sistema de extração é bem operado, o princípio ativo carbofurano fica retido na minicoluna, e o volume de água que transpassou a minicoluna é descartado. A aplicação de uma pressão muito alta pode fazer com que o carbofurano seja descartado junto com os compostos interferentes e água. O sistema com *Manifold* utilizado para extração e purificação da amostra é apresentado na Figura 4.11.

Quanto a lavagem da vidraria, utilizou-se uma solução de detergente neutro, seguido de 5 lavagens com água da torneira fornecida pelo abastecimento público, 5 lavagens com água destilada e por último, 5 lavagens com água ultra-pura. Após isso, a vidraria é levada para a estufa, onde permanece por 4 horas a 200°C, para garantir que a vidraria esteja desprovida de contaminantes de amostras anteriores.

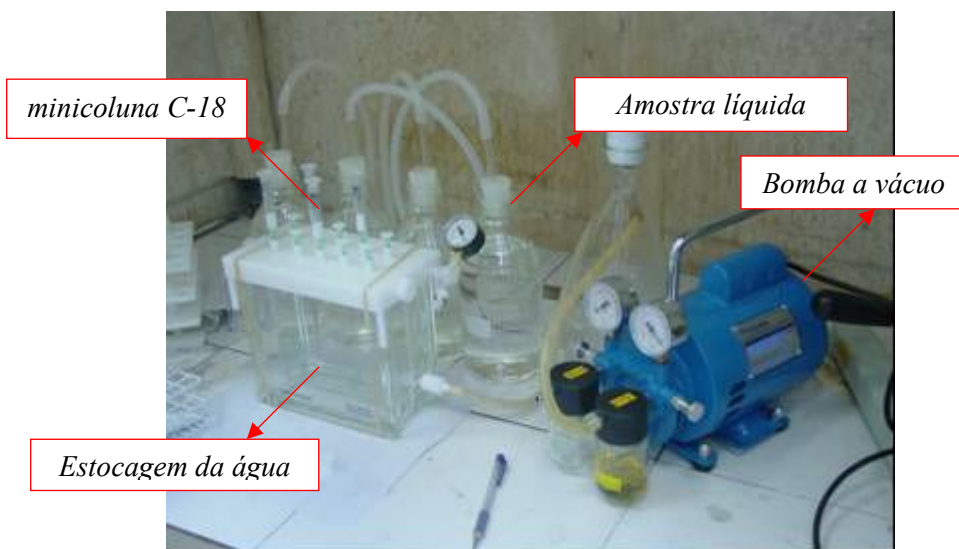


Figura 4.11 – Sistema (Manifold) para extração e purificação da amostra líquida.

#### 4.3.3. Eluição e concentração

Na etapa de eluição, os compostos de carbofurano são liberados da minicoluna com a passagem de 5 mL do solvente (acetonitrila), cujo efluente é a soma do carbofurano e do solvente orgânico. O volume final do efluente obtido é igual a 5 mL.

Para concentrar ainda mais a amostra, utiliza-se o evaporador rotativo (Figura 4.12). A amostra de 5 mL é despejada em balão volumétrico de fundo redondo, que permanecerá em banho Maria aquecido aproximadamente entre 40 e 50°C, com rotação lenta. Após a evaporação do extrato, adiciona-se 1 mL do solvente acetonitrila, obtendo assim o volume final de 1 mL, ou seja, a amostra é concentrada em 100 vezes.



Figura 4.12 - Evaporador rotativo e banho Maria aquecido.

Os processos de extração, purificação, eluição e concentração da amostra apresentados nos itens anteriores podem ser visualizados na Figura 4.13.

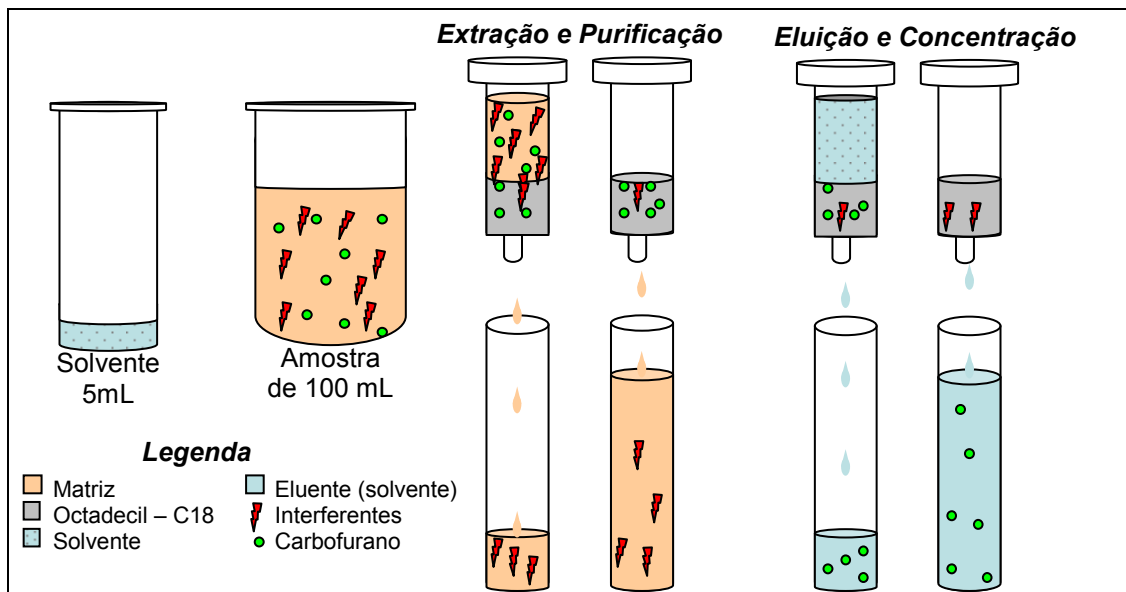


Figura 4.13 – Processos de extração, purificação, eluição e concentração da amostra.

#### 4.3.4. Técnica cromatográfica – CLAE/UV

A cromatografia líquida de alta eficiência com detector ultravioleta (CLAE/UV) é um método para análise de carbamatos. Esta técnica cromatográfica consiste em uma separação físico-química fundamentada na distribuição dos compostos de uma mistura entre duas fases imiscíveis contidas em uma coluna, a fase móvel e a fase estacionária (GICQUEL, 1998).

A moderna cromatografia líquida de alta eficiência utiliza uma pressão muito alta para forçar a passagem do solvente pela coluna contendo partículas finas que proporcionam eficientes separações. As etapas da cromatografia líquida são observadas na Figura 4.14, e descritas a seguir (SANTOS, 2007).

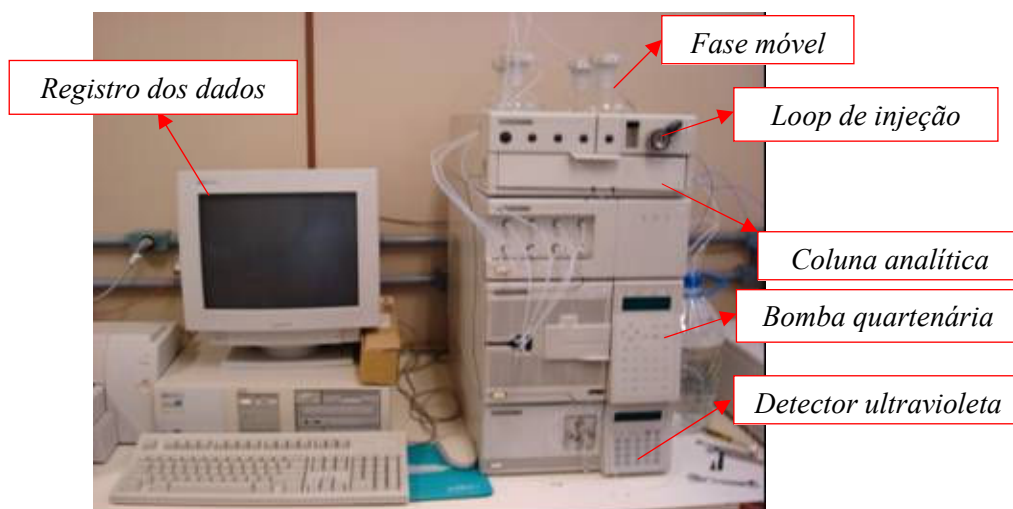


Figura 4.14 – Cromatógrafo HPLC/UV

**Fase móvel:** A fase móvel é composta por substâncias líquidas (água, metanol e acetonitrila), que podem ser misturadas de forma isocrática, feita com um único solvente, ou por gradiente, variando a proporção dos solventes ao longo da análise. Esta mistura tem a função de eluir a amostra em todo o sistema.

**Bomba quaternária:** O sistema de bombeamento proporciona o fluxo e o gradiente dos líquidos, permitindo melhor separação das substâncias analisadas.

**Loop de injeção:** É responsável pela medida exata do volume da amostra a ser analisada, no caso 20  $\mu\text{L}$ . A injeção da amostra no sistema é realizada com uma seringa de vidro de 25  $\mu\text{L}$ , e o excedente vai para o descarte.

**Coluna analítica:** É nesta etapa que ocorre a separação das substâncias de uma determinada mistura, para posterior detecção para quantificação. A coluna analítica utilizada possui 250 mm de comprimento e 4,6 mm de espessura, sendo preenchida por partículas microporosas com diâmetro de 5  $\mu\text{m}$ .

**Detector Ultravioleta:** Proporciona a detecção da amostra no comprimento de onda de 203 nm, uma vez que o carbofurano apresenta maior absorvância e sensibilidade neste comprimento de onda. Para a detecção das análises, foi empregado o detector ultravioleta Hewlett Packard TM, modelo HP1050.

**Registro dos dados:** Computador responsável pela integração das áreas dos picos cromatográficos, e conseqüentemente, pela quantificação do resíduo. A separação de uma mistura por cromatografia líquida é caracterizada por um gráfico (cromatograma), onde cada composto é representado por um pico e um tempo de retenção (GICQUEL, 1998).

O esquema de funcionamento do CLAE-UV está esquematizado na Figura 4.15.

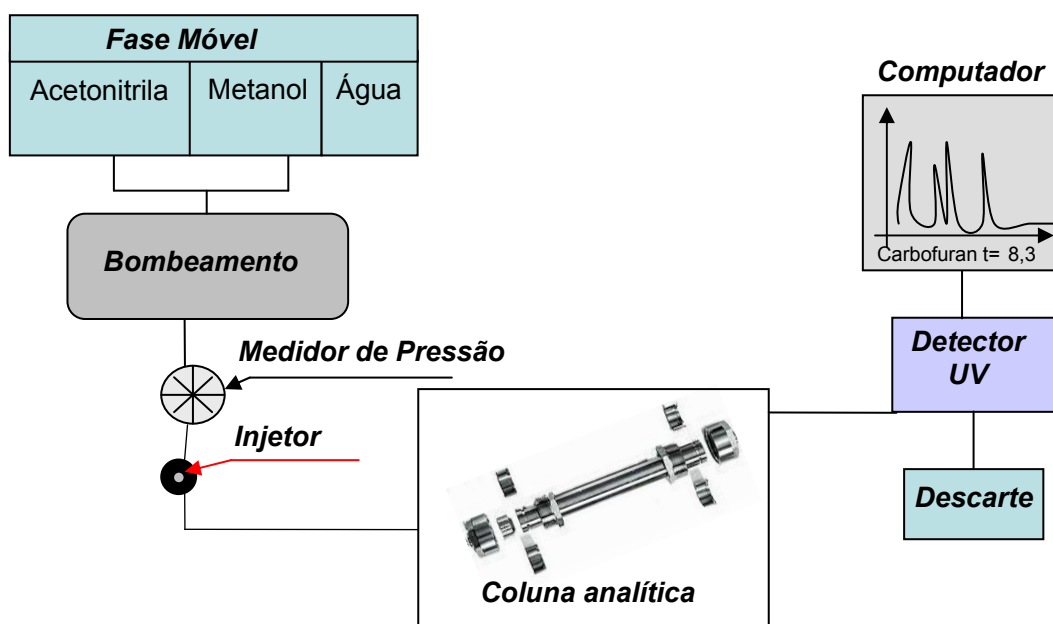


Figura 4.15 – Esquema do funcionamento do CLAE/UV.

#### 4.4. Experimento com chaleira metálica

Para simular o fenômeno de evaporação e condensação da água que acontece dentro dos destiladores solares, realizou-se um experimento com uma chaleira metálica e dois béqueres de vidro, de forma que os resultados obtidos com este experimento para remoção do carbofurano sejam comparados com aqueles obtidos a partir da destilação solar natural.

A água utilizada neste experimento foi coletada no sistema de abastecimento público de água da CASAN. Em uma chaleira metálica, foram colocados 1,5 litros desta água acrescida de determinada concentração de carbofurano ( $3 \mu\text{L}$ ). A água da chaleira metálica foi aquecida a uma temperatura de  $100^\circ\text{C}$  e o vapor de água proveniente da chaleira foi direcionado para o *béquer 1*, enquanto que as gotículas de água formadas foram encaminhadas para o *béquer 2*, como mostra a figura 4.16.



Figura 4.16 – Simulação do processo da destilação solar com chaleira metálica.

Como o sistema apresentado não era devidamente fechado, houve muita perda de calor e a quantidade de água inicialmente colocada teve que ser reposta quatro vezes, visando a obtenção de 60 mL de água destilada. Vale salientar que é necessário um volume mínimo de água para determinação do carbofurano. O procedimento para determinação do carbofurano foi o mesmo apresentado anteriormente.

#### 4.5. Determinação da água salina

##### 4.5.1. Coleta e preservação da água bruta

Para avaliação da remoção do sal através do destilador solar construído, foram coletados 15 litros de água da Praia dos Ingleses, com o auxílio de bomba de plástico de 20 L, e à uma profundidade de 20 cm. A Praia dos Ingleses localiza-se no norte da cidade de Florianópolis, conforme observado na Figura 4.17.



**Figura 4.17-Localização do ponto de coleta da água bruta na Praia dos Ingleses.**  
**Fonte: NASA (2008) e própria, respectivamente.**

A água coletada da Praia dos Ingleses foi preservada a temperatura ambiente. Para cada ciclo de destilação solar, foram retiradas amostras de 1,5 litros e em seguida foram depositadas na bandeja metálica do destilador solar. Após completar o ciclo da destilação solar de aproximadamente 2 dias, coletou-se a água destilada produzida. As amostras de água bruta e destilada foram armazenadas congeladas até a realização das análises físico-químicas.

A condutividade foi o indicador de qualidade da água utilizado para medir a quantidade de sais nas amostras. A unidade padrão da condutividade elétrica é  $\mu\text{S}/\text{cm}$  a  $25^\circ\text{C}$  e o condutímetro utilizado foi o *Condutivimeter meter* de modelo Lutron CD-4303. As amostras de água bruta foram diluídas três vezes para medição no condutímetro, enquanto que as amostras de água destilada foram medidas diretamente.

Com base no trabalho de Bernhardt (2003), o valor da salinidade das amostras foi estimado a partir de medições prévias da condutividade e da temperatura, na escala de salinidade prática (do inglês, *Practical Salinity Scale*), com a seguinte equação:

$$S = 0,008 - 0,1692^{0,5} + 25,3853K + 14,0941K^{1,5} - 7,0261K^2 + 2,7081K^{2,5}$$

Onde  $S$  é a salinidade calculada em ppt e  $K$  representa a condutividade elétrica da amostra de água a uma temperatura de  $15^\circ\text{C}$ . O valor da condutividade devidamente normalizado foi obtido através da seguinte equação (BERNHARDT, 2003):



$$K = \frac{\text{condutividade medida}}{53045,4}$$

Onde o valor 53045,4 corresponde a condutividade da água do mar a uma temperatura de 15°C. Vale lembrar que no decorrer das medições de condutividade, não foram medidas as temperaturas das amostras, portanto, os valores de salinidade foram estimados a partir da suposição que as amostras estavam a uma temperatura de 15°C.

#### 4.6. Parâmetros para análise da qualidade da água

Além da identificação e quantificação do carbofurano na água de estudo, foram realizadas outras análises para verificar a potabilidade da água destilada produzida, bem como a eficiência da unidade de destilação projetada.

Todas as análises da qualidade da água foram realizadas no Laboratório de Potabilização de Águas (LAPOA), em conjunto com o Laboratório Integrado do Meio Ambiente (LIMA), ambos localizados no Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis/SC.

Os parâmetros de controle da qualidade da água analisados foram: cor aparente, cor verdadeira, pH, turbidez, ferro total, coliformes fecais e coliformes totais. Os procedimentos seguem os métodos padrões do APHA – *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater*, 1998. Os equipamentos utilizados para execução das análises estão descritos na Tabela 4.1.

**Tabela 4.1 – Equipamentos utilizados para análise da qualidade da água.**

<i>Parâmetros</i>	<i>Equipamentos/ Métodos de medida</i>
Cor aparente (uH)	Espectrofotômetro DR-2100 (HACH)
Cor verdadeira (uH)	Espectrofotômetro DR-2100 (HACH)
Ferro Total	Espectrofotômetro DR-2100 (HACH)
Turbidez (uT)	Turbidímetro 2100P (HACH)
pH	Potenciométrico
Coliformes fecais (NMP/100mL)	Colilert
Coliformes totais (NMP/100mL)	Colilert

Para determinação da cor verdadeira, as amostras foram inicialmente filtradas com membrana de acetato de celulose de 0,45 µm, para posterior análise no Espectrofotômetro DR-2100.

Para a análise dos coliformes fecais e totais, as amostras foram diluídas dez vezes com água de diluição. No tocante a determinação do ferro total, as amostras de água bruta foram diluídas duas vezes, visto que a concentração de ferro no ponto de coleta é relativamente alta.

Todos os parâmetros foram periodicamente analisados para as amostras da água bruta e da água tratada por destilação solar. A água destilada foi coletada após dois dias de tratamento, a fim de se obter uma quantidade razoável para a realização de todas as análises.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1. Avaliação econômica do funcionamento do sistema piloto de destilação solar

Considerando que o destilador solar desta pesquisa é apenas um sistema piloto, seu custo não foi muito elevado, apesar de o vidro ser um material oneroso. O conjunto de vidros utilizado para construção do sistema piloto teve um gasto de 140 reais, e o sistema de vedação com silicone e cantoneiras de alumínio custou 30 reais, resultando num investimento inicial de 170 reais.

A produção de água diária depende muito das condições climáticas do local onde o destilador solar está implantado, logo considerando uma produção média diária de 0,3 L, tem-se ao longo de um ano com 300 dias ensolarados, uma produção média anual de 90 L.

Admitindo-se como zero o custo referente à mão-de-obra e à manutenção dos materiais utilizados, calculou-se o custo da água destilada ao longo dos anos. Para este cálculo, o investimento inicial (170 reais) foi dividido pela produção média anual (90L), obtendo-se assim o custo da água destilada no primeiro ano de consumo.

Nos anos de consumo consecutivos não há gastos adicionais, e consequentemente o custo da água destilada vai diminuindo, como pode ser observado na Figura 5.1. Por exemplo, no segundo ano de funcionamento do destilador, o custo do litro da água destilada é calculado pela razão entre o investimento inicial e a quantidade de água destilada em 2 anos. O mesmo procedimento foi aplicado para determinação do custo da água destilada nos outros anos de funcionamento do destilador.

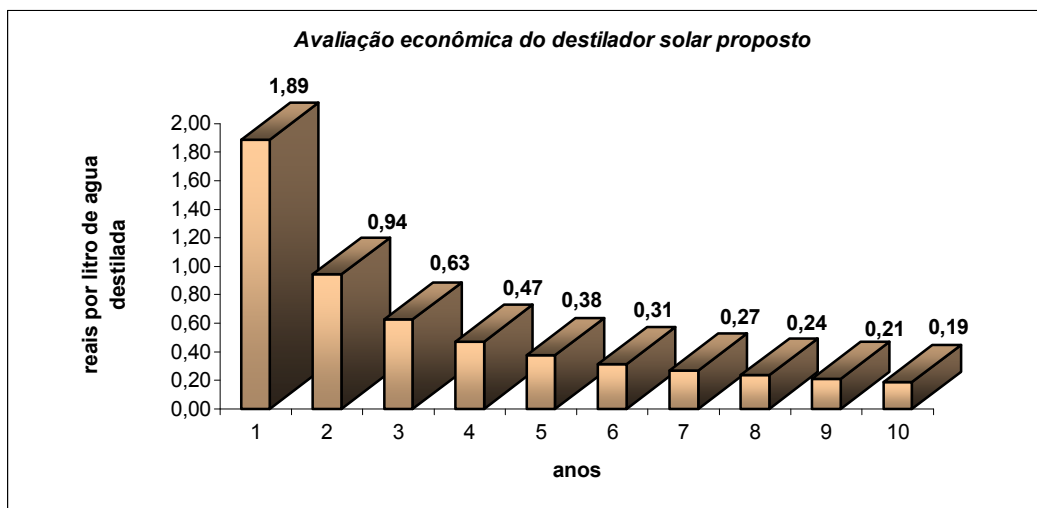


Figura 5.1 – Avaliação econômica do sistema piloto de destilação solar.

Mesmo no primeiro ano de funcionamento do destilador solar, um litro de água destilada teria um preço inferior a uma garrafa de água mineral de 1 L, que é vendida no mercado atual por aproximadamente R\$ 2,00. Com o passar dos anos, essa diferença se torna cada vez mais evidente, e o destilador solar chega a produzir um litro de água destilada por 19 centavos em seu décimo ano de funcionamento.

Entretanto, a água produzida pelo destilador solar proposto deixa de ser viável economicamente quando comparada com a água fornecida pelo abastecimento

público da Companhia Catarinense de Águas e Saneamento (CASAN). A tarifa de água cobrada pela CASAN é de 3,93 reais por m<sup>3</sup> de água, considerando um consumo entre 11 e 25 m<sup>3</sup> por mês, o que equivale menos de um centavo por litro de água fornecida.

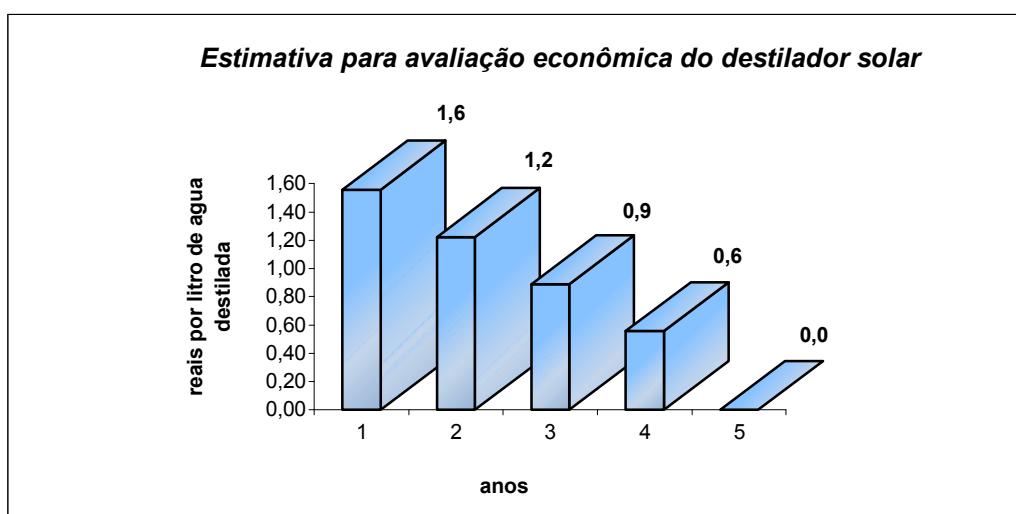
Outro fator que deve ser levado em conta é o tempo de vida do destilador solar, que é estimado entre 15 e 20 anos, uma vez que o vidro é um material frágil e fácil de quebrar. Diante desses dados, verifica-se que a destilação solar natural é preferencialmente uma técnica alternativa de tratamento de água, que pode ser empregada em locais onde o acesso à água potável é dificultado, pois dificilmente substituiria uma estação de tratamento de água, devido sua pequena produção de água e custo elevado.

A avaliação econômica proposta por Khanna *et al* (2008) considera também as despesas médicas economizadas com o consumo de uma água destilada de boa qualidade, visto que metade das doenças ocorridas em países subdesenvolvidos é devido à contaminação de água. Portanto, considerando uma economia média anual de 50 reais referentes aos remédios e consultas médicas, e supondo agora um custo de 20 reais anuais com a manutenção do destilador solar (Tabela 5.1), tem-se um novo custo por litro de água destilada.

**Tabela 5.1: Avaliação econômica do destilador solar proposto.**

<i>Custos (-)</i>	
Investimento Inicial	170 reais
Manutenção (materiais)	20 reais por ano
<i>Economia (+)</i>	
Remédios e consultas médicas	50 reais por ano

Para o cálculo do custo em reais do litro da água destilada, considerou-se a mesma produção anual de 90 L. De acordo com a Figura 5.2, verifica-se que no quinto ano de funcionamento do destilador solar os gastos já teriam sido recuperados e o litro da água destilada teria custo zero.



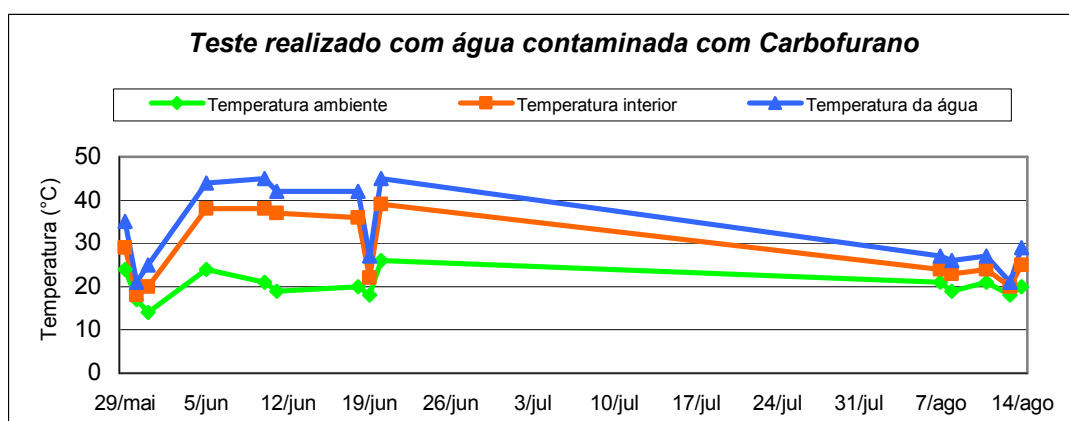
**Figura 5.2 – Avaliação econômica do sistema piloto de destilação solar, considerando as despesas médicas economizadas e manutenção.**

## 5.2. Avaliação quantitativa do sistema piloto de destilação solar

### Testes realizados com amostras de água do Rio Itajaí do Sul

O sistema piloto de destilação solar foi testado inicialmente durante o período de 28/05/2008 a 14/08/2008, com exceção do mês de julho. A água de alimentação utilizada neste período foi a água contaminada com Carbofurano.

Para verificar a ocorrência do efeito estufa dentro da pirâmide, mediu-se diariamente, com auxílio de um termômetro digital, a temperatura da água depositada na bandeja de alumínio, a temperatura do ar dentro da pirâmide (temperatura no interior) e a temperatura do ar externo (temperatura ambiente), conforme apresentado na Figura 5.3.



**Figura 5.3 – Temperaturas medidas durante experimentos com água contaminada com carbofurano.**

A máxima temperatura da água observada neste período foi de 45°C, correspondente ao dia 10/06/2008, sendo que foi um dia ensolarado sem vento e com temperatura ambiente de 21°C. A temperatura mínima da água foi de 21°C, referente ao dia 30/05/2008 – dia nublado com vento e com temperatura ambiente de 17°C.

Foi observado que a produção de água destilada aumenta com o aumento da temperatura da água e do ambiente externo (Figura 5.4 e 5.5, respectivamente). A produção de água destilada (L/m<sup>2</sup>/dia) foi obtida através do quociente entre a quantidade média diária de água destilada e a área da bandeja metálica em m<sup>2</sup>.

Como o destilador solar não dispõe de um reservatório graduado de água tratada e que seja de fácil manipulação, o volume de água destilada foi medido apenas no final de cada ciclo. Assim, para obtenção da quantidade diária de água produzida, fez-se a média do volume de água produzido pelo número de dias de cada ciclo.

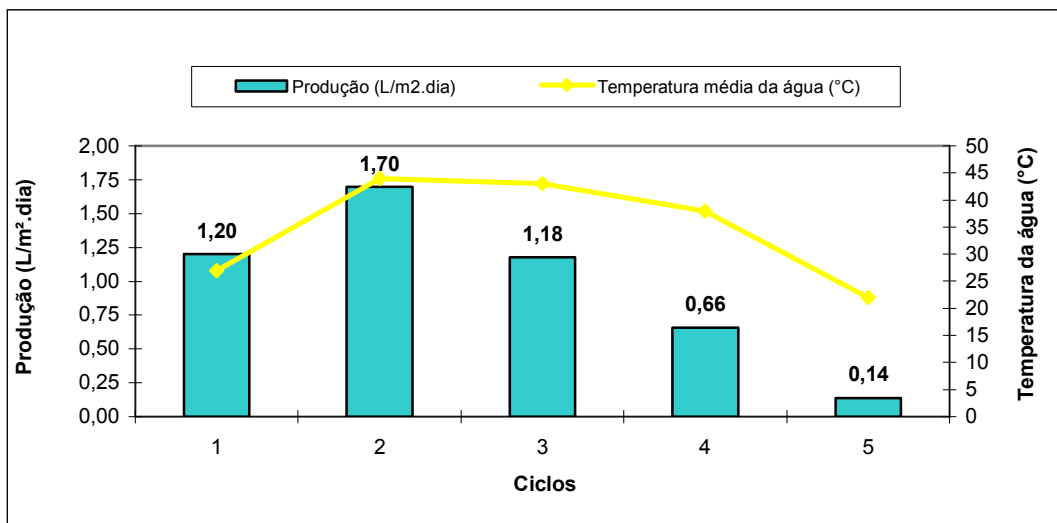


Figura 5.4 – Relação entre a produção de água destilada e a temperatura média da água.

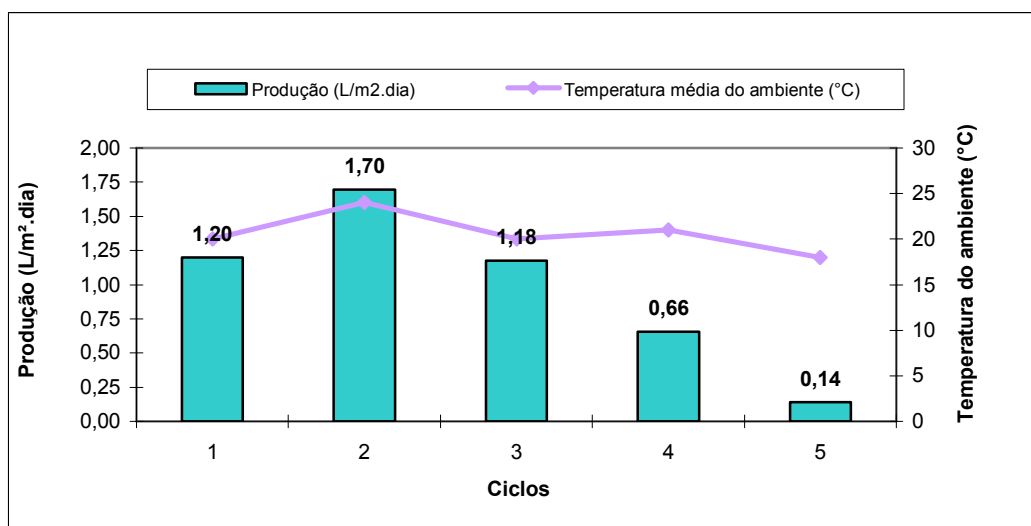


Figura 5.5 – Relação entre a produção de água e a temperatura média do ambiente.

Conforme apresentado nos gráficos acima, a máxima produção de água destilada foi de 1,7 L/m<sup>2</sup>dia, sendo que o valor geralmente encontrado na literatura para esta época do ano é de 2 L/m<sup>2</sup>dia. A produção média do destilador solar proposto (0,98 L/m<sup>2</sup>dia) se assemelha com os resultados obtidos em destiladores solares desenvolvidos por outros pesquisadores do LAPOA-UFSC (MURAKAMI, 2005; REIF, 2006). Deve-se levar em conta também que o rendimento dos destiladores solares diminui em cerca de 30 a 40% durante o inverno.

A mínima produção de água foi de 0,14 L/m<sup>2</sup>dia correspondente ao quinto ciclo, período caracterizado por muita chuva e nebulosidade. Durante este ciclo, o destilador solar ficou em funcionamento ao longo de 8 dias para obtenção de uma quantidade muito pequena de água (135 mL), apesar de se saber que após alguns dias de ciclo a qualidade da água fica comprometida. Fica evidenciado que a destilação solar natural deve ser empregada em regiões de clima quente e pouca chuva. Outro fator climático que influencia bastante na eficiência desta tecnologia é a presença ou

não do vento, ocorrendo menor produção de água destilada em dias ventosos por causa da dispersão da radiação solar.

A produção diária de água destilada também foi comparada com os dados de radiação solar durante os cinco ciclos de destilação solar. Os dados de radiação solar foram obtidos através de um gerador fotovoltaico do LABSOLAR, laboratório do Departamento da Engenharia Mecânica da UFSC.

Este gerador fotovoltaico armazena os dados de radiação global direta a cada hora. Para cada dia do ciclo, foram somadas as radiações globais horárias do período das 7 horas até às 19 horas, resultando em um total de 12 horas de radiação por dia.

Os dados de radiação solar são apresentados com unidade  $W/m^2$ . Esta unidade, conhecida como constante solar, corresponde a energia do Sol recebida por uma unidade de área. Com a Figura 5.6, verifica-se que a produção diária de água destilada é maior em dias de alta radiação solar.

A máxima produção de água destilada, por exemplo, foi obtida em um dia de radiação global média diária de  $3660 W/m^2$ , e a menor produção de água corresponde ao quinto ciclo com radiação global média diária de  $1903 W/m^2$ .

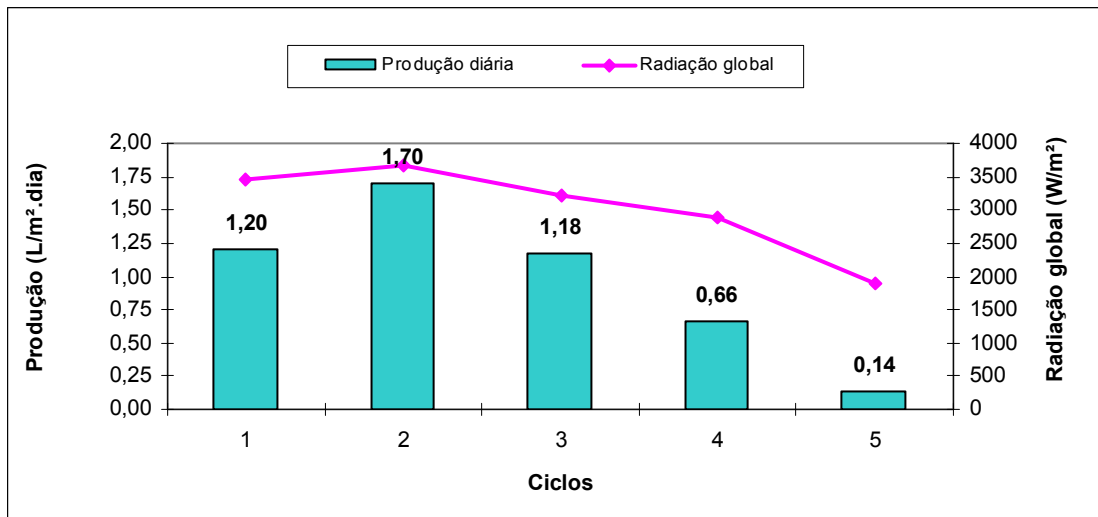


Figura 5.6 – Relação entre a produção de água destilada e a radiação global média.

#### Testes realizados com amostras de água da Praia dos Ingleses

O destilador solar foi testado com água do mar durante o período de 18/08/2008 e 16/09/2008, período caracterizado por dias mais ensolarados e conseqüentemente, as temperaturas medidas foram maiores (Figura 5.7).

A temperatura média da água armazenada na bandeja metálica durante esse período foi de  $44^{\circ}C$ , com temperatura máxima de  $53^{\circ}C$  no dia 03/09/2008 e temperatura mínima de  $23^{\circ}C$  no dia 22/08/2008. Como pode ser observado no gráfico a seguir, a temperatura do ar no interior do destilador solar é sempre maior que a temperatura do ambiente externo, chegando a uma temperatura de até  $49^{\circ}C$  em dias mais quentes. Isto se deve ao fato de o sistema piloto de destilação solar ser bem vedado, evitando assim uma perda muito grande de calor.

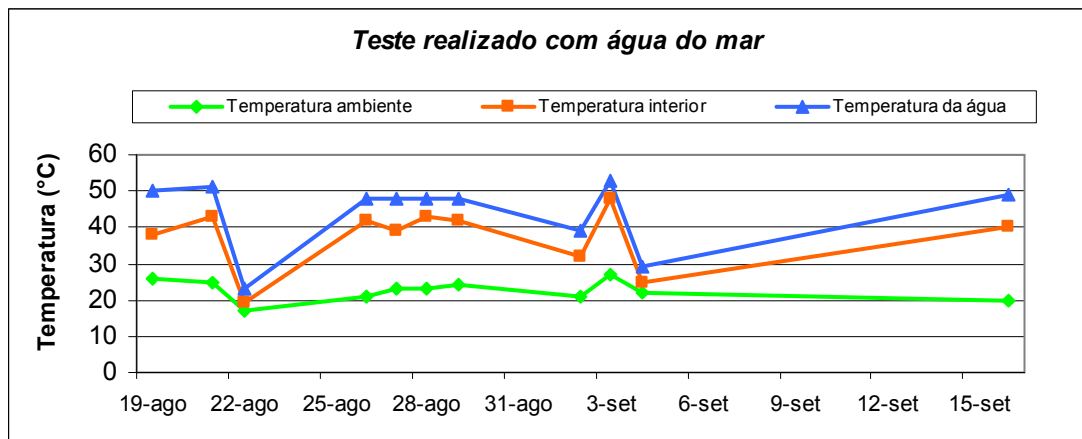


Figura 5.7 – Temperaturas medidas durante experimentos com água do mar.

### 5.3. Avaliação dos parâmetros físico-químicos da água bruta e tratada

#### Amostras de água do Rio Itajaí do Sul contaminada com Carbofurano

A Tabela 5.2 compara os valores dos parâmetros físico-químicos analisados da água bruta e tratada, referentes aos ciclos de destilação solar com água contaminada com Carbofurano. Para esta comparação, são apresentados os valores médios obtidos em quatro ciclos de destilação solar.

Tabela 5.2: Comparação qualitativa das amostras de água do Rio Itajaí do Sul.

<i>Parâmetros de Controle</i>	<i>Água contaminada com carbofurano</i>		
	<i>Água bruta</i>	<i>Água destilada</i>	<i>Portaria N°518</i>
Turbidez (uT)	19,2	0,18	5
Cor aparente (uH)	138,8	6,8	15
Cor verdadeira (uH)	6,8	2,3	
pH	7,8	7,2	Entre 6,0 e 9,5
Ferro total (mg/L)	1,9	0,1	0,3
Coliformes totais (NMP/100mL)	10,3	<1	Ausência em 100mL
Coliformes fecais (NMP/100mL)	<1	<1	Ausência em 100mL
Concentração de Carbofurano (µg/L)	3,7	1,1	

Como visto na Tabela 5.2, os valores dos parâmetros da água destilada se encontram dentro dos limites de potabilidade estabelecidos pela Portaria N°518 do Ministério da Saúde. Através da tabela anterior foi feito um gráfico com a eficiência do destilador solar na remoção de cada parâmetro de controle. A Figura 5.8 ilustra os resultados apresentados anteriormente.

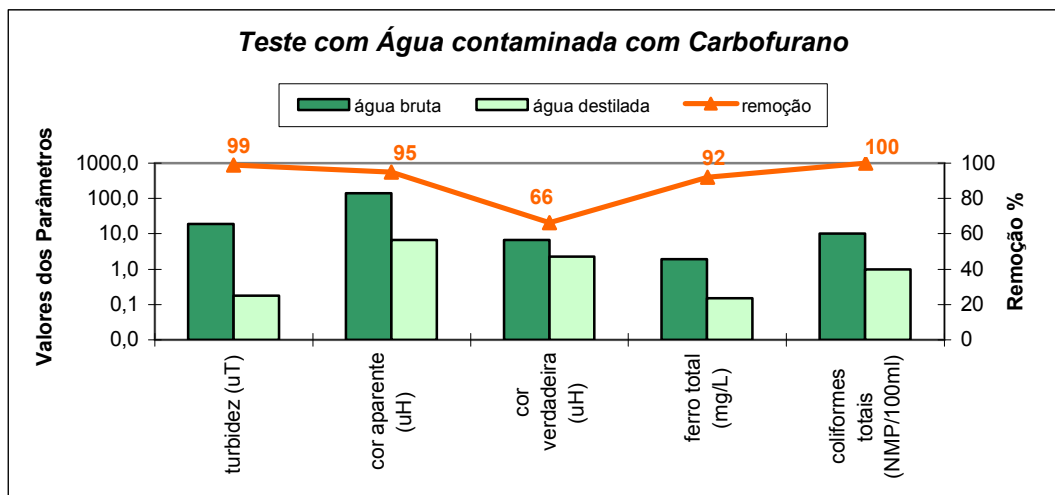


Figura 5.8 - Parâmetros de controle da água contaminada com carbofurano.

Não foram detectados coliformes fecais nas amostras de água bruta e tratada analisadas, portanto este parâmetro de controle não foi incluso no gráfico acima. As amostras de água destilada não apresentaram aparentemente odor, embora não tenha sido utilizado nenhum equipamento para tal análise.

O ponto de coleta de água bruta, no rio Itajaí do Sul, é caracterizado por concentração de ferro, por causa da formação basáltica que se estende ao longo da região. A tecnologia da destilação solar proposta apresentou uma remoção de 92% do ferro total, sendo que a água tratada atendeu ao limite estabelecido pela legislação (< 0,3mg/L).

Os valores de pH variaram muito pouco durante a passagem da água de alimentação no destilador solar. O pH das amostras de água bruta e tratada ficaram dentro da faixa de 6,0 e 9,5, conforme estabelecido pela Portaria N°518. Se o pH da água bruta ficasse fora desta faixa, poderia ter ocorrido corrosão na parte metálica do reservatório de água bruta.

#### Amostras de água da Praia dos Ingleses

Foram realizados seis ciclos de destilação solar com água coletada na Praia dos Ingleses e os valores médios dos parâmetros físico-químicos da água são apresentados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3: Comparação qualitativa das amostras de água da Praia dos Ingleses.

Parâmetros de Controle	Água do Mar		
	Água bruta	Água destilada	Portaria N°518
Turbidez (uT)	5,3	0,96	5
Cor aparente (uH)	42,3	7,3	15
Cor verdadeira (uH)	4,0	2,3	
pH	7,9	7,0	Entre 6,0 e 9,5
Condutividade (µs/cm a 25°C)	41,8	0,1	
Sólidos totais (mg/L)	22292,5	7,7	1000
Salinidade (ppt)	0,025	0,08	



A Figura 5.9 possibilita melhor interpretação dos resultados apresentados na Tabela 5.3, assim como a eficiência na remoção dos parâmetros de controle.

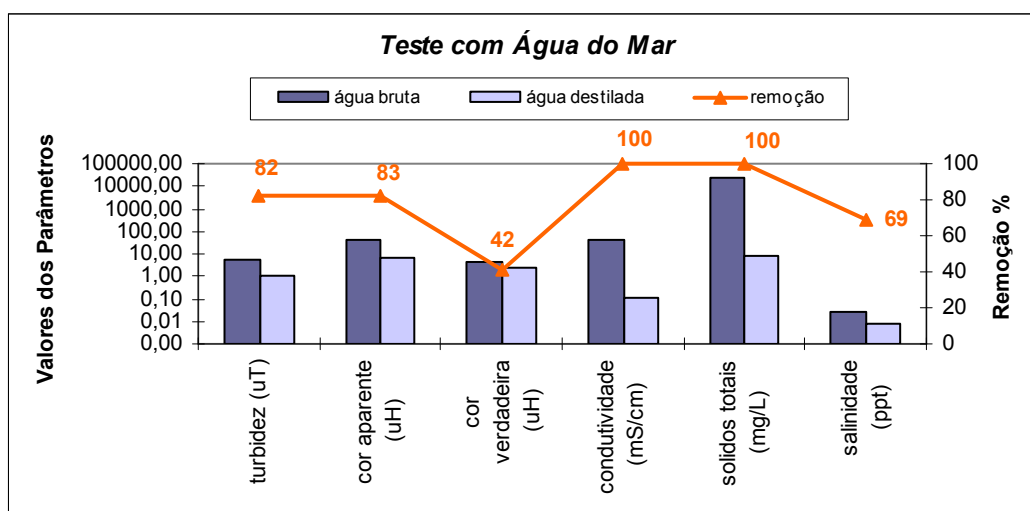


Figura 5.9 - Parâmetros de controle da água do mar.

Como visto na Tabela 5.3, os parâmetros físico-químicos da água destilada estão dentro dos limites de potabilidade da água. As eficiências da remoção da turbidez e cor aparente foram significativamente altas (82 e 83% respectivamente), entretanto a remoção da cor verdadeira foi de apenas 42%.

O destilador solar proposto apresentou remoção de 100% para os parâmetros de condutividade e sólidos totais, o que evidencia sua alta eficiência na remoção de compostos inorgânicos, como o sal.

As Figuras 5.10 e 5.11 apresentam os valores de remoção média, mínima e máxima da salinidade e da condutividade, respectivamente. A remoção da condutividade apresentou uma variância muito baixa (0,081) e desvio padrão de 0,28, uma vez que a remoção mínima da condutividade foi de 99%.

Quanto à remoção da salinidade, a mínima e a máxima remoção foram 58% e 72%, respectivamente, com variância de 27,11 e desvio padrão de 5,21. A remoção média da salinidade (69%) foi muito menor que a remoção média da condutividade (100%). Isto se deve ao fato que os valores de salinidade das amostras foram estimados através da fórmula de salinidade prática, enquanto os valores de condutividade foram obtidos diretamente pelo condutímetro utilizado. Considerou-se também que a água estava a uma mesma temperatura de 15°C para estimativa da salinidade, mas não foram medidas as temperaturas das amostras antes das análises.

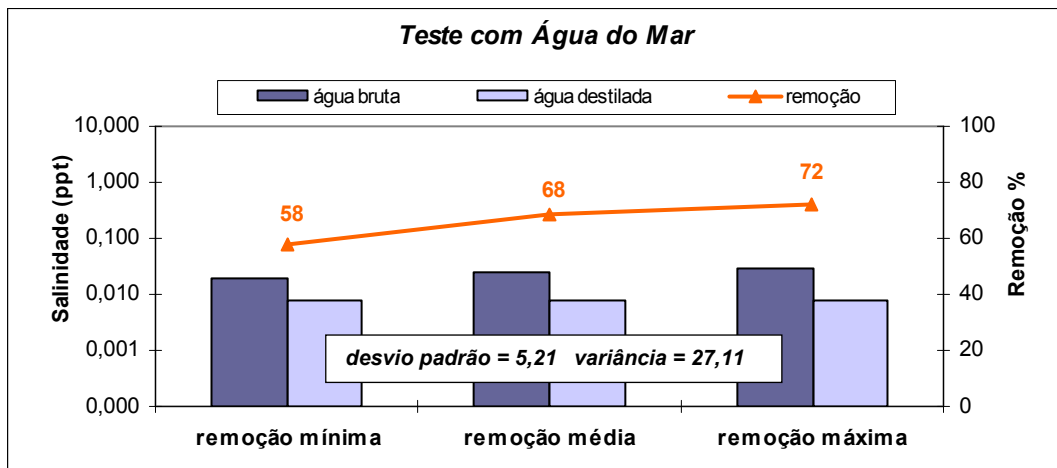


Figura 5.10 – Análise da remoção da salinidade das amostras da água do mar .

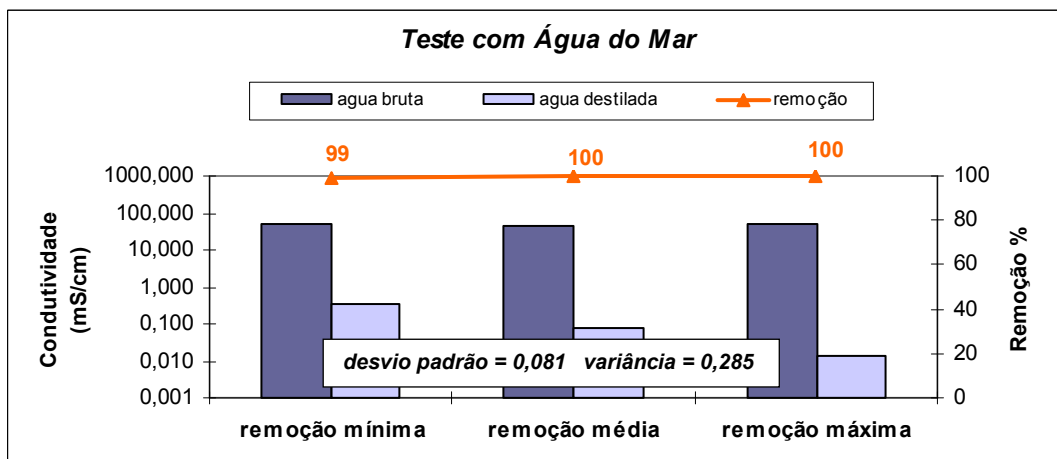


Figura 5.11 – Análise da remoção da condutividade das amostras da água do mar .

#### 5.4. Remoção do Carbofurano nas amostras de água do Rio Itajaí do Sul

A partir da concentração do Carbofurano identificada no cromatograma e o volume da amostra analisada, calculou-se a concentração do Carbofurano (em  $\mu\text{g/L}$ ) das amostras referentes aos ciclos realizados, conforme mostra a Tabela 5.4.

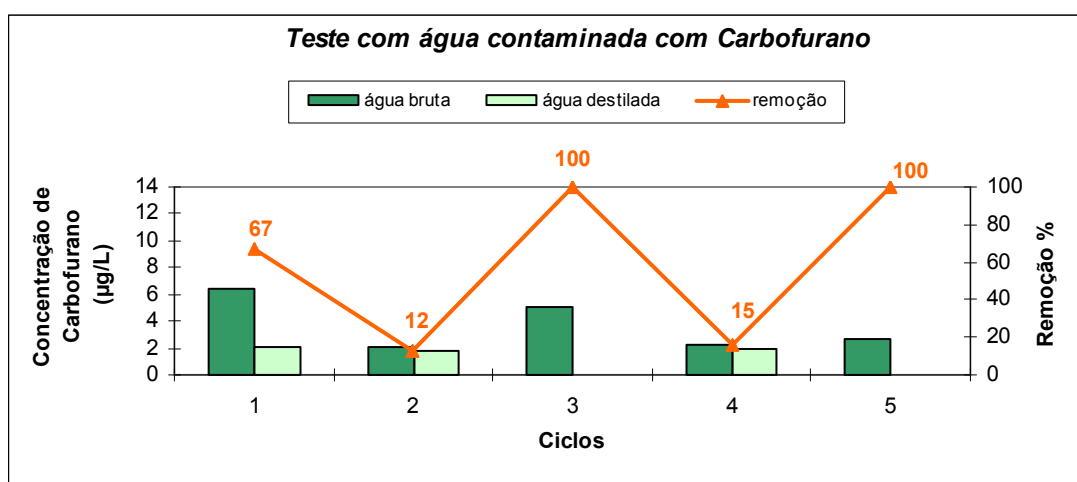
Ao todo, foram realizados oito testes para tratamento de águas contaminadas com Carbofurano; os três primeiros testes não foram considerados na Tabela 5.4, uma vez que o sistema requer um tempo para estabilização. Acredita-se também que houve contaminação das amostras de água destilada durante esses primeiros ciclos devido à má limpeza do reservatório de água tratada, por isso reforça-se a necessidade de lavar devidamente o reservatório.

**Tabela 5.4: Concentrações do Carbofurano nas amostras de água bruta e destilada.**

Ciclo	Amostra	Concentração do volume injetado (mg/L)	Volume amostra (mL)	Massa do Carbofurano (g)	Concentração (µg/L)
1	bruta	0,516	80	0,000516	6,4
	destilada	0,170	80	0,000170	2,1
2	bruta	0,169	80	0,000169	2,1
	destilada	0,148	80	0,000148	1,8
3	bruta	0,253	50	0,000253	5,1
	destilada	Abaixo do limite de detecção	50	Abaixo do limite de detecção	Abaixo do limite de detecção
4	bruta	0,115	50	0,000115	2,3
	destilada	0,097	50	0,000097	1,9
5	bruta	0,131	50	0,000131	2,6
	destilada	Abaixo do limite de detecção	50	Abaixo do limite de detecção	Abaixo do limite de detecção

A Figura 5.12 apresenta a diferença das concentrações do Carbofurano nas amostras de água bruta e destilada, sendo que as amostras de água destilada nos ciclos 3 e 5 apresentaram concentração de Carbofurano abaixo do limite de detecção do cromatógrafo (0,1 µg/L).

Nota-se que houve remoção do Carbofurano nos cinco ciclos analisados, entretanto a eficiência de remoção variou bastante entre os ciclos, ocorrendo desde uma remoção pequena de 12% até uma remoção total de 100%.



**Figura 5.12 – Concentrações de Carbofurano nas águas bruta e destilada e remoções.**

A remoção de compostos voláteis, como pesticidas, apresenta sucessos variados na literatura também, e sua remoção depende diretamente da Constante de Lei de Henry (CLH) do composto. O Carbofurano possui uma Constante de Lei de Henry muito pequena ( $3,9 \times 10^{-9} \text{ atm m}^3 \text{ mol}^{-1}$ ), o que significa que menor porcentagem do Carbofurano vai para o ar em relação a água, dificultando sua remoção. Não foram encontrados trabalhos publicados sobre a remoção de carbamatos através da destilação solar para comparação. Autores como Hanson et al (2004) utilizaram em suas pesquisas pesticidas do grupo organoclorados com CLH bem maior que àquela do Carbofurano.

Conforme apresentado na Figura 5.13, optou-se pela comparação dos resultados com os limites estabelecidos pela OMS (2004) e UE (COUNCIL DIRECTIVE, 1998), uma vez que são os limites mais críticos ( $7 \mu\text{g/L}$  e  $0,1 \mu\text{g/L}$ , respectivamente) encontrados atualmente. Os padrões estabelecidos pela USEPA (2008) e pela HEALTH CANADA (2008) permitem uma concentração maior de Carbofurano ( $40 \mu\text{g/L}$  e  $90 \mu\text{g/L}$ , respectivamente) e todas as amostras de água destilada nos cinco ciclos atenderam esses limites.

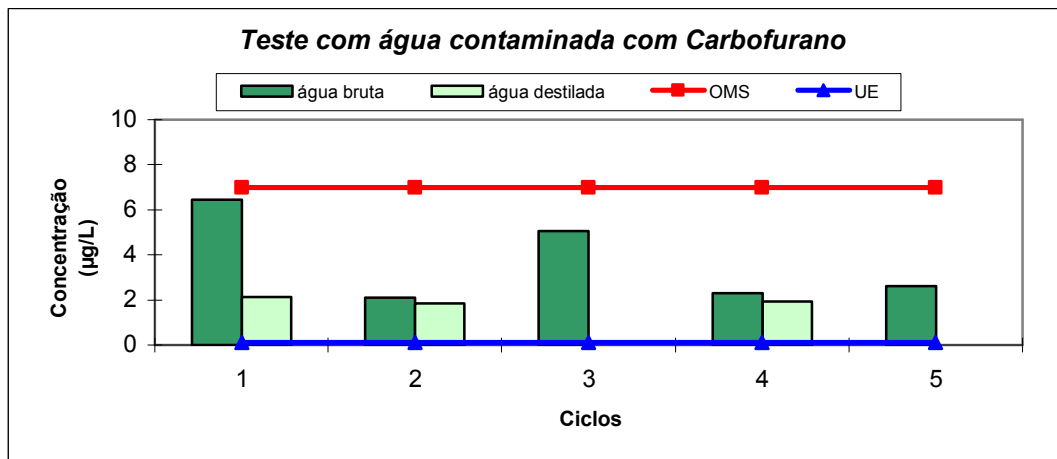


Figura 5.13 – Comparação das concentrações de Carbofurano com a legislação.

Observa-se que as amostras de água destilada dos cinco ciclos estão dentro dos limites estabelecidos pela OMS, entretanto somente os ciclos 3 e 5 atenderam aos limites determinados pela União Européia, já que não foi detectado Carbofurano nessas amostras.

### 5.5. Balanço de massa do Carbofurano

O balanço de massa de cada ciclo não fica totalmente equilibrado com relação ao volume, porque com o completar do ciclo, a cobertura e também as paredes do sistema ficam com gotículas. Ou seja, para se obter um balanço completo, seria necessário medir as gotículas que ficaram nestes lugares. Estas gotículas não alcançaram volume ou peso suficiente para escorrer pela cobertura ou retornar para a bandeja, por isso a equação de balanço de massa sempre apresenta uma constante representante das gotículas.

Para encontrar uma constante referente a essas perdas de água, fez-se um balanço de massa do Carbofurano à partir da realização de três ciclos, utilizando: (a) volume de água colocado na bandeja no início do ciclo ( $V_{bruta}$ ) e a massa do Carbofurano na amostra ( $m_{bruta}$ ); (b) volume de água destilada presente no reservatório de água tratada ( $V_{destilada}$ ) e a massa do Carbofurano na amostra ( $m_{destilada}$ ); (c) volume de água restante na bandeja no final do ciclo ( $V_{bandeja}$ ) e a massa do Carbofurano na amostra ( $m_{bandeja}$ ). A Tabela 5.5 representa os dados utilizados para realização do balanço de massa do Carbofurano.

**Tabela 5.5: Balanço de massa do Carbofurano em três ciclos.**

<i>Ciclo</i>	<i>Amostra</i>	<i>Massa do Carbofurano (mg)</i>	<i>Volume (mL)</i>
<b>3</b>	<i>água bruta</i>	0,000253	1500
	<i>água destilada</i>	0	1100
	<i>água restante na bandeja</i>	0,0000563	68
<b>4</b>	<i>água bruta</i>	0,000115	1500
	<i>água destilada</i>	0,0000972	450
	<i>água restante na bandeja</i>	0,00000904	650
<b>5</b>	<i>água bruta</i>	0,000131	1500
	<i>água destilada</i>	0	700
	<i>água restante na bandeja</i>	0,000139	375

O balanço de massa foi feito a partir da equação de conservação de massa, onde C é a constante de perdas.

$$m_{bruta} \times V_{bruta} = (m_{destilada} \times V_{destilada} + m_{bandeja} \times V_{bandeja}) + C$$

Encontrou-se um valor da constante de perdas para cada ciclo ( $C_3=0,376$  mg.mL;  $C_4=0,123$  mg.mL e  $C_5=0,144$  mg.mL).

## 5.6. Remoção do Carbofurano através da chaleira metálica

Em análise ao ciclo realizado na chaleira metálica, observou-se que a água destilada não indicou presença de concentração de carbofurano. Acredita-se que a presença do fogo ( $\cong$  máximo de  $100^\circ\text{C}$ ), pode ter quebrado a molécula do carbofurano em metabólitos menos tóxicos (como exemplo: 7-fenol com dose letal 2200 mg/Kg e o 3-hidroxi-7-fenol com dose letal 1350 mg/Kg) ou mais tóxicos (3hidroxi-carbofurano com dose letal 18 mg/Kg, e-ceto-carbofurano com dose letal 69 mg/Kg e o 3-ceto-7-fenol com dose letal 295 mg/Kg), ou mesmo substâncias mais simples como água, álcoois, etc.

## 6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A construção do destilador solar teve custo relativamente baixo e não apresentou problemas de vazamento de água, devido ao seu bom sistema de vedação com cantoneiras de alumínio e silicone. Entretanto, o destilador solar proposto não se trata de um modelo prático, principalmente quando se faz a coleta de água destilada. Caso este modelo de destilador solar seja refeito em uma escala maior, propõe-se a instalação de uma mangueira de pequeno diâmetro na base do destilador para facilitar a coleta de água destilada.

A qualidade da água produzida através da destilação solar atendeu os padrões de potabilidade estabelecidos pela Portaria N°518 em todos os parâmetros analisados. As eficiências na remoção dos parâmetros foram altas, mostrando que a tecnologia da destilação solar é capaz de transformar uma água de qualidade muito baixa em uma água de alta qualidade.

Houve remoção do Carbofurano durante os ciclos de destilação solar, porém as eficiências de remoção oscilaram bastante entre os ciclos, ocorrendo desde uma remoção pequena até uma remoção máxima de 100%. A concentração de Carbofurano na água destilada produzida nos ciclos atendeu os limites da Organização Mundial de Saúde, mas somente dois ciclos atenderam aos limites estabelecidos pela União Européia.

O experimento realizado com a chaleira metálica se mostrou altamente eficiente na remoção do Carbofurano. Recomenda-se a fervura da água contaminada com Carbofurano para verificar se a temperatura maior da água realmente influencia na remoção do composto em questão.

A realização de testes de destilação solar utilizando água do mar mostrou que compostos inorgânicos são mais fáceis de remover que o Carbofurano, devido ao alto ponto de ebulição do sal. As eficiências na remoção da salinidade (condutividade) foram muito maiores que as eficiências obtidas na remoção do Carbofurano.

Em relação a avaliação quantitativa do destilador solar proposto, conclui-se que a maior produção de água ocorre em dias de alta radiação solar e sem chuva, e consequentemente com maior temperatura da água de alimentação. Desta forma, recomenda-se a instalação deste destilador solar em alguma região do Brasil de clima mais quente e com menor índice pluviométrico, como o nordeste brasileiro. Recomenda-se também a realização de novos projetos e estudos referentes a eficiência energética do destilador solar.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

ANVISA. AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA NATURAL. **Programa de Análise de Resíduos de Agrotóxicos em Alimentos – PARA.** Disponível em: <[http://www.anvisa.gov.br/toxicologia/residuos/resultados\\_PARA.pdf](http://www.anvisa.gov.br/toxicologia/residuos/resultados_PARA.pdf)>. Acesso em 28 de maio de 2008.

ANVISA. AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA NATURAL. **Carbofurano** Disponível em: <<http://www.anvisa.gov.br/toxicologia/monografias/c06.pdf>>. Acesso em 29 de maio de 2008.

APHA, **Standard methods for examination of water and wastewater.** 20<sup>th</sup> ed. Washington: APHA. 1998.

BANIK A.E. **The choice is clear.** ACRES USA, Metairie, Louisiana, 1989.

BERNHARDT, M.F. **MicroServidor Web no monitoramento e controle remotes da qualidade da água na carnicultura,** 2003. 112p. Dissertação (Mestrado em Ciências da Computação). Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação. Florianópolis.

BOUCHEKIMA, B. **A solar desalination plant for domestic water needs in arid areas of South Algeria.** Desalination, v.153, p.65-69, Algeria, 2002.

BOUCHEKIMA, B.; GROS, B.; OAHES, R.; DIBOUN, M. **Performance study of the capillary film solar distiller.** Desalination, v.116, p.185-192, Algeria, 1998.

BRASIL. **Decreto Federal nº 4.074 de 04 de janeiro de 2002 do Ministério da Saúde.** Regulamenta a Lei no 7.802, de 11 de julho de 1989, que dispõe sobre a pesquisa, a experimentação, a produção, a embalagem e rotulagem, o transporte, o armazenamento, a comercialização, a propaganda comercial, a utilização, a importação, a exportação, o destino final dos resíduos e embalagens, o registro, a classificação, o controle, a inspeção e a fiscalização de agrotóxicos, seus componentes e afins, e dá outras providências. 2002

BRASIL. **Portaria nº 518 de 25 de março de 2004 do Ministério da Saúde.** Estabelece procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e das outras providências. 2004.

CAPELLETTI, G.M. **An experiment with a plastic solar still.** In: Desalination, v.142, p. 221-227, Italy, 2002.

CHAIBI, M.T. **An overview of solar desalination for domestic and agricultura water needs in remote arid areas.** Desalination, v.127, p. 119-133, Tunisia, 2000.

COUNCIL DIRECTIVE. **Council Directive 98/83/EC of November 1998 on the Quality of Water Intended for Human Consumption.** Official Journal L 330. European Union, Brussels, p. 32, 1998.

DALSASSO, R. L. **Pré-ozonização de águas contendo agrotóxicos, seguida de filtração direta,** 1999. 147p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. Florianópolis.

DELYANNIS, E.; BELESSIOTIS, V. **Solar application in desalination: the Greek Islands experiment.** Desalination, v.100, p.27-34, Greece, 1995.

DGFE – Deutsche Gesellschaft für Ernährung. **Drink distilled water?** Med. Mo. Pharm. 1993.

DI BERNARDO, L., DANTAS, A.D.B. **Métodos e técnicas de tratamento de Água.** 2ª Edição, Volume 1, p.785-1565. Editora Rima. São Carlos, 2005.

DI BERNARDO, L. **Métodos e técnicas de tratamento de Água.** Rio de Janeiro: ABES. 481p, v.1, 1993.

DUFFIE J.A.; BECKMAN W. A. **Solar energy thermal processes.** Wiley Interscience Publication, New York. 386p, 1975.

DUFFIE J. A, BECKMAN W. A., **Solar engineering of thermal processes,** 2 edição. Editora John Wiley & Sons. 1991.

EPA. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Current drinking water standards.**

Disponível em: <<http://www.epa.gov/safewater/contaminants/index.html#primary>> atualizado em 21/11/2006. Acessado em 04 de junho de 2008.

EXTOXNET. Extension Toxicology Network. **Pesticides Information Profiles.** Oregon State University, 1996. Disponível em <<http://extoxnet.orst.edu/pips/carbofur.htm>>. Acesso em 03 de junho de 2008.

FERRARI, G. **Avaliação de aspectos construtivos e operacionais da tecnologia de destilação solar natural para tratamento de água e sua eficiência na remoção de cianotoxinas,** 2008. 50p. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

FLENDRIG, L.M.; SHAH, B.; SUBRAHMANIAM, N.; RAMAKRISHNAN, V. **Low cost thermoformed solar still water purifier for D&E countries.** Physics and Chemistry of the Earth, The Netherlands, 2008.



FREITAS, M.B. **Tratamento de água para consumo humano**. Curso de Especialização em Engenharia Sanitária e Controle Ambiental. Rio de Janeiro, 2001.

GALLO, D. **Método de controle de pragas: métodos químicos**. Manual de Entomologia Agrícola. 2ª Edição, São Paulo: Agronômica Ceres, p.213-277, 1988.

GICQUEL, L. **Curso Agrotóxico**. Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, 43p, 1998.

HANSON, A.; ZACHRITZ, W.; STEVENS, K.; MIMBELA, L.; POLKA, R.; CISNEROS, L. **Distillate water quality of a single-basin solar still: laboratory and field studies**. Solar Energy, v.76, p.635-645, USA, 2004.

HEALTH CANADA. **Summary of guidelines for Canadian drinking water**. Disponível em: <[http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/alt\\_formats/hecs-sesc/pdf/pubs/water-eau/sum\\_guide-res\\_recom/summary-sommaire\\_e.pdf](http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/alt_formats/hecs-sesc/pdf/pubs/water-eau/sum_guide-res_recom/summary-sommaire_e.pdf)>. Acesso em 28 de maio de 2008.

HOWE, E.D., Tleimat, B.W. **Fundamentals of water desalination**. Sayigh, A.A.M. (Ed), Solar Energy Engineering. Academic Press, p.431-464, 1977.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Indicadores de desenvolvimento sustentável**. Rio de Janeiro. 195p, 2002.

IQBAL M. **An introduction to solar radiation**. Academic Press Canada, 390p, 1983.

ITUPORANGA. Secretaria Estadual de Desenvolvimento Regional-SDR. **Caracterização Regional**. Santa Catarina, 37p, 2003.

KHANNA, R.K.; RATHORE, R.S.; SHARMA, C. **Solar still an appropriate technology for potable water need of remote villages of desert state of India – Rajasthan**. Desalination, v.220, p. 645-653, Índia, 2008.

LARINI, L. **Toxicologia**. Editora Manole Ltda, v.1, 300p. São Paulo, 1997.

LEÃO, J.C. **Estudo do movimento do Carbofuran no perfil de um solo agrícola**, 1997. 96p. Dissertação de mestrado. Programa de pós-graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC.

MALIK, M., TIWARI, M.S.G.N., KUMAR, A., SODHA, M.S. **Solar Distillation: a practical study of a wide range of stills and their optimum design, construction and performance**. Pergamon Press, Oxford, 1982.

MALUF, A.P. **Destiladores solares no Brasil**, 2005. 39p. Monografia. Programa de pós-graduação em Fontes Alternativas de Energia. Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais.

MEZZARI, M.P. **Determinação do Carbofuran em amostras ambientais e avaliação de seu potencial de bioacumulação em Poecilia Reticulata por cromatografia líquida de alta eficiência (CLAE-UV)**. 2000. 101p. Dissertação em Engenharia Ambiental, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Florianópolis.

MORTARI Jr, J.R. **Simulação do Potencial de Contaminação de Agrotóxicos nas Microbacias Hidrográficas de Santa Catarina**. 1995. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

MURAKAMI, D.T. **Potabilização de água utilizando um destilador solar em forma de pirâmide invertida**, 2005. 38p. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

NASA. NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. **World book at NASA – Sun**. Disponível em:  
<[http://www.nasa.gov/worldbook/sun\\_worldbook.html](http://www.nasa.gov/worldbook/sun_worldbook.html)>. Acesso em 10 de junho de 2008.

NASAexplorer. NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. **Models of the electromagnetic spectrum – student sheet**. Disponível em:  
<[http://www.nasaexplorer.org/show\\_912\\_student\\_st.php?id=030106134335](http://www.nasaexplorer.org/show_912_student_st.php?id=030106134335)>. Acesso em 10 de junho de 2008.

NASA, Image. Disponível em Google Earth 2008: image©2008 Digital Globe. Acesso em 12 de junho de 2008.

NASSAR, Y.F.; YOUSIF, S.A.; SALEM, A.A. **The second generation of the solar desalination systems**. Desalination 209, p.177-181, Libya, 2007.

OPAS. Organização Pan-Americana de saúde. **Manual de Vigilância da saúde de populações expostas a agrotóxicos**. Brasília, edição de 2000, 72p, 1996.

ORP. **Observatoire des Résidus de Pesticides**. Disponível em:  
<<http://www.observatoire-pesticides.gouv.fr>>. Acesso em 03 de junho de 2008.

PATTRON, D. **Health Benefits of Drinking Distilled Water? Public Health and Management**. University of West Indies. Trinidad, 2008.

PMF.PREFEITURA MUNICIPAL DE FLORIANÓPOLIS. **Perfil de Florianópolis**. Disponível em:  
<[http://www.pmf.sc.gov.br/index.php?link=perfil&sublink=fisico\\_geog#area](http://www.pmf.sc.gov.br/index.php?link=perfil&sublink=fisico_geog#area)>. Acesso em 06 de junho de 2008.

POLASTRO, D. **Estudo dos casos de intoxicação ocasionados pelo uso de agrotóxicos no estado do Paraná, durante o período de 1993 a 2000**, 2005.

Dissertação de mestrado em Ecologia em agroecossistemas. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, São Paulo.

PROSAB. **Processos de desinfecção e desinfetantes alternativos na produção de água potável**. São Carlos: ABES, 2001.

REIF, L. **Produção de águas através da destilação solar natural utilizando uma pirâmide metálica**. Relatório Parcial PIBIC-CNPQ, 2006.

SANTOS, M.G.S. **Determinação de Resíduos de Carbofurano e do Metabólito 3-Hidroxi-Carbofurano em águas de lavouras de arroz irrigado em Santa Catarina**, 2007. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental. Florianópolis, SC.

ŞEN, Z. **Solar energy in progress and future research trends**. In: Progress in energy and combustion science 30. p.367-415, 2004.

SOARES C. **Tratamento de água unifamiliar através da destilação solar natural utilizando água salgada, salobra e doce contaminada**. 2004. 110p. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental. Florianópolis, SC.

STOPPELLI, I. M. de B. **Agricultura, ambiente e saúde: uma abordagem sobre o risco do conato com os agrotóxicos a partir de um registro hospitalar de referência regional**. 2005. 155 p. Tese (Doutorado em Ciências da engenharia Ambiental). Programa de Pós-Graduação em Ciências da Engenharia Ambiental. Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos.

TIWARI, G.N; TIWARI, A.K. **Solar distillation practice for water desalination systems**. Editora Anshan. New Delhi, India. 270p, 2008.

TLEIMAT, B. W. **Tecnologia para aproveitar la energia solar**. Organizacion de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial. Naciones Unidas, NY.169p, 1979.

TOMLIN, C.D.S. **The Pesticide Manual**. Editora Farnham: British Crop Protection Council. 2001.

UNICEF. THE UNITED NATIONS CHILDREN'S FUND. **Water for life– Making it happen**, 2005. Disponível em: <[http://www.unicef.org/wes/files/JMP\\_2005.pdf](http://www.unicef.org/wes/files/JMP_2005.pdf)>. Acesso em 10 de junho de 2008.

USEPA. U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **What is a Pesticide?** Disponível em: <<http://www.epa.gov/pesticides/whatis.html>>. Acesso em 02 de junho de 2008.

WHO – WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Guidelines for drinking - water quality**, 2nd ed. Geneva: WHO, 1998.

WHO – WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Carbofuran in drinking water**. 2004.

Disponível em:

<[http://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/dwq/chemicals/carbofuran.pdf](http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/chemicals/carbofuran.pdf)>.

Acesso em 25 de maio de 2008.