

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENERGIA NUCLEAR**

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PARA
DESCONTAMINAÇÃO MICROBIOLÓGICA DA ÁGUA POR
PASTEURIZAÇÃO SOLAR**

GUSTAVO CARIELO

**Recife
2011**

GUSTAVO CARIELO

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PARA
DESCONTAMINAÇÃO MICROBIOLÓGICA DA ÁGUA POR
PASTEURIZAÇÃO SOLAR**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares (PROTEN) do Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco como requisito para obtenção do título de Mestre. Área de Concentração: Fontes Renováveis de Energia.

ORIENTADOR: DR. CHIGUERU TIBA

RECIFE

2011

Catálogo na fonte
Bibliotecário: Carlos Moura, CRB4-1502 (BDEN/UFPE)

S586d **Silva, Gustavo Carielo da.**

Desenvolvimento de um sistema para descontaminação microbiológica da água por pasteurização solar. / Gustavo Carielo da Silva. - Recife: O Autor, 2011.

107 f. : il., graf. , tab.

Orientador: Prof. Dr. Chigueru Tiba.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, 2011.

Inclui Referências Bibliográficas.

**1. Energia solar. 2. Pasteurização solar.
3. Coliformes. 4. Descontaminação. I. Tiba, Chigueru.
(orientador). II. Título.**

333.7923 CDD (21. ed.)

UFPE/BDEN/2011-006

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PARA
DESCONTAMINAÇÃO MICROBIOLÓGICA DA ÁGUA POR
PASTEURIZAÇÃO SOLAR**

Gustavo Carielo da Silva

APROVADO EM: 11.08.2011

ORIENTADOR: Prof. Dr. Chigueru Tiba

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Carlos Costa Dantas – DEN/UFPE

Profa. Dra. Eielza Moura de Souza Barbosa – DEN/UFPE

Profa. Dra. Glícia Maria Torres Calazans – Depto. Antibióticos/UFPE

Visto e permitida a impressão

Coordenador do PROTEN/DEN/UFPE



“Dedico esta obra ao meu falecido avô, José Carielo da Silva, que sempre acreditou no meu ser com amor e paciência, e que me ensinou os caminhos necessários à conquista, mas infelizmente não está aqui para colher a semente que plantou. Obrigado Vovô!”

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PARA DESCONTAMINAÇÃO MICROBIOLÓGICA DA ÁGUA POR PASTEURIZAÇÃO SOLAR

RESUMO

É de notável importância propor soluções para o suprimento de água potável no Nordeste do Brasil, principalmente na região Semiárida, não somente pela escassez, mas por sua falta de qualidade química e biológica. Neste trabalho é descrito um sistema de pasteurização solar automatizado cujos critérios básicos de projeto foram: ausência da produção de trihalometanos; geração local de energia térmica e elétrica; preservação do bioma local (a caatinga); tecnologia de automação, e finalmente, robustez e baixo custo. As principais características deste sistema residem na sua autonomia energética, na capacidade de promover a descontaminação independente de qualquer turbidez e qualquer pH, no controle do tempo de tratamento e na ausência de contaminação secundária derivada da possível mistura da água contaminada em tratamento. O protótipo construído consiste de um sistema solar térmico para tratamento microbiológico da água com um pequeno sistema fotovoltaico para suprimento de eletricidade, somente para o sistema de controle. A etapa de controle, além de garantir o total confinamento de lotes de água, isolando completamente a água contaminada da massa em tratamento, possui versatilidade de tratamento em função das temperaturas de pasteurização. Este equipamento é capaz de pasteurizar a água por bateladas, em intervalos de tempo pré-programados de acordo com a curva de desativação dos microrganismos. Para verificar a eficácia deste sistema, o mesmo foi submetido a testes de tratamento da água contaminada em cinco temperaturas de pasteurização: 55°C à 3600 segundos; 60°C à 2700 segundos; 65°C à 1800 segundos; 75°C à 900 segundos e 85°C à 15 segundos. Análises bacteriológicas quantitativas e qualitativas foram realizadas em laboratório e os resultados obtidos estão de acordo com portaria nº 518 do Ministério da Saúde do Brasil. Antes do tratamento havia um alto nível de contaminação por bactérias do grupo coliformes, inclusive a presença do indicador mais específico de contaminação de organismos patogênicos deste grupo, a *Escherichia coli*. As análises após os tratamentos, feitas pela técnica do substrato Cromogênico e Fluorogênico, se mostraram totalmente negativas para ambos os microrganismos.

Palavras-Chave: Pasteurização.Solar.Coliformes.Descontaminação.

DEVELOPMENT OF A SYSTEM FOR MICROBIOLOGICAL DECONTAMINATION OF WATER BY SOLAR PASTEURISATION

ABSTRACT

It is noticeable the importance of proposing solutions for the drinking water supply in the Northeast of Brazil, mainly in the sub arid region, not only for its scarcity, but also for the lack of its chemical and biological quality. In this work, an automated solar pasteurization system is described, in which the project's basic criteria were, the absence of trihalomethane production; local generation of thermal and electric energy; local biome (caatinga) preservation, automation technology, and finally, robustness and low cost. The main characteristics of that system are the energetic autonomy, in the capacity of removing the decontamination regardless from any blurriness of the water or pH, in the control of time in the treatment in the absence of secondary contamination derived in the possible mixture of the contaminated water under treatment. The built prototype consists of a solar thermal system for the microbiological treatment of the water with a small photovoltaic system for the energy supply, only for the control system. The control stage, besides guaranteeing the total confinement of the water lots, isolating completely the contaminated mass water under treatment, has treatment versatility in view of the pasteurization temperatures. This equipment is able to pasteurize water by batch, in pre programmed time intervals in accordance with the microorganisms deactivation curve. In order to verify the efficacy of this system, it was submitted to tests of contaminated water treatment in five pasteurizing temperatures and time intervals: 55°C and 3600 seconds; 60°C and 1800 seconds; 75°C and 900 seconds and 85°C and 15 seconds. Quantitative bacteriological analyses were done in laboratories and the obtained results are in accordance with the Act n°. 518 of the Ministry of Health in Brazil. Before the treatment there was a high level of contamination by coliform bacteria, and also the presence of the most specific indicator for contamination of pathogenic organisms of this group, the *Escherichia coli*. The analyses post treatment, by means of the Chromogenic and Fluorogenic substract, have proven totally negative for both microorganisms.

Key-Words: Solar.Pasteurization.Coliforms.Descontamination.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Curva de inativação de microorganismos patogênicos por pasteurização.	27
Figura 2 – Esquema de um típico sistema de pasteurização solar.	28
Figura 3 – Esquema de um sistema de pasteurização solar simples movido à densidade.	29
Figura 4 – Esquema de um sistema de pasteurização solar movido à densidade com “loop” de convecção interno.	31
Figura 5 – Plataforma de suporte para o reservatório da água contaminada.	35
Figura 6 – Coletor solar plano utilizado no protótipo.	36
Figura 7 – Curva característica e parâmetros do coletor solar utilizado no protótipo.	36
Figura 8 – Reservatório e respirador utilizados no protótipo.	37
Figura 9 – Vista lateral do protótipo com cotas em unidade de metro.	38
Figura 10 – Vista frontal do protótipo com cotas em unidade de metro.	39
Figura 11 – Recuperador de calor construído e utilizado no protótipo.	40
Figura 12 – Diagrama em blocos do sistema de controle com alimentação fotovoltaica.	41
Figura 13 – Conexões hidráulicas de entrada do coletor solar.	42
Figura 14 – Esquema de funcionamento cíclico do pasteurizador solar automático.	43
Figura 15 – Diagrama das conexões entre os dispositivos e equipamentos.	46
Figura 16 – Circuito eletrônico de controle com microcontrolador.	46
Figura 17 – Interface gráfica do painel de monitoramento.	47
Figura 18 – Monitoramento do sistema configurado em modo de tratamento aleatório.	49
Figura 19 – Monitoramento do sistema no instante de descarga do coletor solar.	50
Figura 20 – Monitoramento do sistema no instante de recarga do coletor solar.	51
Figura 21 – Direção dos fluxos de água e ar na entrada do coletor solar.	52
Figura 22 – Circulação de retorno do vapor no respirador.	53
Figura 23 – Riacho Cavouco (UFPE).	54

Figura 24 – Metodologia de análise bacteriológica desenvolvida para o sistema.....	55
Figura 25 – Procedimentos metodológicos executados para coleta e análise microbiológica.....	56
Figura 26 – Tubos C, D e E com indicadores microbiológicos.....	57
Figura 27 – Tubos A, B, C, D e E submetidos à luz ultravioleta.....	58
Figura 28 – Flaconetes contendo substrato cromogênico ReadyCult® Coliforms 100.....	59
Figura 29 – Diagramação lateral do pasteurizador solar automático.....	60
Figura 30 – Diagramação frontal do pasteurizador solar automático	60
Figura 31 – Variação de I_{coll} , T_{in} e T_{out} com o tempo no dia 11/11/10	62
Figura 32 – Variação de I_{coll} , T_{in} e T_{out} com o tempo no dia 24/11/10.	63
Figura 33 – Variação de I_{coll} , T_{in} e T_{out} com o tempo no dia 27/02/11	65
Figura 34 – Variação de I_{coll} , T_{in} e T_{out} com o tempo no dia 14/03/11	66
Figura 35 – Variação de I_{coll} , T_{in} e T_{out} com o tempo no dia 04/02/11.	68
Figura 36 – Variação de I_{coll} , T_{in} e T_{out} com o tempo no o dia 26/03/11.	69
Figura 37 – Variação de T_{in} e T_{out} sem, e com, recuperação de calor no “Set-Point _{75°C} ”.....	71
Figura 38 – Variação das temperaturas de entrada e saída nos horários entre as 20 horas (PM) e 4 horas (AM).....	73
Figura 39 – Consumo elétrico das válvulas solenóides versus irradiância solar.....	76
Figura 40 – Produtividade do protótipo sem recuperação de calor	77
Figura 41 – Produtividade do protótipo com recuperação de calor.....	77
Figura 42 – Comparação entre as tendências de produtividade apresentadas pelo protótipo.....	78
Figura 43 – Resultados positivos para coliformes totais.....	80
Figura 44 – Resultados negativos para coliformes totais e <i>E. Coli</i>	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Padrão microbiológico de potabilidade da água para consumo humano.....	18
Tabela 2 – Temperatura e tempo de pasteurização para alguns microorganismos patogênicos.	26
Tabela 3 – Desempenho diário do protótipo sem recuperação de calor.....	74
Tabela 4 – Desempenho diário do protótipo com recuperação de calor.....	75
Tabela 5 – Resultado das análises bacteriológicas pela técnica dos tubos múltiplos..	79

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

A	Área de abertura do coletor (m^2)
BATCHs	Contagem de bateladas
c	Calor específico ($cal/g.^{\circ}C$)
COUNT	Contador do período de tratamento correspondente a uma determinada temperatura de pasteurização
COUNT _{descarga}	Contador do tempo de descarga do coletor
COUNT _{carga}	Contador do tempo de carga do coletor
cm	Centímetros
H _{coll}	Irradiância global incidente diária (MJ/m^2)
I _{coll}	Irradiância global instantânea no plano do coletor (W/m^2)
i	Temperatura de pasteurização
kg	Kilograma
l	Litro
\dot{m}	Vazão (kg/s ou l/s)
m	Metro
MF	Membrana filtrante
NMP	Número mais provável
NTU	Nephelometric turbidity (unidade de turbidez)
pH	Taxa de acidez
P/A	Presença e ausência
Q	Energia térmica (J)
Set-Point	Valor de temperatura que determina o início do tratamento
Stand-by	Circuito de controle em funcionamento parcial
Δt_i	Período de tratamento a determinada temperatura de pasteurização

$\Delta t_{\text{descarga}}$	Tempo de descarga do lote de água no coletor
Δt_{carga}	Tempo de carga (preenchimento) do coletor
T_{amb}	Temperatura ambiente (°C)
T_{in}	Temperatura de entrada do fluido (°C)
T_{out}	Temperatura de saída do fluido (°C)
TM	Tubos múltiplos
THM	Trihalometanos
UV	Ultravioleta
Valv_IN	Válvula de entrada
Valv_OUT	Válvula de saída
W	Watt
β	Inclinação do coletor em relação ao plano horizontal (°)
°C	Unidade de temperatura (Centígrados)
η	Eficiência térmica instantânea do coletor (%)

SUMÁRIO	Páginas
1 INTRODUÇÃO	13
2 OBJETIVOS	15
3 REVISÃO DE LITERATURA.....	16
3.1 Água para consumo humano.....	16
3.1.1 Indicadores de qualidade bacteriológica da água.....	18
3.1.2 Características essenciais dos indicadores	20
3.1.3 Técnicas para determinação de coliformes	21
3.2 Descontaminação da água.....	21
3.2.1 Métodos de descontaminação	23
3.3 Tipos de sistemas de pasteurização desenvolvidos.....	28
4 MATERIAL E MÉTODOS	33
4.1 Estrutura de suporte para o reservatório de água contaminada	34
4.1.1 Composição do sistema térmico	34
4.1.1.1 Acoplamento de um trocador de calor ao sistema	35
4.1.2 Desenvolvimento do sistema de controle	39
4.1.2.1 Lógica de controle.....	40
4.2 Monitoramento do protótipo	45
4.3 Tratamento x Análise da água.....	53
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	60
5.1 Comportamento do protótipo.....	60
5.2 Desempenho do protótipo	74
5.3 Eficácia do pasteurizador solar automático	79
6 CONCLUSÕES	81
6.1 Sugestões para trabalhos futuros.....	60
REFERÊNCIAS.....	83
APÊNDICE A – Projeto estrutural e mecânico do protótipo	87
APÊNDICE B – Encapsulamento do sensor	94
APÊNDICE C – Resultados finais das análises bacteriológicas	96
ANEXO A – Acesso à água potável em diversos países e regiões.....	102
ANEXO B – Doenças e mortes decorrentes da ingestão de águas contaminadas	106

1 INTRODUÇÃO

Á água é um dos recursos naturais mais importantes e necessários ao ser humano, porém sua acessibilidade e disponibilidade no planeta são muito restritas. Em toda a Terra somente 2,5% da água é doce, das quais 68,9% encontram-se em geleiras, 30,8% no subsolo e 0,3% em lagos e rios (UNIAGUA, 2007).

A escassez de água é ainda mais acentuada em áreas rurais de países em desenvolvimento, pois nessas áreas não existem suprimento e distribuição adequados. As principais fontes de abastecimento de água para a população local são: os barreiros, açudes, escoamentos, poços rasos e nascentes. Todas são bastante susceptíveis à contaminação por microorganismos causadores de doenças, dentre os quais, os principais agentes patogênicos: protozoários, vírus e bactérias. As fontes existentes são consumidas pelas populações mesmo sendo impróprias para o consumo humano, seja sob o ponto de vista microbiológico como também químico. Consequentemente ocorrem a cada ano milhões de mortes causadas por doenças de natureza infecciosa (ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE, 2011).

A descontaminação microbiológica da água nas áreas rurais que envolvem grande extensão territorial, baixa densidade demográfica, baixo índice de eletrificação rural e acesso precário, torna-se uma tarefa muito mais complexa. Diante deste problema, o desenvolvimento de tecnologias para o tratamento microbiológico da água torna-se de vital importância para as comunidades remotas.

Existem alguns métodos de tratamento que são aplicáveis a estas regiões, como a: cloração, filtração, irradiação ultravioleta (UV) e a pasteurização. Dentre os tratamentos citados, a pasteurização é considerada a forma mais eficiente de eliminar patógenos, por atuar em temperaturas mais baixas, aniquilando 100% dos microorganismos responsáveis pela contaminação da água independentemente de fatores como a turbidez e o pH, os quais influenciam outros métodos de forma significativa.

No nordeste brasileiro, especialmente no semiárido, a fervura é a técnica mais frequentemente utilizada para purificar a água, conseguida pela queima de material vegetal proveniente da caatinga, contribuindo assim com a degradação do único bioma exclusivo dessa região. Entretanto, a fervura pode ser substituída pela pasteurização, a

qual pode ser realizada de maneira alternativa, utilizando o Sol como fonte de energia limpa, obtendo os mesmos resultados com menor gasto de energia.

Pelo que antecede, este trabalho visa minimizar a problemática da água contaminada existente em regiões do semiárido nordestino, suprimindo a demanda de pequenas comunidades com água livre de contaminação microbiológica, através de um sistema autosuficiente que se baseia na utilização de coletores solar térmicos, denominado “Pasteurizador Solar”.

2 OBJETIVOS

- Geral

Projetar, construir e determinar as condições de operação de um sistema para descontaminar microbiologicamente a água, através da tecnologia de pasteurização solar.

- Específico

Desenvolver um protótipo automático capaz de garantir a qualidade da água e otimizar o controle do tempo de tratamento.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Água para consumo humano

A água para consumo humano é um dos mais importantes veículos de enfermidades diarreicas de natureza infecciosa, o que torna primordial a avaliação de sua qualidade microbiológica (MARQUEZ *et al.*, 1994). As doenças de veiculação hídrica são causadas principalmente por micro-organismos patogênicos de origem entérica, animal ou humana, transmitidos pelas fezes de indivíduos infectados e que são ingeridos junto com a água ou alimento contaminado (GRABOW, 1996).

Conboy e Goss (2000) afirmaram que a deposição diária de resíduo orgânico animal no solo, prática muito disseminada no meio rural, aumenta o risco da contaminação das águas subterrâneas. O dejetos bovino depositado no solo também representa riscos de contaminação das fontes de água, uma vez que esses animais são reservatórios de diversos micro-organismos como *Cryptosporidium parvum* e *Giardia* spp., causadores de enfermidades humanas. Isso mostra o papel desses animais na contaminação ambiental por esses importantes patógenos de veiculação hídrica (FAYER *et al.*, 2000). A água de escoamento superficial, durante o período de chuva, é o fator que mais contribui para a mudança da qualidade microbiológica da água (GELDREICH, 1998). Em estudo realizado no México, concluiu-se que a presença de coliformes nas amostras de água dos mananciais e dos domicílios teve relação direta com a presença da chuva, devido ao arraste de excrementos humanos e animais (GONZALEZ *et al.*, 1982).

A água para consumo humano deve ser inofensiva à saúde e agradável aos sentidos, além de adequada para uso doméstico. A qualidade da água é função das influências diversas do meio e os parâmetros que classificam a sua potabilidade podem ser de ordem: física (cor; turbidez; odor; sabor), química (presença de substâncias químicas), radioativa (presença de elementos radioativos) e microbiológica (presença de micro-organismos vivos).

De acordo com a PORTARIA N.º518, definida em 25 de Março de 2004 pelo Ministério da Saúde do Brasil, toda água destinada ao consumo humano deve obedecer ao padrão de potabilidade e está sujeita à vigilância da qualidade da água. Para os fins a que se destina essa Norma, as seguintes definições foram estabelecidas:

- Água potável – água para consumo humano cujos parâmetros microbiológicos, físicos, químicos e radioativos atendam ao padrão de potabilidade e que não ofereça riscos à saúde;
- Coliformes totais (bactérias do grupo coliforme) – bacilos gram-negativos, aeróbios ou anaeróbios facultativos, não formadores de esporos, oxidase-negativos, capazes de se desenvolverem na presença de sais biliares ou agentes tensoativos que fermentam a lactose com produção de ácido, gás e aldeído a $35,0 \pm 0,5^\circ$ em 24-48 horas, e que podem apresentar atividade da enzima β -galactosidase. A maioria das bactérias do grupo coliforme pertence aos gêneros *Escherichia coli*, *Citrobacter*, *Klebsiella* e *Enterobacter*, embora vários outros gêneros e espécies pertençam ao grupo;
- Coliformes termotolerantes – subgrupo das bactérias do grupo coliformes que fermentam a lactose a $44,5 \pm 0,2^\circ\text{C}$ em 24 horas; tendo como principal representante a *Escherichia coli*, de origem exclusivamente fecal;
- *Escherichia coli* – bactéria do grupo coliforme que fermenta a lactose e manitol, com produção de ácido e gás a $44,5 \pm 0,2^\circ\text{C}$ em 24 horas, produz indol a partir do triptofano, oxidase negativa, não hidrolisa a uréia e apresenta atividade das enzimas β galactosidase e β glucoronidase, sendo considerada o mais específico indicador de contaminação fecal recente e de eventual presença de organismos patogênicos;
- Cianobactérias – micro-organismos procarióticos autotróficos, também denominados como cianofíceas (algas azuis), capazes de ocorrer em qualquer manancial superficial especialmente naqueles com elevados níveis de nutrientes (nitrogênio e fósforo), podendo produzir toxinas com efeitos adversos à saúde;

3.1.1 Indicadores de qualidade bacteriológica da água

Segundo o Art. 11, do capítulo IV, da Portaria N.º 518 (MINISTÉRIO DA SAÚDE DO BRASIL, 2004), a água potável deve estar em conformidade com o padrão bacteriológico descrito na tabela abaixo.

Tabela 1. Padrão microbiológico de potabilidade da água para consumo humano.

Água para consumo humano¹	
Parâmetro	Valor Máximo Permitido (VMP)
Coliformes totais	Ausência em 100ml
<i>Escherichia coli</i> ou coliformes termotolerantes ²	Ausência em 100ml

(¹) água para consumo humano em toda e qualquer situação, incluindo fontes individuais como poços, minas, nascentes, dentre outras;

(²) a detecção de *Escherichia coli* deve ser preferencialmente adotada.

Ainda de acordo com o Art. 11 do Ministério da Saúde do Brasil, em complementação, o grupo dos coliformes totais (CT) inclui espécies de origem não exclusivamente fecal, podendo ocorrer naturalmente no solo, na água e em plantas. Por isso, na avaliação da qualidade de águas naturais, os CT têm valor sanitário limitado e sua aplicação restringe-se praticamente à avaliação da qualidade da água tratada e distribuída. Apesar dessa denominação, o grupo dos coliformes fecais (CF) também inclui bactérias de origem não exclusivamente e, principalmente em países de clima tropical, mesmo que originalmente introduzidas na água por poluição fecal, podem se adaptar ao meio aquático. Por esse motivo, o emprego do termo “coliformes fecais” tem sido amplamente questionado, sendo que a tendência atual é de referir-se ao grupo como coliformes termotolerantes. Apesar disso, e com base no fato de que dentre cerca de 10^6 – 10^8 coliformes fecais/100ml usualmente presentes nos esgotos sanitários predomina a *Escherichia coli* (exclusivamente fecal), esses organismos ainda tem sido largamente utilizados como indicadores de poluição de águas naturais. Por outro lado, é pouco provável que os coliformes termotolerantes se desenvolvam em sistemas de distribuição, a menos que exista abundância de nutrientes.

Em se tratando de água para consumo humano em qualquer situação, a *E. coli* é reconhecida como o indicador mais preciso de contaminação fecal, sendo sua presença uma indicação da provável ocorrência de micro-organismos patogênicos. Não obstante, pelo fato de que a presença de coliformes termotolerantes, na maioria das vezes, guarda relação com a presença de *E. coli*, seu emprego ainda é aceitável quando não são disponíveis métodos de detecção rápida em programas de monitoramento sistemático.

Embora a primeira linha da tabela 1 apresente abrangência genérica, o conteúdo encontra aplicação direta e específica na avaliação de fontes individuais de abastecimento, a exemplo de poços e nascentes, sendo que nesses casos, o emprego dos coliformes totais deve ser utilizado com critério, ou evitado, devido à elevada probabilidade de resultados falso-positivos. Isso porque dentre o grupo dos coliformes totais, incluem-se, com bastante frequência, bactérias de vida livre, as quais podem não guardar qualquer associação com poluição da água por material fecal. Assim, é importante que se pretenda evitar a avaliação da qualidade da água, especialmente as de fontes individuais, com base no emprego exclusivo dos coliformes totais. Este grupo é indicativo da eficiência do tratamento, sobretudo da desinfecção, uma vez que estes organismos apresentam uma taxa de decaimento similar à dos coliformes termotolerantes e da *E. coli*. Neste caso, o teste de presença/ausência para atestar a qualidade bacteriológica da água tratada é suficiente.

Embora a detecção de coliformes totais, na ausência de *E. coli* ou coliformes termotolerantes não guarde uma relação conclusiva com contaminação de origem fecal, serve como indicador da eficiência do tratamento. Água insuficientemente tratada, por exemplo, sem a garantia de cloro residual ou com possíveis infiltrações, podem permitir o acúmulo de sedimentos, matéria orgânica e propiciar o desenvolvimento de bactérias, incluindo aquelas do grupo coliforme que não são *E. coli*. Por esse fato, na avaliação da qualidade da água distribuída, em geral, tolera-se a detecção eventual de coliformes totais, mas requer-se a ausência sistemática de *E. coli* ou coliformes termotolerantes. A exclusão da necessidade de quantificação da contaminação é respaldada pela seguinte exigência: amostras com resultados positivos para coliformes totais, independentemente da densidade porventura presente, devem ser analisadas para *Escherichia coli* ou coliformes termotolerantes, devendo, nesse caso, ser efetuada a verificação e confirmação dos resultados positivos, conforme item segundo do artigo 11 da Portaria Nº 518, que estabelece o padrão de bacteriológico da água para consumo humano.

3.1.2 Características essenciais dos indicadores

Segundo as afirmações de Pelczar (1996), para determinar a potabilidade da água em uma análise microbiológica laboratorial, não se faz necessário isolar e identificar os micro-organismos patogênicos, pelas seguintes razões:

- Os agentes patogênicos têm acesso esporádico ao ambiente hídrico e não demonstram sobrevivência durante um longo período de tempo; portanto, poderiam ser perdidos em uma amostra submetida à análise laboratorial;
- Estando em pequeno número, os micro-organismos patogênicos podem não ser detectados pelos procedimentos laboratoriais;
- É necessário um período de pelo menos 24 horas ou mais, para a obtenção de resultados laboratoriais para micro-organismos patogênicos; uma vez detectada a presença desses micro-organismos durante esse período, muitas pessoas teriam consumido a água e estariam expostas aos mesmos antes de uma ação corretiva para a situação.

Devido a estas razões, métodos baseados na detecção de micro-organismos indicadores cuja presença na água indica a possibilidade da presença de patógenos, têm sido desenvolvidos. Dessa forma, o termo “micro-organismos indicadores” refere-se a um tipo de organismo cuja presença na água evidencia a poluição fecal, de origem humana ou de outros animais de sangue quente.

Ainda segundo Pelczar (1996), as características importantes de um organismo indicador são:

- Estar presente em águas poluídas e ausente em águas não-poluídas;
- Estar presente na água quando os micro-organismos patogênicos estão presentes;
- O número de micro-organismos indicadores deve estar relacionado com o índice de poluição;
- Sobreviver melhor e por mais tempo na água do que os micro-organismos patogênicos;

- Apresentar propriedades uniformes e estáveis;
- Geralmente ser inofensivo ao homem e a outros animais;
- Estar presente em maior número do que os patogênicos;
- Ser facilmente evidenciado por técnicas laboratoriais padronizadas.

3.1.3 Técnicas para determinação de coliformes

As condições ambientais são muito diversas e podem divergir muito das condições entéricas. Isso pode ocasionar um estresse metabólico e levar a um resultado falso-positivo de bactérias. Para evitar o transtorno devem ser-lhes oferecidas nas análises laboratoriais, as mais favoráveis condições de crescimento possíveis. Por essa razão, as amostras são inicialmente incubadas em meios de cultura pouco seletivos, o que vem a constituir os ensaios presuntivos. Entretanto, os ensaios presuntivos podem incluir resultados falso-positivos e, por isso, os testes devem ser confirmados em meios de cultura mais seletivos, constituindo os ensaios confirmativos.

As análises podem também ser classificadas em qualitativas (presença/ausência – P/A) e quantitativas, quando se pretende, respectivamente, detectar a mera presença de um organismo na água ou determinar sua densidade em número de organismos em um dado volume (usualmente 100 ml). Os métodos quantitativos mais utilizados são: tubos múltiplos ou método da diluição, cartelas utilizadas em métodos cromogênicos e da técnica da membrana filtrante (MF).

A escolha das técnicas de análise deve ser o resultado da avaliação da sensibilidade e da especificidade requeridas para o tipo de amostra (água bruta, tratada ou distribuída) e de possibilidades técnico-financeiras.

3.2 Descontaminação da água

Os processos de descontaminação têm como objetivo a destruição ou inativação de organismos patogênicos, capazes de produzir doenças, ou de outros organismos indesejáveis. Esses organismos podem sobreviver na água por várias semanas, em temperaturas próximas a 21°C e, em alguns casos, por vários meses, em baixas temperaturas (MEYER *et al.*, 1994). Segundo Rossin (1987), a sobrevivência desses

organismos na água depende, não só da temperatura, mas também de outros fatores ecológicos, fisiológicos e morfológicos, tais como: pH, turbidez, oxigênio, nutrientes, competição com outros organismos, resistência a substâncias tóxicas, habilidade na formação de esporos. A descontaminação não implica necessariamente na destruição completa de todas as formas vivas, embora muitas vezes o processo de desinfecção, seja levado até o ponto de esterilização.

Segundo Laubush (1971), os fatores que influem na descontaminação e, portanto, no tipo de tratamento a ser empregado podem ser resumidos em:

- Espécie e concentração do organismo a ser destruído;
- Espécie e concentração do desinfetante;
- Tempo de contato/exposição;
- Características químicas e físicas da água;
- Grau de dispersão do desinfetante na água.

A resistência de algumas espécies de micro-organismos a métodos de descontaminação específicos varia consideravelmente. Bactérias não-esporuladas são menos resistentes que as formadoras de esporos; formas encistadas e vírus podem ser bastante resistentes (ROSSIN, 1987).

Outro fator de grande importância é a concentração de micro-organismos. Esses organismos aglomerados, além de possibilitarem a criação de uma barreira para a penetração do desinfetante, implicam em uma maior demanda de desinfetante devido a sua densidade. A morte desses organismos pela ação de um desinfetante, fixando-se os outros fatores, é proporcional à concentração do desinfetante e ao tempo de reação. Desse modo, podem-se utilizar altas concentrações e pouco tempo ou baixas concentrações e um tempo elevado.

Segundo Fair *et al.* e Rossin (1987), as características necessárias para um bom desinfetante podem ser resumidas em:

- Capacidade de destruir em um tempo razoável os organismos patogênicos a serem eliminados na quantidade em que se apresentam e nas condições encontradas na água;

- O desinfetante não deve ser tóxico para o homem e para os animais domésticos e, nas dosagens usuais, não deve causar à água cheiro e gosto que prejudiquem o seu consumo;
- Seu custo de utilização deve ser razoável, além de apresentar facilidade e segurança no transporte, armazenamento, manuseio e aplicação;
- A concentração na água tratada deve ser fácil e rapidamente determinável;
- Deve produzir concentrações residuais resistentes na água, de maneira a constituir uma barreira sanitária contra eventual recontaminação antes do uso.

As características da água a ser tratada têm influência marcante no processo de desinfecção. Quando o agente desinfetante é um oxidante, a presença de material orgânico e outros compostos oxidáveis irão consumir parte da quantidade de desinfetante necessária para destruir os organismos (DEGRÉMONT, 1979). Alguns desinfetantes, quando em contato com a água, sofrem hidrólise e se dissociam, formando compostos com ação germicida diferente daquela da substância inicial. A temperatura do sistema influencia o caráter químico da água, já que alguns compostos podem se apresentar sob formas diferentes, conforme a temperatura do meio. Em geral, temperaturas elevadas favorecem a ação desinfetante.

Os desinfetantes químicos necessitam ser uniformemente dispersos na água, para garantir uma concentração uniforme; portanto, a agitação favorece a descontaminação. A ação dos desinfetantes na destruição ou inativação dos micro-organismos não é instantânea. Em geral, o processo se desenvolve de maneira gradativa, ocorrendo etapas físicas, químicas e bioquímicas.

3.2.1 Métodos de descontaminação

A descontaminação da água pode ser obtida pela utilização de vários processos específicos de descontaminação. Os processos classificados por Laubusch (1971) podem ser através de:

- íons metálicos – cobre e prata;
- compostos alcalinos – lítio; sódio; potássio;

- compostos tensoativos – sais de amônia quaternários;
- oxidantes halogênicos – ozônio, cloro e outros compostos orgânicos/inorgânicos;
- tratamento físico – calor, radiação ultravioleta e outros agentes físicos.

A desinfecção por cloração (oxidante halogênico) é a forma mais comum de tratamento da água. Seu custo é considerado baixo, é amplamente disponível e de fácil aplicação sob várias formas. As formas mais utilizadas são: pó e líquido, sendo o pó mais utilizado pelos países em desenvolvimento devido a sua segurança e facilidade no transporte. A cloração tem um atributo de enorme valia que é a capacidade de desinfecção residual quando usada com pequeno excesso de dose. Entretanto, as desvantagens da utilização do cloro residem na alteração do sabor da água deixando-a desagradável e pesquisas recentes também relatam que o cloro, ao reagir com componentes orgânicos, forma substâncias cancerígenas, os trihalometanos (ELLIS, 1991; MEYER, 1994).

Outro método utilizado com o propósito de tornar a água potável é a filtração. A subclasse filtração lenta de areia é um método bastante popular nas Organizações Não Governamentais (ONGs) espalhadas pelo planeta (EPA¹, 1991). A subclasse filtração caseira tem sido usada de várias maneiras nos países em desenvolvimento. O funcionamento dos filtros é bastante simples, o que reflete na vantagem de não necessitar de trabalhadores treinados para a sua construção ou utilização. Os filtros cerâmicos caseiros são dimensionados em diversos tamanhos e podem tratar de um a cem litros de água por dia. Eles são produzidos por pessoas do local com habilidades artesãs, tornando o produto de baixo custo. Essas pessoas fazem parte de uma cultura tradicional, como as do Sudão, onde os filtros cerâmicos são comuns (AZRAG, 1996). Sabe-se que a eficiência dos filtros é determinada por características inerentes, como por exemplo, o tamanho dos poros e forças de absorção. Os filtros quando de baixa qualidade removem apenas 90% das bactérias, significando que milhões de bactérias podem escapar e tornar a água imprópria para o consumo. Outra preocupação é a necessidade de limpeza regular e troca periódica dos filtros. No caso da filtração lenta de areia, as propriedades de filtração são dependentes de um filme biológico que efetivamente remove mais de 99% de todos os patógenos (SCHULZ, 1984). Este

¹ EPA – Manual de orientação para o cumprimento dos requisitos de filtração e desinfecção de sistemas públicos de água, usando fontes de água superficiais.

método consegue melhorar o sabor da água através da remoção de sólidos dissolvidos, mas por outro lado exige manutenção semanal, além de ser um processo lento de custo elevado e com necessidade de áreas relativamente grandes. Outra desvantagem é a necessidade de pré-tratamento quando a turbidez da água for alta.

A radiação UV é uma classe de tratamento da água que promove o efeito biocida. O processo desativa as seqüências de DNA envolvidas no processo de reprodução das bactérias e vírus. No espectro da radiação UV, a UV-C é considerada a mais germicida por ser a mais efetiva do que outros espectros UV na eliminação dos patógenos. A radiação ultravioleta de procedência natural da luz do Sol tem sido estudada por Acra *et al.* (1991) e Wegelin *et al.* (1994) para desinfecção da água, embora o fluxo na superfície terrestre seja constituído somente do espectro UV-B e UV-A. Segundo Ellis (1991), lâmpadas ultravioletas têm sido amplamente utilizadas na Europa para desinfetar água, esterilizar equipamentos cirúrgicos e reduzir a virulência no ar ventilado ou sistemas de ar condicionado (SCHEIR, 1996). Para que se tenha um bom resultado de desinfecção por UV, é necessário que os patógenos recebam a dosagem certa de exposição à irradiância em função do tempo. Vírus e bactérias necessitam de doses de 40 a 80 W.s/m², cistos de protozoários requerem de 1200 a 2000 W.s/m². Outro fator determinante na eficiência do tratamento com UV é a turbidez da água, que é a medida da quantidade de agregado de partículas sólidas em suspensão. A unidade de medida da turbidez é o NTU, sendo considerada boa água aquela com turbidez menor que 5 NTU. As partículas em suspensão com constituição variada podem refletir e absorver os raios ultravioletas acarretando na redução drástica da eficiência do tratamento (ELLIS, 1991; WEGELIN *et al.*, 1994).

Alguns micro-organismos patogênicos possuem a capacidade de reparação de danos causados ao DNA pelos raios ultravioletas. Gadgil e Shown (1997) mostraram que para evitar tais regenerações patogênicas é importante realizar o tratamento por períodos longos, aproximadamente de 36 horas. O tratamento de água com radiação ultravioleta, em princípio é atrativo devido a pouca manutenção e não precisar de nenhum combustível, entretanto, sua aplicabilidade e economicidade ficam comprometidas se a água a ser tratada for contaminada por cistos/vermes ou se tiver um alto índice de turbidez.

De forma geral, a pasteurização consiste em elevar a temperatura do flúido a um valor programado, e mantê-la neste nível durante certo lapso de tempo. Este processo

assegura que bactérias, vírus e protozoários sejam aniquilados pelo calor independentemente da turbidez e do pH, levando em consideração que o tempo de pasteurização que decresce exponencialmente com o aumento da temperatura. Segundo Burch e Thomas (1998), a pasteurização solar é uma das alternativas mais confiáveis e promissoras para solucionar os problemas da água contaminada em meios rurais. Essa técnica utiliza a tecnologia de aquecimento por coletores solares térmicos que substituem seguramente a queima de madeira e demais combustíveis fósseis. Isto por se tratar de um método físico que não gera subprodutos, não degrada o meio ambiente e ainda consegue aniquilar patógenos de veiculação hídrica com a aplicação de calor. A pasteurização solar é capaz de tratar a água em temperaturas mais baixas que a temperatura de ebulição, evitando o gasto de energia desnecessária que ocorre quando utilizam a fervura de forma indiscriminada. A tabela 2 mostra uma série de microorganismos que foram estudados e submetidos à pasteurização por diversos pesquisadores.

Tabela 2. Temperatura e tempo de pasteurização para alguns microorganismos patogênicos.

<i>Patógeno; Gênero; Espécie</i>	<i>Organismos</i>	<i>Temperatura de Pasteurização</i>	<i>Tempo requerido</i>	<i>Fonte</i>
<i>Escherichia coli</i>	Bactéria	60°C	45 minutos	Padhye & Doyle
<i>Salmonella sp.</i>	Bactéria	60°C	1 hora	Feachem
<i>Shigella sp.</i>	Bactéria	55°C	1 hora	Feachem
<i>Giardia lamblia</i>	Protozoário	60°C	2-3 minutos	Univ of Utah
<i>Entamoeba histolytica</i>	Protozoário	60°C	1 minuto	Feachem
Rotavírus	Vírus	63°C	30 minutos	G.N. Woode
Poliovírus 1 (enterovírus)	Vírus	60°C	5 minutos	Wiley (1969)
<i>Ascaris lumbricoides</i>	Helmintos	55°C	1 hora	Feachem

Conforme a tabela verifica-se que a pasteurização foi utilizada por pesquisadores para eliminar patógenos importantes. Padhye e Doyle (1992) constataram susceptibilidade de *Escherichia coli* à 60°C durante 45 minutos de exposição. A escola de medicina “University of Utah” mostrou resultados de pasteurização com o protozoário *Giardia lamblia* na temperatura de 60°C por 3 minutos. Harp *et al.* (1996) comprovaram que foi possível desativar o protozoário *Cryptosporidium parvum*, causador de doenças no intestino e vias respiratórias, responsável por grande número de mortes humanas, aquecendo a água por 16 segundos à temperatura de 71,1°C.

Feachem, R. G. *et al.* (1982) propuseram zonas de temperatura com tempo de exposição (Figura 1) que garantem a inativação de microorganismos patogênicos,

baseadas em rigorosos testes conduzidos em laboratórios. Os testes foram realizados em estufas que permitem o controle do tempo e da temperatura. Mais tarde, relataram que os vírus são os microrganismos mais difíceis de eliminar, uma vez que seus limites de tempo e temperatura são os mais altos, exemplificando processos típicos de 75°C por 10 minutos. Parry e Mortimer (1984) mostraram que o agente pode ser inativado quando o agente infeccioso é submetido a uma temperatura de 71,1°C durante 30 segundos.

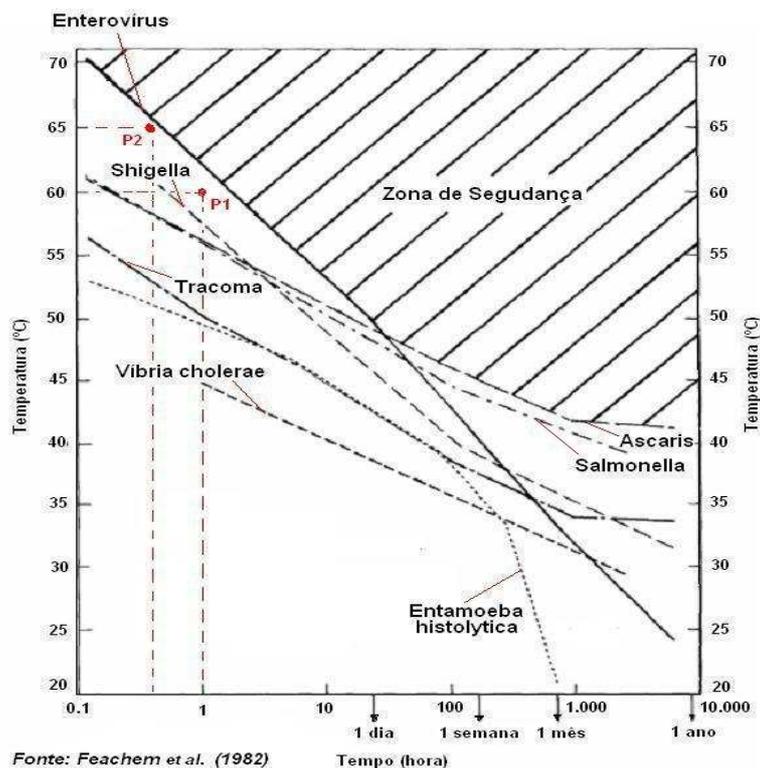


Figura 1. Curva de inativação de micro-organismos patogênicos por pasteurização.

A Figura 1 mostra a zona de letalidade ou zona de segurança que garante a eliminação de microrganismos patogênicos pelo método de pasteurização. Observa-se que a exposição a uma temperatura de 60°C, como indicada por P₁, durante uma hora, aniquila de forma eficaz os microrganismos apontados no gráfico, com exceção dos vírus entéricos. À 65°C, como indicado por P₂, é possível desativar todos esses patógenos em um período menor que uma hora. O aumento da temperatura faz com que o tempo de inativação desses microrganismos caia exponencialmente. Com temperaturas ainda mais elevadas e próximas de 75°C, é possível conseguir a aniquilação de enterovírus com menos de um minuto de exposição.

Em 2002, Robert Metcalf, em Meatu, na Tanzânia, realizou testes de aquecimento de água para a inativação do *E. coli*. Um dos testes utilizou o “Cookit”, (um fogão solar) que consiste de um arranjo de papelão em forma de concentrador, forrado com folha de alumínio e, no centro, uma vasilha escura envolvida por um saco plástico. Este mecanismo simples converte a luz solar em calor, podendo cozinhar comida e ou pasteurizar água. Com este método foram aquecidos em um recipiente preto de metal, dois litros de água de uma fonte contaminada. Quando a temperatura atingiu 60 °C, em duas horas, constatou-se a inatividade total de *E. coli*.

3.3 Tipos de sistemas de pasteurização solar desenvolvidos

Os sistemas de pasteurização solar podem ser basicamente de dois tipos: os que operam em bateladas e os que funcionam por fluxo contínuo. O desempenho desses sistemas normalmente é expresso em $l/m^2.h$ ou $l/m^2.dia$. Devido à dificuldade de determinar a produção diária a partir da produção horária, alguns cientistas reportam a produtividade em função da energia solar em MJ ou kWh.

Duff, W. S. e Hodgson, D. (2004) construíram e testaram três protótipos passivos que não requerem energia elétrica para seu funcionamento, na Colorado State University. O primeiro experimento conduzido utiliza uma válvula termostática para controlar o fluxo, como mostra o esquema da Figura 2.

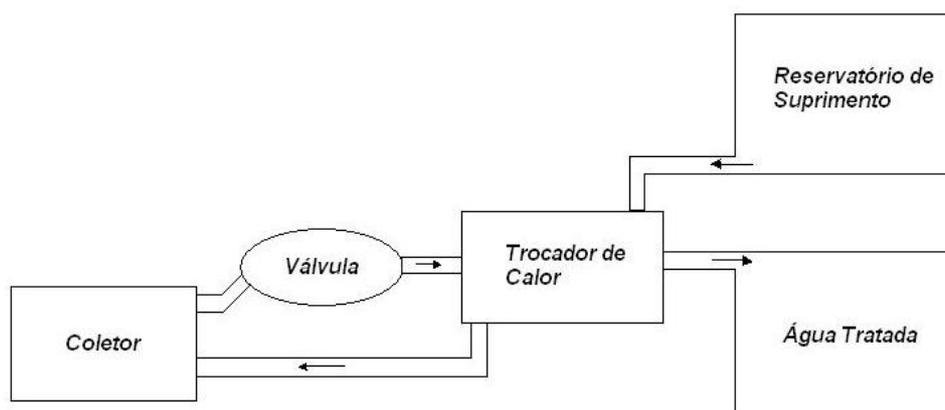


Figura 2. Esquema de um típico sistema de pasteurização solar.

Fonte: Duff e Hodgson (2004) / Solar Energy 79 (2005) 25-32

Nesse sistema, a água flui de um reservatório superior através de um recuperador de calor onde é pré-aquecida pela água quente tratada voltando do coletor. A água então flui por um coletor solar de tubo evacuado onde alcança sua temperatura máxima de

cerca de 85°C. Se estiver quente o bastante, a água passa pela válvula de controle e então flui de volta pelo recuperador de calor e para o reservatório de água tratada. No começo do dia, a válvula é fechada. Conforme a luz solar vai atingindo o coletor, a água no interior é aquecida. A água ao redor da válvula é aquecida através de correntes de condução e convecção pela água dentro do coletor. Quando a água ao redor da válvula atinge a temperatura limiar, a água no coletor está em uma temperatura muito mais alta. Quando a válvula abre pela primeira vez, água quente de dentro do coletor começa a passar através da válvula. Isso leva a válvula a abrir-se ainda mais e o fluxo aumenta rapidamente. Conforme a água pré-aquecida (mais fria) pelo recuperador de calor entra no coletor, a temperatura na válvula começa a cair e conseqüentemente a vazão também diminui, até que a válvula fechará completamente e o ciclo volta a se repetir. Esse sistema mostra alguns problemas decorrentes do longo tempo de inércia térmica da válvula e da imprecisão intrínseca na temperatura de abertura ou fechamento. Nele não é possível assegurar a não-mistura de água tratada com a contaminada e nem o tempo de tratamento.

Um segundo experimento foi construído e testado por causa dessas dificuldades. Esse sistema é movido por diferença de densidade da água com a temperatura e pode ser visualizado na Figura 3.

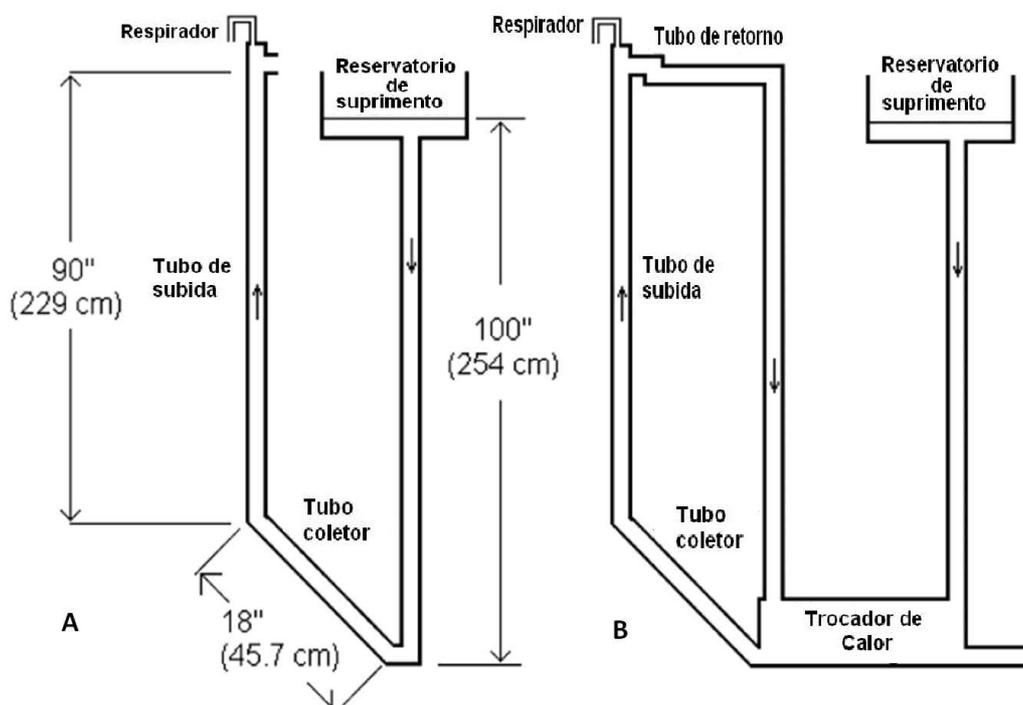


Figura 3. Esquema de um sistema de pasteurização solar simples movido a densidade.

Fonte: Duff e Hodgson (2004) / Solar Energy 79 (2005) 25-32

As setas indicam a direção do fluxo. Água do reservatório é alimentada ao tubo coletor, onde cinco tubos evacuados inclinados a aquecem (Figura 3-A). Se a água no tubo de subida estiver quente o suficiente, ela fluirá acima da cota de tratamento. Um trocador de calor pode ser adicionado ao sistema para pré-aquecer a água antes que ela entre no tubo coletor o que aumentará a produção do sistema (Figura 3-B).

Nesse sistema, o nível da água contaminada no reservatório é mantido a uma altura de aproximadamente 254 cm (a altura pode ser ajustada por um parafuso mecânico). A água então flui por um cano (tubo coletor) que é acoplado a cinco tubos coletores solares, com uma área total de 0,45m² de absorção. A água aquecida deve então fluir para fora de um cano (tubo elevador) que está a uma altura de 260,9 cm. A água de suprimento pode estar mais fria que 20°C, mas mesmo se o suprimento tiver a densidade média da água de 5°C (1000 kg/m³) a água não transbordará até que tenha a densidade média de água a 78°C (973 kg/m³). O tubo coletor foi construído em um ângulo de 45° para promover a convecção natural no tubo elevador. No começo do dia a água no tubo coletor começa a esquentar, mas a água no tubo elevador continua fria o bastante de modo que não haja fluxo. Eventualmente, para dias com alto nível de irradiação solar a água no tubo coletor começa a ferver e nesse caso pode ocorrer a mistura das águas tratada e contaminada. O terceiro protótipo foi desenvolvido com o intuito de eliminar a fervura e permitir o controle da temperatura. Esse sistema incorpora um “loop” de convecção interno que assegura que a temperatura da água no tubo elevador esteja sempre próxima da temperatura da água no tubo coletor. O sistema é mostrado na Figura 4. Cinco canos tubos evacuados com uma área de absorção total de 0,45m² estão mecanicamente ligados ao tubo coletor. Conforme a água no tubo coletor é aquecida, o tubo de convecção permite que a água circule pelo tubo elevador. O tubo em “U” assegura que a circulação está na direção adequada (sentido horário para Figura 4). A circulação permite que a água no tubo elevador seja quase isotérmica.

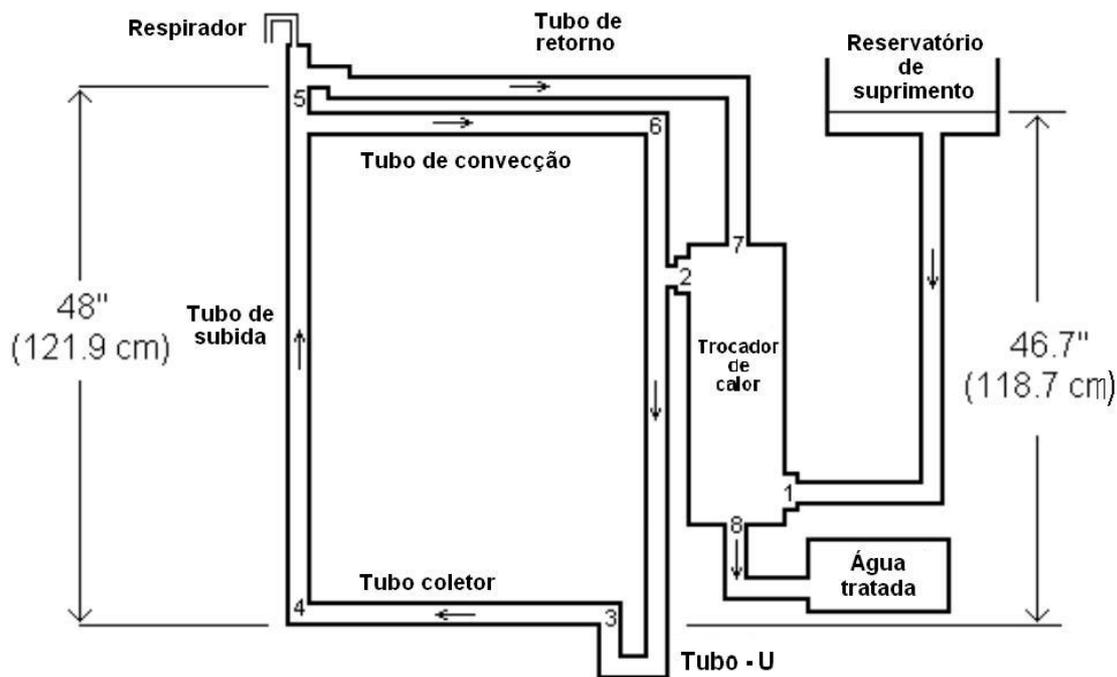


Figura 4. Esquema de um sistema de pasteurização solar movido à densidade com “loop” de convecção interno.

Fonte: Duff e Hodgson (2004) / Solar Energy 79 (2005) 25-32

Os números indicam a localização dos termopares. As setas indicam a direção do fluxo. A água flui do reservatório até o lado do casco do recuperador de calor. Conforme a água sai do trocador de calor e entra no tubo de convecção onde é misturada com a água do tubo de subida, a água é aquecida no tubo coletor. Se a água no tubo coletor for quente o bastante, parte dela fluirá para o tubo de retorno. A água do tubo elevador que não fluir para o tubo de retorno circula novamente pelo tubo de convecção (“loop”). Após fluir pelo tubo de retorno, a água alimenta o trocador onde é usada para pré-aquecer a água não tratada. Finalmente, a água entra no reservatório de água tratada.

Testes foram conduzidos com esse sistema em Fort Collins, Colorado. O sistema atingiu uma taxa de vazão máxima de 19,3 kg/h enquanto o fluxo solar incidente era 955 W/m² (todos os valores de radiação solar são medidos normais à superfície absorvente). Dois fatores afetam a taxa de vazão do sistema: o fluxo solar e a temperatura da água após ser pré-aquecida pelo recuperador de calor. Como a massa térmica do mesmo é considerável, podem ser necessárias duas horas de boas condições de irradiação solar para que a água de saída do trocador de calor alcance sua temperatura estável de 10-15°C abaixo da temperatura de pasteurização.

No dia 22 de março de 2002, com irradiância de $13,5 \text{ MJ/m}^2$, o sistema produziu 37 litros de água tratada e no dia 27 de março de 2002, com irradiância de $24,7 \text{ MJ/m}^2$, produziu 86 litros. Porém, mesmo com uma produtividade relativamente boa, o sistema apresenta falhas graves que podem inviabilizar sua utilização para os fins de tratamento, pois não demonstram dados de inativação microbiológica. Uma das falhas diz respeito à configuração física do sistema que só permite o tratamento em uma única temperatura, devido aos alinhamentos precisos necessários das colunas de água. Outro problema observado é a necessidade de reposição constante de água no reservatório de suprimento, pois sem essa reposição, após o tratamento de algumas frações de água, o nível do reservatório diminui e conseqüentemente o nível da coluna de água no tubo de subida também. Isso configura um momento em que não haverá circulação da água pelo tubo de convecção, não havendo expansão suficiente para atingir a cota de tratamento e o tubo de retorno. Também se observa que o sistema não garante o isolamento entre a água que está em tratamento e a água contaminada, porque existe comunicação entre os fluidos constantemente na tubulação para que haja a convecção e o fluxo contínuo.

Levando em consideração os sistemas de pasteurização solar explanados e os problemas que foram encontrados durante a experimentação de cada um deles, este trabalho propõe construir um pasteurizador solar que funciona por bateladas, utilizando um controle automatizado para o confinamento e tratamento da água.

4 MATERIAL E MÉTODOS

O protótipo foi idealizado com base nos seguintes requisitos:

- a) Ausência de produção de precursores químicos danosos ao meio ambiente ou à saúde humana

O sistema de descontaminação utiliza um método físico e por isso não produz subprodutos químicos danosos ao ecossistema.

- b) Utilização da fonte energética local

O sistema de controle opera com energia fotovoltaica podendo ser implantado em qualquer região do semiárido nordestino. Um pequeno módulo fotovoltaico é suficiente para alimentar o sistema, uma vez que, o maior consumo é feito por duas válvulas solenóides, as quais passam a maior parte do tempo desacionadas.

- c) Não utilização da vegetação como insumo energético

O coletor solar substitui a utilização abusiva dos recursos naturais da caatinga, para a queima e produção de calor.

- d) Sistema simples, robusto e de baixo custo

O protótipo possui uma estrutura simples, sendo composto por componentes resistentes e de fácil acessibilidade. Os sistemas que o compõem são formados por peças hidráulicas, tubulações, madeiras, reservatório e dispositivos eletroeletrônicos comuns.

e) Sistema de abastecimento de água potável para comunidades remotas

As aplicações adequadas para o sistema são em: residências, vilarejos, clínicas de saúde rural, pequenas escolas, pequenos restaurantes de estradas e vendedores de água. Como o sistema é bastante automatizado no que concerne ao controle das temperaturas, liberação e entrada da água, vai necessitar de um operador com treinamento básico e simples.

f) Segregação completa das águas tratada e contaminada

O sistema assegura completamente a segregação entre a água contaminada e a água em tratamento.

Este projeto propõe a construção e testes de um pasteurizador solar automático, adaptado ao semiárido do Nordeste. O desenvolvimento experimental do projeto foi conduzido na área de testes do grupo de Fontes Alternativas de Energia (FAE), localizada no campus da Universidade Federal de Pernambuco, em Recife (latitude 08°04'03'' S e longitude 34°55'00'' O). Essas coordenadas se referem à cidade de Recife cuja irradiância média diária anual, é de 5,4 kWh/m² (Atlas Solarimétrico Brasileiro, 2000).

4.1 Estrutura de suporte para o reservatório de água contaminada

A estrutura de suporte se constitui em uma plataforma de madeira que suporta um reservatório de água a ser tratada. A plataforma necessita ter altura suficiente para que seja formada uma coluna de água bem acima da disposição dos componentes que compõem o sistema. Assim foi intencionalmente construída com a uma altura de 236 cm, propiciando a circulação de água pela ação da gravidade sobre a coluna d'água. A Figura 5 mostra a estrutura devidamente montada em campo.

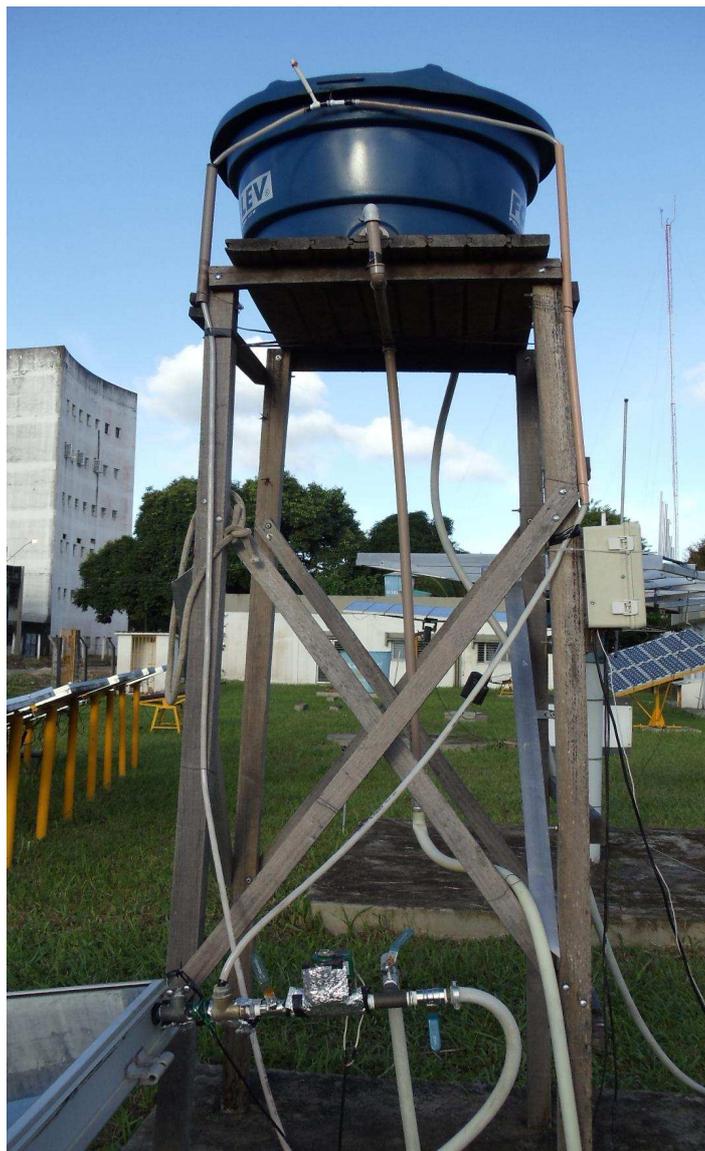


Figura 5. Plataforma de suporte para o reservatório da água contaminada.

4.1.1 Composição do sistema térmico

O sistema térmico é o sistema responsável pelo tratamento da água contaminada através do confinamento do fluido em lotes. O sistema é composto por um coletor solar térmico, componentes hidráulicos, respirador e um reservatório para água contaminada. O coletor solar térmico utilizado é do tipo plano (Figura 6) com capacidade volumétrica para dois litros de água. A parte exterior é feita de alumínio, possui uma cobertura simples de vidro transparente com 2 m² de área de abertura. Esse equipamento é o responsável por coletar a radiação solar e transferi-la para a água no interior das tubulações, em forma de calor. Os componentes hidráulicos que interligam o coletor às

demais partes do sistema são tubulações, válvulas manuais e conexões com diâmetro igual a 0,5 polegadas.



Figura 6. Coletor solar plano utilizado no protótipo.

Na Figura 7 observa-se a curva característica do coletor solar plano, onde é possível se verificar os parâmetros de eficiência óptica (75%) e térmica apresentados que são determinados pela cobertura transparente, número de coberturas, tipo de placa absorvedora e do material da placa.

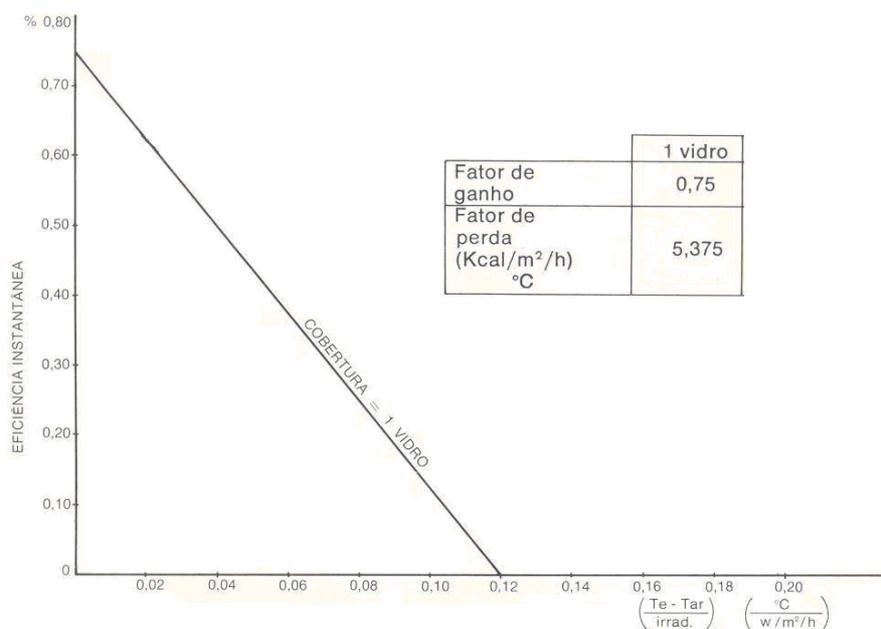


Figura 7. Curva característica e parâmetros do coletor solar utilizado no protótipo.

Fonte: Luwa PLANOSOL®

A curva característica do coletor plano mostra que a operação em altas temperaturas diminui a eficiência do mesmo. O gráfico também mostra que a temperatura de estagnação é atingida quando a eficiência instantânea é zero, considerando 1000 W/m^2 de irradiância coletada.

O reservatório de água contaminada é uma caixa d'água feita de polietileno (Figura 8), disposto sobre a plataforma. Foi posicionada acima de todos os dispositivos, a uma altura de 236 cm acima do solo, com o objetivo de garantir uma pressão suficiente para fazer circular o fluido por todo o sistema térmico, desde a caixa d'água até o reservatório de água tratada. Na sequência, o coletor solar foi colocado 120 cm abaixo da caixa d'água, o trocador de calor 40 cm abaixo da altura de saída do coletor e o reservatório de água tratada 12 cm abaixo do trocador.

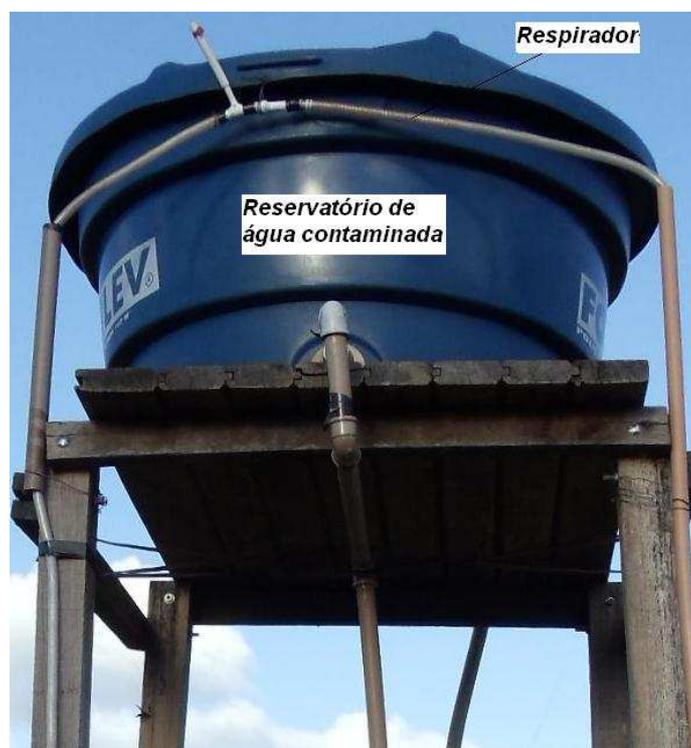


Figura 8. Reservatório e respirador utilizados no protótipo.

O respirador é feito de uma mangueira de plástico reforçado com 3 cm de diâmetro e aproximadamente 4 metros de comprimento. Foi interligado com uma extremidade conectada entre o sensor e a válvula de entrada, alcançando o nível máximo do reservatório, e a outra extremidade ao reservatório de água tratada. A disposição ideal dos componentes pode ser vista nas Figuras 9 e 10 com todas as cotas

em metro. O posicionamento (as distâncias) ou alinhamento horizontal dos componentes não tem influência significativa no funcionamento do sistema, sendo as alturas as medidas mais importantes.

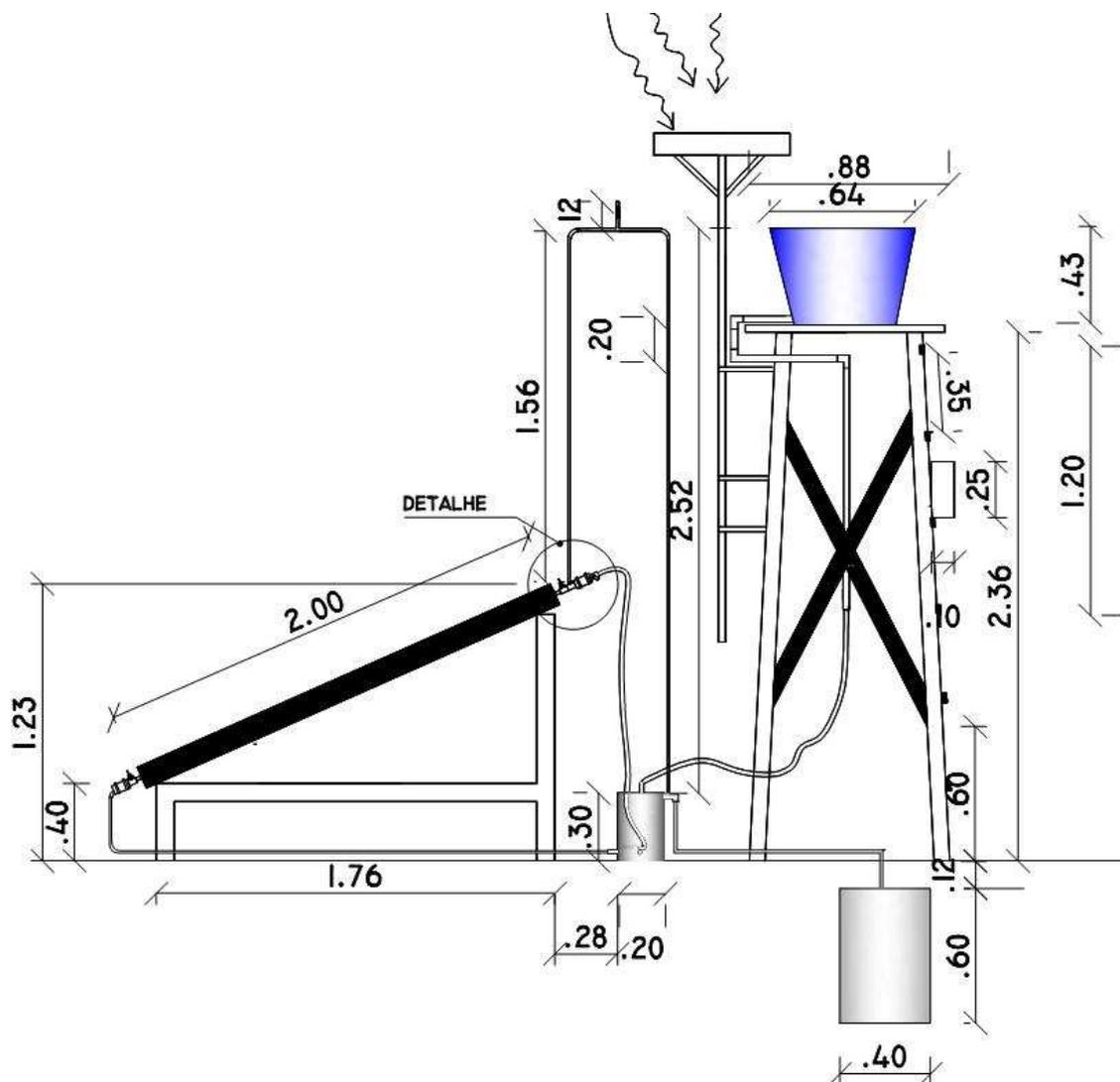


Figura 9. Vista lateral do protótipo com cotas em unidade de metro.

O posicionamento do coletor deve levar em consideração não só o favorecimento da coleta de irradiância para a latitude local, como também deve considerar os tempos de carga e descarga do volume tratado. A inclinação (β) pode influenciar a vazão de saída, permitindo assim estabelecer com precisão os tempos de carga e descarga do coletor.

Ainda na Figura 9, o “detalhe” da entrada do coletor mostra o arranjo hidráulico utilizado para a saída de ar do sistema térmico e o controle de vazão de entrada, podendo ser visto no APÊNDICE - A.

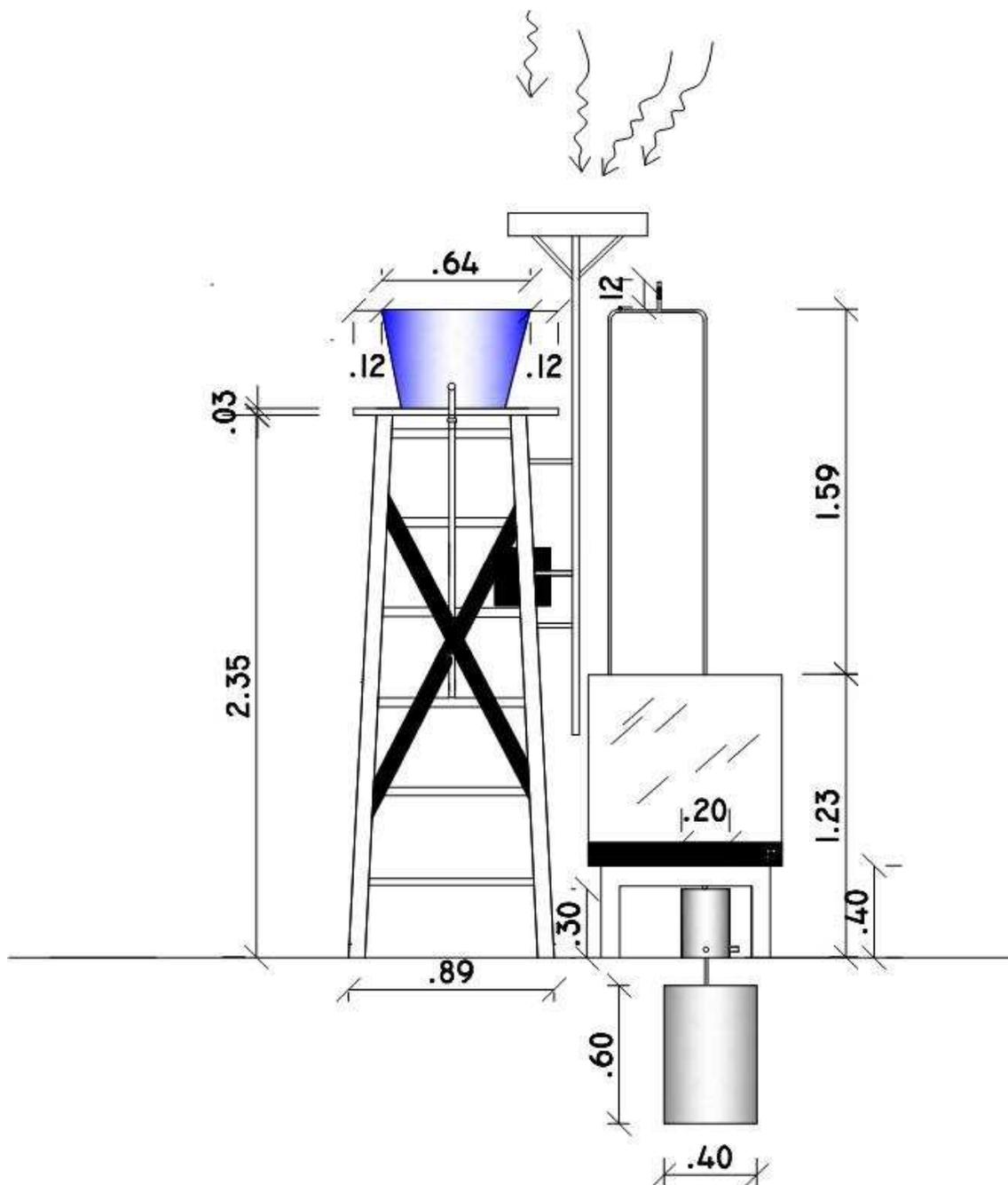


Figura 10. Vista frontal do protótipo com cotas em unidade de metro.

4.1.1.1 Acoplamento de um recuperador de calor ao sistema

Um recuperador de calor foi artesanalmente construído e acoplado ao sistema térmico, como pode ser visto na Figura 11. O dispositivo corresponde a um recipiente cilíndrico de metal, com 30 cm de altura e 20 cm de diâmetro e capacidade volumétrica de 2,2 litros. Internamente, as paredes do cilindro possuem um isolamento térmico feito com lã de rocha e passando pelo centro do mesmo, uma serpentina de cobre espiralada

que interliga a entrada de água fria à saída de água pré-aquecida. O pré-aquecimento ocorre quando a água fria que sai do reservatório circula pela serpentina mergulhada no volume de água quente proveniente do coletor. As ligações de entrada e saída do recuperador de calor podem ser vista na figura abaixo.

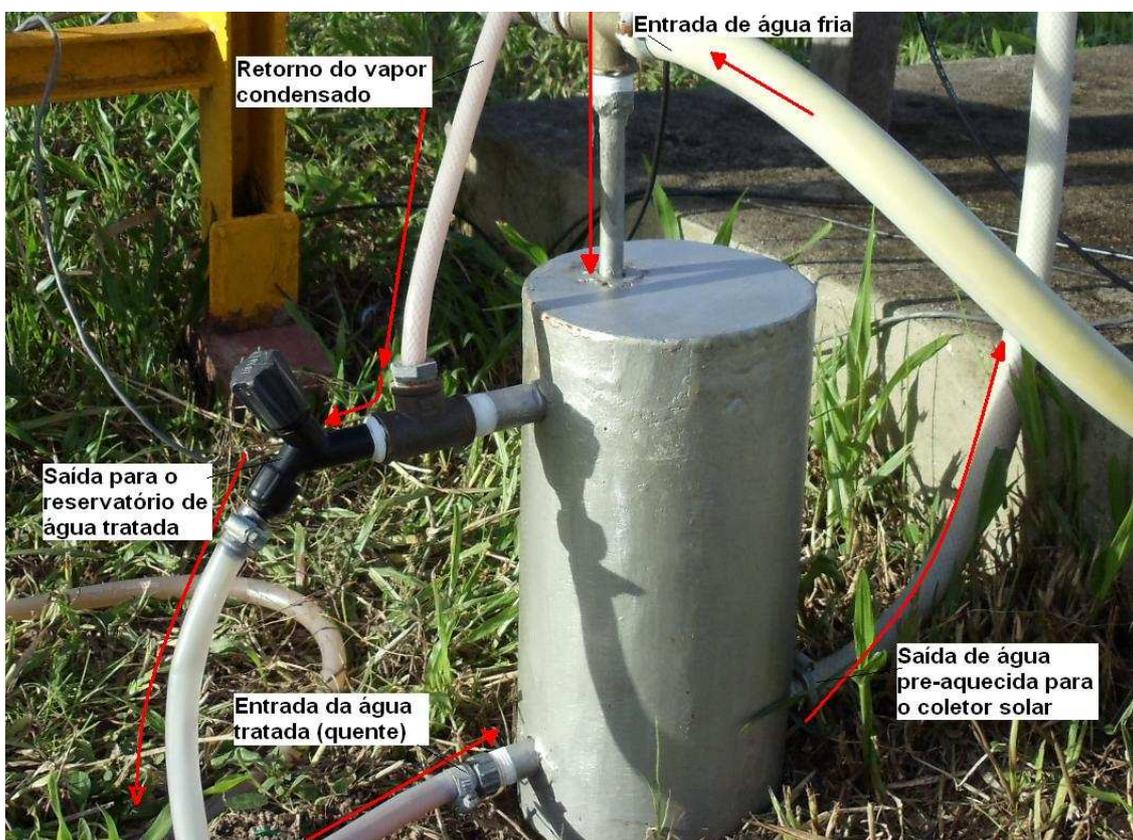


Figura 11. Recuperador de calor construído e utilizado no protótipo.

4.1.2 Desenvolvimento do sistema de controle

O sistema de controle é um circuito eletrônico microcontrolado de baixo custo, capaz de controlar automaticamente dispositivos de saída a partir de sinais enviados por dispositivos de entrada. Como pode ser observado no diagrama em blocos da Figura 12, o sistema de controle é constituído por: sensores de temperatura, válvulas solenóides e um circuito eletrônico que são supridos eletricamente por um pequeno sistema fotovoltaico.

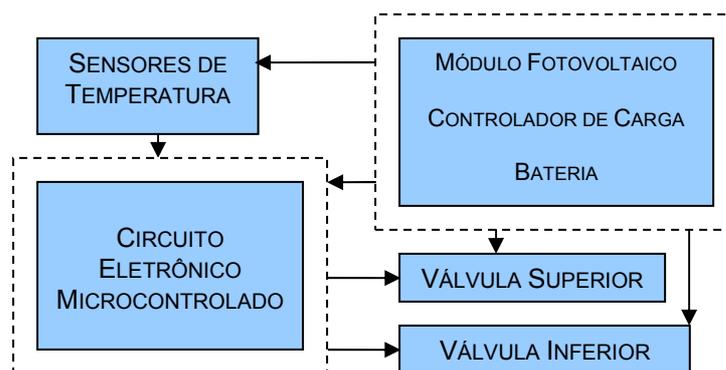


Figura 12. Diagrama em blocos do sistema de controle com alimentação fotovoltaica.

Duas válvulas respondem a uma lógica de controle programada no microcontrolador, uma vez que todos os dispositivos estejam eletricamente alimentados e os sensores de temperatura enviam sinais de comando.

Para a facilidade experimental de desenvolvimento do controle do protótipo, os sensores de temperatura, o circuito microcontrolado e as válvulas foram alimentados com energia elétrica proveniente de uma fonte de tensão/corrente (12 Volts DC/3 Ampéres), ressaltando-se que o equipamento no campo deverá ser suprido pelo sistema fotovoltaico.

Os sensores de temperatura utilizados são os circuitos integrados LM35, selecionados por serem semicondutores que se baseiam na variação linear com a temperatura e por apresentarem um sinal de saída de 10 mV/°C. Outras propriedades importantes, como medição até 150°C e a incerteza intrínseca de $\pm 1/4^\circ\text{C}$ contribuíram para a escolha do componente (NATIONAL SEMICONDUCTOR, 2000).

As válvulas utilizadas são válvulas solenóides do tipo “normalmente fechada” (N/F), projetadas para acionamento elétrico com potência de dissipação de 8 W. Estas foram selecionadas considerando três características básicas: a tensão de acionamento em nível DC (12 Volts); obstrução e abertura total (estado on/off); e o consumo.

A Figura 13 mostra a disposição do arranjo hidráulico na entrada do coletor, assim como a ordem de posicionamento dos dispositivos.

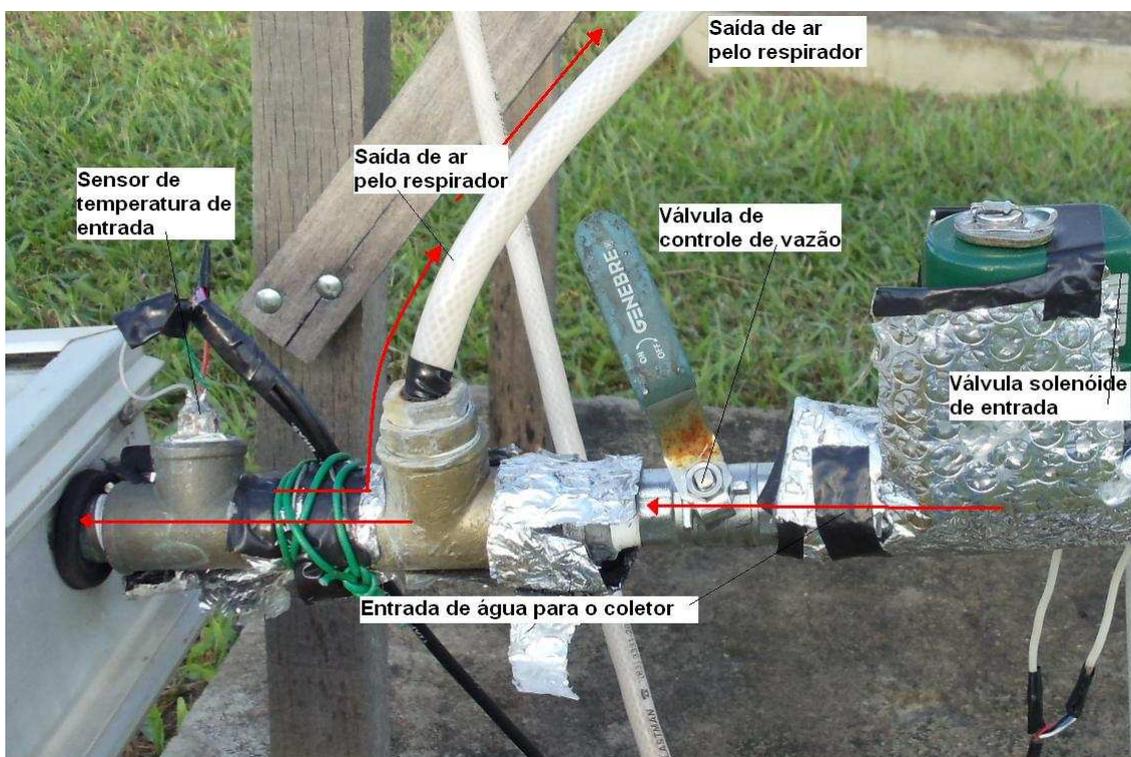


Figura 13. Conexões hidráulicas de entrada do coletor solar.

Dentre eles, estão: o sensor de temperatura; o respirador; a válvula de controle de vazão e a válvula solenóide. O sensor é localizado logo na tubulação de entrada do coletor a fim de obter a temperatura da água o mais próximo do interior do mesmo (entre o coletor e o respirador). O respirador é acoplado entre o sensor e válvula manual para evitar o aumento da pressão interna do coletor após a obstrução do fluxo de entrada. Posteriormente o controle vazão é feito por uma válvula manual que é disposta entre o respirador e a válvula solenóide de entrada. A solenóide permite o fluxo de entrada da água impulsionado pela coluna de água do reservatório.

4.1.2.1 Lógica de controle

No sistema composto pelos componentes mencionados, a descontaminação microbiológica da água por pasteurização solar depende estritamente de dois fatores: a implementação de uma lógica funcional capaz de promover o completo isolamento da

massa de água em tratamento; e o controle do tempo de tratamento. A consideração desses dois fatores caracteriza um sistema de tratamento por bateladas que foi desenvolvido a partir do esquema ilustrado na Figura 14.

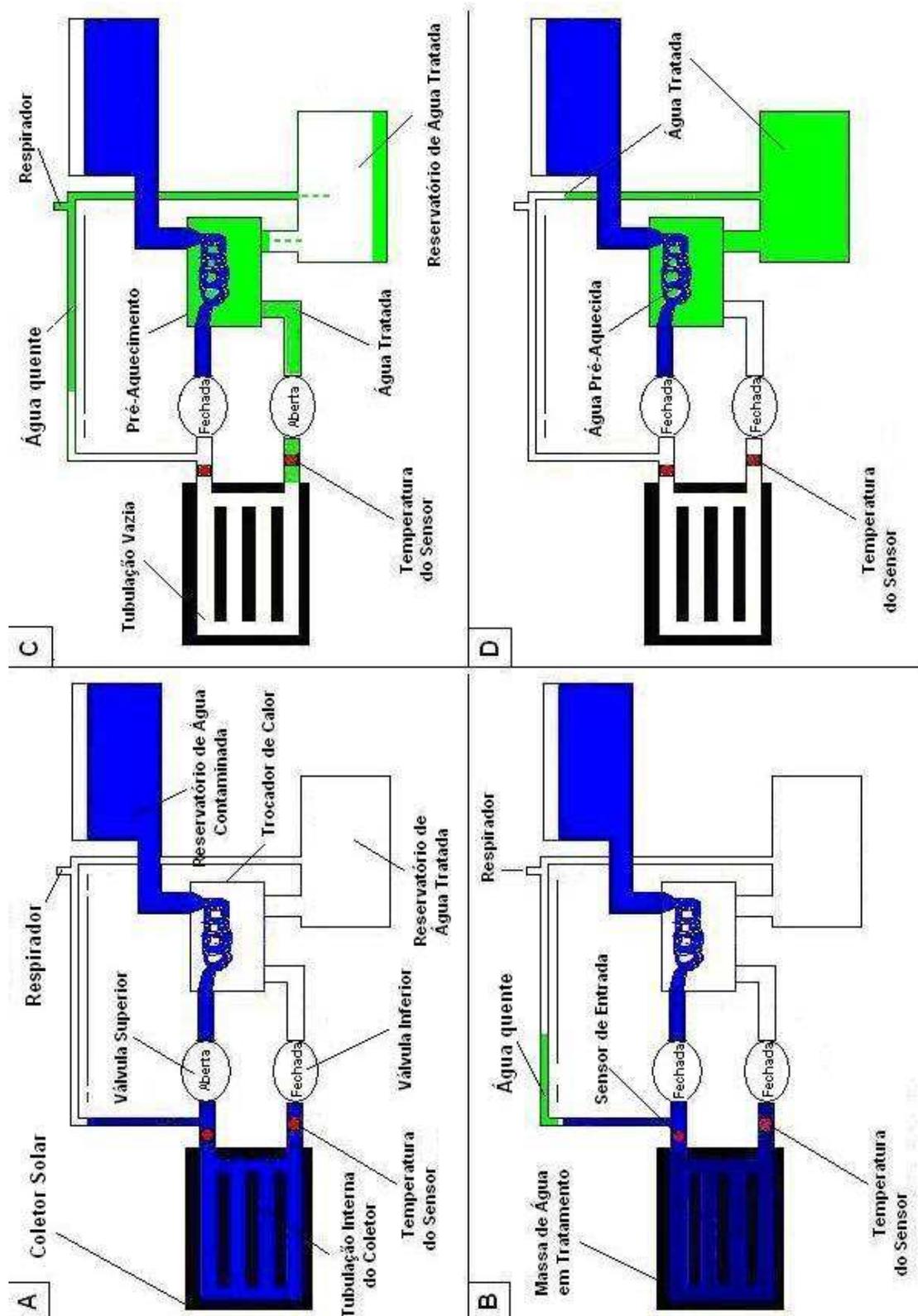


Figura 14. Esquema de funcionamento cíclico do pasteurizador solar automático.

Como pode ser visualizado na Figura 14-A, o ciclo de funcionamento inicia com a abertura da válvula de entrada e sua permanência nesse estado até o total preenchimento do coletor (carga). Depois de preenchido, a válvula de entrada do coletor fecha, estabelecendo o confinamento ou isolamento (Figura 14-B) da massa de água. Após o confinamento do lote e conclusão do período de tratamento, a válvula de saída abre para expulsar a água e conduzi-la até o trocador de calor (conforme a Figura 14-C). Após a descarga do coletor, a válvula de saída fecha e a válvula de entrada abre, concluindo a primeira batelada e iniciando um novo ciclo (Figura 14-D).

O comportamento cíclico mostrado acima é conseguido a partir da programação sistemática dos seguintes parâmetros:

- Horário de Inicialização em “Stand-by”: Hora que o sistema é ativado. A partir deste horário, o sistema de controle passa a responder aos comandos.
- Horário de Finalização: Hora de desligamento do sistema, isto é, o momento em que o sistema de controle não responde mais aos comandos de temperatura e de tempo.
- Temperatura de Tratamento (Set-Point_i): Valores de temperatura detectados pelos sensores, tanto na entrada como na saída do coletor, que determinam o ponto de início do tratamento.
- Tempo de Residência (Δt_i): Período que garante o tratamento da água a uma determinada temperatura.
- Tempo de descarga ($\Delta t_{descarga}$): Intervalo de tempo responsável por permitir a vazão completa do volume de água tratado.
- Tempo de carga (Δt_{carga}): Intervalo de tempo responsável por permitir o preenchimento completo do coletor solar.
- Contador de Tratamento (COUNT_i): Dispositivos responsáveis por efetuar a contagem do tempo de tratamento, quando na entrada e na saída o “Set-Point_i” é atingido.
- Contador de Descarga (COUNT_{descarga}): É o dispositivo responsável por efetuar a contagem do tempo de descarga, quando um dos contadores atingir o período de tratamento.
- Contador de tempo de carga (COUNT_{carga}): É o dispositivo responsável por efetuar a contagem do tempo de carga, após a finalização do tempo de descarga.

Os parâmetros foram definidos respeitando as premissas da pasteurização, as quais relacionam a temperatura com o tempo. Após definidos esses parâmetros, desenvolveu-se a lógica seqüencial abaixo sob a forma de algoritmo, utilizando a linguagem de programação do próprio sistema de aquisição de dados.

- Inicialização;
- Abrir a válvula de entrada e contar o tempo de carga (Δt_{carga});
- Zerar contadores;
- Iniciar verificação das temperaturas de entrada e saída;
- Disparar contador de tratamento (COUNT_i) uma vez que a temperatura de tratamento (Set-Point_i) for atingida, tanto na entrada quanto na saída;
- Parar o COUNT_i se a temperatura de entrada (T_{in}) ou de saída (T_{out}) cair abaixo da temperatura de tratamento (Set-Point_i); continuar a contagem se “ T_{in} ” e “ T_{out} ” forem maiores ou iguais ao “ Set-Point_i ”;
- Ao concluir o período de tratamento (Δt_i): parar o respectivo contador; zerar os outros contadores; abrir a válvula de saída e permanecer aberta durante o tempo de descarga ($\Delta t_{\text{descarga}}$);
- Após $\Delta t_{\text{descarga}}$: fechar a válvula de saída; abrir a válvula de entrada; ativar o contador de carga ($\text{COUNT}_{\text{carga}}$); ao terminar a contagem, zerar todos os contadores e iniciar novamente a verificação de T_{in} e T_{out} .

4.1.3 Monitoramento do protótipo

A experimentação do sistema envolveu uma série de etapas que vão além da construção do protótipo. Depois de interligar os sistemas que compõem o projeto, um sistema de aquisição de dados foi instalado com o objetivo de monitorar o comportamento do equipamento.

O monitoramento foi realizado através de um computador conectado ao “hardware” de aquisição, tanto para o acompanhamento do funcionamento do protótipo, quanto para a coleta e armazenamento dos dados. O sistema utilizado foi o Datalogger modelo CR10X da Campbell Scientific, INC. O diagrama da Figura 15 mostra o esquema de ligação entre os dispositivos e os equipamentos.

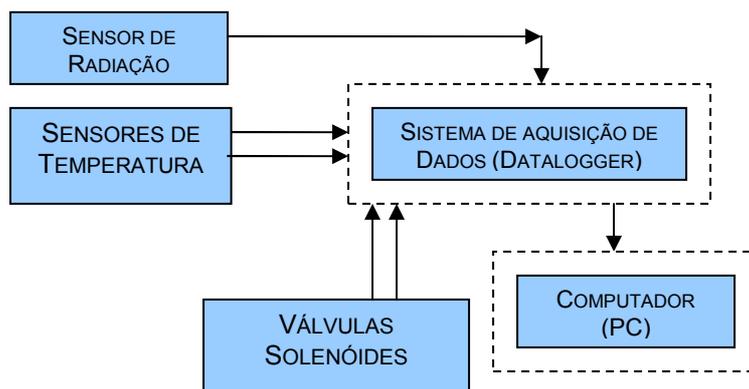


Figura 15. Diagrama das conexões entre os dispositivos e equipamentos.

O sensor de radiação global (I_{coll}) utilizado e devidamente calibrado para a experimentação foi o Piranômetro LI-200SA, com característica de erro absoluto tipicamente de 3%. O Datalogger além de atuar como sistema de aquisição de dados, também pôde ser utilizado para executar e testar a lógica de controle idealizada. Cabe ressaltar que no projeto de campo, o “Datalogger” será substituído por um circuito eletrônico de baixo custo e baixo consumo que utiliza o microcontrolador AT89C52 da ATNEL (família 8051), o qual necessita de alimentação de 12 VDC e pode ser visualizado na figura abaixo.

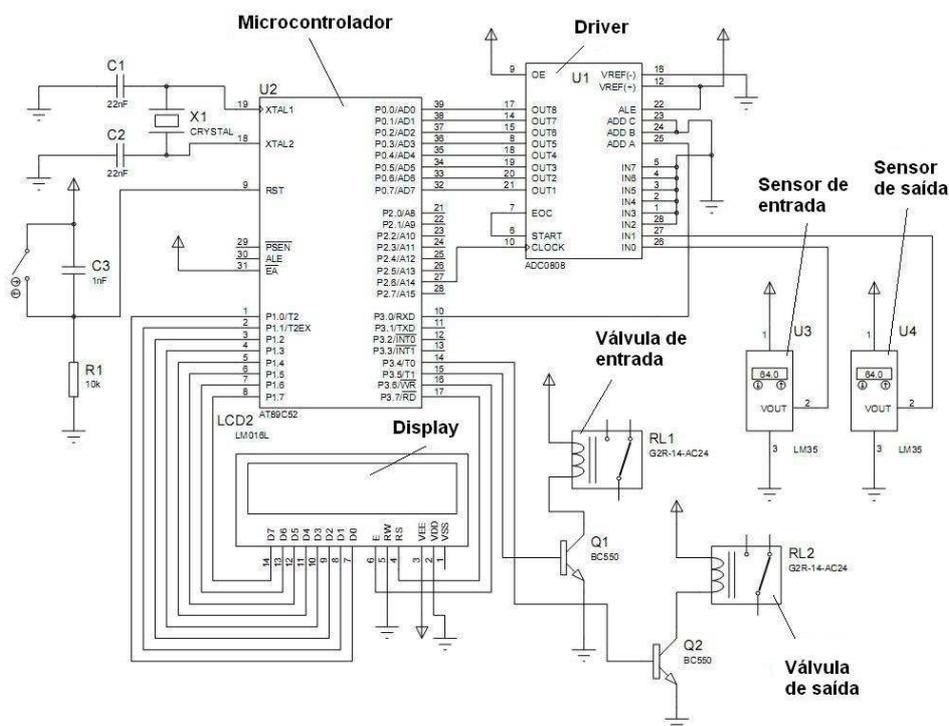


Figura 16. Circuito eletrônico de controle com microcontrolador.

Dessa forma, a lógica de controle para o pasteurizador foi programada no “Datalogger”, resultando em um painel de monitoramento não só das variáveis do sistema, mas também dos parâmetros que o controlam o (Figura 17).

Os sinais recebidos pelo sistema de aquisição são convertidos e mostrados pelo painel em tempo real, trazendo os valores instantâneos de irradiância global no plano do coletor (I_{coll}), os valores de temperaturas (T_{in} e T_{out}), o horário em que os sinais são captados e o estado de ativação das válvulas. O sistema foi programado para armazenar os dados em médias de minuto durante o período de monitoramento. Para efeito de acompanhamento diário, um contador de bateladas (“BATCHs”) foi configurado no programa para contabilizar a quantidade de tratamentos realizados no dia.

Val_IN	0	Pasteur_in_55°C	0	CNT_on_55°C	0	Time_in_55°C	3.600
Val_OUT	0	Pasteur_in_60°C	0	CNT_on_60°C	0	Time_in_60°C	2.700
		Pasteur_in_65°C	0	CNT_on_65°C	0	Time_in_65°C	1.800
		Pasteur_in_75°C	0	CNT_on_75°C	0	Time_in_75°C	900
TimeStamp	07:42:32	Pasteur_in_85°C	0	CNT_on_85°C	0	Time_in_85°C	30
Icoll	270,48						
				CNT_CARGA	0	Time_of_CARGA	110
T_SOMA	87,88			CNT_DESCARGA	0	Time_of_DESCAR	31
T_SUB	3,71						
T_IN	45,79						
T_OUT	42,08					BATCHs	0

Update Interval: 00 m 01 s 000 ms

Buttons: Add..., Delete, Options..., Clear All, Help

Figura 17. Interface gráfica do painel de monitoramento.

A rotina de monitoramento do sistema se dá pelas informações contidas nos balões da figura acima:

Estado de ativação das válvulas (Valv_IN e Valv_OUT) – no balão 1, os sinais de nível alto ou baixo que indicam o acionamento das válvulas.

Potencia solar global no plano do coletor (I_{coll}) – no balão 2, os níveis de irradiância solar incidente, em W/m^2 .

Temperaturas de entrada e saída do coletor (T_{in} e T_{out}) – no balão 3, os valores de temperaturas (em °C) que atuam no controle do sistema.

Indicadores de tratamento – no balão 4, os sinais de nível alto ou baixo que indicam atividade do processo.

Contadores de tratamento – no balão 5, a contabilização individual dos contadores quando cada qual atinge seu “Set-Point”.

Períodos de tratamento – no balão 6, os períodos de pasteurização definidos na programação do controle.

Contadores e períodos de carga/descarga – nos balões 7 e 8, as contagens referentes aos períodos de vazão e enchimento do coletor.

De acordo com a lógica de controle, o funcionamento do sistema pode ser configurado em dois modos: tratamento de temperaturas aleatórias e tratamento de temperatura fixa. O tratamento aleatório consiste no tratamento da água em quaisquer temperaturas de pasteurização (“Set-Points”), desde que se conheça o período de tratamento referente à mesma, ao contrário da configuração de temperatura fixa que estabelece uma única temperatura para a pasteurização. Baseado na curva de inativação de microorganismos proposta por Feachem *et al.* (1992) e nos estudos do Dr. Metcalf *et al.* (2002), foram utilizadas as temperaturas de pasteurização em: 55°C, 60°C, 65°C, 75°C e 85°C. Para testar o circuito de controle e garantir a aniquilação das diversas espécies de microorganismos patogênicos sob as temperaturas acima citadas, foram relacionados os respectivos intervalos de tempo: 3600, 2700, 1800, 900 e 15 segundos. Dessa forma é possível estabelecer o tratamento dentro da “Zona de Segurança” ou “Zona de Letalidade” apontada nos estudos pesquisados.

No painel da Figura 18 é notório observar o momento em que o sistema efetua o tratamento em quatro temperaturas diferentes com os contadores ativados em função das temperaturas de entrada e saída. Cada contador foi ativado sequencialmente à medida que as temperaturas de entrada e saída atingiram seus respectivos “Set-Points”. No painel, “ T_{in} ” e “ T_{out} ” demonstram que as temperaturas atingidas permitiram que o sistema iniciasse o tratamento em quatro Set-Points diferentes, não chegando ao Set-Point_{85°C} pelo fato de que “ T_{out} ” se mantém abaixo deste valor de temperatura. Pelas contagens registradas nos contadores, observa-se que passaram apenas 12 segundos

após o início do tratamento à 75°C. Considerando que o tratamento nesta temperatura requer um período de 900 segundos, seria necessário que “T_{in}” e “T_{out}” se mantivessem acima do “Set-Point_{75°C}” para que o processo fosse concluído nos próximos 888 segundos. Já no “Set-Point_{55°C}”, o período de tratamento foi configurado para 3.600 segundos, restando 1.692 segundos a serem contados para ocorrer mais uma batelada.

Parameter	Value	Parameter	Value	Parameter	Value	Parameter	Value
Val_IN	1	Pasteur_in_55°C	1	CNT_on_55°C	1.908	Time_in_55°C	3.600
Val_OUT	0	Pasteur_in_60°C	1	CNT_on_60°C	908	Time_in_60°C	2.700
		Pasteur_in_65°C	1	CNT_on_65°C	433	Time_in_65°C	1.800
		Pasteur_in_75°C	1	CNT_on_75°C	12	Time_in_75°C	900
		Pasteur_in_85°C	0	CNT_on_85°C	0	Time_in_85°C	15
Icoll	1.040,28						
				CNT_CARGA	0	Time_of_CARGA	110
T_SOMA	178,16			CNT_DESCARGA	0	Time_of_DESCA	31
T_SUB	27,95						
T_IN	103,06						
T_OUT	75,10					BATCHs	3

Update Interval: 00 m 01 s 000 ms

Buttons: Add..., Delete, Options..., Clear All, ? Help

Figura 18. Monitoramento do sistema configurado em modo de tratamento aleatório.

Pode-se dizer que o tratamento do lote de água, em qualquer “Set-Point”, se inicia quando “T_{in}” e “T_{out}” atingem o valor pré-estabelecido como temperatura de tratamento. Ao iniciar o tratamento em qualquer dessas temperaturas, o contador é ativado. Como neste sistema a temperatura não pode ser controlada, a lógica de controle interpreta os valores maiores que o “Set-Point_i” como iguais a este. Essa condição foi estabelecida, uma vez que toda a massa de água ao longo do coletor deve estar sob a mesma temperatura para se considerar que o lote está em tratamento.

No monitoramento mostrado na figura anterior, observa-se que “T_{in}” está no “Set-Point_{85°C}” (temperatura maior ou igual a 85°C) e “T_{out}” no “Set-Point_{75°C}” (temperatura maior ou igual a 75°C e menor que 85°C), e mesmo assim o contador de tratamento à 85°C (COUNT_{85°C}) não inicia a contagem. Isto se deve ao fato de o contador estar programado para contabilizar apenas quando as duas temperaturas estiverem maior ou igual ao “Set-Point”. Sendo assim, à medida que “T_{in}” e “T_{out}” atingem temperaturas cada vez mais elevadas, os contadores são ativados sequencialmente só parando a contagem quando uma das temperaturas decair abaixo de um determinado “Set-Point_i”. Se houver a pausa do contador devido ao decaimento de

alguma das temperaturas, o dispositivo aguarda o respectivo “Set-Point_i” ser novamente atingido para continuar a contagem. Esse comportamento é característico da lógica configurada no sistema de controle, onde mais de uma temperatura pode ser predeterminada como “Set-Point”. Isso pode ocorrer com ou sem recuperação de calor.

Na sequência do monitoramento, ao completar a contagem do período de tratamento em qualquer temperatura programada, o acionamento do contador de descarga e a abertura simultânea da válvula de saída (Val_OUT) são executados pelo sistema como ilustra o painel da Figura 20. Observando a sequência na Figura 19, a qual se refere ao momento de descarga, percebe-se que após 1.792 segundos, a contagem do período de tratamento (2700s) no “Set-Point_{60°C}” foi concluída primeiro, fazendo o sistema ativar a válvula de saída (Val_OUT).

Val_IN	0	Pasteur_in_55°C	0	CNT_on_55°C	0	Time_in_55°C	3.600
Val_OUT	1	Pasteur_in_60°C	1	CNT_on_60°C	2.700	Time_in_60°C	2.700
		Pasteur_in_65°C	0	CNT_on_65°C	0	Time_in_65°C	1.800
		Pasteur_in_75°C	0	CNT_on_75°C	0	Time_in_75°C	900
		Pasteur_in_85°C	0	CNT_on_85°C	0	Time_in_85°C	15
Icoll	880,33						
				CNT_CARGA	0	Time_of_CARGA	110
T_SOMA	157,61			CNT_DESCARGA	8	Time_of_DESCA	31
T_SUB	0,89						
T_IN	79,25						
T_OUT	78,36					BATCHs	6

Update Interval: 00 m 01 s 000 ms

Buttons: Add..., Delete, Options..., Clear All, Help

Figura 19. Monitoramento do sistema no instante de descarga do coletor solar.

Na Figura 20 verifica-se a conclusão do período de descarga ao atingir 31 segundos, assim como a desativação da válvula de saída tornando-a fechada. Simultaneamente, também se observa que o contador do tempo de carga é acionado juntamente com a válvula de entrada, permitindo assim a recarga completa do coletor em um período de 110 segundos. Nesse momento, a válvula de saída encontra-se fechada e a de entrada permanece aberta até que o tempo de recarga seja atingido. Também é possível visualizar que nesse período a temperatura de entrada cai no momento da recarga/carga e a temperatura de saída cai mais lentamente, devido tanto à inércia térmica do sensor, assim como ao ganho de calor obtido pela massa de água ao circular nas tubulações ainda aquecidas.

Parameter	Value	Parameter	Value	Parameter	Value	Parameter	Value
Val_IN	1	Pasteur_in_55°C	0	CNT_on_55°C	0	Time_in_55°C	3.600
Val_OUT	0	Pasteur_in_60°C	0	CNT_on_60°C	0	Time_in_60°C	2.700
		Pasteur_in_65°C	0	CNT_on_65°C	0	Time_in_65°C	1.800
		Pasteur_in_75°C	0	CNT_on_75°C	0	Time_in_75°C	900
		Pasteur_in_85°C	0	CNT_on_85°C	0	Time_in_85°C	15
lcoll	965,33						
				CNT_CARGA	88	Time_of_CARGA	110
T_SOMA	129,55			CNT_DESCARGA	31	Time_of_DESCA	31
T_SUB	-11,11						
T_IN	59,22						
T_OUT	70,33					BATCHs	6

Update Interval: 00 m 01 s 000 ms

Buttons: Add..., Delete, Options..., Clear All, ? Help

Figura 20. Monitoramento do sistema no instante de recarga do coletor solar.

Ao finalizar a contagem do tempo de descarga, o sistema contabiliza mais uma batelada (“BATCHs”), zera os demais contadores e reinicia. Assim os ciclos de tratamento podem ser monitorados visualmente durante o funcionamento da máquina.

Para a configuração física desse sistema, os tempos de carga e descarga do coletor foram definidos experimentalmente, cronometrando-os. Após a realização de testes com o coletor inclinado (β) de aproximadamente 20° (Norte), verificou-se que esses parâmetros podem ser definidos em: 110 e 31 segundos respectivamente para esta inclinação, de forma que esses tempos são suficientes para a carga e descarga completa do coletor, não comprometendo o volume a ser tratado. Tal inclinação foi escolhida por se tratar de um ângulo que favorece a coleta anual de radiação mais eficientemente para a latitude onde se encontra o sistema. A diferença nos tempos de carga e descarga se justifica pela diferença entre as vazões de entrada (18,18 ml/s) e saída (64,51 ml/s) que foram obtidas utilizando o método volumétrico. A velocidade da água na saída do tubo coletor, cujo diâmetro é de 0,0127 m e a área da seção igual a $0,0885 \text{ m}^2$, é de $0,000728 \text{ m/s}$. Como o diâmetro é fixo e a viscosidade cinemática da água, entre as temperaturas de 25°C à 90°C , varia entre $0,326 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ e $1,003 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ respectivamente, o escoamento no momento da descarga tem regime laminar.

Na experimentação, testes com diferentes vazões de entrada foram realizados através do controle manual do fluxo no sentido do coletor (Figura 21).

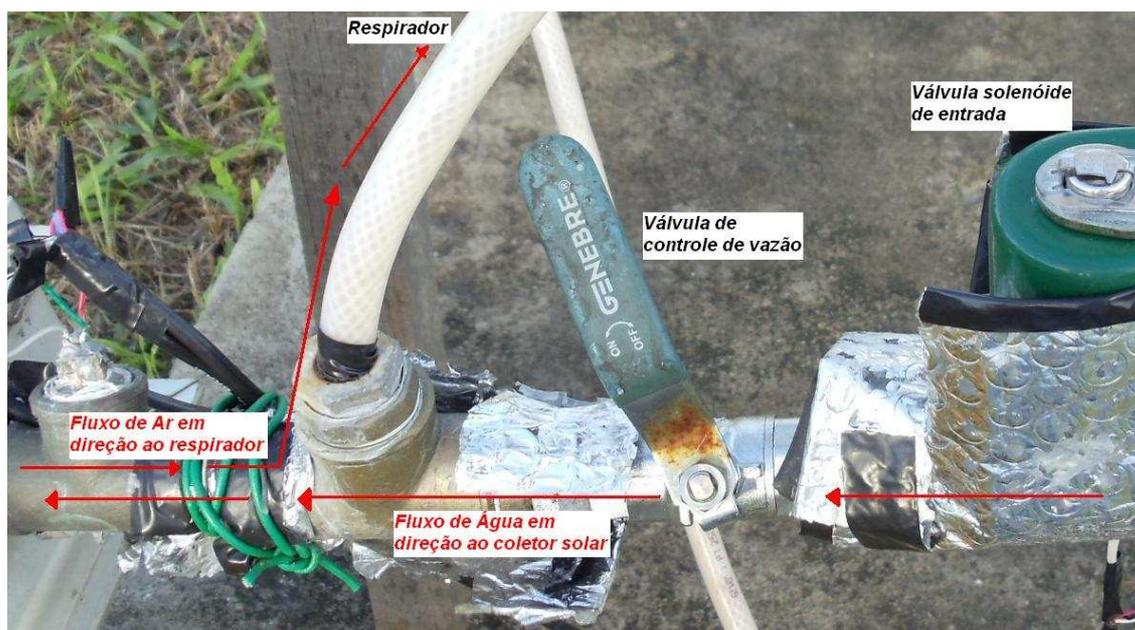


Figura 21. Direção dos fluxos de água e ar na entrada do coletor solar.

Com a vazão de entrada ajustada igualmente à de saída, a saída do ar pelo respirador leva consigo frações da água no momento de recarga. Isso acarretaria numa possível contaminação da água tratada no momento da recarga. Para corrigir esse problema foi necessário diminuir a vazão de entrada para que o fluxo permitisse a saída do ar pelo respirador sem arrastar água ainda não tratada.

A fervura é um fenômeno observado em dias com alta irradiância, próximo do meio-dia-solar, apenas na entrada do coletor. Nos dias em que a irradiância não é suficiente para fazer com que " T_{in} " atinja valores acima de 99°C , não se verifica o fenômeno. Embora ocorra convecção natural do fluido nas tubulações do coletor, o sensor de saída não detecta temperaturas tão altas quanto na entrada no momento da ebulição. Em horários próximos do meio dia solar, verifica-se a formação de vapor que provocara a expulsão de frações do volume da água em tratamento através do respirador.

Para não haver desperdício e perda de volume em tratamento nos momentos de ebulição, o respirador foi interligado a um retorno para o reservatório de água tratada conforme mostra a Figura 22. Essa solução foi possível por se tratar da água em temperaturas muito altas, onde o tempo de tratamento é praticamente nulo.



Figura 22. Circulação de retorno do vapor no respirador.

Com essa adaptação feita no topo do respirador, o fluxo de vapor é interrompido por uma válvula unidirecional que ao obstruir a passagem em direção à atmosfera o faz condensar e retornar para o reservatório de água tratada (Figura 22).

4.3 Tratamento x Análise da água

Amostras de água foram coletadas no Riacho Cavouco (Figura 23) que fica situado no campus da Universidade Federal de Pernambuco. A coleta foi realizada no período da manhã para que fossem submetidas ao tratamento ainda no mesmo período, utilizando o protótipo desenvolvido. Posteriormente foram analisadas no Laboratório de Processos Fermentativos (LFP) que fica no Departamento de Antibiótico da UFPE.



Figura 23. Riacho Cavouco (UFPE).

Durante cinco dias consecutivos foram feitas coletas de água contaminada em um recipiente de 10 litros, de onde se transferiu uma amostra com cerca de 200 ml para frascos plásticos previamente esterilizados, diretamente para a análise controle. Imediatamente após a amostragem de controle, essa foi submetida ao procedimento de análise bacteriológica, e o restante do volume contaminado foi levado ao pasteurizador solar para inserção e tratamento. O procedimento de coleta e análise, antes e depois do tratamento, foi realizado de acordo com o esquema da Figura 24.

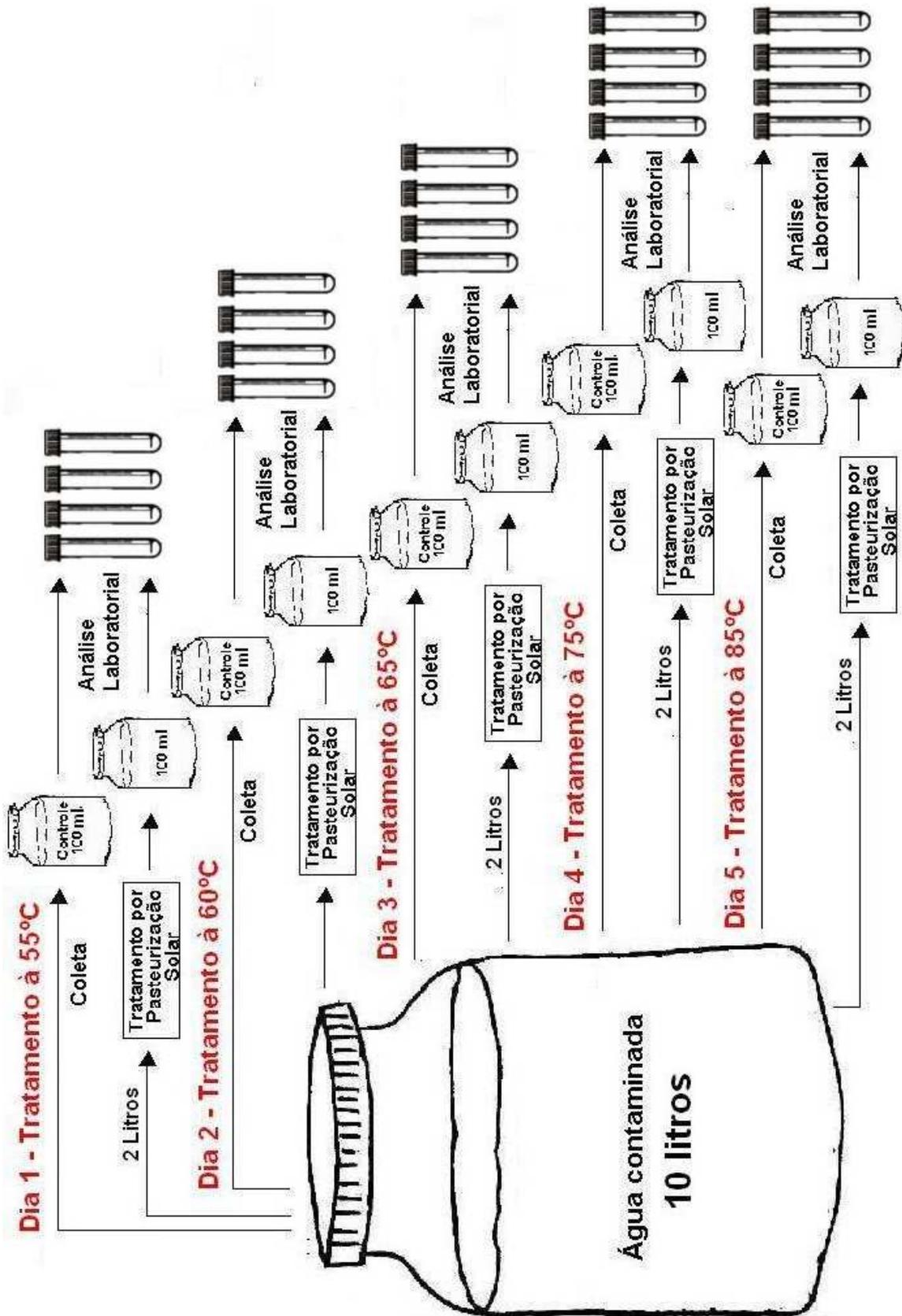


Figura 24. Metodologia de análise bacteriológica desenvolvida para o sistema.

Todo o processo, desde a coleta da água contaminada até a etapa de análise após o tratamento, foi feito dentro de um intervalo de duas horas. Esse limite de tempo é necessário para evitar, tanto possíveis ocorrências de recontaminação e ou proliferação bacteriana, quanto diminuição da população por falta de nutrientes disponíveis na água, podendo com isso causar discrepâncias na comparação das análises. Então, para os cinco dias o sistema de tratamento foi configurado e testado nas respectivas temperaturas de: 55°C, 60°C, 65°C, 75°C e 85°C.

Os procedimentos executados em todos os dias seguiram a sequência da figura abaixo.



Figura 25. Procedimentos metodológicos executados para coleta e análise microbiológica.

Primeiramente fez-se a coleta da água contaminada (A), em seguida a amostragem de alíquota (B) com cerca de 200 ml. Depois o restante foi conduzido ao coletor solar, onde foram depositados dois litros com a ajuda de um funil previamente esterilizado (C). A saída do coletor foi pulverizada com álcool a 70% para evitar algum tipo de contaminação adicional no momento de coleta após o tratamento (D). A amostragem feita após a batelada foi levada ao LFP para a execução dos processos de

análise bacteriológica (E). Todas as amostras foram analisadas tanto para presença/ausência, quanto para a quantidade de bactérias pertencente aos grupos dos coliformes totais e de *E. coli*.

A quantificação dessas bactérias foi feita pela técnica dos tubos múltiplos, empregando o caldo Fluorocult (MERCK, 2000) para a detecção simultânea de coliformes totais e *E. coli* na água. A aceleração do diagnóstico foi conseguida através de um teste enzimático que utiliza um substrato cromogênico que é hidrolisado pelos coliformes, e em geral por um substrato fluorogênico que é específico para *E. coli*. Nas análises feitas antes do tratamento, foram inoculadas alíquotas de 1 ml, 0,1 ml e 0,01 ml respectivamente em três séries de três tubos, contendo 1ml de caldo Fluorocult. Depois do tratamento, foram inoculadas alíquotas de 10 ml, 1 ml e 0,1 ml, também em três séries de três tubos, contendo 10 ml do caldo. Para a inoculação utilizaram-se pipetadores automáticos acoplados com ponteiras estéreis, e posteriormente os tubos foram incubados a 35°C por 24 horas. Após o tempo de incubação, os cultivos que apresentaram coloração verde indicaram a presença de coliformes totais. Os cultivos que apresentam além da coloração verde, a fluorescência sob luz ultravioleta (366 nm), indicaram a presença de *E. coli*, conforme a exemplificação das Figuras 26 e 27 (tubo C).

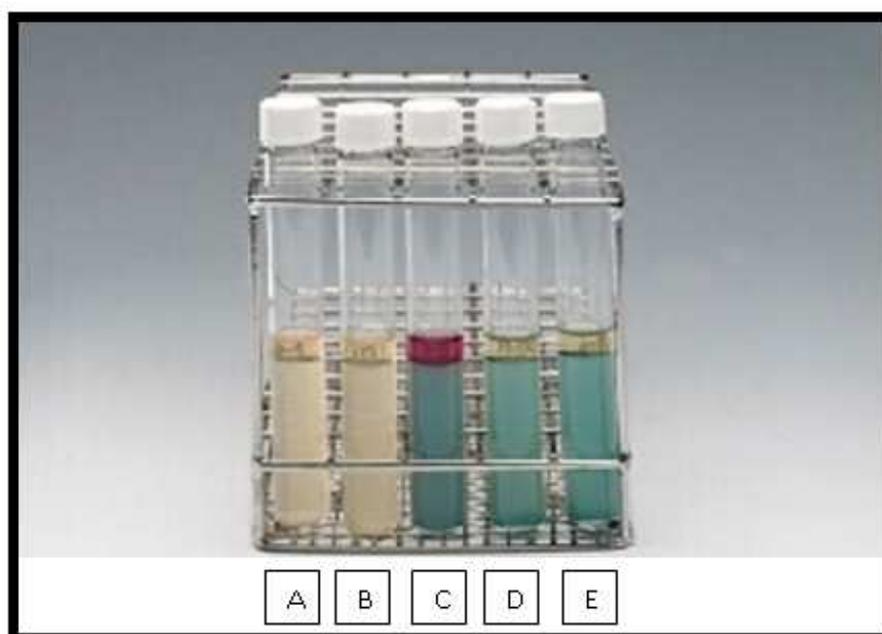


Figura 26. Tubos C, D e E com indicadores microbiológicos.

Fonte: MERCK, 2002.

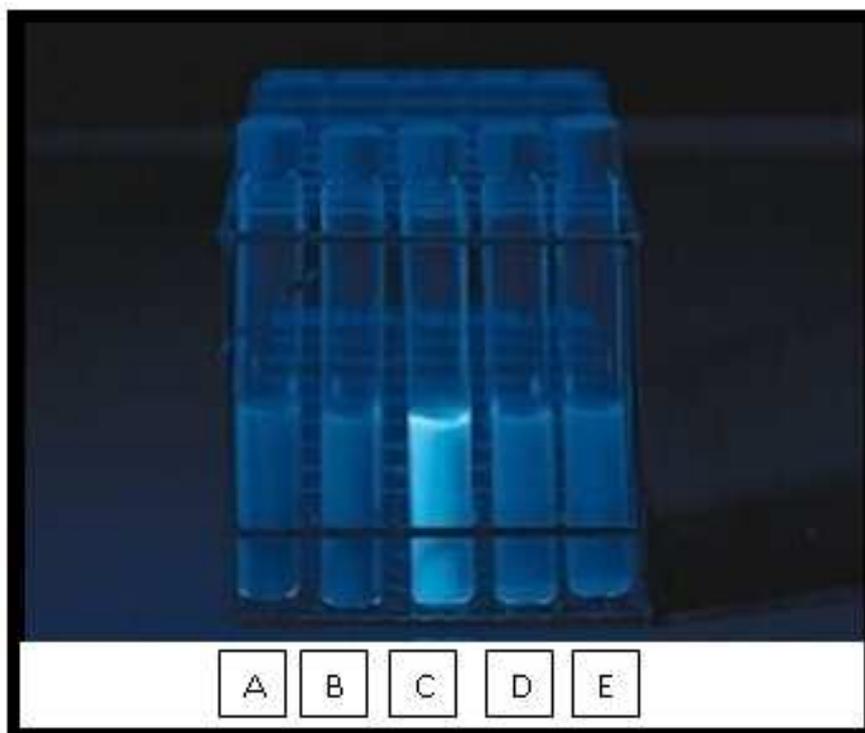


Figura 27. Tubos A, B, C, D e E submetidos à luz ultravioleta.

Fonte: MERCK, 2002.

Após a incubação, antes do tratamento, o número mais provável (NMP) de coliformes totais e *E. coli* foi determinado pela tabela de Mac Crady (BRASIL, 2003). Para as análises após o tratamento, utilizou-se a tabela de Hoskins vide “Standard Methods for Examination of Water and Wastewater (2005)”.

Para a confirmação dos resultados obtidos utilizando a técnica dos tubos múltiplos, outra análise de coliformes totais e *E. coli* foi feita após o tratamento, com a utilização do substrato cromogênico Readycult® Coliforms 100 (Figura 28). No laboratório, cada amostra de 100 ml de água foi transferida para vidros estéreis com capacidade para 200 ml, onde cada qual foi misturada a um flaconete do meio desidratado. A amostra foi agitada suavemente até a completa dissolução do meio de cultura, e logo após, foi incubada em estufa a uma temperatura de 35°C também por 24 horas.



Figura 28. Flaconetes contendo substrato cromogênico Readycult® Coliforms 100.

Fonte: MERCK S. A.

No final do procedimento, a positividade ou negatividade do teste para detecção de coliformes totais se deu pela mudança de cor na solução. Quando da presença de coloração verde (claro ou escuro), o resultado é positivo para coliformes totais; quando da presença de coloração transparente, o resultado é negativo tanto para coliformes totais quanto para *E. coli*; a positividade para *E. coli* se dá pela fluorescência apresentada nas amostras de coloração verde quando expostas à luz ultravioleta (366 nm) conforme o exemplo da Figura 27 (tubo C).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Comportamento do protótipo

Os diagramas das Figuras 29 e 30 mostram o desenho do protótipo completamente montado e os respectivos componentes utilizados na construção do sistema:

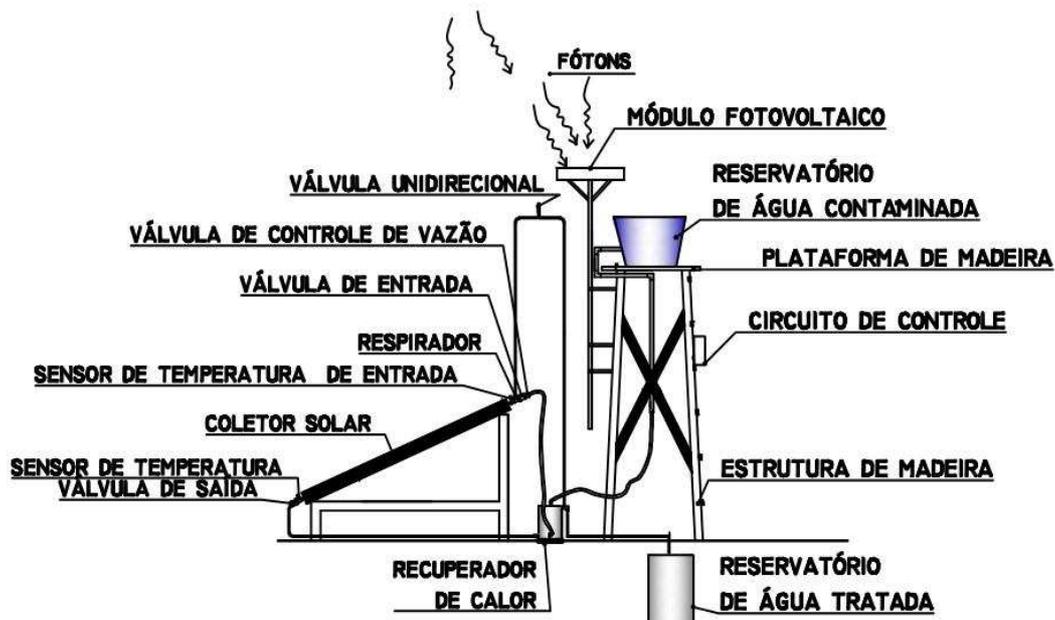


Figura 29. Diagramação lateral do pasteurizador solar automático.



Figura 30. Diagrama frontal do pasteurizador solar automático.

O protótipo foi monitorado durante o período de Nov/2010 à Abril/2011, tendo seu início de funcionamento às 8 da manhã e término às 15 horas da tarde. Nesse período, os dados de irradiância instantânea (I_{coll}) e temperaturas (T_{in} e T_{out}) foram coletados em médias de minuto, demonstrando o comportamento do sistema configurado sem e, com recuperação de calor

Na figura 31, 32 e 33 observa-se a variação das irradiâncias e temperaturas com o tempo, nos dias 11/11/10, 24/11/10 e 27/11/10, com H_{coll} igual a 14,6 MJ/m², 17,2 MJ/m², 19,4 MJ/m² respectivamente. Ao fazer a comparação destes dois parâmetros em três dias com diferentes valores de irradiância, verificou-se que os mesmos influenciam tanto na frequência de bateladas, ou seja, na amplitude das temperaturas que determina o período de tratamento e conseqüentemente a quantidade de ciclos de tratamento.

O sistema foi configurado primeiramente sem recuperação de calor, em tratamento aleatório. No dia 11/11/10 houve a ocorrência de intensa nebulosidade durante as horas de experimentação, caracterizando um dia de baixa irradiância coletada. Com os níveis de radiação variando muito, o desempenho do sistema foi prejudicado, ocorrendo duas bateladas com características diferentes das ocorridas nos dias 24/11 e 27/11, no horário de pico. Observa-se pela Figura 31 que a forma de onda no momento das bateladas tem um formato diferenciado pela maior largura (Δt) existente entre os valores de temperatura de entrada, no momento que a temperatura cai e depois se eleva. Essa característica de comportamento é verificada em dias em que a sequência de irradiância é baixa ou muito variável. Fazendo uma comparação com figuras 32 e 33, os intervalos de tempo ali são bem menores, indicando um ganho de temperatura mais acelerado devido à coleta contínua de radiação pelo coletor solar. A coleta contínua de radiação solar promove o aquecimento mais rápido da água e, no momento final da batelada, a entrada de um novo lote para tratamento também ganha calor mais rapidamente. Quando o coletor é totalmente preenchido, a temperatura de entrada começa a se elevar rapidamente, diferentemente do dia 11/11 que teve a baixa incidência de radiação solar. Após a segunda batelada os valores de temperatura (T_{in} e T_{out}) ainda atingiram o “Set-Point_{65°C}” e o “Set-Point_{75°C}” de tratamento, porém, não conseguiram completar o período de tratamento dos respectivos “Set-Points”.

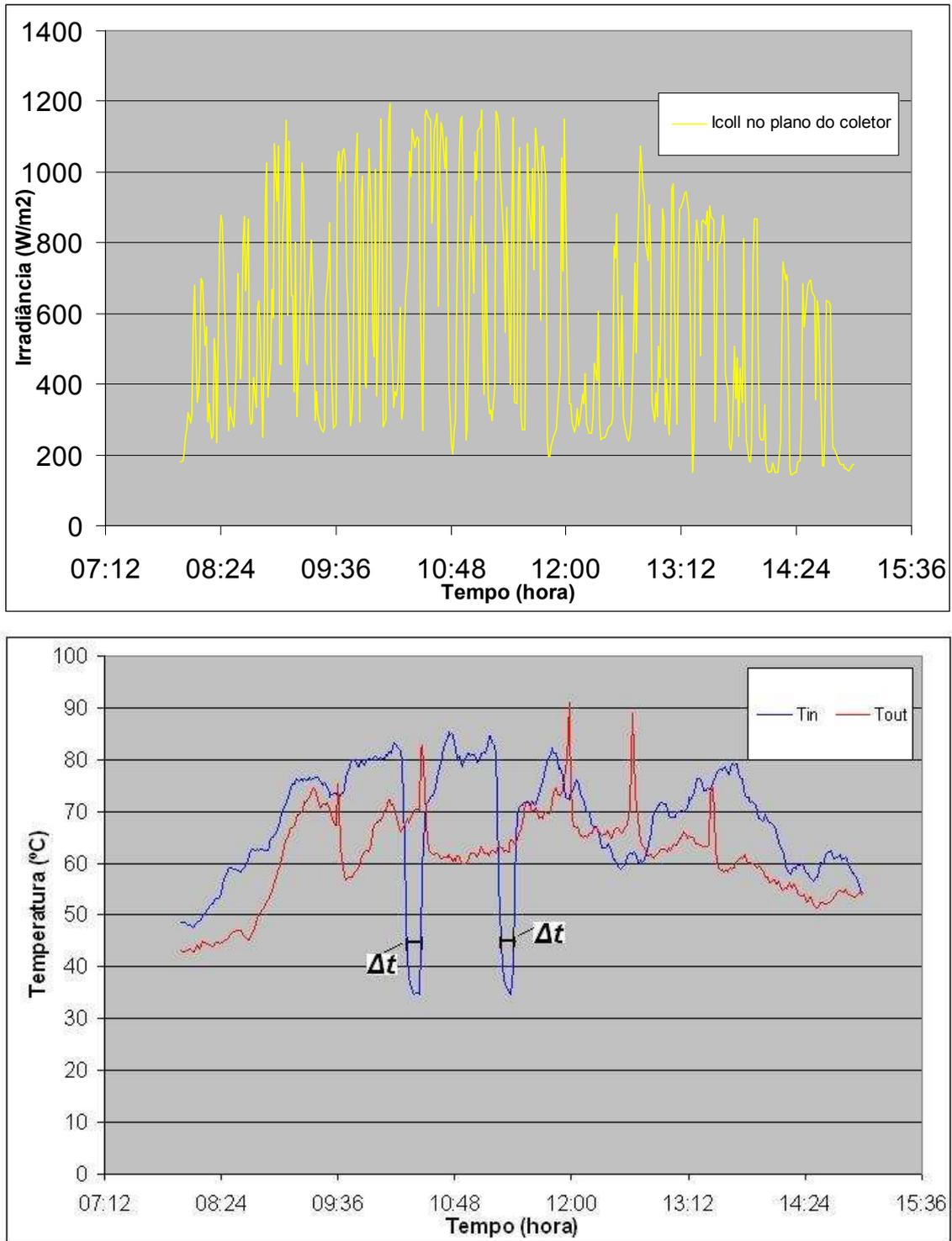


Figura 31. Variação de I_{coll} , T_{in} e T_{out} com o tempo, no dia 11/11/10.

No dia 24/11/10 o sistema também foi testado sem recuperação de calor. A Figura 32 mostra um aumento na quantidade de bateladas, devido à maior coleta de radiação solar durante as horas de Sol, sendo considerado um dia razoável de irradiância.

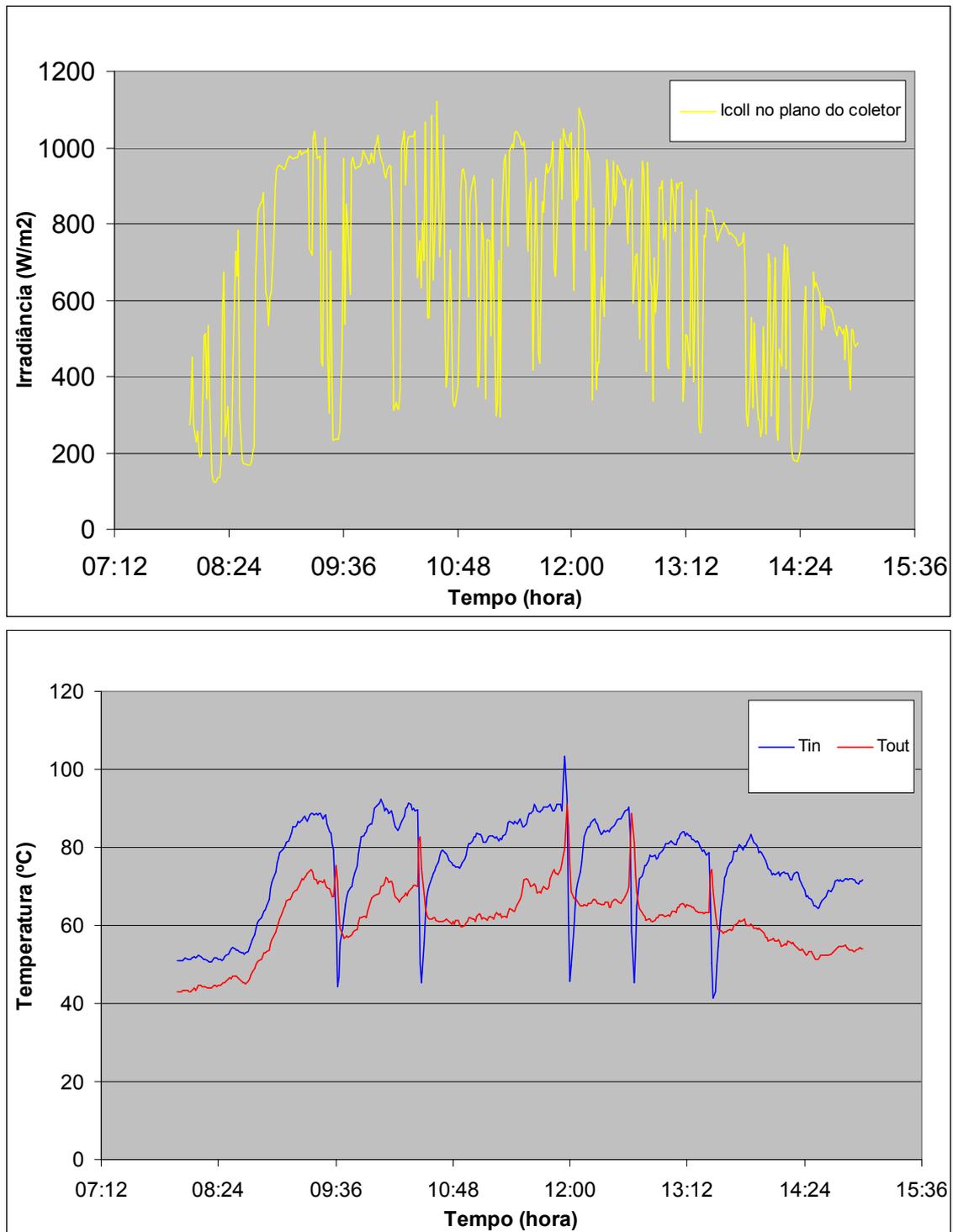


Figura 32. Variação de I_{coll} , T_{in} e T_{out} com o tempo, no dia 24/11/10.

Nesse dia observa-se que perto do meio-dia-solar, entre as dez horas da manhã e o meio dia local, não houve batelada e as temperaturas reduziram consideravelmente devido a queda dos níveis de irradiância solar (Figura 32). Dessa forma, verifica-se então uma redução na frequência de bateladas e o conseqüente aumento do tempo de tratamento em razão dos “Set-Points” mais baixos que determinam um maior período de pasteurização. Quando ocorre uma batelada e a sequência de irradiância se mantém em níveis de incidência que garantem o aquecimento, a próxima batelada acontece exatamente no período de tratamento correspondente aquele “Set-Point”. Para exemplificar, observa-se na figura anterior que as bateladas ocorrentes entre 12h e 13h foram no “Set-Point_{65°C}”, mostrando que os valores de “T_{out}” se mantiveram acima de 65°C durante o tratamento, assim como “T_{in}”. Sabe-se que o indicador de tratamento é a temperatura de saída por estar localizada a uma altura mais baixa do que a entrada do coletor solar. Entretanto, o sistema só considera que o lote está em tratamento quando a temperatura de entrada também se encontra maior ou igual ao mesmo “Set-Point”. Isto se dá pelo fato de que, após a recarga do coletor, a temperatura de saída aumenta primeiro rapidamente e pode atingir o “Set-Point”. Contudo, a temperatura de entrada pode demorar a atingi-lo mesmo com o lote confinado. Esse comportamento depende também da continuidade da irradiância, assim como da recuperação de calor.

Na Figura 33, os gráficos mostram que o dia 27/11/10 se trata de um dia com boa irradiância, onde a primeira e a última batelada ocorreram respectivamente próximo das oito e meia da manhã e duas e meia da tarde, contabilizando um total de oito bateladas. Observou-se que essas duas bateladas ocorrem em temperaturas de pasteurização mais baixas do que as bateladas ocorrentes entre às nove horas da manhã e o meio dia local, quando em dia de céu claro. Quando não existe nebulosidade os níveis de irradiância promovem o tratamento nas temperaturas de 75°C e 85°C, otimizando o sistema com menor tempo de tratamento e maior produtividade.

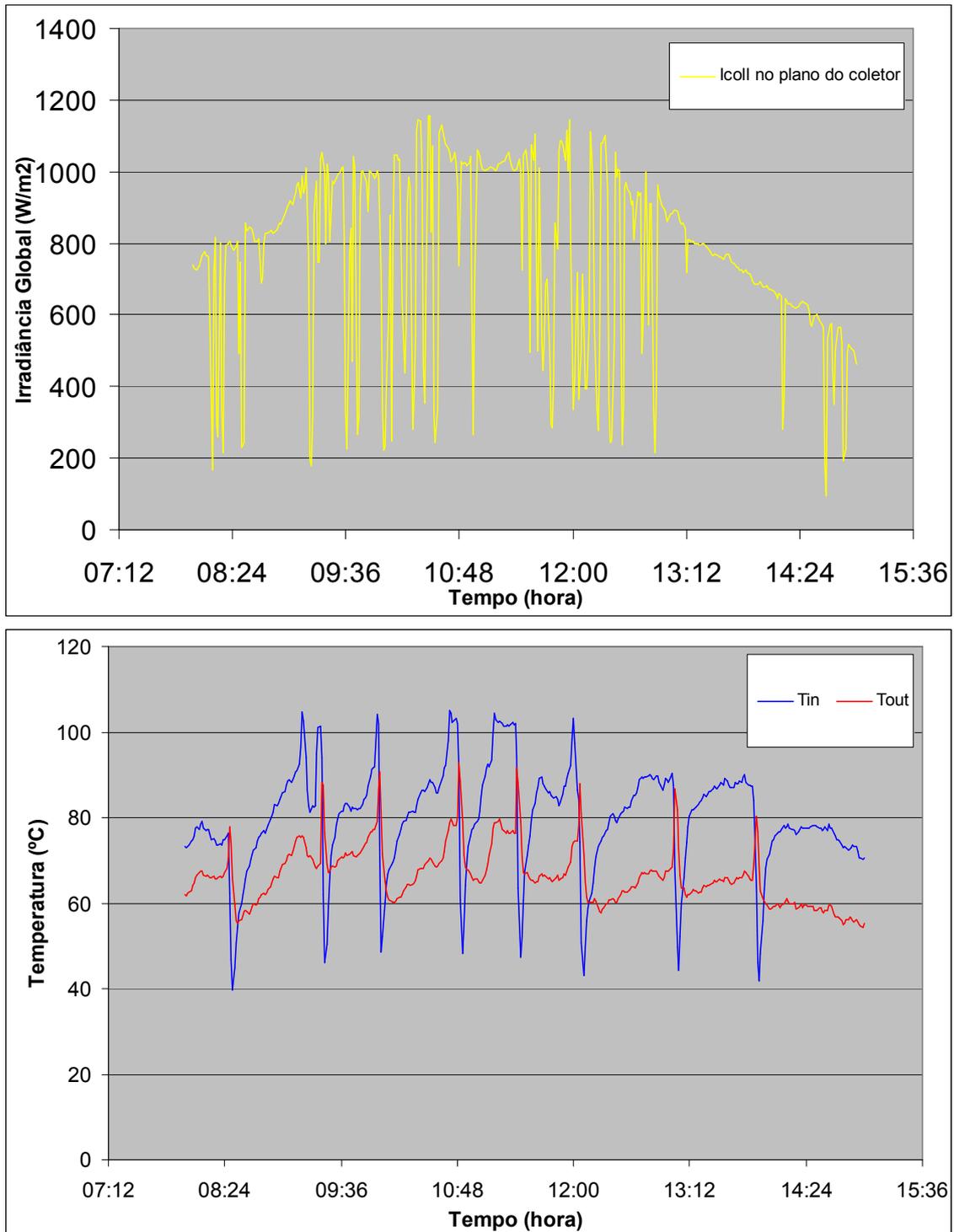


Figura 33. Variação de I_{coll} , T_{in} e T_{out} com o tempo, no dia 27/11/10.

A Figura 34 mostra os níveis de “ I_{coll} ” atingidos no plano do coletor, com irradiância acumulada (H_{coll}) de $17,6 \text{ MJ/m}^2$. Durante o dia de teste observa-se a sequência de três bateladas consecutivas em modo de tratamento com temperatura fixa de 65°C (Set-Point $_{65^\circ\text{C}}$). Neste dia utilizou-se a recuperação de calor.

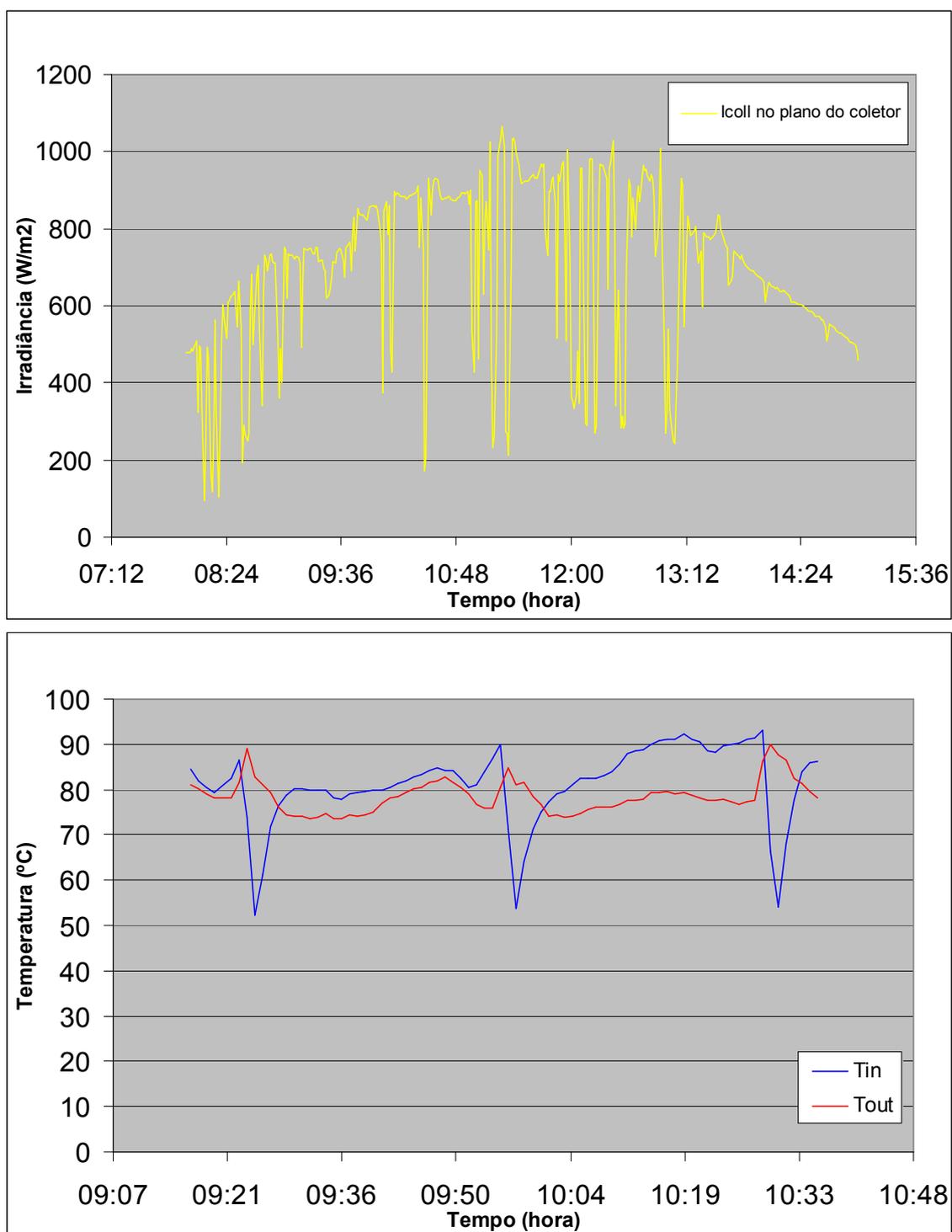


Figura 34. Variação de I_{coll} , T_{in} e T_{out} com o tempo, no dia 14/03/11.

No gráfico da figura anterior é possível observar “ T_{in} ” e “ T_{out} ” no momento da batelada, assim como o comportamento das mesmas durante e após a recarga do coletor. Na batelada, a temperatura de entrada cai bruscamente enquanto que a temperatura de saída tende a aumentar por causa do fluxo da água tratada na saída. Durante a primeira recarga, a temperatura de saída se manteve acima de 65°C , pois durante o preenchimento, a água passa pelas tubulações absorvendo calor ainda armazenado no coletor solar. Ao mesmo tempo a temperatura de entrada decresce continuamente até a total recarga, decaindo abaixo do “Set-Point $_{65^{\circ}\text{C}}$ ”. Isso justifica a lógica do sistema que determina o período de tratamento como sendo dependente das temperaturas de entrada e saída. Caso a lógica se baseasse apenas em “ T_{out} ”, o contador poderia disparar sem haver garantia de que todo o lote estivesse dentro do “Set-Point”, uma vez que após a recarga, a temperatura de entrada pode demorar a atingir o valor definido para o tratamento.

Considerando o período em que as três bateladas ocorreram, verifica-se que a temperatura de saída permeou o “Set-Point $_{75^{\circ}\text{C}}$ ”, mas durante vários instantes esteve abaixo deste, fazendo com que as bateladas ocorressem pelo “COUNT $_{65^{\circ}\text{C}}$ ”. Contudo, mesmo atingindo temperaturas mais altas que 65°C , tanto na entrada como na saída, neste modo de configuração do sistema de controle as bateladas ocorrem apenas neste “Set-Point”. Essa limitação do sistema influencia diretamente a frequência de batelada, tanto se houver queda de “ T_{in} ” ou “ T_{out} ” abaixo da temperatura limiar, quanto se houver o aumento dessas temperaturas. Nesta configuração de tratamento para o sistema, as bateladas só ocorrem para uma única temperatura, restringindo o período de tratamento e ficando limitado a não efetuar a pasteurização em outros “Set-Points” com menor tempo, mesmo com a água já tratada. Isso caracteriza uma queda na eficiência do sistema, pois o coletor eleva a temperatura do lote em tratamento a níveis de pasteurização rápida, porém, o sistema de controle só libera a massa de água no tempo fixado pelo único “Set-Point” escolhido.

Em modo de tratamento aleatório, constatou-se que a frequência de batelada varia no decorrer do dia, sendo nos horários de alta irradiância onde se verifica o estreitamento dos intervalos entre uma batelada e outra. Isto porque as temperaturas se elevam e o sistema inicia o tratamento em um “Set-Point” maior, reduzindo o tempo de tratamento. Por outro lado, a frequência de batelada também é influenciada pela queda

natural das temperaturas após sucessivos ciclos de tratamento, modificando conseqüentemente o “ Δt_i ”.

As Figuras 35 e 36 mostram as variações nas frequências de bateladas para a configuração de tratamento aleatório, utilizando recuperação de calor, entre dois dias com diferentes níveis de irradiância (04/02/11 - $H_{coll} = 20,5 \text{ MJ/m}^2$; 26/03/11 - $H_{coll} = 18,2 \text{ MJ/m}^2$).

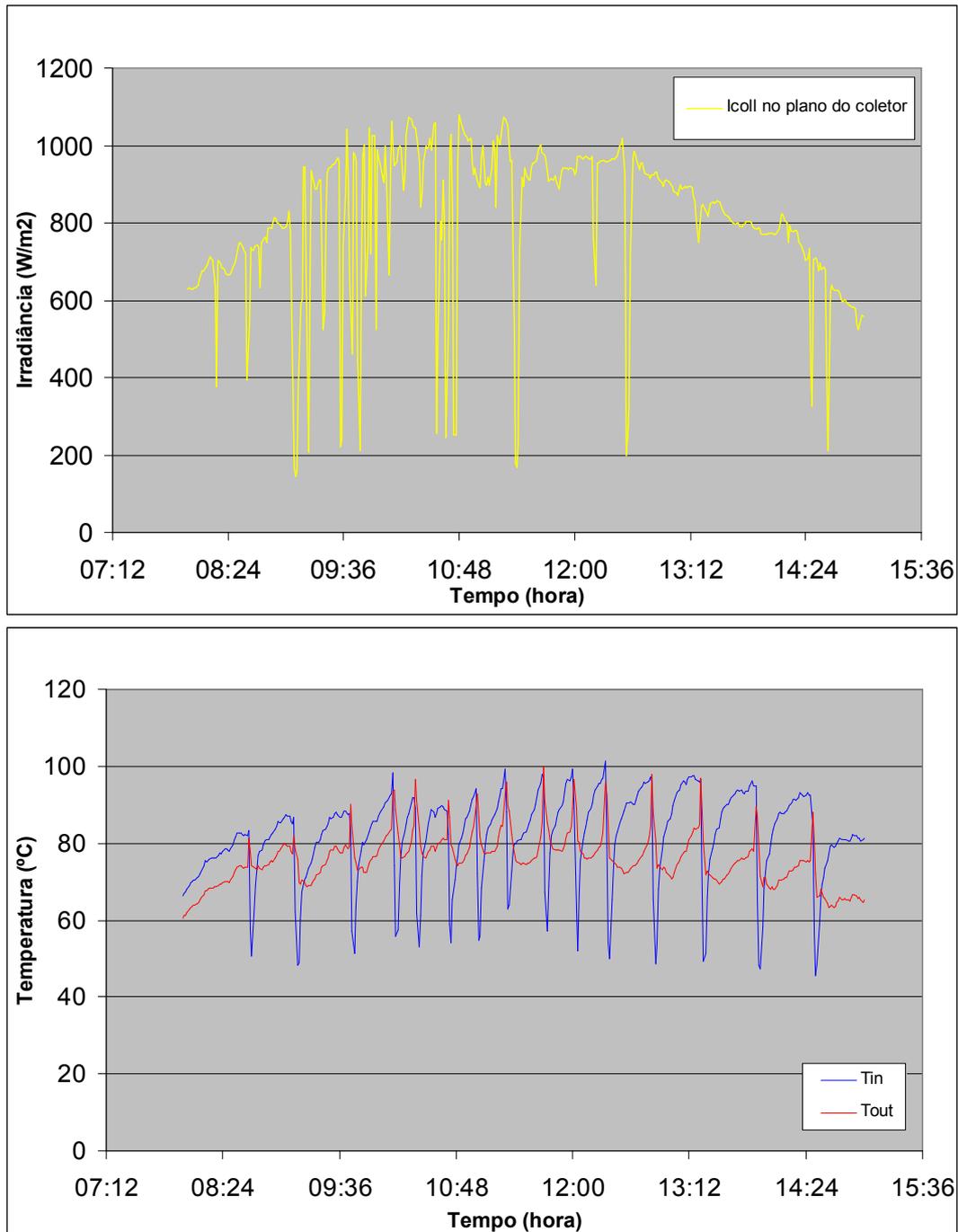


Figura 35. Variação de I_{coll} , T_{in} e T_{out} com o tempo, no dia 04/02/11.

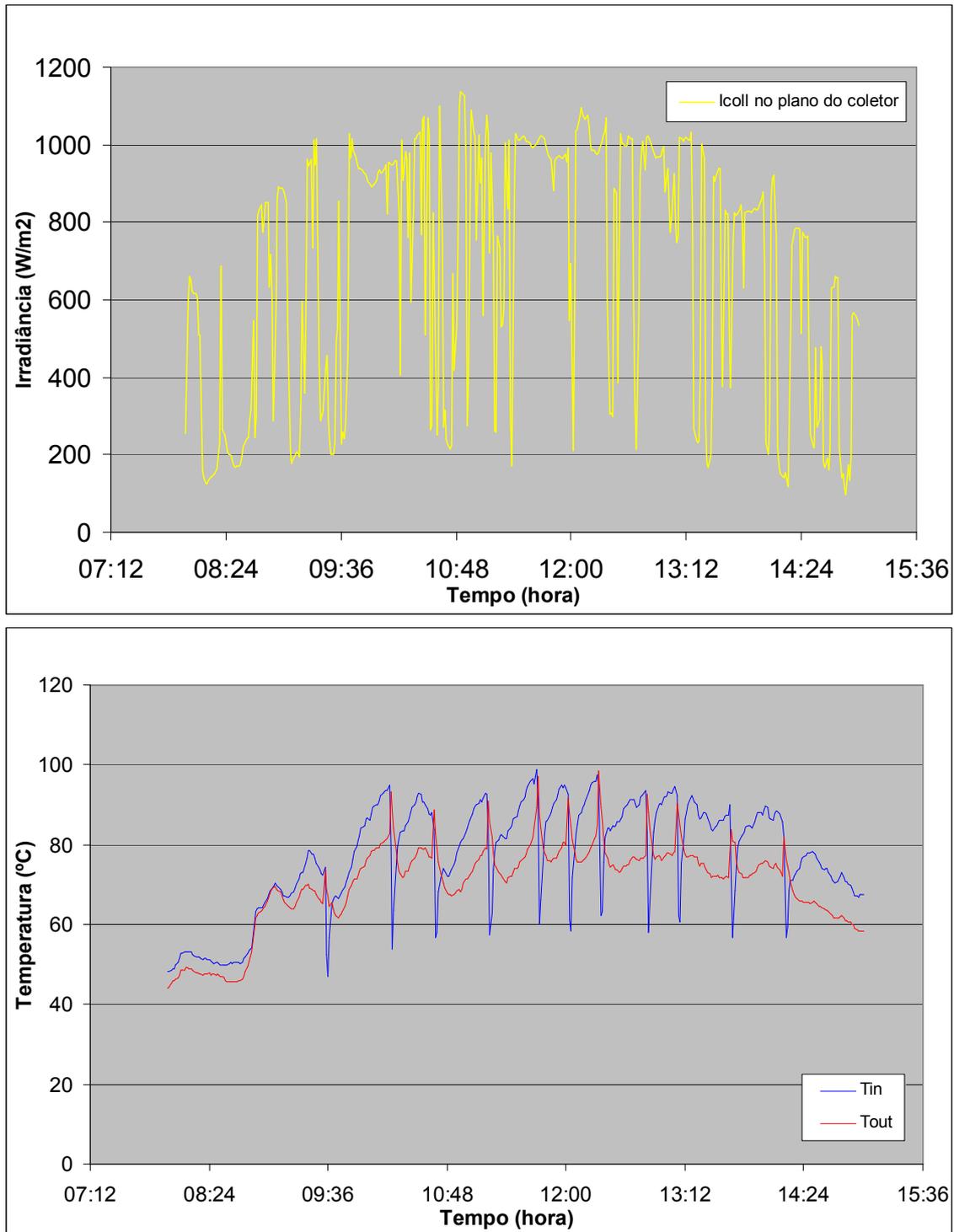


Figura 36. Variação de I_{coll} , T_{in} e T_{out} com o tempo, no dia 26/03/11.

Diferentemente da configuração em temperatura fixa, o modo de tratamento aleatório torna o sistema bastante versátil por executá-lo em uma ou mais temperaturas, podendo reduzir assim o “ Δt_i ” e consequentemente aumentar a frequência de bateladas.

Diante destes fatos, o tratamento em temperatura fixa mostra-se inadequado para aplicações em que se deseja uma alta produtividade, uma vez que o sistema não possui controle de temperatura e a irradiância varia muito com o tempo.

Em dias nebulosos, foram observadas descontinuidades nas temperaturas em qualquer nível de tratamento. As descontinuidades foram provocadas pela redução considerável de irradiância direta no coletor com a passagem de nuvens ou ocorrência de chuva, o que compromete o aquecimento da água e a conseqüente diminuição da frequência de bateladas.

Outro resultado provido pelo sistema de controle foi a caracterização do ciclo de tratamento, ou seja, a batelada. Se a irradiância é parcialmente constante em níveis suficientes para aquecer a água acima do “Set-Point” de tratamento, após o início do processo, as temperaturas “ T_{in} ” e “ T_{out} ” assumem um comportamento particular inerente ao sistema, como pode ser visto na Figura 37. Para a análise desse comportamento, o sistema foi monitorado sem e com recuperação de calor no modo de operação com temperatura fixa de 75°C. “ T_{in} ” e “ T_{out} ” são respectivamente as temperaturas de entrada e saída para cada batelada. Ao comparar cinco bateladas no “Set-Point_{75°C}” que ocorreram nos dias 31/01/11 e 28/02/11, com irradiâncias médias de 632 e 759 W/m² respectivamente, observa-se um padrão comportamental das temperaturas de entrada e saída no momento da descarga da água tratada.

A Figura 37 mostra o comportamento de um ciclo de tratamento em um intervalo de vinte e um minutos para cinco bateladas, nos dias 31/01/11 ($H_{coll} = 19,2$ MJ/m²) e 28/02/11 ($H_{coll} 16,0$ MJ/m²). O comportamento se dá no monitoramento das temperaturas de entrada e saída, no momento em que ocorrem as bateladas. O sistema de controle foi configurado em modo de tratamento com temperatura fixa de 75°C (Set-Point_{75°C}) para a obtenção do comportamento individual das bateladas.

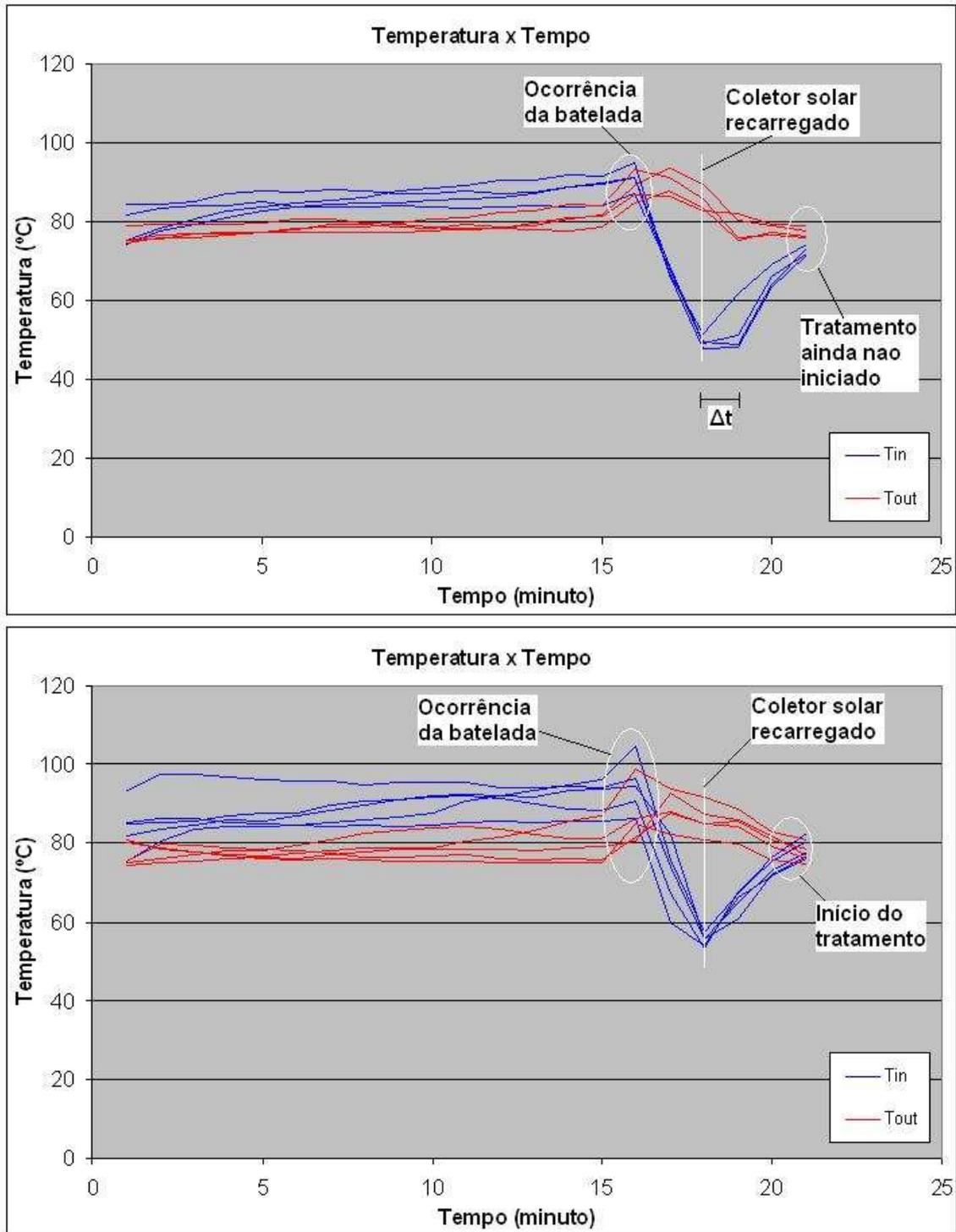


Figura 37. Variação de T_{in} e T_{out} sem, e com, recuperação de calor no "Set-Point_{75°C}".

Ao comparar os comportamentos das bateladas sem e com recuperação de calor, verifica-se que no momento da descarga (ocorrência da batelada), a temperatura de saída aumenta e a de entrada diminui consideravelmente até o momento da recarga. Nas bateladas sem recuperação de calor, observa-se que a temperatura de entrada necessita

de um intervalo de tempo maior para se elevar (Δt), e também ocorre um atraso no reinício do ciclo de tratamento. Com recuperação de calor, observa-se que a elevação da temperatura de entrada ocorre rapidamente após a recarga, onde o “Set-Point” também é atingido mais rapidamente devido ao pré-aquecimento da água na recarga do coletor. O ganho de calor adquirido pela água de recarga do sistema permite iniciar um novo tratamento mais rapidamente, aumentando a frequência de bateladas e caracterizando um aumento na eficiência do sistema. Como pôde ser visto, por exemplo, se a batelada ocorrer em valores maiores ou iguais a 75°C, a temperatura de saída se mantém acima de 65°C mesmo após a descarga total do coletor. Ao ser novamente preenchido, a temperatura de entrada alcança essa temperatura mais rapidamente o “Set-Point” do que sem recuperação de calor, porque a água entrou pré-aquecida.

Anteriormente, mencionou-se que o ciclo de pasteurização neste sistema é iniciado a partir do momento que um dos contadores é disparado. Após esse instante, as temperaturas de entrada e saída continuam a subir porque não existe o controle da temperatura. Isso mantém o contador ativado mesmo com pequenas variações de irradiância por causa da capacidade térmica do sistema. No momento que o período de tratamento é concluído, a massa de água vaza pela saída do coletor, configurando uma variação comportamental das temperaturas. A temperatura de entrada começa a diminuir por perder o contato com o fluido e a de saída a aumentar até o fim da descarga, já que o volume que se encontrara na parte superior do coletor possuía temperatura mais elevada. No final de uma batelada a água fria adentra o coletor com a abertura da válvula de entrada. Ao mesmo tempo na saída do coletor, a temperatura tende a cair mais lentamente, se mantendo acima da temperatura de tratamento anterior.

Na Figura 38, os oscilogramas das temperaturas mostram que a temperatura de entrada está sempre acima dos valores de saída. Durante as horas de Sol, essa diferença nas temperaturas tem relação direta com a inclinação do coletor, pois por diferença de densidade, as moléculas mais quentes da água se concentram no ponto mais alto do coletor. Com o por do Sol há uma tendência das temperaturas diminuírem devido às perdas térmicas para o ambiente. Esse comportamento pode ser verificado nos gráficos a seguir, os quais indicam que neste período de ausência solar as temperaturas variaram entre 22°C e 28°C.

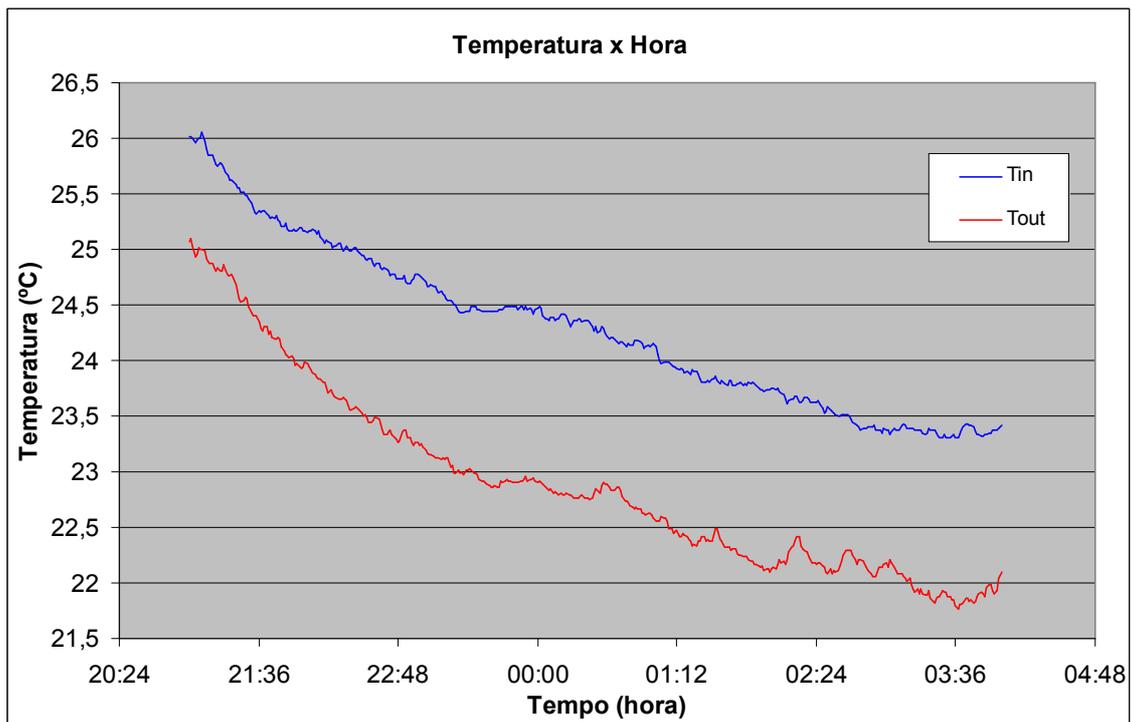
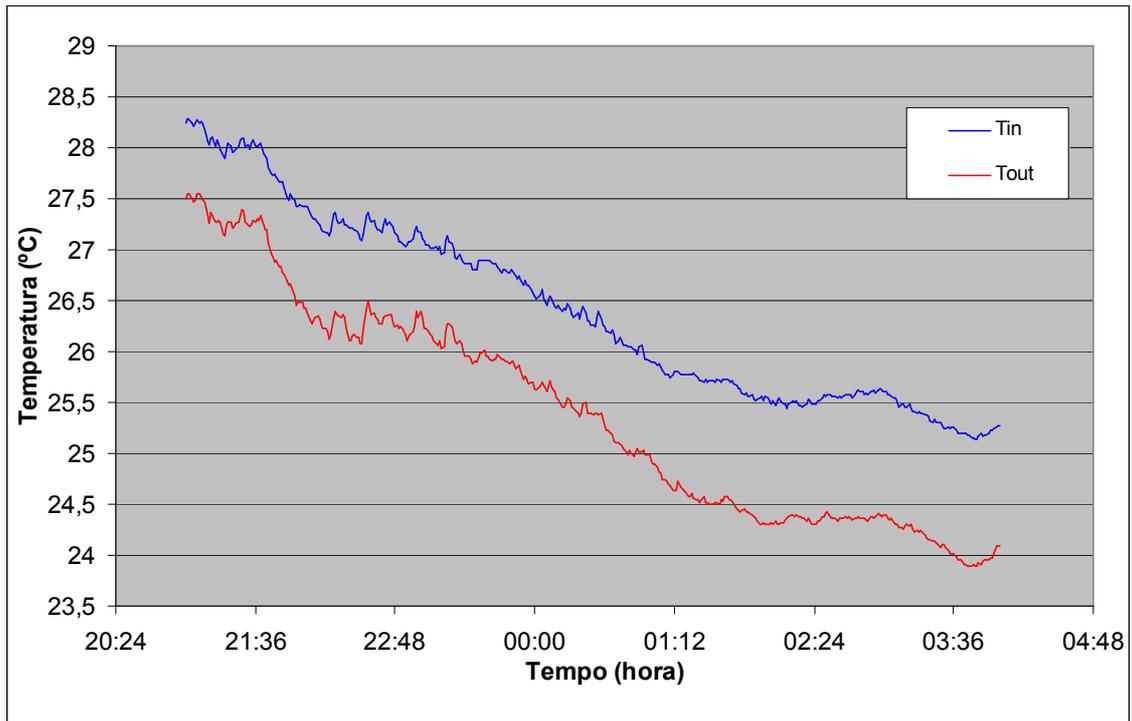


Figura 38. Variações das temperaturas de entrada e saída nos horários entre as 20 horas (PM) e 4 horas (AM).

5.2 Desempenho do protótipo

Durante a experimentação foi possível monitorar o sistema “sem e “com” recuperação de calor, e obter os valores de: irradiância média diária instantânea; irradiância acumulada; produtividade e consumo elétrico das válvulas.

A tabela 3 demonstra que o consumo das válvulas atingiu um valor máximo de 3,87 Wh nos dias 18 e 27 de novembro, cujos respectivos I_{coll} foram de 787,7 W/m² e 766,5 W/m², e o valor mínimo no dia 14 de novembro, gerando um consumo mínimo de 0,67 Wh.

Tabela 3. Desempenho diário do protótipo sem recuperação de calor.

	[W/m ²]	[MJ/m ²]	[Bateladas]	[Wh/dia]
Datas	I_{coll}	H_{coll}	Produção	Consumo
1/nov/10	587,5	14,9	2	1,07
2/nov /10	629,0	16,8	3	1,47
3/nov /10	574,4	14,5	2	1,07
4/nov /10	606,8	15,3	3	1,47
6/nov /10	710,3	18,0	6	2,67
10/nov/10	606,3	15,3	4	1,87
11/nov/10	576,9	14,6	2	1,07
12/nov/10	758,4	19,2	6	2,67
13/nov/10	638,4	16,1	4	1,87
14/nov/10	574,5	14,5	1	0,67
15/nov/10	555,1	14,0	2	1,07
16/nov/10	759,7	19,2	5	2,27
17/nov/10	758,3	19,2	6	2,67
18/nov/10	787,7	19,9	8	3,47
21/nov/10	738,9	18,7	5	2,27
23/nov/10	717,0	18,1	6	2,67
24/nov/10	681,6	17,2	5	2,27
25/nov/10	592,7	15,0	3	1,47
26/nov/10	634,4	16,0	5	2,27
27/nov/10	766,5	19,4	8	3,47
28/nov/10	711,2	18,0	6	2,67

A tabela 4 demonstra que o consumo das válvulas atingiu um valor máximo de 6,27 Wh nos dias 04, 18 e 20 de fevereiro, cujos respectivos “ I_{coll} ” foram de 763,3 W/m^2 , 743,8 W/m^2 e 697 W/m^2 . No dia 24 de março observa-se que houve apenas duas bateladas, gerando um consumo mínimo de 1,07 Wh.

Tabela 4. Desempenho diário do protótipo com recuperação de calor.

	[W/m ²]	[MJ/m ²]	[Bateladas]	[Wh/m ²]
Datas	I_{coll}	H_{coll}	Produção	Consumo
1/fev/11	626,3	17,2	12	5,07
2/fev/11	652,3	17,2	11	4,67
3/fev/11	445,5	11,9	5	2,27
4/fev/11	763,3	20,5	15	6,27
5/fev/11	600,9	15,9	10	4,27
7/fev/11	622,9	16,4	11	4,67
15/mar/11	655,0	17,8	13	5,47
16/mar/11	709,7	19,0	14	5,87
17/mar/11	703,5	18,8	14	5,87
18/mar/11	743,8	19,9	15	6,27
19/mar/11	676,9	18,0	13	5,47
20/mar/11	697,0	18,6	15	6,27
21/mar/11	630,4	16,9	10	4,27
22/mar/11	669,3	17,8	13	5,47
23/mar/11	632,9	16,9	13	5,47
24/mar/11	378,5	10,3	2	1,07
25/mar/11	616,2	17,0	12	5,07
26/mar/11	646,6	17,2	11	4,67

Ao analisar as duas tabelas, verificou-se que a correspondência entre o consumo e a irradiância pode ser representada por um modelo linear. Na prática, o consumo das válvulas foi considerado o consumo total do sistema eletrônico de controle, já que o mesmo funciona com correntes muito pequenas. Assim, os valores de consumo correspondem ao somatório do consumo das válvulas minuto a minuto.

A Figura 39 mostra que existe uma correspondência crescente do consumo das válvulas solenóides com o aumento da irradiância. O gráfico apresenta a relação das grandezas sem, e com recuperação de calor, evidenciando consumos menores que 8 Wh para valores de “ H_{coll} ” próximos de 20 MJ/m².

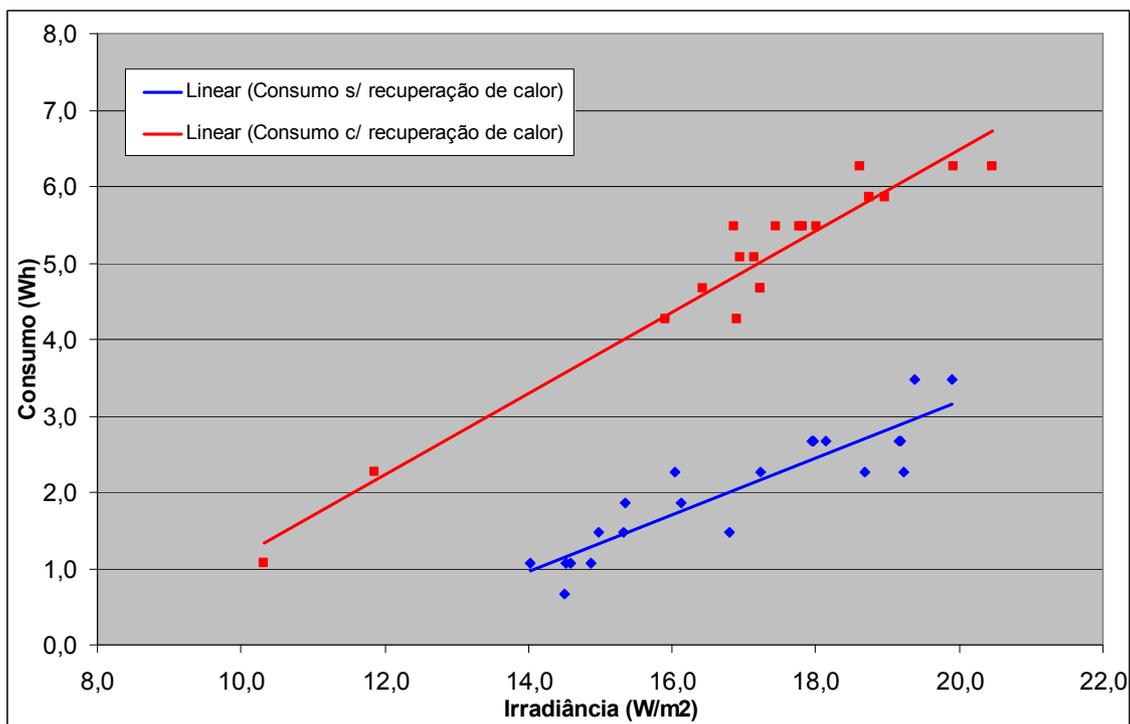


Figura 39. Consumo elétrico das válvulas versus irradiância solar.

O consumo por minuto é de 0,133 Wh, já que a potência individual de cada solenóide é de 8 W. Sabendo que a válvula de saída ao ser acionada dissipa essa potência durante 31 segundos e a de entrada durante 110 segundos, o cálculo do consumo elétrico foi feito superdimensionado, considerando que o tempo mínimo de acionamento fosse de um minuto. Essa condição determina um consumo de 0,399 Wh por batelada. Sendo assim, de acordo com o manual de Instalação de Sistemas Fotovoltaicos para Residências Rurais e Bombeamento de água (TIBA, C.; FRAIDENRAICH, N.; BARBOSA, S. M. E., 1998), pode-se dizer que para um sistema com 1000 litros a serem tratados no semiárido, faz-se necessário um pequeno módulo fotovoltaico com potência menor que 10 W pico.

As Figuras 40 e 41 mostram a produtividade do sistema configurado em tratamento aleatório sem e com recuperação de calor. Cada ponto no gráfico é uma coordenada que relaciona o número de bateladas ocorridas no dia, com o valor integrado de irradiância incidente (H_{coll}).

é 50% maior, pelo fato de o calor ter sido recuperado através de pré-aquecimento da água de entrada no coletor.

No gráfico da Figura 42, observando as retas modeladas e extrapolando-as, foi possível verificar que para ambas as configurações, existe uma irradiação solar de corte ($H_{\text{crítico}}$), aquela cujo valor igual ou abaixo resulta em produção zero de água. Para o sistema configurado com recuperação de calor, a energia de corte está em torno de $8,3 \text{ MJ/m}^2$, enquanto que sem recuperação de calor em $12,2 \text{ MJ/m}^2$. Conforme o Atlas Solarimétrico do Brasil, em Pernambuco os valores mínimos de " H_{coll} " são da ordem de $14,4 \text{ MJ/m}^2$ e, portanto, permite concluir que o equipamento sempre funcionará com ou sem recuperação de calor, embora seja indicada a sua utilização em períodos de alta irradiação solar.

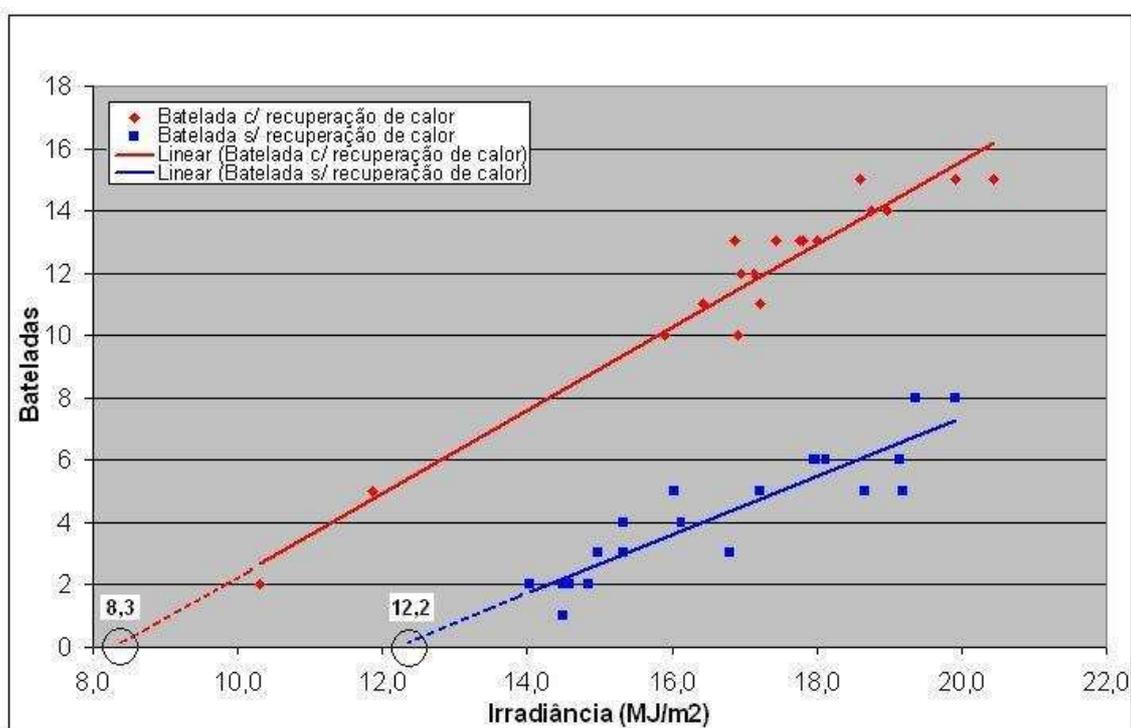


Figura 42. Comparação entre as tendências de produtividades apresentadas pelo protótipo.

Nos dias de alta irradiação, eventualmente quando na entrada do coletor a temperatura se eleva ao ponto de ebulição da água, constata-se que a eficiência térmica do coletor é afetada. Isto ocorre devido ao aumento da temperatura média de operação do coletor. De acordo com a curva característica do mesmo (Figura 9), é possível verificar que nessa condição o coletor trabalha com eficiência abaixo de 20%

considerando “ I_{coll} ” médio de 1000 W/m². Contudo, apesar de afetar a produtividade, o sistema é capaz de tratar a água em diversas temperaturas de pasteurização, garante o isolamento entre as massas de água e promove precisamente o controle do tempo de tratamento.

5.3 Eficácia do pasteurizador solar automático

Para constatar a eficácia do método de pasteurização solar por bateladas, utilizando as configurações de tratamento de: 3600 segundos à 55°C; 2700 segundos à 60°C; 1800 segundos à 65°C; 900 segundos à 75°C e 15 segundos à 85°C, análises bacteriológicas foram realizadas antes e após o tratamento. A Tabela 5 mostra que a presença de CT. e *Escherichia coli* foi quantificada em todas as amostras coletadas antes e depois do tratamento.

Tabela 5. Resultados das análises bacteriológicas pela técnica dos tubos múltiplos.

Parâmetro Bacteriológico	1º dia de tratamento (55°C)		2º dia de tratamento (60°C)		3º dia de tratamento (65°C)		4º dia de tratamento (75°C)		5º dia de tratamento (85°C)	
	Antes [NMP /100ml]	Depois [NMP /100ml]								
CT.*	14000	< 3	14000	< 3	14000	< 3	14000	< 3	14000	< 3
<i>E. coli</i>	250	< 3	90	< 3	40	< 3	40	< 3	40	< 3

*CT. – Coliformes Totais.

Os valores encontrados para os parâmetros bacteriológicos, nas diversas temperaturas de pasteurização, mostram que a água estava bastante contaminada antes do tratamento. Após submeter água coletada ao tratamento com a tecnologia de pasteurização solar, os resultados analisados a partir da tabela de Hoskins (STANDARD METHODS FOR EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER, 2005) indicaram potabilidade da água, uma vez que o número mais provável (NMP) dos indicadores de contaminação, em 100 ml de cada amostra, foi menor que três (< 3) em todos os tratamentos. Isso indica que todos os tubos podem ser considerados negativos de acordo com a tabela de Hoskins.

Para assegurar os resultados obtidos após a pasteurização solar, na análise quantitativa, realizou-se uma análise qualitativa que evidenciou a ausência de contaminação pelos indicadores preconizados na Portaria N.º 518, anteriormente citada.

Remetendo os resultados ao sistema de tratamento com energia solar, pode-se afirmar que além da eficácia do processo de pasteurização, a aniquilação de micro-organismos patogênicos foi garantida para todas as temperaturas de tratamento e períodos de tratamento pré-estabelecidos.

As Figuras 43 e 44 mostram os resultados laboratoriais antes e após o tratamento feito pelo sistema de pasteurização solar. Antes do tratamento, todas as alíquotas (de 1, 0,1 e 0,01 ml) apresentaram contaminação por coliformes totais, verificados pela coloração esverdeada dos tubos. Nos tubos onde foi detectada a presença de coliformes totais, verificou-se também a presença de *E. coli* na maioria das alíquotas. Após o tratamento utilizando o sistema de pasteurização solar desenvolvido, observa-se que houve a inativação de ambos os indicadores através da transparência dos tubos.



Figura 43. Resultados positivos para coliformes totais.

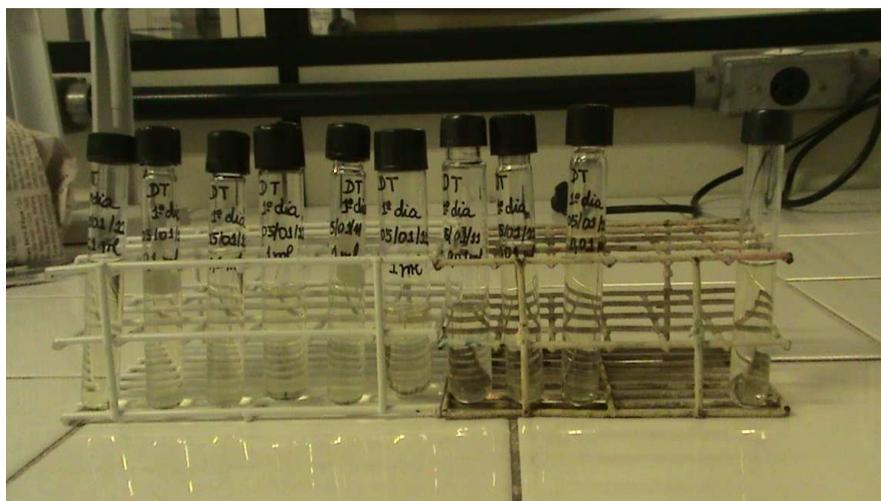


Figura 44. Resultados negativos para coliformes totais e *E. coli*.

6 CONCLUSÕES

- O sistema de controle desenvolvido assegura que a massa de água em tratamento seja completamente isolada da massa de água contaminada;
- O protótipo apresenta versatilidade de tratamento, podendo tratar um lote de água contaminada em uma ampla faixa de temperaturas de pasteurização;
- A ebulição indesejada que ocorria intermitentemente, reduzindo assim a produtividade do sistema, foi contornada recuperando a água que seria desperdiçada através do respirador;
- O sistema apresenta-se bastante promissor para a região do semiárido, pois em dias de céu claro, com irradiâncias em torno de 20 MJ/m^2 , o protótipo é capaz de produzir cerca de 30 litros de água tratada por dia;
- As análises bacteriológicas demonstraram que o pasteurizador solar automático é eficaz na inativação de indicadores de poluição que tornam a água imprópria para o consumo humano;
- O sistema de controle permite configurar diversas temperaturas de tratamento como “Set-Point”, assim como ajustar com precisão o tempo de tratamento de uma respectiva temperatura de pasteurização (Set-Point_i);
- O sistema viabiliza a utilização de alimentação fotovoltaica por ter um baixo consumo de eletricidade durante todo o dia de funcionamento, não ultrapassando 10 Wh/dia ;
- A produtividade do sistema pode ser melhorada a partir: da utilização de coletores solares térmicos mais eficientes (ex.: tubo evacuado); da programação de vários “Set-Points” intermediários (ex.: $65\text{-}75^\circ\text{C}$); do aumento da área de coleta e do volume a ser tratado, podendo resultar na produção de mais de 100 (cem) litros/ m^2 em um dia;
- Em dias com irradiâncias próximas de 20 MJ/m^2 , o protótipo consegue suprir a demanda diária de água tratada para 15 habitantes de uma comunidade remota.

6.1 Sugestões para trabalhos futuros

- Realizar testes com o sistema de pasteurização solar automático, utilizando coletores do tipo CPC e coletores de tubo evacuado;
- Aperfeiçoar o sistema de controle quanto aos “Set-Points” de pasteurização programáveis, visando o aumento da produtividade diária;
- Realizar estudos sobre o comportamento térmico do pasteurizador solar para modelagem;

- Utilizar o pasteurizador solar automático para testes de eliminação de *Pseudomonas aeruginosa*, bactérias heterotróficas, parasitos e cistos;

REFERÊNCIAS

- ACRA, A.; JURDI, M.; MUALLEM, H.; KARAHAGOPIAN, Y.; RAFFOUL, Z. Water disinfection by solar radiation: assessment and application. International Development Research Center, P; P. Box 8500, Ottawa, Ontario, Canada. 1991.
- ANDREATTA, D.; YEGIAN, D.; CONNELLY, L.; METCALF, R. Recent advances in devices for the heat pasteurization of drinking water in the developing world. Proceedings of the 29th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, p. 1741–1746. 1994.
- AZRAG, E. Personal communication. Water for People, National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado. 1996.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa nº 62, de 26 de agosto de 2003. Oficializada os Métodos Analíticos Oficiais para Análise Microbiológica para Controle de Produtos de Origem Animal e Água. Diário Oficial da União de 18/09/2003, Seção 1, p. 14, 2003.
- BURCH, J. D.; THOMAS, K.E. Solar thermal water pasteurization. Submitted for publication at 1998 ASES Conference. 1998-
- BURCH, J. D.; THOMAS, K.E. An overview of water disinfection in developing countries and the potential for solar thermal water pasteurization. NREL/DE-AC36-83CH10093. 1998.
- BURCH, J. D.; THOMAS, K.E. Water disinfection for developing countries and potential for solar thermal pasteurization. Solar Energy, v. 64, n. 1–3, p. 87–97. Golden, CO 80401, U.S.A. 1998.
- CONBOY, M. J.; GOSS, M. J. Natural protection of groundwater against bacteria of fecal origin. Journal of Contaminant Hydrology, v.43, p. 1–24. 2000.
- DEGRÉMONT, Water treatment handbook. New York: John Wiley & Sons. 1979.
- DUFF, W. S.; HODGSON, D. Evacuated tubular collector water pasteurization systems. Department of Mechanical Engineering, Colorado State University, Fort Collins CO 80523, USA. 2010.
- DUFF W. S.; HODGSON D. A simple high efficiency solar water purification system. Department of Mechanical Engineering, Colorado State University, fort Collins, Colorado 80524, USA. 2004.
- ELLIS, K. V. Water Disinfection: A review with some consideration of the requirements of third world. Critical Reviews in Environmental Control; v. 20, n. 5, 6, p. 341–407. 1991.

- EPA Guidance Manual for Compliance with the Filtration and Disinfection Requirements for Public Water Systems Using surface Water Sources. Washington, D.C.; U.S. Environmental Protection Agency. 1991.
- ESREY, S. A.; POTASH, J. B.; ROBERTS, L.; SHIFF, C. Effects of improved water supply and sanitation on ascariasis, diarrhea, dracunculiasis, hookworm infection, schistosomiasis and trachoma. Bulletin of the world health organization, v. 65, n. 5, p. 609–621. 1991.
- FAIR, G. M.; GEYER, J. C.; OKUM, D. A. Water and wastewater engineering. New York: John Wiley & Sons. 1954.
- FEACHEM, R. E.; BRADLEY, D. J.; GARELICK, H.; MARA, D. D. Sanitation and disease: health aspects of excreta and wastewater management. New York: John Wiley and Sons. 1983.
- FEACHEM, R.; MCGARRY, M.; MARA D. Water, wastes, and health in hot climates. Chichester, UK: John Wiley and Sons. 1997.
- FAYER, R.; TROUT, J. M.; GRACZKY, T. K.; LEWIS, E. J. Prevalence of *Cryptosporidium parvum*, *Giardia* sp and *Eimeria* sp infection in post-weaned and adult cattle in three Maryland farms. Veterinary Parasitology, v. 93, p. 103–112. 2000.
- GADGIL, A. J.; SHOWN, L. J. To Drink without risk: The use of ultraviolet light to disinfect drinking water in developing countries. 1997. Disponível em: <<http://eetd.lbl.gov/iep/archive/uv/drink.html>>.
- GELDREICH, E. E. The bacteriology of water. In: Microbiology and microbial infections. 9th ed. London: Arnold; 1998.
- GONZALEZ, R.G., TAYLOR ML, ALFARO G. Estudio bacteriano del agua de consumo em una comunidad Mexicana. Boletín de la Oficina Sanitaria Panamericana, v. 93, p.127–40. 1982.
- GRABOW, W. Waterborne diseases: update on water quality assessment and control. Water S.A, v. 22, p. 193–202. 1996.
- HARP, J. A.; FAYER, R.; PESCH, B. A.; JACKSON, G. J. Effect of pasteurization on infectivity of *Cryptosporidium parvum* oocysts in water and milk. Applied Environmental Microbiology, v. 62, p. 2866 – 2868. 1996.
- KENJO, L.; CACCAVELLI, D.; INARD, C. A model of a low flow solar domestic hot water system. Laboratoire d'Étude des Phénomènes de Transfert Appliqués au Bâtiment (LEPTAB) Pôle. Sciences et Technologies, FRANCE. 2003.
- LAUBUSCH, E. J. Chlorination and other disinfection processes. In: Water Quality and Treatment: A Handbook of Public Water Supplies (American Water Works Association), p. 158-224, New York: McGraw-Hill Book Company. 1971.

MARQUEZ, I.; LEZAMA-DAVILA, C. M.; KU-PECH, R. P.; TAMAY-SEGOVIA, P. Calidad sanitaria de los suministros de água para consumo humano en Campeche. Salud Pública del México, v.36, p. 655 – 61. 1994.

MINISTÉRIO DA SAÚDE, Secretaria de Vigilância em Saúde. “Comentários sobre a portaria MS N.º 518/2004”. Subsídios para implementação. Ed. do Ministério da Saúde. Brasília-DF, 2005.

MEYER, S. T. O uso de cloro na desinfecção de águas, a formação de trihalometanos e os riscos potenciais à saúde pública. Caderno de Saúde Pública, Rio de Janeiro, v. 10, n.1, p. 99-110. 1994.

METCALF, R.; POLINELLI, C. The science of safe water. Newsletters, 2002. Disponível em: <<http://solarcooking.org/newsletters/scrnov02.htm#water>>. Acesso em 9 nov. 2010, 10:36:12.

NATIONAL SEMICONDUCTOR CORPORATION. LM 35 Datasheet. Disponível em: <<http://www.national.com/ds/LM/LM35.pdf>>. Acesso em 24 jun. 2011, 17:50:10.

PADHYE, N. V.; DOYLE, M. P. *Escherichia coli* 0157:H7: Epidemiology, pathogenesis, and methods for detection in foods. Journal of Food Protection, v.55, n.7, p.555-565. 1992.

PARRY, J. V.; MORTIMER, P. P. The heat sensitivity of hepatitis A virus determined by a simple tissue culture method. Journal of Medical Virology, v. 14, n. 3, p. 277–283. 1984.

PELCZAR, M. J.; Chan, E.C.S, Krieg, N.R.. Microbiologia. Conceitos e Aplicações. v.1. São Paulo: Makron Books, 476p. 1996.

PORTARIA 518/2004. Padrão de potabilidade da água para consumo humano. Ministerio da Saúde, Brasília. 2004.

RABL, A. Active solar collectors and their applications. Presented at Center Energy and Environmental Studies Princeton University, Oxford, NY. 1985.

ROSSIN, A. C.; Desinfecção. In: Técnica de Abastecimento e Tratamento de Água (Tratamento de Água), v. 2, São Paulo: CETESB/ASCE-TEB. 1987

STANDARD METHODS FOR EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER. 21th Edition. Washington, D.C., American Public Health Association, 2005.

SCHULZ, C.R.; OKUN, D.A. Treating surface waters for communities in developing countries. Journal of the American Water Works Association, v. 75, n. 5, p. 212–219, 1983.

SCHULZ, C.R.; OKUN, D.A. Surface water treatment for communities in developing countries. New York: John Wiley and Sons. 1984.

SCHEIR, R.; FENCL, F. UVC and indoor air quality. *Heating, Piping, Air Conditioning Magazine*, v. 68, n. 2, p.109. 1996.

SOBSEY, M. D.; HANDZEL, T.; VENCZEL, L. Chlorination and safe storage of household drinking water in developing countries to reduce waterborne disease. *Water Science and Technology*, v. 47, n. 3, p. 221–228. 2003.

SOBSEY, M.. Managing water in the home: accelerated health basis of improved water supply. *Protection of the Human Environment Water, Sanitation and Health*. Geneva, 2002.

STEVENS, R. J.; RUTHER, J. An investigation of a solar pasteurizer with and integral heat exchanger (SPIHX). Submitted for ASES SOLAR 98 Conference Proceedings. North Carolina State University, Raleigh, NC 27695. 1998.

STEVENS, R. J.; JOHNSON, R.; ECKERLIN, H. An investigation of a solar pasteurizer with in integral heat exchanger (SPIHX). In: *Proceedings of the 1998 Annual Conference of the American Solar Energy Society*, 14–17 June, Albuquerque, New Mexico, American Solar Energy Society, Boulder, Colorado, p. 383–388. 1998.

STUKEL, T. A.; GREENBERG, E. R.; DAIN, B. J.; REED, F. C., JACOBS, N. J. A. Longitudinal study of rainfall and coliform contamination in small community drinking water supplies. *Environmental Science Technology*, v.24, p. 571–575, 1990.

TIBA, C. *et al.*, Atlas Solarimétrico Brasileiro: Banco de Dados Terrestres. Editora Universitária da UFPE, Recife, 2000.

TIBA, C.; FRAIDENRAICH, N.; BARBOSA, S. M. E. Instalação de sistemas fotovoltaicos para residências rurais e bombeamento de água, ISBN 85-7315-118-8, Recife PE, Editora Universitária UFPE, 1999.

UNICEF. United Nations Children's Fund / The State of the World's Children. Oxford, UK: Oxford University Press. 1995.

VENTUROLI, T. Dossiê Água: Desperdício, mau uso e poluição das fontes ameaçam a humanidade com o fantasma da sede. *Revista Atualidades Vestibular*, ed. Abril, Recife, edição 9, p. 24 – 43. 2009

WEGELIN, M. *et al.* Solar water disinfection: scope of the process and analysis of radiation experiments. *Journal of Water Supply Research Technology-Aqua*, v. 43, p. 154-169. 1994.

WEGELIN, M. Water treatment with solar energy. Internal EAWAG/SANDEC report. Available from the author at wegelin@eawag.ch, 1996.

Wilderness Medicine. University of Utah, School of Medicine. 2005.

WOODE, G. N.: “The rotaviruses”. *Archives of Virology*, v. 57, p.1-23. 1978.

WORLD BANK. World Development Report, Washington, D.C.: World Bank. 1994.

APÊNDICE A

Projeto estrutural e mecânico do protótipo

DEPARTAMENTO DE ENERGIA NUCLEAR

GRUPO FAE

ORIENTADOR CHIGUERU TIBA

MESTRANDO GUSTAVO CARIELO

OBRA:

SISTEMA PARA DESCONTAMINAÇÃO MICROBIOLÓGICA DA ÁGUA POR PASTEURIZAÇÃO SOLAR

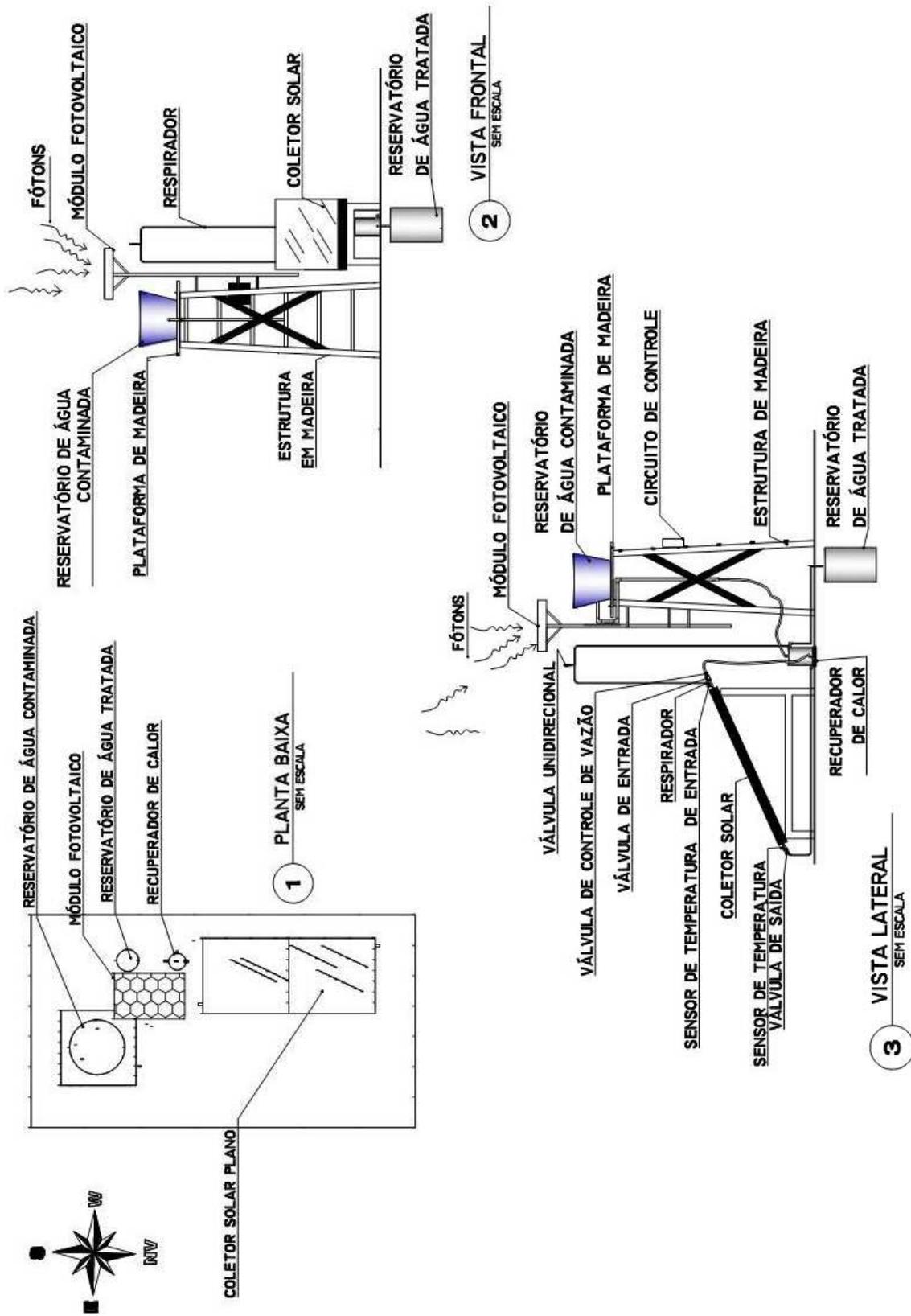
ESCALA:

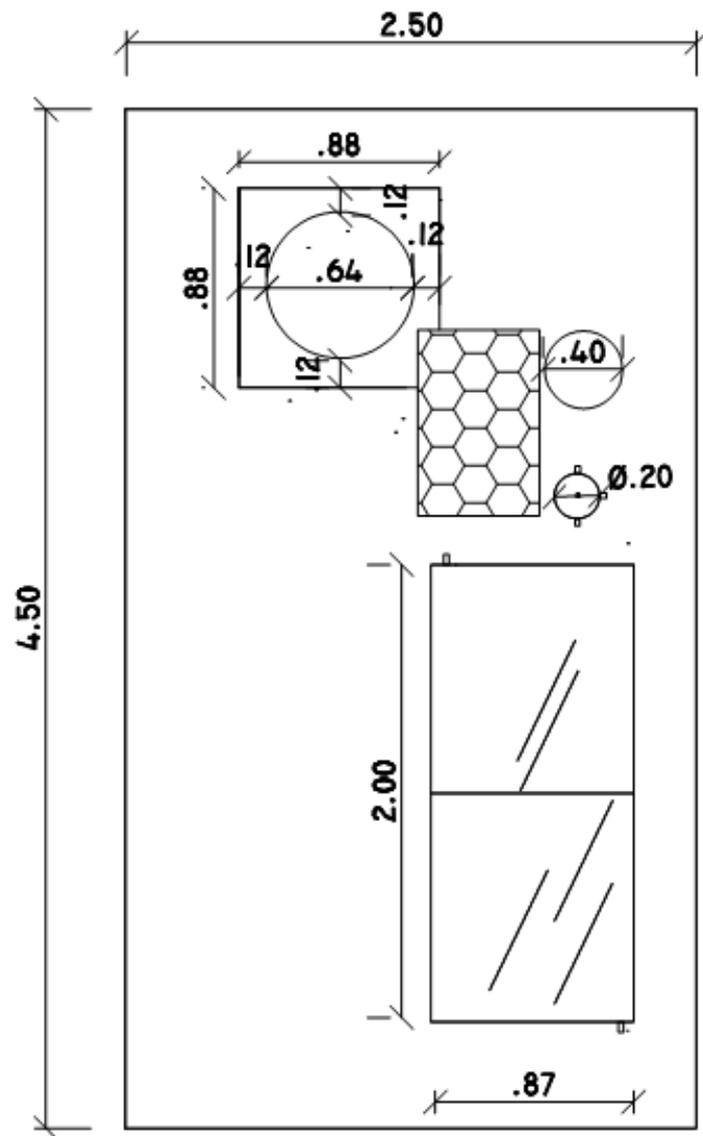
S/ESCALA

DATA:

JULHO/2010

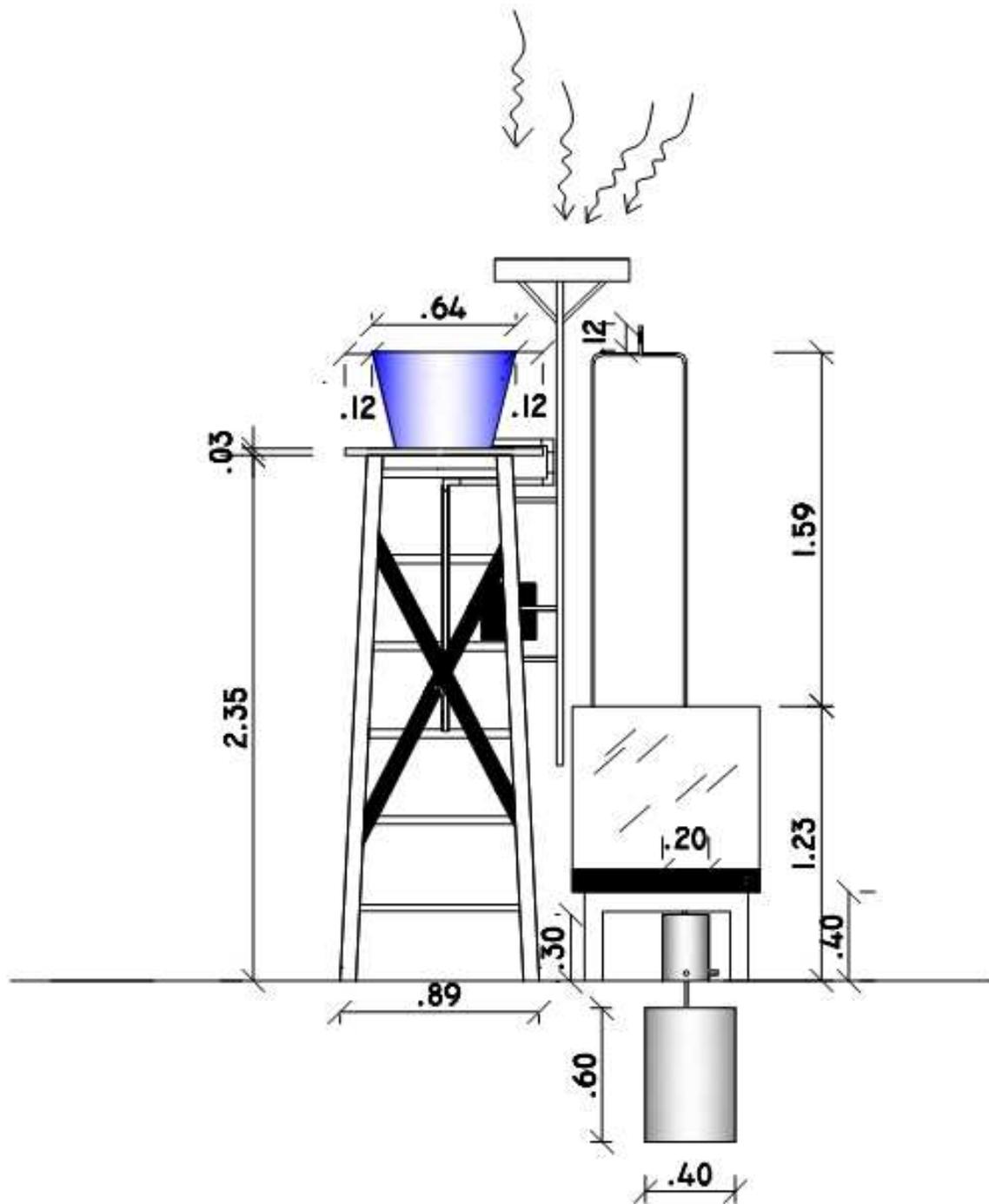
**PROJETO ESTRUTURAL
E MECÂNICO DO
PROTÓTIPO**





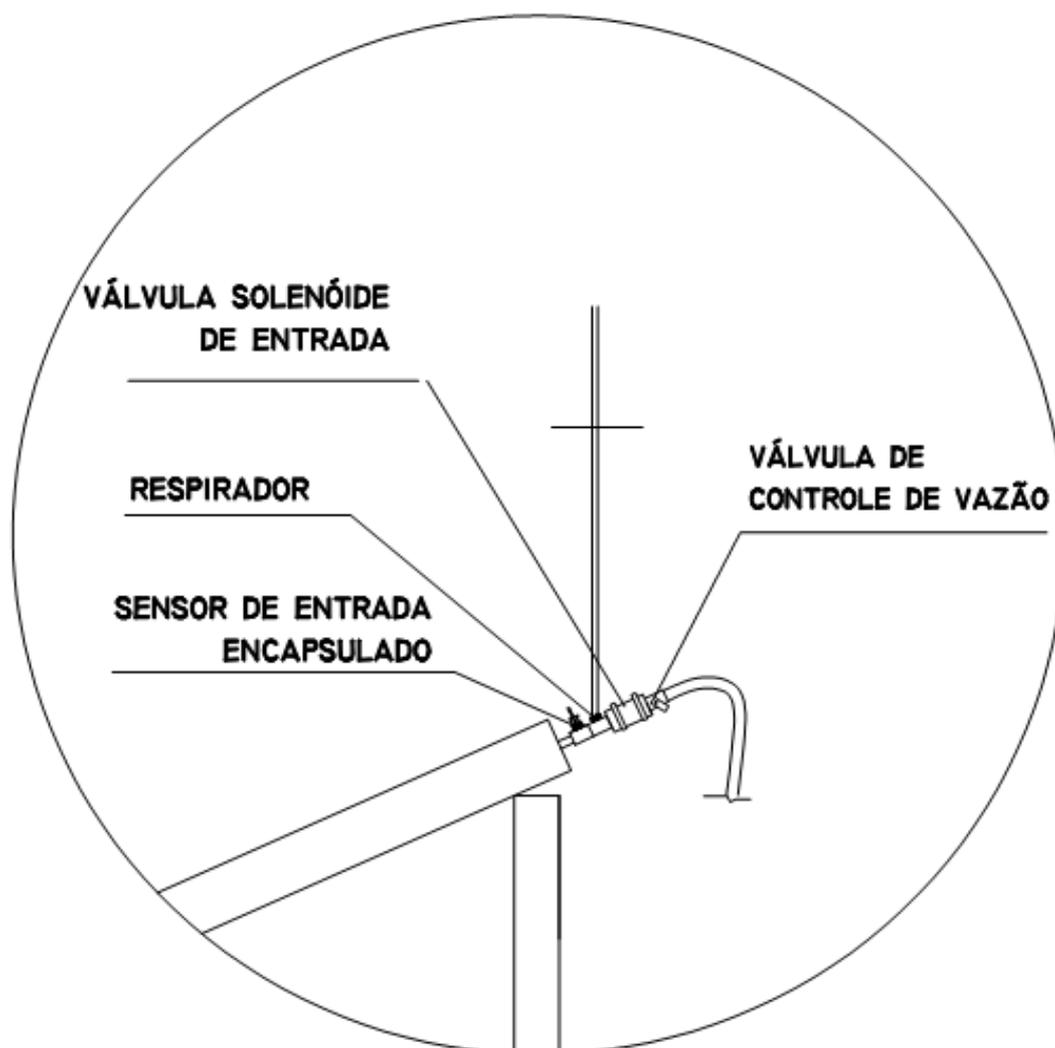
1

PLANTA BAIXA
SEM ESCALA - UND:METRO



2

VISTA FRONTAL
SEM ESCALA - UND:METRO



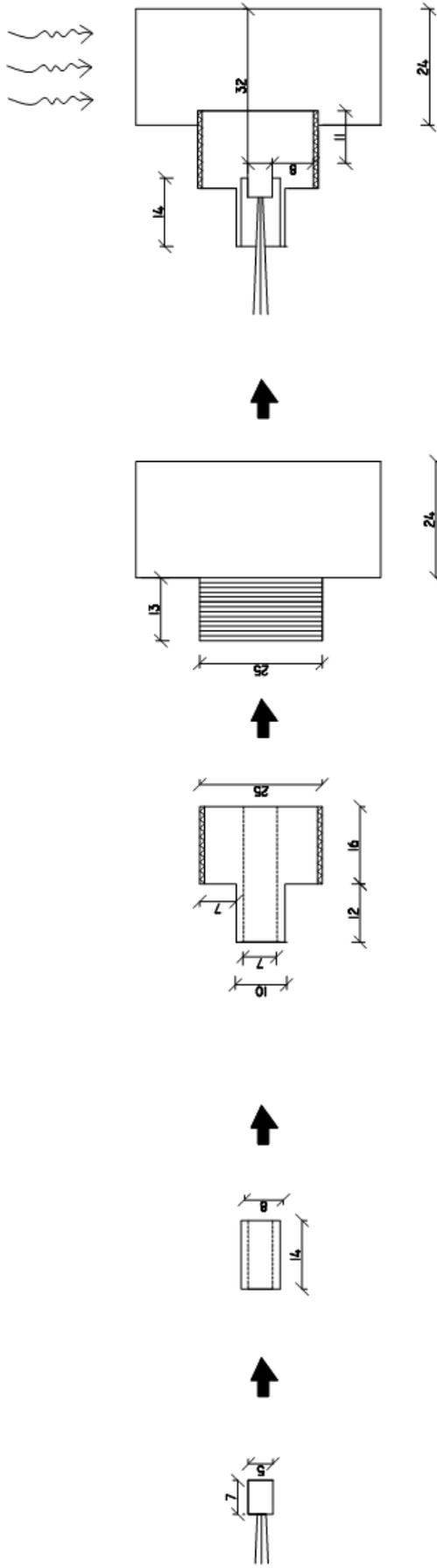
4

DETALHE
SEM ESCALA

APÊNDICE B

Encapsulamento do sensor de temperatura (LM35)

FLUXO DE ÁGUA



SENSOR

MANGUEIRA TRANSP.

"BUJÃO"

CONEXÃO "T"

MONTAGEM

UNIDADE DE MEDIDA: mm (milímetros)

APÊNDICE C

Resultados finais das análises bacteriológicas

1.º dia T: 55°C a 3600s	ANÁLISE ANTES DO TRATAMENTO		
	ANÁLISE DE COLIFORMES TOTAIS		
	ALÍQUOTAS		
RESULTADOS	1ml	0,1ml	0,01ml
	+	+	+
	+	+	+
	+	+	+
pH= 7,48	CONCLUSÃO: 14.000 NMP/100ml		
Turbidez: 5,45NTU			

1.º dia T: 55°C a 3600s	ANÁLISE ANTES DO TRATAMENTO		
	PESQUISA DE <i>E. coli</i>		
	ALÍQUOTAS		
RESULTADOS	1ml	0,1ml	0,01ml
	+	-	-
	+	-	-
	+	-	-
pH= 7,48	CONCLUSÃO: 250 NMP/100ml		
Turbidez: 5,45NTU			

1.º dia T: 55°C a 3600s	ANÁLISE DEPOIS DO TRATAMENTO		
	ANÁLISE DE COLIFORMES TOTAIS		
	ALÍQUOTAS		
RESULTADOS	10ml	1ml	0,1ml
	-	-	-
	-	-	-
	-	-	-
pH= 8,05	CONCLUSÃO: <3,0 NMP/100ml		
Turbidez: 7,29NTU			

1.º dia T: 55°C a 3600s	ANÁLISE DEPOIS DO TRATAMENTO		
	PESQUISA DE <i>E. coli</i>		
	ALÍQUOTAS		
RESULTADOS	10ml	1ml	0,1ml
	-	-	-
	-	-	-
	-	-	-
pH= 8,05	CONCLUSÃO: <3,0 NMP/100ml		
Turbidez: 7,29NTU			

2.º dia T: 75°C a 900s	ANÁLISE ANTES DO TRATAMENTO		
	ANÁLISE DE COLIFORMES TOTAIS		
	ALÍQUOTAS		
	1ml	0,1ml	0,01ml
RESULTADOS	+	+	+
	+	+	+
	+	+	+
pH= 7,48	CONCLUSÃO: 14.000 NMP/100ml		
Turbidez: 4,23NTU			

2.º dia T: 75°C a 900s	ANÁLISE ANTES DO TRATAMENTO		
	PESQUISA DE <i>E. coli</i>		
	ALÍQUOTAS		
	1ml	0,1ml	0,01ml
RESULTADOS	+	-	-
	+	-	-
	-	-	-
pH= 7,48	CONCLUSÃO: 90 NMP/100ml		
Turbidez: 4,23NTU			

2.º dia T: 75°C a 900s	ANÁLISE DEPOIS DO TRATAMENTO		
	ANÁLISE DE COLIFORMES TOTAIS		
	ALÍQUOTAS		
	10ml	1ml	0,1ml
RESULTADOS	-	-	-
	-	-	-
	-	-	-
pH= 8,72	CONCLUSÃO: <3,0 NMP/100ml		
Turbidez: 9,99NTU			

2.º dia T: 75°C a 900s	ANÁLISE DEPOIS DO TRATAMENTO		
	PESQUISA DE <i>E. coli</i>		
	ALÍQUOTAS		
	10ml	1ml	0,1ml
RESULTADOS	-	-	-
	-	-	-
	-	-	-
pH= 8,72	CONCLUSÃO: <3,0 NMP/100ml		
Turbidez: 9,99NTU			

3.º dia T: 60°C a 2700s	ANÁLISE ANTES DO TRATAMENTO		
	ANÁLISE DE COLIFORMES TOTAIS		
	ALÍQUOTAS		
	1ml	0,1ml	0,01ml
RESULTADOS	+	+	+
	+	+	+
	+	+	+
pH= 7,33	CONCLUSÃO: 14.000 NMP/100ml		
Turbidez: 4,23NTU			

3.º dia T: 60°C a 2700s	ANÁLISE ANTES DO TRATAMENTO		
	PESQUISA DE <i>E. coli</i>		
	ALÍQUOTAS		
	1ml	0,1ml	0,01ml
RESULTADOS	+	-	-
	-	-	-
	-	-	-
pH= 7,33	CONCLUSÃO: 40 NMP/100ml		
Turbidez: 4,23NTU			

3.º dia T: 60°C a 2700s	ANÁLISE DEPOIS DO TRATAMENTO		
	ANÁLISE DE COLIFORMES TOTAIS		
	ALÍQUOTAS		
	10ml	1ml	0,1ml
RESULTADOS	-	-	-
	-	-	-
	-	-	-
pH= 7,73	CONCLUSÃO: <3,0 NMP/100ml		
Turbidez: 3,64NTU			

3.º dia T: 60°C a 2700s	ANÁLISE DEPOIS DO TRATAMENTO		
	PESQUISA DE <i>E. coli</i>		
	ALÍQUOTAS		
	10ml	1ml	0,1ml
RESULTADOS	-	-	-
	-	-	-
	-	-	-
pH= 7,73	CONCLUSÃO: <3,0 NMP/100ml		
Turbidez: 3,64NTU			

4.º dia T: 65°C a 1800s	ANÁLISE ANTES DO TRATAMENTO		
	ANÁLISE DE COLIFORMES TOTAIS		
RESULTADOS	ALÍQUOTAS		
	1ml	0,1ml	0,01ml
	+	+	+
	+	+	+
pH= 7,33	CONCLUSÃO: 14.000 NMP/100ml		
Turbidez: 5,05NTU			

4.º dia T: 65°C a 1800s	ANÁLISE ANTES DO TRATAMENTO		
	PESQUISA DE <i>E. Coli</i>		
RESULTADOS	ALÍQUOTAS		
	1ml	0,1ml	0,01ml
	+	-	-
	-	-	-
pH= 7,33	CONCLUSÃO: 40 NMP/100ml		
Turbidez: 5,05NTU			

4.º dia T: 65°C a 1800s	ANÁLISE DEPOIS DO TRATAMENTO		
	ANÁLISE DE COLIFORMES TOTAIS		
RESULTADOS	ALÍQUOTAS		
	10ml	1ml	0,1ml
	-	-	-
	-	-	-
pH= 7,75	CONCLUSÃO: <3,0 NMP/100ml		
Turbidez: 4,86NTU			

4.º dia T: 65°C a 1800s	ANÁLISE DEPOIS DO TRATAMENTO		
	PESQUISA DE <i>E. coli</i>		
RESULTADOS	ALÍQUOTAS		
	10ml	1ml	0,1ml
	-	-	-
	-	-	-
pH= 7,75	CONCLUSÃO: <3,0 NMP/100ml		
TURBIDEZ: 4,86NTU			

5.º dia T: 85°C a 15s	ANÁLISE ANTES DO TRATAMENTO		
	ANÁLISE DE COLIFORMES TOTAIS		
	ALÍQUOTAS		
RESULTADOS	1ml	0,1ml	0,01ml
	+	+	+
	+	+	+
pH= 7,33	CONCLUSÃO: 14.000 NMP/100ml		
Turbidez: 5,05NTU			

5.º dia T: 85°C a 15s	ANÁLISE ANTES DO TRATAMENTO		
	PESQUISA DE <i>E. coli</i>		
	ALÍQUOTAS		
RESULTADOS	1ml	0,1ml	0,01ml
	+	-	-
	-	-	-
pH= 7,33	CONCLUSÃO: 40 NMP/100ml		
Turbidez: 5,05NTU			

5.º dia T: 85°C a 15s	ANÁLISE DEPOIS DO TRATAMENTO		
	ANÁLISE DE COLIFORMES TOTAIS		
	ALÍQUOTAS		
RESULTADOS	10ml	1ml	0,1ml
	-	-	-
	-	-	-
pH= 8,58	CONCLUSÃO: <3,0 NMP/100ml		
Turbidez: 6,74NTU			

5.º dia T: 85°C a 15s	ANÁLISE DEPOIS DO TRATAMENTO		
	PESQUISA DE <i>E. coli</i>		
	ALÍQUOTAS		
RESULTADOS	10ml	1ml	0,1ml
	-	-	-
	-	-	-
pH= 7,33	CONCLUSÃO: <3,0 NMP/100ml		
Turbidez: 5,05NTU			

ANEXO A

Acesso à água potável em diversos países e regiões

Países e Regiões	População total	População urbana com acesso a água potável	População urbana sem acesso a água potável	População rural com acesso a água potável	População rural sem acesso a água potável
Leste da Ásia	1.338.500,0	408.012,8	40.793,2	610.772,0	278.922,0
China	1.162.200,0	273.000,8	40.793,2	576.916,1	271.489,9
Mongólia	2.300,0	1.357,0	0,0	546,0	396,1
Coréia	43.700,0	32.338,0	0,0	8.635,1	2.726,9
Hong Kong	5.800,0	5.452,0	0,0	334,1	13,9
Japão	124.500,0	95.865,0	0,0	25.339,8	4.295,3
Europa	480.400,0	345.172,6	1.584,4	111.052,4	4.990,6
Romênia	22.700,0	12.485,0	0,0	9.193,5	1.021,5
Bulgária	8.500,0	5.865,0	0,0	2.529,6	105,4
Polônia	38.400,0	22.740,5	1.451,5	11.650,6	2.557,4
Albânia	3.400,0	1.224,0	0,0	2.067,2	108,8
Hungria	10.300,0	6.798,0	0,0	3.326,9	175,1
Grécia	10.300,0	6.592,0	0,0	3.522,6	185,4
Portugal	9.800,0	3.327,1	102,9	5.733,0	637,0
Irlanda	3.500,0	2.030,0	0,0	1.470,0	0,0
Espanha	39.100,0	30.889,0	0,0	8.211,0	0,0
Reino unido	57.800,0	51.442,0	0,0	6.358,0	0,0
Itália	57.800,0	40.460,0	0,0	17.340,0	0,0
Holanda	15.200,0	13.528,0	0,0	1.672,0	0,0
Bélgica	10.000,0	9.600,0	0,0	400,0	0,0
Finlândia	5.000,0	2.970,0	30,0	1.800,0	200,0
França	57.400,0	41.902,0	0,0	15.498,0	0,0
Áustria	7.900,0	4.661,0	0,0	3.239,0	0,0
Alemanha	80.600,0	69.316,0	0,0	11.248,0	0,0
Noruega	4.300,0	3.268,0	0,0	1.032,0	0,0
Dinamarca	5.200,0	4.420,0	0,0	780,0	0,0
Suécia	7.800,0	7.308,0	0,0	1.392,0	0,0
Suíça	6.900,0	4.347,0	0,0	2.553,0	0,0
America Latina	432.400,0	281.790,4	33.898,6	54.755,2	58.355,8
Nicarágua	3.900,0	1.808,0	571,0	319,4	1.201,6
Honduras	5.400,0	2.065,5	364,5	1.425,6	1.544,4
Bolívia	7.500,0	2.964,0	936,0	1.080,0	2.520,0
Peru	22.400,0	10.814,7	5.089,3	1.559,0	4.937,0
Guatemala	9.700,0	3.569,6	310,4	2.502,6	3.317,4
República Dominicana	7.300,0	3.711,3	814,7	1.248,3	1.525,7
Equador	11.000,0	4.019,4	2.360,6	2.032,8	2.587,2
El Salvador	5.400,0	2.114,1	315,9	445,5	2.524,5
Colômbia	33.400,0	20.631,2	3.082,8	7.942,5	1.743,5
Jamaica	2.400,0	1.231,2	64,8	507,8	596,2
Paraguai	4.500,0	1.345,1	860,0	229,5	2.065,5
Costa Rica	3.200,0	1.536,0	0,0	1.397,8	266,2
Panamá	2.500,0	1.350,0	0,0	759,0	391,0
Chile	13.600,0	11.560,0	0,0	428,4	1.611,6
Brasil	153.900,0	112.577,9	5.925,2	21.592,2	13.904,8
Venezuela	20.200,0	16.727,6	1.654,4	654,5	1.163,5
Uruguai	3.100,0	2.759,0	0,0	6,8	334,2
México	85.000,0	59.126,0	3.774,0	9.503,0	12.597,0
Trinidad e Tobago	1.300,0	858,0	0,0	389,0	53,0
Argentina	33.100,0	21.021,8	7.775,2	731,5	3.571,5

Porto Rico	3.600,0	-	-	-	-
Oriente Médio	327.600,0	160.620,9	7.708,1	89.564,8	69.706,2
Paquistão	119.300,0	32.282,6	7.086,4	33.571,0	46.360,0
Iémen	13.000,0	4.030,0	0,0	1.614,6	7.355,4
Jordânia	39.000,0	26.910,0	0,0	11.727,3	362,7
Turquia	58.500,0	37.440,0	0,0	14.742,0	6.318,0
Irã	59.600,0	34.568,0	0,0	18.774,0	6.258,0
Síria	13.000,0	6.033,3	596,7	4.331,6	2.038,4
Omã	1.600,0	167,0	25,0	591,4	816,6
Arábia Saudita	16.800,0	13.104,0	0,0	3.511,2	184,8
Israel	5.100,0	4.692,0	0,0	395,8	12,2
Emirados Árabes	1.700,0	1.394,0	0,0	306,0	0,0
África do Norte	115.600,0	39.966,6	1.203,4	29.962,7	18.167,3
Egito	54.700,0	22.864,6	1.203,4	26.343,5	4.288,5
Marrocos	26.200,0	12.314,0	0,0	2.499,5	11.386,5
Tunísia	8.400,0	4.788,0	0,0	1.119,7	2.492,3
Argélia	26.300,0	-	-	-	-
Ilhas do pacífico e Austrália	25.000,0	18.116,4	24,6	3.809,1	3.049,9
Papua Nova Guiné	4.100,0	385,4	24,6	738,0	2.952,0
Nova Zelândia	3.400,0	2.856,0	0,0	446,1	97,9
Austrália	17.500,0	14.875,0	0,0	2.625,0	0,0
Sudeste da Ásia	1.411.400,0	285.746,0	94.381,0	688.148,2	343.124,8
Bangladesh	114.400,0	8.030,9	12.561,1	83.489,1	10.318,9
Laos	4.400,0	413,6	466,4	880,0	2.640,0
Indonésia	184.300,0	20.641,6	38.334,4	41.356,9	83.967,1
Myanmar	43.700,0	8.630,8	2.294,3	23.598,0	9.177,0
Filipinas	64.330,0	26.311,6	1.980,4	29.256,6	6.481,4
Tailândia	58.000,0	8.671,0	4.669,0	37.961,0	6.699,0
Malásia	18.600,0	8.035,2	334,8	6.751,8	3.478,2
Singapura	2.800,0	2.800,0	0,0	0,0	0,0
Nepal	19.900,0	1.576,1	811,9	5.594,1	11.557,9
Siri Lanka	17.400,0	3.062,4	765,6	7.464,6	6.107,4
Índia	883.600,0	197.573,0	32.163,0	451.166,2	202.697,8
África subsariana	488.300,0	95.002,6	26.003,4	96.252,2	225.241,8
Moçambique	16.500,0	2.178,0	2.772,0	1.963,5	9.586,5
Etiópia	54.800,0	4.986,8	2.137,2	5.244,4	42.431,6
Tanzânia	25.900,0	4.273,5	1.424,5	9.292,9	10.909,1
Serra Leoa	4.400,0	1.196,8	299,8	580,8	2.323,2
Uganda	17.500,0	1.260,0	840,0	4.620,0	10.780,0
Burundi	5.800,0	320,2	27,8	2.344,4	3.107,6
Malawi	9.100,0	720,7	371,3	3.923,9	4.084,1
Butão	1.500,0	54,0	36,0	423,0	987,0
Chade	6.000,0	-	-	-	-
Guiné-Bissau	1.000,0	37,8	172,2	213,3	576,7
Madagascar	12.400,0	1.922,0	1.178,0	930,0	8.370,0
Ruanda	7.300,0	367,9	70,1	4.597,5	2.264,5
Níger	8.200,0	1.687,6	34,4	2.915,1	3.562,9
Burkina Faso	9.500,0	710,6	904,4	5.519,5	2.365,5
Quênia	25.700,0	5.461,3	963,8	2.891,3	16.383,8

Mali	9.000,0	922,5	1.327,5	270,0	6.480,0
Nigéria	101.900,0	37.703,0	0,0	14.123,3	50.073,7
togo	3.900,0	1.131,0	0,0	1.689,1	1.079,9
Benin	5.000,0	1.460,0	540,0	1.290,0	1.710,0
República Central Africana	3.200,0	291,8	1.244,2	432,6	1.231,4
Gana	15.800,0	3.483,9	2.046,1	3.389,1	6.880,9
Guiné	6.100,0	1.647,0	0,0	1.647,6	2.805,4
Mauritânia	2.100,0	840,0	210,0	892,5	157,5
Zimbábue	10.400,0	2.964,0	156,0	5.824,0	1.456,0
Lesoto	1.900,0	235,4	163,6	675,5	825,6
Somália	8.300,0	1.037,5	1.037,5	1.805,3	4.419,8
Sudão	26.500,0	5.485,5	609,5	4.081,0	16.324,0
Zâmbia	8.300,0	2.649,4	836,6	2.070,0	2.744,0
Costa do Marfim	12.900,0	3.088,3	2.329,7	5.985,6	1.496,4
Senegal	7.800,0	2.078,7	1.119,3	1.196,5	3.405,5
Camarões	12.200,0	2.152,1	2.971,9	3.184,2	3.891,8
Congo	2.400,0	927,4	80,6	27,8	1.364,2
Namíbia	1.500,0	391,5	43,5	394,1	671,0
África do Sul	39.800,0	-	-	-	-
Mauritius	1.100,0	451,0	0,0	597,1	51,9
Botswana	1.400,0	378,0	0,0	899,4	122,6
Gabão	1.200,0	507,6	56,4	318,0	318,0

Fonte: World Bank, 1994.

ANEXO B

Número de casos e mortes das principais doenças decorrentes da ingestão de águas contaminadas no mundo

Doenças	Casos por ano	Mortes por ano
Ascaridíase	900 milhões	20.000
Cólera	5,5 milhões	120.000
Diarréia (incluindo, disenteria amebiana, giardíase e vírus entéricos)	875 milhões	4,6 milhões
Dracunculose (verme da guiné)	500.000	a
Hepatite	7 milhões	a
Esquistossomose	200 milhões	a
Tracoma	500 milhões	b

a – efeito de debilitação ao invés de morte; b – efeito de cegueira (8 milhões por ano)
 Fontes: Feachem *et al.* 1983; Esrey *et al.* 1991; Jones 1994.