

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

PASTEURIZADOR SOLAR PARA DESCONTAMINAÇÃO
MICROBIOLÓGICA DA ÁGUA

GUSTAVO CARIELO DA SILVA

RECIFE
2016

GUSTAVO CARIELO DA SILVA

PASTEURIZADOR SOLAR PARA DESCONTAMINAÇÃO
MICROBIOLÓGICA DA ÁGUA

Tese de Doutorado submetida ao
Programa de Pós-Graduação em
Tecnologias Energéticas e
Nucleares para obtenção do título de
Doutor em Ciências. Área de
Concentração: Fontes Renováveis
de Energia.

ORIENTADOR: DR. CHIGUERU TIBA
CO-ORIENTADORA: DRA. GLÍCIA MARIA TORRES CALAZANS

RECIFE

2016

Catálogo na fonte
Bibliotecário: Carlos Moura, CRB-4 / 1502

S586p Silva, Gustavo Carielo da.
Pasteurizador solar para descontaminação
microbiológica da água. / Gustavo Carielo da Silva. -
Recife: O Autor, 2016.
112 f. : il., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Chigueru Tiba.
Coorientadora: Profa. Dra. Glícia Maria Torres Calazans.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de
Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em
Tecnologias Energéticas e Nucleares, 2016.
Inclui referências bibliográficas, apêndices e anexo.

1. Pasteurização solar. 2. Água potável. 3.
Descontaminação microbiológica. 4. Inativação térmica.
I. Tiba, Chigueru, orientador. II. Calazans, Glícia Maria
Torres, coorientadora. III. Título.

CDD 621.47 (21. ed.)

UFPE
BDEN/2016-09

PASTEURIZADOR SOLAR PARA DESCONTAMINAÇÃO
MICROBIOLÓGICA DA ÁGUA

Gustavo Carielo da Silva

APROVADO EM: 31.03.2016

ORIENTADOR: Prof. Dr. Chigueru Tiba

CO-ORIENTADORA: Prof. Dra. Glícia Maria Torres Calazans

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Carlos Costa Dantas – DEN/UFPE

Prof. Dr. Antônio Celso Dantas Antonino – DEN/UFPE

Prof. Dr. Chigueru Tiba – DEN/UFPE

Profa. Dra. Gláucia Manoella de Souza Lima – DANTI/UFPE

Prof. Dr. Alcides Codeceira Neto – UPE

Visto e permitida a impressão

Coordenador do PROTEN/DEN/UFPE

“Dedico essa obra ao meu falecido avô, José Carielo da Silva, que apostou firmemente no meu sucesso, e que sempre acreditou em mim com amor e paciência. Obrigado Vovô!”

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a minha mãe Maria do Carmo Cruz da Silva por todo carinho e o incentivo que me foi dado. Agradeço a ela, principalmente, por acreditar em mim, e por prover com muito esforço e dedicação, condições importantes para tornar este trabalho possível. Sempre se preocupou com a minha saúde física e mental, não me deixando fraquejar em nenhum momento da vida, por mais difícil que fosse. Obrigado por tudo, Mamãe!

Em segundo lugar, agradeço ao meu tio Carlos Alberto Carielo, que também acreditou no meu potencial, reconheceu meu empenho e sempre esteve de prontidão quando precisei. Sou muito grato por tê-lo como tio. Obrigado, “TioBeto”!

Agradeço também aos meus irmãos Erick Araujo Cariele da Silva e José Paulo Carielo da Silva, que sempre respeitaram meus momentos de reclusão e apostaram firmemente nas minhas metas. Valeu, “Brothers”!

Ao meu orientador Dr. Chigueru Tiba, que acreditou no nosso trabalho, e que, mesmo com toda a minha “alopração” e desorganização foi até o fim. O professor Tiba foi mais que um orientador. Ele foi um disciplinador. Sempre me incentivou e se preocupou para além dos trabalhos acadêmicos. Serei eternamente grato pelas oportunidades que me foram conferidas por ele. Obrigado, Professor!

À minha co-orientadora Dra. Glícia Maria Torres Calazans, pela confiança, ensinamentos, contribuição e dedicação. Obrigado pela oportunidade de aprender tudo que aprendi a cerca de uma área tão importante que é a microbiologia. Obrigado, Professora!

À professora Dra. Gláucia Lima pela confiança, credibilidade e disponibilidade. Obrigado pela oportunidade e pela cessão de toda a estrutura laboratorial, a qual contribuiu e possibilitou a realização das pesquisas que compõem este trabalho. Obrigado, Professora!

À professora Dra. Olga de Castro Vilella, que me proporcionou a base dos estudos da engenharia solar e me apoiou no desenvolvimento do trabalho na área de testes do grupo FAE. Obrigado, professora!

Ao meu amigo José Aurino de Oliveira, que foi inspirador e, ao mesmo tempo, um dos maiores motivadores para o meu despertar à vida acadêmica. Seu auxílio e disponibilidade nos momentos de discussão e reflexão a cerca das pesquisas foram de grande importância para o desenvolvimento desse trabalho. Valeu, “Pruff”!

Aos meus amigos Lucas Noletto e Charles Nilton, que contribuíram com seus conhecimentos em programação computacional, dias e madrugadas adentro. Jamais esquecerei. Valeu “Luky”, valeu Charles!

Ao meu amigo Diego Oliveira, que me acompanhou e me ajudou nos testes do sistema desenvolvido neste trabalho, mesmo em momentos de muita dificuldade. Sua curiosidade e seu interesse foram de suma importância para o desenvolvimento da pesquisa. Valeu “Miserinha”!

À minha amiga Taciana Santos, por ter me motivado nos momentos de fraquesa, e principalmente, nos momentos em que tudo parecia estar perdido. Sempre me incentivou e me fez seguir em frente com otimismo. Valeu “Bugada”!

Às meninas do laboratório: Amanda, Evelyn e Wanda, Que foram extremamente prestativas, pacientes, companheiras e divertidas, na empreitada de me ensinar as técnicas de análises laboratoriais. Sem a dedicação delas neste meu treinamento, dificilmente o presente trabalho teria sido realizado. Obrigado, meninas!

À minha amiga Jacileide Cunha, que nos momentos finais de muita tensão, com toda paciência e positivismo, me incentivou e me ajudou a focar nas coisas mais importantes naqueles momentos. Jamais esquecerei suas palavras: “vai dar tudo certo”. Obrigado, Galega!

RESUMO

A ingestão de água contaminada é uma das principais causas de doenças e mortes nos países em desenvolvimento. A descontaminação da água pode ser conseguida por diferentes métodos de tratamento, entretanto, a pasteurização solar se mostra promissora por inativar micro-organismos em diferentes temperaturas e utilizar o Sol como fonte de energia limpa. Neste trabalho, um sistema de pasteurização solar automatizado que opera por bateladas foi concebido e testado. O sistema consiste de um coletor solar plano de 2 m² de abertura, um trocador de calor, duas válvulas solenoides e um controle eletrônico. O sistema foi configurado para executar o tratamento da água em diferentes “setpoints” pré-programados: 3600 s a 55 °C; 2700 s a 60 °C; 1800 s a 65 °C; 900 s a 75 °C e 15 s a 85 °C. O uso do trocador de calor resultou tanto no aumento da produtividade em cerca de 113%, quanto na redução significativa da irradiância solar de corte para 6,6 MJ/m².dia. Os dados experimentais mostraram que foi possível alcançar uma produtividade de 80 L de água tratada em um dia de céu claro, com inclinação do coletor solar em 20° N. Além disso, o pasteurizador se mostrou estável quanto à eficiência de eliminação dos micro-organismos testados, considerando a temperatura de tratamento de 85 °C durante 15 s. As análises bacteriológicas depois do tratamento mostraram ausência de coliformes totais e *E. coli*, NMP <1,1 para *P. aeruginosa* e redução média de 98,7% para bactérias heterotróficas em diferentes níveis de contaminação das amostras de água.

Palavras-chave: Pasteurização solar. Água potável. Descontaminação microbiológica. Inativação térmica.

ABSTRACT

The ingestion of contaminated water is a major cause of disease and death in developing countries. The decontamination of water can be achieved by different methods of treatment, however, solar pasteurization shows promise for inactivating micro-organisms at different temperatures and using the Sun as a source of clean energy. In this work, a solar pasteurization system operating by automated batches has been both designed and tested. A flat solar collector with 2 m² of opening, a heat exchanger, two solenoid valves and an electronic control were used. The system was configured to perform water treatment in different "setpoints" preprogrammed: 3600 s at 55 °C; 2700 s at 60 °C; 1800 s at 65 °C; 900 s at 75 °C and 15 s at 85 °C. The use of the heat exchanger has great importance since it implies increased productivity at about 113% as the significant reduction of the solar radiation cutting at about 6.6 MJ/m².day. The experimental data showed that it was possible to achieve a productivity of 80 liters of treated water in a day of clear sky, using 20° (N) inclination. Furthermore, the pasteurizer remained stable for disposal efficiency of the tested microorganisms, considering the 85 °C treatment temperature for 15 seconds. Bacteriological analysis after treatment showed absence of total coliforms and *E. coli*, MPN <1.1 *P. aeruginosa* and for average reduction of 98.7 % for heterotrophic bacteria at different levels of contamination of water samples.

Keywords: Solar pasteurization. Safe water. Microbiological decontamination. Thermal inactivation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Curvas de inativação de micro-organismos patogênicos por pasteurização.....	39
Figura 2. As visões 2A (lateral) e 2B (frontal) mostram o desenho original do sistema de pasteurização, com os componentes e dispositivos utilizados nos testes. As cotas estão em unidade de metro e representam as alturas relevantes para a montagem do pasteurizador. Nos círculos grandes estão detalhes das ligações de entrada e saída do coletor solar.	45
Figura 3. As visões 3A (lateral) e 3B (frontal) mostram o desenho modificado do sistema de pasteurização, com os componentes e dispositivos utilizados nos testes. As cotas estão em unidade de metro e representam as alturas relevantes para a montagem do pasteurizador. Nos círculos grandes estão detalhes das ligações de entrada e saída do coletor solar.	46
Figura 4. Esquema de funcionamento cíclico do sistema de controle.	48
Figura 5. Diagrama de alimentação fotovoltaica do sistema de controle e dispositivos.	51
Figura 6. Diagrama de monitoramento do sistema de aquisição de dados.....	53
Figura 7. Painel de monitoramento das variáveis e parâmetros do sistema. ...	54
Figura 8. Coleta das amostras de água contaminada em tanque paisagístico situado na UFPE.....	57
Figura 9. Esquema de análise para determinação de coliformes totais e <i>E. coli</i>	59
Figura 10. Esquema de análise para confirmação de coliformes termotolerantes e <i>E. coli</i>	60
Figura 11. Esquema de análise para determinação de <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	61
Figura 12. Esquema de análise para contagem de colônias heterotróficas.	63
Figura 13. Tendência de produtividade do sistema na configuração modificada sem trocador de calor, nos diferentes ângulos de inclinação testados.	66
Figura 14. Produtividade do sistema na configuração modificada ($\beta = 20^\circ$), sem e com recuperação de calor.	69
Figura 15. Produtividade do sistema na configuração original ($\beta = 20^\circ$), sem e com recuperação de calor.	71

Figura 16. Comparação entre as produtividades nas configurações original e modificada com recuperação de calor.	72
Figura 17. Mapa da distribuição média anual da radiação global no Brasil.	73
Figura 18. Comportamento das variáveis medidas e resultado dos dados computados com valores: $I_{coll} = 573,5 \text{ W/m}^2$; Bateladas = 13; Config. Original.....	79
Figura 19. Comportamento das variáveis medidas e resultado dos dados computados com valores: $I_{coll} = 590 \text{ W/m}^2$; Bateladas = 26; Config. Modificada.....	79
Figura 20. Comportamento das variáveis medidas e resultado dos dados computados com valores: $I_{coll} = 774 \text{ W/m}^2$; Bateladas = 17; Config. Original.....	80
Figura 21. Comportamento das variáveis medidas e resultado dos dados computados com valores: $I_{coll} = 793 \text{ W/m}^2$; Bateladas = 34; Config. Modificada.....	80
Figura 22. Esquema de circulação da água e do ar nas tubulações internas do coletor solar.	81
Figura 23. Resultado da inoculação em caldo Lauril Tryptose, antes (à esquerda) e depois do tratamento (à direita). Os ensaios após o tratamento foram realizados com amostras resultantes de tratamento no “setpoint” de $85 \text{ }^\circ\text{C}$	83
Figura 24. Resultado da inoculação em meio VB, antes (tubo à esquerda) e depois do tratamento (tubo à direita).	84
Figura 25. Resultado da inoculação em meio EC, antes (tubo à esquerda) e depois do tratamento (tubo à direita).	85
Figura 26. Resultado da inoculação em meio EMB, antes (à esquerda) e depois do tratamento (à direita).	85
Figura 27. Resultado da inoculação em substrato cromogênico antes e depois do tratamento sob luz UV.	86
Figura 28. Resultado da inoculação em meio Asparagina sob luz ultravioleta, antes (à esquerda) e depois do tratamento (à direita).	87
Figura 29. Resultado da inoculação em meio Acetamida, antes e (à esquerda) e depois do tratamento (à direita).....	87
Figura 30. Resultado da inoculação em meio PCA, antes e (à esquerda) e depois do tratamento (à direita).....	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Características relevantes de bactérias que ameaçam a saúde humana.....	23
Tabela 2. Características relevantes de vírus que ameaçam a saúde humana.	26
Tabela 3. Características relevantes de protozoários que ameaçam a saúde humana.....	28
Tabela 4. Parâmetros bacteriológicos indicadores de qualidade da água para consumo humano.....	29
Tabela 5. Relação de temperatura e tempo utilizada no sistema de controle..	52
Tabela 6. Períodos de realização dos testes em diferentes configurações e inclinações do coletor solar.	55
Tabela 7. Resultados das regressões lineares aplicadas aos dados de produtividade para cada ângulo testado.....	66
Tabela 8. Dados de produtividade sem e com recuperação de calor para a configuração modificada ($\beta = 20^\circ$).....	68
Tabela 9. Dados de produtividade sem e com trocador de calor para a configuração original ($\beta = 20^\circ$).	70
Tabela 10. Relação entre a produtividade média diária em função da irradiância acumulada para as diferentes configurações do sistema.	72
Tabela 11. Relação entre a produtividade média diária em função da irradiância coletada para as diferentes configurações do sistema ($\beta = 20^\circ$; c/ recuperação de calor).	77
Tabela 12. Resultado do número mais provável para <i>Pseudomonas aeruginosa</i> , antes e depois do tratamento. Os ensaios após o tratamento foram realizados com amostras resultantes de tratamento no “setpoint” de 85 °C.....	88
Tabela 13. Resultado da contagem de unidades formadoras de colônias para as bactérias heterotróficas antes e depois do tratamento. Os ensaios após o tratamento foram realizados com amostras resultantes de tratamento no “setpoint” de 85 °C.	90
Tabela 14. Resultados de pH e turbidez da água como parâmetros de água potável para consumo humano, antes e depois do tratamento.....	94

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ADWG	Australian Drinking Water Guidelines
ANVISA	Agencia Nacional de Vigilância Sanitária
AT	Antes do tratamento
CPC	Calha parabólica de concentração
CPVC	Chlorinated Polyvinyl Chloride (Policloreto de vinila clorado)
CT	Coliformes totais
CF	Coliformes fecais
DT	Depois do tratamento
EC	Caldo para <i>Escherichia coli</i>
EMB	Eosina azul de metileno
EPA	Envionmental Protection Agency
FAE	Fontes Alternativas de Energia
FV	Fotovoltaica
H_{corte}	Ponto de Irradiância crítica
H_{coll}	Irradiância global diária acumulada no plano do coletor (MJ/m^2)
I_{coll}	Irradiância global diária instantânea no plano do coletor (W/m^2)
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MS	Ministério da Saúde
NMP	Número mais provável
NTU	Unidade Nefelométrica de turbidez
pH	Potencial hidrogeniônico
PA	Caldo Presença e Ausência
PCA	Plate Count Agar (Ágar Padrão de Contagem)

PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
Setpoint	Valor de temperatura que determina o início do tratamento
SODIS	Solar Disinfection
Temp.Superior	Temperatura da parte superior do coletor solar (°C)
Temp.Inferior	Temperatura da parte inferior do coletor solar (°C)
TM	Tubos múltiplos
UFC	Unidades Formadoras de Colônias
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
UNICEF	United Nations Children Fund
UV	Ultravioleta
VB	Caldo Verde Brilhante Bile
VMP	Valor máximo permitido
W	Watt (unidade de potência)
WHO	World Health Organization
β	Inclinação do coletor em relação ao plano horizontal (°)

Sumário	Pág.
1 INTRODUÇÃO	15
2 OBJETIVOS	17
3 REVISÃO DE LITERATURA	18
3.1 A água no mundo	18
3.2 Água para consumo humano e sua contaminação	19
3.3 Padrões de potabilidade	20
3.4 Micro-organismos patogênicos	21
3.4.1 Bactérias	22
3.4.2 Vírus	25
3.4.3 Protozoários	26
3.5 Indicadores de qualidade da água	28
Técnicas para determinação de coliformes	32
3.6 Descontaminação microbiológica da água.....	33
3.6.1 Descontaminação química	34
3.6.2 Filtros e membranas	34
3.6.3 Desinfecção solar (UV)	35
3.6.4 Tecnologias térmicas	37
3.7 Sistemas de Pasteurização solar	40
4 MATERIAL E MÉTODOS	44
4.1 Descrição conceitual do sistema.....	44
4.2 Funcionamento do sistema.....	47
4.2.1 Equipamentos e dispositivos	48
4.2.2 Sistema de controle	51
4.2.3 Monitoramento do sistema.....	53
4.3 Avaliação da produtividade do sistema.....	55
4.4 Análises bacteriológicas e eficiência de tratamento	56
4.4.1 Coleta e preparo de amostras	57
4.4.2 Determinação de coliformes totais e <i>E. coli</i>	58
4.4.3 Determinação de <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	61
4.4.4 Contagem de bactérias heterotróficas.....	62
4.5 Medição do pH e da Turbidez	63
4.6 Análises estatísticas	64
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	65
5.1 Produtividade do sistema em função da inclinação	65
5.2 Produtividade do sistema nas diferentes configurações	67
5.3 Perfil diário do comportamento do sistema	77
5.4 Análises bacteriológicas e eficiência de tratamento	82
5.4.1 Pesquisa de coliformes totais e <i>E. coli</i>	83
5.4.2 Pesquisa de <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	86
5.4.3 Pesquisa de Bactérias heterotróficas	89
5.4.4 Avaliação do pH e da turbidez.....	93
6 CONCLUSÕES	96
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	98
REFERÊNCIAS.....	99
APÊNDICE A – Ficha de Calibração	110
APÊNDICE B – Resultados p/ <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	111
ANEXO A – Tabela com NMP para <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	112

1 INTRODUÇÃO

A água é um dos recursos naturais mais importantes e necessários à vida dos seres humanos, animais e plantas. Este recurso é essencial para tornar a vida possível, pois influencia na segurança alimentar, mortalidade, crescimento econômico e principalmente na saúde.

Infelizmente nos dias atuais ainda existem grandes populações de diversas regiões do planeta que sofrem com a falta de água potável. Mais de 780 milhões de pessoas ainda permanecem sem acesso à água potável, predominantemente nos países em desenvolvimento (WHO e UNICEF, 2013). A água contaminada representa grande ameaça para a saúde dos seres humanos, particularmente em regiões semiáridas onde fontes de água para consumo humano são escassas.

No Brasil, mais precisamente nas regiões semiáridas, a instabilidade no regime de chuvas resulta em secas frequentes com variações bruscas na disponibilidade de água. A escassez de água potável nessas regiões influencia negativamente o bem estar das populações locais por ser um fator crítico à saúde e conseqüentemente ao desenvolvimento social. Devido ao problema das secas e da falta de sistemas de tratamento e distribuição de água, as principais fontes de abastecimento para essas populações ainda continuam sendo: barragens, açudes, barreiros, poços rasos e nascentes; todas susceptíveis à contaminação por micro-organismos causadores de doenças cujos principais agentes são bactérias, vírus e protozoários (GADGIL e SHOWN, 1995). Mesmo sendo imprópria para consumo, a água dessas fontes são ingeridas pelas pessoas. Em consequência disto, milhões de mortes ocorrem por causas infecciosas todo ano, principalmente crianças menores de cinco anos de idade (WHO, 2011; UNICEF, 2012).

Diante das dificuldades de prover o acesso à água potável para consumo humano nessas regiões, o desenvolvimento ou aperfeiçoamento de tecnologias para o tratamento microbiológico da água torna-se de vital importância às comunidades que vivem sob condições inapropriadas (ELLIS, 1991; MEYER, 1994). Existem métodos aplicáveis para o tratamento de água, como: cloração, filtração, radiação ultravioleta (UV) solar e a fervura; entretanto, cada um possui vantagens e desvantagens no que diz respeito às

suas aplicações para o contexto das regiões semiáridas. Embora alguns destes sejam tratamentos relativamente simples e de baixo custo, existem dificuldades relacionadas tanto aos próprios métodos quanto à água superficial de algumas regiões semiáridas.

Uma alternativa adequada que se mostra promissora para essas regiões, capaz de garantir o tratamento com eficiência sem agredir o meio ambiente, são os sistemas de aquecimento solar da água. Alguns desses sistemas são desenvolvidos para pasteurizar a água com energia solar, mostrando-se uma solução sustentável para a descontaminação microbiológica em zonas rurais (VALENZUELA *et al.*, 2010).

No presente trabalho, o comportamento de um modelo físico de pasteurizador solar, desenvolvido por Carielo (2011), foi estudado para descontaminação microbiológica da água, devido à necessidade de água potável e à abundância de energia solar em regiões remotas. O sistema foi aprimorado e testado para investigar tanto o potencial de produção de água tratada quanto a eficiência de tratamento sob micro-organismos importantes à saúde humana, a fim de, posteriormente, propor um projeto de instalação para suprimento de água potável em comunidade do semiárido de até 500 pessoas.

2 OBJETIVOS

- Geral

Otimizar e testar um sistema de pasteurização solar automatizado, elevando a eficiência do mesmo sob os pontos de vista microbiológico e da produtividade.

- Específicos

- Avaliar parâmetros básicos (geométricos e físicos) que influenciem na produtividade do sistema, tais como: inclinação do coletor solar e configurações do sistema construído.

- Testar o potencial de eliminação ou redução dos micro-organismos: coliformes totais, *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa* e bactérias heterotróficas; em amostras de água contaminada, de forma a adequá-las às exigências preconizadas pela Portaria nº 2914 do Ministério da Saúde, que regula a qualidade da água para consumo humano no país.

3 REVISÃO DE LITERATURA

A revisão de literatura discorre sobre a situação da água no mundo e, principalmente, na região do semiárido nordestino, a qual é o foco da pesquisa desenvolvida; e também discute sobre os desafios encontrados na descontaminação da água em países em desenvolvimento. Essa revisão também procura explicar sobre os tipos de micro-organismos causadores de doenças nos seres humanos, métodos para descontaminação e alguns sistemas que utilizam a energia solar para o tratamento da água.

3.1 A água no mundo

Dentre os recursos do planeta, sejam eles naturais ou não, a água é vital, pois constitui parte essencial da bioquímica dos seres vivos, sendo o componente majoritário das suas células. A vida na Terra depende essencialmente da existência de água com qualidade e quantidade suficiente, prontamente disponível para uso direto e indireto (MORAES e JORDAO, 2002). Apesar de abundante no planeta (cerca de $1.350.000 \text{ km}^3$), o quadro real acerca da disponibilidade de água potável é preocupante, pois a água não é um recurso inesgotável. Em toda a Terra 2,5% da água é doce, das quais 68,9% encontram-se em geleiras e neves eternas, 30,8% em águas subterrâneas, solo, pântanos, e 0,3% em rios e lagos (MMA, 2011).

O Brasil, graças à sua superfície territorial extensa, caracterizada por grande diversidade climática e edafológica, possui uma situação privilegiada em relação aos seus recursos hídricos. Apenas considerando o potencial hídrico fluvial, a vazão média dos rios corresponde a cerca de $180.000 \text{ m}^3/\text{s}$, respondendo por 12% da disponibilidade hídrica mundial. Adicionalmente, o Brasil detém em seu território 70% do aquífero Guarani, a maior reserva subterrânea de água doce da América Latina, que armazena aproximadamente 45.000 km^3 de água potável de excelente qualidade (AQUIFERO GUARANI, 2015).

Em outra mão, o semiárido nordestino, região consideravelmente populosa, sofre com a instabilidade em seu regime de chuvas resultando em secas frequentes com variações bruscas na disponibilidade de água. Nesta

região a água é um recurso escasso e ao mesmo tempo um fator crítico para as populações locais, pois influencia de forma negativa o bem estar da população e o desenvolvimento regional. Logo, estes fatos ressaltam a necessidade urgente e a importância de gerenciamento adequado dos recursos hídricos disponíveis (GEO BRASIL, 2007; MARENGO, 2008).

Nas regiões semiáridas as fontes de água superficial (barreiros, lagos, açudes e escoamento) para consumo humano têm histórico de serem contaminadas com micro-organismos que trazem o fardo de doenças e mortalidade. Segundo estudo realizado em comunidades rurais do Nordeste do Brasil, a contaminação bacteriana e parasitária é uma ocorrência comum na água de chuva utilizada para consumo da população, com maior densidade durante a estação chuvosa (XAVIER *et al.*, 2011). O escoamento superficial durante o período de chuva é o fator que mais contribui para a mudança da qualidade microbiológica da água (GELDREICH, 1998). Na cidade de Tuparetama, localizada no Nordeste do Brasil, por exemplo, parte da população consome água da chuva de barragens e de pequenos reservatórios que são frequentemente contaminados. Devido à escassez de água em regiões semiáridas, a idéia de armazenar água da chuva tem sido sugerido por ser útil em tempos de seca prolongada. Todavia, as principais restrições para o uso doméstico de água da chuva têm sido relacionadas com a sua qualidade, que depende da pureza da atmosfera e dos materiais utilizados para coletá-lo em residências (BLACKBURN *et al.*, 2005).

3.2 Água para consumo humano e sua contaminação

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 pela rota fecal-oral que são ingeridas através da água e/ou alimentos contaminado (GRABOW, 2003; FRANCO, 2007).

Em estudo realizado no México, demonstrou-se que a presença de coliformes nas amostras de água dos mananciais e dos domicílios tem relação

direta com a presença da chuva, devido ao arraste de excrementos humanos e de animais (GONZALEZ *et al.*, 1982). A deposição diária de resíduo orgânico animal no solo, prática disseminada no meio rural, aumenta o risco da contaminação das águas subterrâneas (CONBOY e GOSS, 2000). Dessa forma, o dejetos bovino depositado no solo representa riscos de contaminação das fontes de água, uma vez que esses animais são reservatórios de diversos micro-organismos causadores de enfermidades humanas, o que demonstra o papel desses animais na contaminação ambiental por patógenos de veiculação hídrica (FAYER *et al.*, 2000).

Dentre as enfermidades causadas por patógenos, a diarreia é a segunda principal causa de morte de crianças em todo o mundo (BOSCHI-PINTO *et al.*, 2008). Nos anos 70, doenças gastrointestinais eram problemas agudos. Lactentes e crianças foram as que mais sofreram com essas graves moléstias como resultado de contaminação patogênica em água de lagoas, rios, lagos, barreiros, etc. (NGUYEN e SPERANDIO, 2012). Embora a diarreia ainda cause mundialmente cerca de 760.000 mortes de crianças abaixo de 5 anos de idade, é possível prevenir e tratá-la com métodos adequados (WHO, 2003).

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).

3.3 Padrões de potabilidade

A qualidade da água para consumo humano é uma questão extremamente importante, pois constitui um dos principais assuntos de saúde pública.

Os padrões universais para o controle da qualidade da água destinada ao abastecimento público são recomendados pelo “Guidelines for Drinking-Water Quality” da World Health Organization (WHO, 2008), os quais estabelecem valores máximos permissíveis para os agentes microbiológicos e químicos presentes na água. Na Austrália, os padrões são estabelecidos pelo

Australian Drinking Water Guidelines (ADWG), nos Estados Unidos segue-se o Drinking Water Guidelines da Environmental Protection Agency (EPA) e para os países da União europeia criou-se o Directive 98/83/EC (RAJARATNAM *et al.*, 2002; CLASEN e BASTABLE, 2003).

No Brasil, a água destinada ao consumo humano denomina-se potável e deve preencher condições mínimas de acordo com padrões estabelecidos pela Portaria do Ministério da Saúde nº 2914 de 2011, a qual determina os procedimentos e responsabilidades relativas ao controle e vigilância da qualidade da água para o consumo humano e seu padrão de potabilidade (BRASIL, 2005).

3.4 Micro-organismos patogênicos

No mundo, mais de 2 milhões de crianças morrem vítima de doenças de veiculação hídrica (uma a cada 14 segundos), tendo como principal causa a contaminação por águas superficiais expostas ao ambiente coabitado por animais e seres humanos (MORAES e JORDÃO, 2002).

Doenças relacionadas à água, tais como a amebíase, cólera, febre tifoide, paratifoide e hepatites infecciosas, também trazem impactos diretos na economia, podendo se perder em até um décimo do tempo produtivo de cada pessoa (WHO, 2008). Alguns dos patógenos que são transmitidos por água contaminada podem provocar doenças graves e, por vezes, risco de morte.

As águas superficiais como rios, canais, lagos e barreiros, podem veicular diferentes tipos de micro-organismos oriundos de fezes humanas ou animais. As doenças mais comuns transmitidas pela água são causadas por bactérias, vírus e parasitas (protozoários e helmintos), os quais trazem risco para a saúde quando se fala sobre água potável (JULIÃO e SEGURA-MUÑOZ, 2011; WHO, 2011).

Embora nem todos os micro-organismos sejam ofensivos aos seres humanos, alguns gêneros ou algumas de suas espécies são moderadamente prejudiciais e outros são considerados críticos: *Campylobacter*, *Shigella*, *Salmonella*, *Escherichia coli*, *Vibrio cholerae*, *Legionella*, *Enterovirus*, vírus da Hepatite A ou E, *Rotavirus*, *Entamoeba*, *Cryptosporidium*, *Pseudomonas aeruginosa* e *Giardia* (GEMS/WATER..., 1992). Agentes patogênicos como a

Legionella podem crescer na água, entretanto, o norovirus e o *Cryptosporidium* são dependentes de um agente patogênico hospedeiro e, portanto, não podem se desenvolver na água, contudo podem persistir nela (WHO, 2011).

Agentes patogênicos que dependem de hospedeiros perdem gradualmente a viabilidade e capacidade de infectar depois de deixá-los. A taxa de decaimento é normalmente exponencial e depois de certo período o micro-organismo se torna indetectável. Dessa forma, patógenos com baixa persistência necessitam imediatamente de novos hospedeiros, sendo mais susceptíveis de se propagar pelo contato entre pessoas ou devido à falta de higiene, do que pela água (WHO, 2011). A persistência dos micro-organismos depende de diversos fatores, sendo a temperatura o mais importante.

3.4.1 Bactérias

As bactérias patogênicas encontradas na água e/ou alimentos, constituem uma das principais fontes de morbidade em nosso meio. Visto que a maioria das bactérias infecciosas aos seres humanos seja viabilizada por animais, a contaminação pela água geralmente relaciona-se com a presença de bactérias pertencentes à família Enterobacteriaceae, representada por uma heterogênea coleção de bactérias de importância clínica: o grupo coliforme (WHO, 2011).

As bactérias entéricas possuem vida útil mais curta que os vírus e parasitos. Existem alguns agentes patogênicos de vida livre, tais como a *Legionella* e *Mycobacteria* não-tuberculosa que crescem tanto na água como no solo (WHO, 2011). A maioria dos agentes patogênicos bacterianos transmissíveis pela água afeta o trato gastrointestinal e são excretados nas fezes humanas e de animais infectados (SVENSKT VATTEN, 2011).

Existem potenciais agentes patogênicos bacterianos de veiculação hídrica responsáveis por doenças diarreicas: *Vibrio cholerae*, *Campylobacter*, *E. coli*, *Salmonella* e *Shigella* (LIVSMEDELSVERKET, 2005). *Vibrio cholerae* causa diarreia aquosa e quando não tratada pode ser letal. *Campylobacter* também é uma importante causa de diarreia em todo o mundo. A doença pode produzir uma vasta gama de sintomas, porém, com índice de mortalidade

baixa. *Shigella* faz mais de 2 milhões de infecções por ano, incluindo cerca de 60.000 mortes, principalmente em países em desenvolvimento (WHO, 2011).

A Tabela 1 mostra alguns agentes patogênicos bacterianos de veiculação hídrica para os quais existem evidências de relevante importância para a saúde, relacionados à ocorrência no abastecimento de água potável. A importância à saúde relaciona-se com a incidência e a severidade da doença, incluindo associação com surtos.

Tabela 1. Características relevantes de bactérias que ameaçam a saúde humana.

Bactérias	Persistência	Importância	Fonte animal
<i>Campylobacter jejuni</i>	Moderada	Alta	Sim
<i>Escherichia coli</i>	Moderada	Alta	Sim
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Podem multiplicar-se	Moderada	Não
<i>Legionella spp.</i>	Podem multiplicar-se	Alta	Não
<i>Salmonella typhi</i>	Moderada	Alta	Não
<i>Shigella spp.</i>	Baixa	Alta	Sim
<i>Vibrio cholerae</i>	Baixa a Alta	Alta	Não
Fonte: (WHO, 2011)			

Bactérias heterotróficas

As bactérias heterotróficas requerem fonte orgânica de carbono para a síntese de material celular e crescem em uma faixa de temperatura ótima entre 25 °C e 40 °C (TORTORA *et al.*, 2005). Embora geralmente a maioria das bactérias heterotróficas, não seja patogênica, alguns membros desse grupo, incluindo *Legionella spp.*, *Mycobacterium spp.*, *Pseudomonas spp.* e *Aeromonas spp.*, podem ser patógenos oportunistas (QUIROZ, 2002). Mesmo que a maioria das bactérias heterotróficas da microbiota natural da água não seja considerada patogênica, é importante que sua população seja mantida sob controle, pois o aumento pode causar riscos à saúde humana (DIAS, 2008). Segundo o Ministério da Saúde do Brasil, a contagem padrão de bactérias

heterotróficas não deve exceder a quinhentas unidades formadoras de colônia por mililitro (UFC/mL) (BRASIL, 2011).

As bactérias heterotróficas merecem uma atenção particular para garantir a qualidade da água necessária em áreas de alto risco, tais como hospitais e lugares onde pacientes imunossuprimidos são tratados; uma vez que são verificadas infecções causadas por micro-organismos heterotróficos encontrados na água (HUANG *et al.*, 2002). Nesses locais, algumas autoridades utilizam essas bactérias para indicar o risco da presença de patógenos oportunistas (HARGREAVES *et al.*, 2001).

A contagem de micro-organismos heterotróficos em placas é um procedimento para estimar o tamanho de uma população bacteriana, e pode ser empregado como um indicador primário de eficiência de desinfecção por permitir medir mudanças nas concentrações de micro-organismos durante um processo de tratamento (EPA, 1999).

Pseudomonas aeruginosa

P. aeruginosa é reconhecida como agente patogênico ou oportunista colonizador não fermentador. Esse micro-organismo é responsável por infecções em ambientes hospitalares, principalmente em pacientes com queimaduras e imunocomprometidos, além de ser também encontrado em águas doces superficiais (REX *et al.*, 1998; WHO, 2003; CHURCH *et al.*, 2006).

Em pacientes hospitalizados expostos a numerosos agentes antimicrobianos, as resistências intrínsecas e adquiridas sob diversas classes de drogas desta bactéria conferem vantagem seletiva, permitem colonização e infecção subsequente, o que complica frequentemente o tratamento das infecções (DUBOIS *et al.*, 2001; MARTINCO *et al.*, 2002; PIRNAY *et al.*, 2003; HAUSER e SRIRAM, 2005; FALAGAS *et al.*, 2006; ZAHRA *et al.*, 2015).

A enteropatogenicidade dessa espécie de *Pseudomonas* baseia-se na sua capacidade de produzir enterotoxinas (WHO, 2003). Pesquisas têm reconhecido essa bactéria como um patógeno entérico e agente causador de diarreia em lactentes (LECLERC *et al.*, 2002).

Apesar de inúmeras fontes hospitalares causarem surtos nosocomiais, estudos indicam que a fonte mais negligenciada, importante e controlável de

patógenos nosocomiais, é a água hospitalar (YU *et al.*, 1993; RUTALA e WEBER, 1997). Surtos nosocomiais de *P. Aeruginosa* foram confirmados em água de hospitais, sugerindo que os focos de infecção estejam frequentemente relacionados a fontes de água (MOFFET e WILLIAMS, 1967). Trautmann *et al.* (2001) encontraram que, em estudo prospectivo de cuidados cirúrgicos intensivos, 29% de 17 pacientes foram infectados com genótipos de *P. aeruginosa* detectadas na água das torneiras.

Ao contrário de tanques de água residenciais, grandes edifícios, tais como hospitais, são obrigados a ter sistemas de recirculação de água, que estão associados com um aumento significativo do risco de colonização destes agentes patogênicos (GELDREICH, 1996). Embora sejam utilizados sistemas de filtragem em hospitais, eles nem sempre são eficazes, além de serem caros e de difícil manutenção (COOKE *et al.*, 1998). Uma abordagem potencialmente eficaz é a de manter a água de circulação aquecida igual ou acima de 60 °C, objetivando a redução da concentração de micro-organismos em sistemas de água hospitalares (BARTLEY e OLMSTED, 1996).

3.4.2 Vírus

Os vírus são os menores agentes patogênicos, normalmente têm gama de hospedeiros limitada e muitos são espécies específicas. A maioria dos vírus entéricos humanos não é transportada por animais. Entretanto, os vírus mais comumente encontrados nas águas contaminadas por dejetos humanos são, entre outros, os da poliomielite e da hepatite infecciosa A e E (WHO, 2011).

A hepatite é uma doença infecciosa aguda, altamente contagiosa, transmitida por via fecal-oral, ocorrendo contaminação direta de pessoa para pessoa ou a partir do contato com alimento e água contaminados. Os sintomas da hepatite são febre baixa, fadiga, mal estar, inapetência, sensação de desconforto abdominal, náuseas, vômito e diarreia. No caso da hepatite A pode ocorrer icterícia, persistindo de duas a quatro semanas. As medidas de prevenção incluem hábitos de higiene e melhorias das condições sanitárias (BRASIL, 2005).

Os poliovírus, pertencentes ao gênero enterovírus, causam a poliomielite; uma doença aguda que pode ocorrer sob a forma de infecção não

aparente ou apresentar manifestações clínicas frequentemente caracterizadas por febre, mal estar, cefaleia, distúrbios gastrointestinais e rigidez de nuca acompanhadas ou não de paralisia. A transmissão ocorre no contato direto de pessoa para pessoa, ou de forma indireta, no contato com objetos, alimentos e água contaminada. A intensa batalha pela erradicação da poliomielite conduziu a valiosa obtenção, produção e aplicação de vacinas, que reduziram acentuadamente a incidência da doença em todo o mundo (WHO, 2011). Tal ação acarretou no confinamento do poliovírus selvagem no sudeste asiático e em alguns países africanos. No entanto, ações de vigilância ambiental em águas residuárias fornecem valiosas informações sobre a quantidade de poliovírus excretados nas fezes de pessoas imunizadas, pois a água pode atuar como veículo de infecção a partir de cepas utilizadas nas vacinas (GONZÁLEZ *et al.*, 2006).

Os rotavírus, enterovírus e norovírus são exemplos de vírus que foram identificados como potenciais agentes patogênicos de referência. Destes, os rotavírus são a causa mais importante de infecção gastrointestinal em crianças e pode ter consequências graves, incluindo hospitalização e morte, com o último sendo muito mais frequente em regiões de baixa renda (WHO, 2011). A Tabela 2 mostra alguns dos vírus mais importantes quanto à infecciosidade e suas características relevantes.

Tabela 2. Características relevantes de vírus que ameaçam a saúde humana.

Vírus	Persistência	Importância	Fonte animal
Adenovírus	Alta	Moderada	Não
Enterovirus	Alta	Alta	Não
Hepatitis A vírus	Alta	Alta	Não
Norovírus	Alta	Alta	Potencialmente
Rotavírus	Alta	Alta	Não
Fonte: (WHO, 2011)			

3.4.3 Protozoários

Entre os vários agentes patogênicos relacionados à veiculação hídrica, algumas das espécies dos protozoários parasitos como *Cryptosporidium* spp. e *Giardia* spp. são reconhecidas como causadores de surtos de diarreia, sendo

que nos últimos 25 anos esses organismos alcançaram grande relevância em termos de saúde pública devido ao expressivo número de casos registrados (GAJADHAR e FORBES, 2002; MACPHERSON, 2005; KARANIS *et al.*, 2007; CANTUSIO, 2008).

Giardia intestinalis é o protozoário intestinal responsável pela giardíase amplamente distribuída pelo mundo. A contaminação humana por este micro-organismo é comum em crianças abaixo de cinco anos de idade, devido aos precários hábitos higiênicos ou ausência de imunidade (STANLEY e MEYER, 1984). Da maioria dos indivíduos infectados, em particular nas crianças, a *Giardia* pode causar diarreia, dor abdominal e outros problemas (CIMERMAN *et al.*, 1977). O *Cryptosporidium* spp. e a *Giardia* spp. são os principais causadores de diarreia por protozoários, liderando uma significativa taxa de morbidade e mortalidade em países desenvolvidos e subdesenvolvidos (SNEL *et al.*, 2009). No ambiente, a morfologia da *Giardia lamblia* se mostra de forma cística. O cisto é a forma infecciosa, que pode permanecer viável na superfície da água por aproximadamente dois meses (RENDTROFF, 1954).

As enteroparasitoses podem afetar o equilíbrio nutricional, pois interferem na absorção de nutrientes, induzem sangramento intestinal, reduzem a ingestão alimentar e ainda podem causar complicações significativas como obstrução intestinal e formação de abscessos (SANTOS *et al.*, 2004).

Dentre os parasitos que são encontrados na água contaminada, destacam-se a *Entamoeba histolytica*, *Ancylostoma* sp., *Hymenolepis* sp., *Ascaris* sp., *Giardia intestinalis*, *Cyclospora cayatanensis* e o *Cryptosporidium hominis* (Tabela 3). Os protozoários e helmintos são causas comuns de infecção e doença em seres humanos e animais, além de serem de importância sanitária por persistirem na água e apresentarem resistência ao controle químico que utiliza o cloro (CETESB, 2009).

Tabela 3. Características relevantes de protozoários que ameaçam a saúde humana.

Protozoários	Persistência	Importância	Fonte animal
<i>Cryptosporidium hominis/parvum</i>	Alta	Alta	Sim
<i>Cyclospora cayatanensis</i>	Alta	Alta	Nao
<i>Entamoeba histolytica</i>	Alta	Alta	Não
<i>Giardia intestinalis</i>	Alta	Alta	Não
Fonte: (WHO, 2011)			

Os protozoários podem sobreviver por longos períodos na água e a sua concentração infecciosa geralmente é baixa (WHO, 2011). Infecções por *Giardia* são normalmente mais comuns quando comparada com as infecções por *Cryptosporidium*, e com sintomas mais duradouros, de acordo com modelos testados por WHO. Não obstante, o *Cryptosporidium* é menor que a *Giardia*, sendo, portanto, mais difícil de remover por processos físicos convencionais (WHO, 2011).

3.5 Indicadores de qualidade da água

Devido a questões relacionadas com a complexidade, sensibilidade, detecção, custo e oportunidade de obtenção de resultados, os testes para identificar patógenos específicos geralmente se dão pela avaliação da qualidade da água como base para validar se o desempenho de um tratamento é eficaz na eliminação de micro-organismos.

Ocasionalmente, a detecção de agentes patogênicos pode ser realizada para verificar se um tratamento ou processo têm sido eficaz. No entanto, os testes microbiológicos incluídos na verificação são geralmente limitados a testes com organismos indicadores de qualidade da água (aqueles amplamente utilizados para determinar a potabilidade da água).

É importante reconhecer que existem diferentes métodos para detectar patógenos e que possuem diferentes propriedades. Métodos de cultivo além de poderem utilizar caldos baseados em meios seletivos para detectar crescimento vivo de micro-organismos, são menos onerosos que outros métodos, como por exemplo, os métodos que utilizam microscópios. A detecção de patógenos por microscopia, presença de ácido nucleico (reação

em cadeia da polimerase) ou ensaios imunológicos, medem a presença física do micro-organismo ou de componentes deles, mas nem todos necessariamente determinam se o que é detectado está vivo ou infeccioso (WHO, 2011). Assim, alguns desses métodos criam incertezas quanto ao risco à saúde humana quando em comparação com a detecção por métodos baseados em cultivo.

O conceito de utilização da *E. coli* como indicador de contaminação fecal é uma prática bem estabelecida na avaliação da qualidade da água potável. *E. coli* tem sido tradicionalmente usada para monitorar a qualidade da água potável, e continua a ser um parâmetro importante no monitoramento realizado como parte da verificação ou de vigilância sanitária (WHO, 2011). Coliformes termotolerantes podem ser utilizados como uma alternativa ao teste de *E. coli* em muitas circunstâncias. Água destinada ao consumo humano não deve conter organismos indicadores de contaminação fecal. Na maioria dos casos, o controle para *E. coli* ou coliformes termotolerantes fornece um alto grau de segurança por causa dos seus grandes números em águas poluídas.

Segundo a portaria MS 2914 do Ministério da Saúde de 2011, a água destinada à ingestão deve estar em conformidade com o padrão bacteriológico descrito na Tabela 4.

Tabela 4. Parâmetros bacteriológicos indicadores de qualidade da água para consumo humano¹.

Parâmetro	Valor máximo permitido (VMP)
Coliformes totais ²	Ausência em 100 mL
Coliformes termotolerantes	Ausência em 100 mL
<i>Escherichia coli</i> ³	Ausência em 100 mL
⁽¹⁾ água potável destinada à ingestão, preparação e produção de alimentos e à higiene pessoal, independentemente da sua origem. ⁽²⁾ indicador de eficiência de tratamento. ⁽³⁾ a detecção de <i>E. coli</i> deve ser preferencialmente adotada. Indicador de contaminação fecal.	
Fonte: (MS, 2011)	

O grupo dos coliformes totais (CT) inclui espécies de origem não exclusivamente fecal, podendo ocorrer naturalmente na água. Por este motivo, 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) inclui bactérias de origem não exclusivamente, principalmente em países de clima tropical, mesmo que originalmente introduzidas na água por poluição fecal, podem se adaptar ao meio aquático. Dessa forma, o emprego do termo “coliformes fecais” tem sido amplamente questionado, estabelecendo-se a tendência 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 *E. coli* (exclusivamente fecal); esses organismos ainda têm sido largamente utilizados como indicadores de poluição de águas naturais.

Embora a primeira linha da Tabela 4 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 na eficiência do tratamento, sobretudo da desinfecção, uma vez que estes organismos apresentam uma taxa de decaimento similar a 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, 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 *E. coli* ou coliformes termotolerantes, devendo, nesse caso, ser efetuada a verificação e confirmação dos resultados positivos, de acordo com o padrão bacteriológico da água para consumo humano estabelecido pela Portaria 2914 do Ministério da Saúde de 2011.

Características essenciais dos indicadores

Segundo Pelczar *et al.* (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 *et al.* (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.

Técnicas para determinação de coliformes

As condições ambientais são muito diversas e podem divergir muito das condições entéricas. Isso pode ocasionar 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 devem ser 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) 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 (STANDARD METHODS..., 2005).

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.

3.6 Descontaminação microbiológica da água

Os processos de descontaminação têm como objetivo a destruição ou inativação de micro-organismos patogênicos capazes de provocar 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, 1994). 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 à substâncias tóxicas e habilidade na formação de esporos (ROSSIN, 1987).

A taxa de mortalidade de doenças transmitidas pela água pode ser reduzida significativamente com o tratamento da água contaminada, saneamento e higiene (WHO, 2013). A diarreia é a doença mais comumente transmitida pela água, tanto para adultos quanto para crianças (WHO, 2011). Nos adultos a doença traz consequências na renda familiar por atrapalhar o trabalho e, em alguns casos, a morte pode ser uma consequência final (UNIVERSITY OF DHAKA, 2011). Dessa forma, tornar a água potável é de primordial importância, não só para as águas superficiais, mas também as subterrâneas, embora tenham menor quantidade de micro-organismos patogênicos (CRITTENDEN, 2005). A descontaminação da água deve ser capaz de garantir o efeito de inativação ou destruição dos micro-organismos antes de alcançarem os usuários (WHO, 2002). Felizmente, existem técnicas que se mostram como soluções para tratamento microbiológico da água superficial, utilizando métodos e tecnologias que dependem tanto das condições da água, quanto da localidade.

3.6.1 Descontaminação química

A desinfecção química da água para consumo humano inclui qualquer tecnologia à base de cloro (dióxido de cloro), ozônio e outros oxidantes (ácidos e bases fortes) (WHO, 2011).

A desinfecção da água com uso de cloro nos países em desenvolvimento é feita principalmente na forma de pó e líquido, sendo o pó mais utilizado para uso doméstico, devido à sua segurança e facilidade no transporte. Trata-se de um método de fácil aplicação e amplamente disponível, além de ser considerado de baixo custo. Além dessas vantagens, o cloro tem capacidade de desinfecção residual quando usado em doses ligeiramente excedentes (BURCH e THOMAS, 1998).

Para se obter o efeito desejado a aplicação do cloro faz-se necessário que a água esteja sob determinada condição de qualidade. No entanto, o uso do cloro inevitavelmente altera o sabor da água e pH quando aplicado na forma de hipoclorito (CRITTENDEN, 2005). O pH e a concentração de material orgânico na água são fatores de grande importância para a aplicação do cloro (WHO, 2002). Pesquisas mostraram que ao entrar em contato com a matéria orgânica, ela irá oxidar com o cloro livre e formar compostos orgânicos clorados, podendo gerar substâncias carcinogênicas chamadas trihalometanos (ELLIS, 1991; MEYER, 1994; CRITTENDEN, 2005).

A desinfecção da água contaminada com iodo, conhecido como um forte oxidante, geralmente não é recomendado para uso prolongado por causa de preocupações relacionadas com os efeitos do excesso de ingestão sobre a glândula tireóide (WHO, 2011). Da mesma forma, a desinfecção da água com ozônio não é recomendada para tratamento realizado em âmbito familiar, devido à complexidade para gerá-lo, custo elevado e necessidade de uma fonte de energia elétrica segura.

3.6.2 Filtros e membranas

A filtração é um método largamente utilizado nos países em desenvolvimento. O processo de filtração baseia-se no escoamento físico através de uma superfície porosa com um ou múltiplos poros estruturados para

remover e reter micro-organismos em função de seus tamanhos. Quase toda água da superfície requer algum tipo de filtração, não apenas pela existência de micro-organismos patogênicos, mas também, devido à existência de partículas sólidas em suspensão como algas, argila e materiais orgânicos ou inorgânicos (WHO, 2002).

Existem diferentes tipos de filtros feitos de blocos de carbono, cerâmica porosa contendo prata coloidal, membranas reativas, fibra de vidro ou filtros de pano, os quais dependem essencialmente do tamanho dos poros (WHO, 2011). No entanto, quando estes filtros possuem baixa qualidade porosa e inadequada limpeza regular, a remoção dos micro-organismos torna-se ineficiente, permitindo que milhões de bactérias escapem do processo.

Existem também os filtros de meios granulares que removem sólidos suspensos e óleos com a água que passa através do material granular e são bastante utilizados em regiões remotas (CRITTENDEN, 2005). Para reter micro-organismos patogênicos, esses filtros usam a combinação de processos físicos e químicos, incluindo a sedimentação e adsorção (WHO, 2011). Os processos mais comuns de filtração são: filtração rápida e filtração lenta pela areia. Na filtração rápida, as partículas na água são removidas durante o fluxo descendente ao longo do leito. A filtração lenta opera de modo similar, entretanto, depende da formação de filme biológico nas camadas internas do sistema. O filme biológico é responsável pela remoção de 98 % dos agentes patogênicos (SCHULZ e OKUN, 1984; NREL, 1997). Embora a filtração lenta pela areia tenha a vantagem de reduzir a turbidez da água retendo partículas suspensas, o filtro pode entupir rapidamente caso haja alto nível de partículas.

Outras opções de filtração são os ultra-filtros, nano filtros e osmose reversa, porém, são onerosos e exigem fornecimento de energia elétrica confiável para funcionar e serem operados (WHO, 2011).

3.6.3 Desinfecção solar (UV)

Um dos métodos físicos que tem sido aplicado para a descontaminação da água é o tratamento com luz ultravioleta (UV). O processo com luz UV inativa as sequências de DNA envolvidas na reprodução das bactérias, vírus e protozoários, além de gerar reações fotoquímicas que previnem contra a

absorção de nutrientes (SVENSKT VATTEN, 2011). Essa é uma classe de tratamento que promove o efeito biocida nos comprimentos de onda mais curtos, entre 100-280 nm (UV-C) (LEGRINI *et al.*, 1993; SVREK e SMITH, 2005).

Uma série de tecnologias de tratamento de água contaminada emprega a luz UV de lâmpadas para inativar micro-organismos (WHO, 2011). Para uso doméstico ou de tratamento em pequena escala, são empregadas lâmpadas a vapor de mercúrio de baixa pressão que produzem radiação UV monocromática no comprimento de onda de 254 nm (CRITTENDEN, 2005).

Normalmente essas tecnologias permitem que a água seja exposta à radiação em doses suficientes para inativar os agentes patogênicos. O uso dessas tecnologias em países em desenvolvimento pode ser limitado devido aos custos dos equipamentos e, à necessidade de suprimento confiável de energia elétrica e de manutenção (WHO, 2011).

A radiação UV solar para desinfecção da água tem sido estudada por pesquisadores com o objetivo de inibir a necessidade de energia elétrica, uma vez que em regiões remotas é praticamente inexistente. Embora no espectro da radiação UV a faixa UV-C seja considerada a mais germicida na eliminação de micro-organismos patogênicos, a maior parte da energia UV-C proveniente do Sol é absorvida pela atmosfera antes de chegar à superfície (ACRA *et al.*, 1991; ELLIS, 1991).

Uma tecnologia simples e de baixo custo que vem sendo usada nos países em desenvolvimento é a técnica “Solar Desinfection” (SODIS); que utiliza recipientes plásticos transparentes como garrafas PET, os quais permitem a penetração da radiação solar UV. Essa técnica também pode contar com a ação combinada da luz solar com o calor (WHO, 2011). Outras formas físicas de exposição à radiação solar também empregam a combinação destes efeitos em outros recipientes como sacos de plástico (e.g. “solar puddle”) e painéis.

É importante ressaltar que este método sofre forte influência negativa da turbidez da água. Quando a quantidade de agregados sólidos ou partículas em suspensão é alta, ocorre a absorção ou até mesmo reflexão dos fótons responsáveis por atingir as células dos micro-organismos patogênicos (ELLIS, 1991). Além disso, para obter bons resultados de desinfecção utilizando a luz

solar como fonte de radiação UV, faz-se necessárias exposições de longa duração (WEGELIN *et al.*, 1994).

3.6.4 Tecnologias térmicas

Tecnologias térmicas são aquelas cujo principal mecanismo para a destruição de micro-organismos em água é o calor produzido principalmente pela queima de combustível.

Fervura

A técnica de elevar a temperatura da água até o ponto de ebulição é comumente utilizada em regiões rurais, onde o combustível disponível são materiais vegetais como carvão e lenha (UNIVERSITY OF DHAKA, 2011). Embora seja um processo simples e eficaz, a fervura por queima de material vegetal contribui com a degradação do bioma local (ACRA *et al.*, 1984; ELLIS, 1991). Ferver um litro de água requer a queima de aproximadamente um quilograma de madeira, podendo ainda causar tosse e problemas pulmonares (WHO, 2011). Em diversas situações rurais, faz-se necessária uma alternativa que garanta o aquecimento da água, uma vez que a matéria-prima utilizada para a queima de combustível pode ser escassa (WHO, 2002).

Se for considerada a possibilidade de reduzir ou eliminar a exposição ao fogo em benefício à saúde e ao ambiente, não só para prevenir doenças pulmonares, mas também para reduzir o impacto ambiental, a utilização de outras fontes de energia para o aquecimento da água podem se mostrar com alternativas promissoras (WHO, 2011).

Pasteurização térmica

Mesmo sendo capaz de descontaminar a água, a fervura pode ser substituída pelo processo conhecido como pasteurização térmica. A pasteurização refere-se ao aumento suficiente da temperatura da água, a fim de torná-la segura para beber. Pasteurizar a água não significa a remoção de partículas em suspensão que criam turbidez, pois estas são removidas através

de filtração. Além disso, esta técnica não necessita que os patógenos sejam completamente destruídos, pois não se trata de esterilização. As populações desses micro-organismos podem ser simplesmente reduzidas a níveis que não ofereçam risco para a saúde humana.

Alguns patógenos são capazes de sobreviver em temperaturas elevadas por certo tempo. A duração do tratamento depende fortemente da temperatura alcançada e do tipo de micro-organismo. Felizmente existem diretrizes aceitas pelas indústrias de alimentos, no que diz respeito ao ponto térmico de morte desses organismos que podem ser usadas como ponto de partida na discussão de tratamento da água (ABRAHAM *et al.*, 2015). Além disso, diversos estudos acadêmicos têm sido realizados sobre a pasteurização da água.

As temperaturas entre 60 °C e 70 °C foram aplicadas em compostagem de lamas de esgoto por longos períodos (aproximadamente 3 dias) para o tratamento completo (WILEY e WESTERBERG, 1969). Os vírus da hepatite A e B foram estudados e submetidos à temperatura de 98 °C durante 1 min (KRUGMAN *et al.*, 1970). Estudos anteriores já haviam citado inativação das linhagens A e B da Hepatite com exposição de 30 minutos à temperatura de 56 °C (HAVENS, 1945; WARD *et al.*, 1958). Em um trabalho que envolveu o vírus da hepatite A, utilizou-se um método para controlar cuidadosamente a temperatura e o tempo de exposição. Nele, foi relatado que o vírus é completamente inativado a 240 segundos, 30 segundos, e 5 segundos nas temperaturas de 70 °C, 75 °C e 80 °C, respectivamente (PARRY e MORTIMER, 1984).

A tolerância térmica de diferentes patógenos também foi investigada. O tratamento térmico de solos que continham agentes patogênicos foi realizado com temperaturas entre 37-50 °C, o qual revelou uma relação logarítmica entre o tempo e a temperatura para diversos micro-organismos e longos períodos necessários para a descontaminação (PULLMAN *et al.*, 1981). O protozoário *Cryptosporidium* foi estudado sob um protocolo de aquecimento de 55 °C durante o período de 20 minutos, sendo eficaz para fezes de bezerros (ANDERSON, 1985). Por outro lado, experimentos com bactérias enteropatogênicas revelaram que exceder a temperatura alvo de 65 °C torna o tratamento eficaz e seguro (BANDRES *et al.*, 1988).

Experiências laboratoriais com oocistos de *Cryptosporidium* foram realizadas cuidadosamente com incrementos de 5 °C de temperatura, de 60 °C à 100 °C. A duração da exposição ao calor foi cuidadosamente controlada e, em seguida, em laboratório, ratos (cobaias) foram submetidos à água. Os resultados mostraram que para as temperaturas de 60 °C e 72,4 °C, com respectivamente 5 e 1 minuto, o poder infectante foi perdido (FAYER, 1994). Um estudo semelhante sobre oocistos de *Cryptosporidium* reportou que uma exposição térmica de 71,7 °C durante 5 segundos é suficiente para inativar o micro-organismo (HARP *et al.*, 1996).

Mais tarde, ensaios com *Mycobacterium* em soluções de leite foram importantes para se alcançar valores de redução decimal que serviram para calcular taxas de inativação de patógenos, como por exemplo, as temperaturas de 62 °C, 65 °C, 68 °C e 71 °C com tempos de 228,8, 47,8, 21,8 e 11,7 segundos respectivamente (SUNG e COLLINS, 1998).

A Figura 1 mostra as zonas de segurança e de letalidade para inativação de alguns dos principais micro-organismos patogênicos, com as curvas que relacionam temperaturas de pasteurização com o tempo de exposição (FEACHEM *et al.*, 1983).

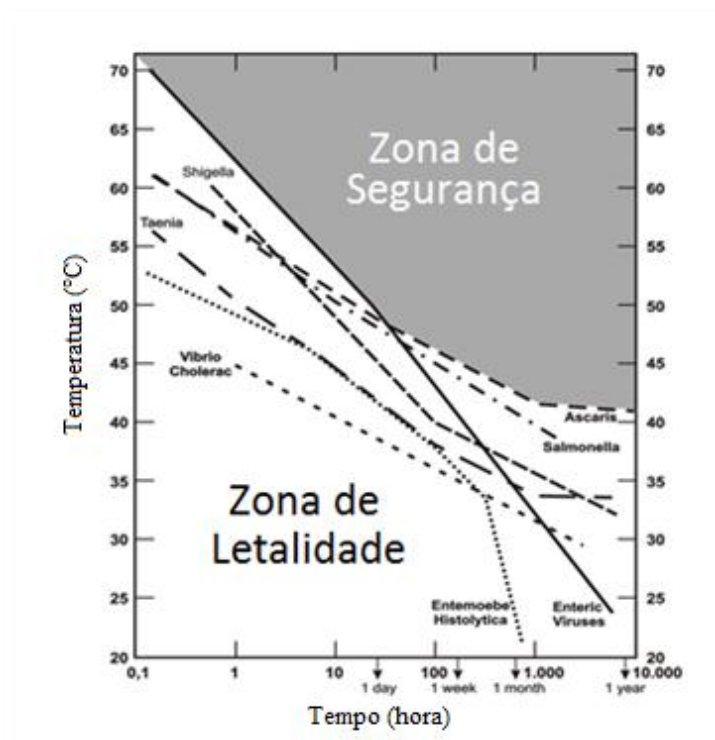


Figura 1. Curvas de inativação de micro-organismos patogênicos por pasteurização.
Fonte: Feachem (1983)

Embora haja uma forte dependência do tipo de patógeno, todos os citados nesta revisão podem ser tratados a temperaturas abaixo da temperatura de ebulição da água. Infelizmente, enquanto esse ponto de vista é universalmente reforçado na literatura científica, não é do conhecimento comum do público geral. Outra característica muito importante é quanto à duração das exposições, que diminui rapidamente à medida que a temperatura aumenta. Além disso, há uma ampla gama de recomendações da literatura para os requisitos de temperatura e tempo de tratamento.

Na literatura também são encontradas discussões sobre sistemas que utilizam o princípio da desinfecção solar conjuntamente ao efeito solar térmico para o tratamento da água, tais como McGuigan *et al.* (1998); Sommere *et al.* (1997); Saitoh e El-Ghetany (1999); Rijal e Fujioka (2003); Martin-Dominguez e Herrera (2005); Marques *et al.* (2013).

Finalmente a pasteurização térmica é um método de tratamento que pode ser aplicado utilizando o Sol como fonte de energia e ainda obter os mesmos resultados que a fervura. Além de não agredir o meio ambiente, a pasteurização solar destrói os micro-organismos independentemente de fatores como a turbidez e o pH, os quais influenciam significativamente outros métodos (BURCH e THOMAS, 1998).

3.7 Sistemas de Pasteurização solar

Para realizar a pasteurização solar da água, a literatura mostra que pesquisadores têm desenvolvido sistemas que utilizam coletores solar térmicos. Estes sistemas podem ser do tipo: que operam por bateladas; e os que funcionam por fluxo contínuo. Embora alguns desses sistemas também tenham sido desenvolvidos com refletores ou concentradores, estes não fazem parte do foco desta revisão.

A “World Pax Service” desenvolveu um pasteurizador solar de fluxo contínuo feito com 18 m de tubulação pintada de preto que fica inserida dentro de uma caixa com tampa de vidro. Este sistema é controlado por uma válvula termostática cuja abertura ocorre em 83,5 °C, sendo capaz de produzir 16-24 L/dia de água tratada (apud ANDREATTA *et al.*, 1994).

Jorgensen *et al.* (1998) alcançaram a quantidade de 50 L/m² de água tratada a 75 °C em um dia. Nesse estudo utilizaram coletores solar térmicos planos e uma válvula termostática para controle do fluxo. Enquanto o pasteurizador desenvolvido por estes pesquisadores mostrou potencial de produzir 50 L/m² litros de água por dia, a “Safe Water Systems” produziu um sistema que também se baseia em uso de coletor solar plano, válvula termostática e trocador de calor. Este pasteurizador trabalhou com uma válvula projetada para liberar água a uma temperatura de 79 °C, coletor com área igual a 3,7 m², e produziu aproximadamente 110 L/dia de água tratada (SAFE WATER SYSTEMS, 2002).

Duff e Hodgson (2005) desenvolveram e testaram três sistemas de pasteurização passivos que não requerem energia elétrica para seu funcionamento. Foram usados coletores solar de tubo evacuado e inicialmente uma válvula termostática automotiva. O segundo e o terceiro sistema foram resultados de modificações feitas a partir de dificuldades e problemas de inércia térmica e de imprecisão na temperatura de abertura ou fechamento encontrados na válvula termostática automotiva. A modificação do sistema consistiu em eliminar o uso da válvula que controlava o fluxo da água e fazê-lo funcionar por diferença de densidade. Diferentemente dos sistemas citados anteriormente, esse pasteurizador passou a funcionar por fluxo contínuo. O estudo reportou que em um dia típico de céu claro, o sistema foi capaz de produzir 86 L de água tratada a 78 °C.

El-Ghetany e Dayem (2010) testaram um sistema de pasteurização solar controlado por uma válvula solenoide. O sistema utiliza pré-aquecimento na saída de um coletor solar plano. A válvula por sua vez é acionada por um termostato que permite configurar uma determinada temperatura para o tratamento. Os pesquisadores reportaram que o sistema foi capaz de produzir 39 L/m².dia a 90°C. Amsberry *et al.* (2015) utilizou uma unidade de coleta junto a concentradores refletivos para pré-aquecer termicamente a água, por fluxo contínuo, até pelo menos 70 °C (durante 7 minutos) antes da fase de desinfecção. Nos testes realizados o sistema atingiu produtividade de 55 L em um dia de operação.

Apesar de não ser o foco desta seção da revisão, é importante ressaltar que alguns estudos, além de relatarem seus resultados de produtividade diária,

trazem também resultados de análises microbiológicas da água. Um exemplo disto, foram as pesquisas realizadas por Onyango *et al.* (2009), Wayua *et al.* (2013), Bigoni *et al.* (2014) e Dobrowsky *et al.* (2015). No primeiro artigo os pesquisadores investigaram um sistema desenvolvido com um coletor solar plano, que realizava bateladas através de uma válvula termostática quando excedia 84 °C. Além de reportar a produtividade de 49 L de água por dia, aumentando à 95 L quando acoplado um refletor solar, mostraram resultados microbiológicos após o tratamento no que diz respeito aos coliformes totais e *E. coli*. Assim como o sistema de Onyango *et al.*, o pasteurizador idealizado por Wayua *et al.* (2013) utilizou um coletor solar do tipo plano, mas para pasteurizar leite, e mostrou resultados para coliformes totais e *E. coli*. No terceiro artigo, um pasteurizador solar que utiliza calha parabólica de concentração (CPC) e uma válvula termostática alcançou produtividade de 66 L a 87 °C, e também mostrou resultados em relação à inativação de *E. coli*. O artigo publicado por Dobrowsky (2015) relatou que o pasteurizador solar para coleta de água de chuva foi capaz de produzir uma média de 8,7 L/h a uma temperatura média de 81 °C, e mostrou resultados microbiológicos envolvendo bactérias heterotróficas, coliformes totais e *E. coli*.

Mesmo que esta revisão de literatura acerca dos sistemas de pasteurização solar não tenha se destinado a ser exaustiva, ela representa o que foi em termos de publicações dentro das últimas duas décadas sobre o tema. Vê-se que existem diversos sistemas desenvolvidos para produção de água potável em pequena escala. Alguns deles não mostram análises bacteriológicas comparativas sobre a qualidade da água antes e depois do tratamento. Além disso, há pouca informação detalhada sobre a confiabilidade das válvulas termostáticas quanto à segregação da água contaminada, cujo objetivo é evitar a recontaminação durante o processo. Na revisão realizada, não foram encontrados sistemas que tenham controle sobre o tempo de tratamento quando a água atinge as temperaturas de pasteurização. E para dias de baixa irradiância absorvida por motivos adversos, os quais o alcance de temperaturas mais baixas necessita de maior tempo de residência, aparentemente os sistemas não podem garantir a inativação dos agentes patogênicos. Isso, tanto para os sistemas que usam válvulas quanto para os sistemas que funcionam por diferença de densidade. O sistema desenvolvido

no presente trabalho se diferencia dos sistemas acima citados por possuir o controle do tempo de tratamento, por garantir a operação mesmo em dias de baixa irradiância absorvida, devido à possibilidade de pré-programação de diversos “setpoints” de tratamento e, por assegurar completamente a segregação entre a água contaminada e a água em tratamento.

4 MATERIAL E MÉTODOS

Um sistema de pasteurização solar automatizado foi reproduzido a partir do modelo proposto por Carielo (2011), com alterações no que diz respeito ao coletor solar e aos sensores de temperatura (desenho original) utilizados no protótipo inicial. Além disso, o modelo foi otimizado a partir de modificações na entrada da água no coletor, assim como a adição de outro respirador ao sistema (desenho modificado).

Os testes foram realizados na área de testes do Grupo de Pesquisa em Fontes Alternativa de Energia (FAE), localizado na Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), latitude 08°04'03" S e longitude 34°55'00" O. A experimentação seguiu duas diretrizes: otimizar a produtividade do sistema e verificar sua eficiência no tratamento microbiológico para coliformes totais, *E. coli*, *P. aeruginosa* e bactérias heterotróficas.

4.1 Descrição conceitual do sistema

O pasteurizador solar é composto basicamente por coletor solar plano, trocador de calor e sistema de controle de válvulas. Uma plataforma de madeira foi utilizada para servir de suporte ao reservatório de água que irá alimentar todo o sistema. A plataforma permite que a água possa fluir de forma passiva, por gravidade, até a entrada do pasteurizador solar.

Nesta seção são apresentadas as configurações em que o sistema foi testado, sendo dois conceitos de desenhos considerados: (a) original - finalidade de assegurar a segregação entre a água contaminada e água em tratamento; e (b) modificado – finalidade de aumentar a produtividade. A Figura 2 mostra as visões lateral e frontal do sistema na configuração original, enquanto a Figura 3 mostra as mesmas visões na configuração modificada.

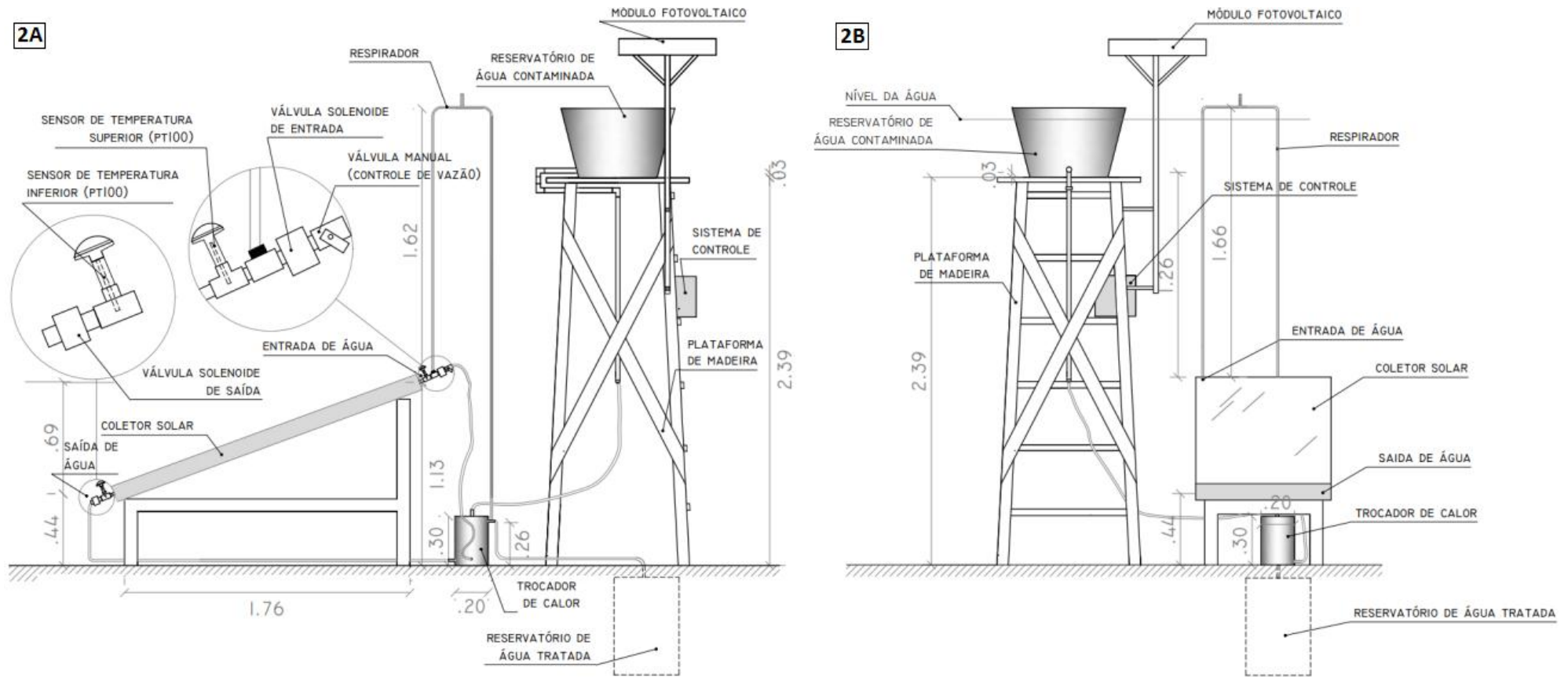


Figura 2. As visões 2A (lateral) e 2B (frontal) mostram o desenho original do sistema de pasteurização, com os componentes e dispositivos utilizados nos testes. As cotas estão em unidade de metro e representam as alturas relevantes para a montagem do pasteurizador. Nos círculos grandes estão detalhes das ligações de entrada e saída do coletor solar.

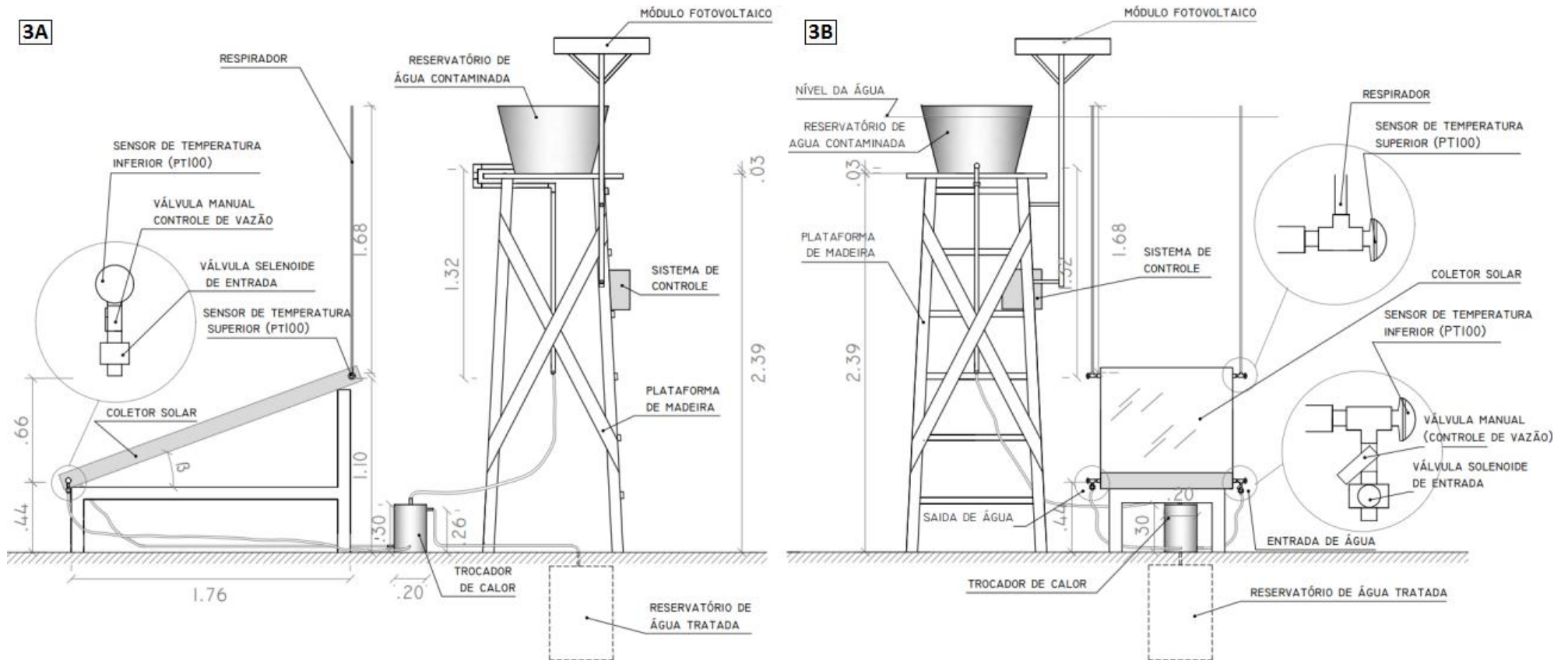


Figura 3. As visões 3A (lateral) e 3B (frontal) mostram o desenho modificado do sistema de pasteurização, com os componentes e dispositivos utilizados nos testes. As cotas estão em unidade de metro e representam as alturas relevantes para a montagem do pasteurizador. Nos círculos grandes estão detalhes das ligações de entrada e saída do coletor solar.

No projeto original, a entrada da água localiza-se 1,13 m acima do solo (parte superior do coletor solar) e a saída localiza-se na parte inferior, a 0,44 m acima do solo a fim de garantir o total preenchimento do trocador de calor. Em outros sistemas de pasteurização convencionais, a água entra na parte de baixo e sai na parte de cima do coletor solar. Esse conceito difere dos sistemas convencionais utilizados para aquecimento de água que funcionam por batelada ou por termossifão. Nesta configuração foi utilizado um único respirador que fica na parte superior do coletor, interligado ao reservatório de água via trocador de calor. Embora esta ligação implique na concorrência entre a saída do ar e a entrada da água, ela garante que, no caso de formação de vapor, a condensação da água dentro do respirador seja conduzida para o reservatório de água tratada.

No projeto modificado, o sistema foi testado com entrada e saída da água na parte inferior, para canalizar a saída do ar unicamente pelos respiradores, sem concorrer com a entrada de água no coletor. Para a configuração modificada, a entrada e a saída de água se localizam 0,44 m acima do solo. Esse conceito de sistema também não é convencional. Nesta configuração foram utilizados dois respiradores na parte superior do coletor a uma altura de 1,10 m, não interligados ao trocador de calor.

4.2 Funcionamento do sistema

Em ambas as configurações propostas para teste do pasteurizador solar, o funcionamento consiste em confinar um lote de água contaminada a uma determinada temperatura, durante um respectivo tempo. Após o confinamento, o lote é descarregado com água tratada e um novo lote de água contaminada carrega o sistema. Nos projetos testados, o reservatório de água contaminada fica em altura suficiente para proporcionar a circulação da água por ação da gravidade.

O sistema permite que a água flua do reservatório de água contaminada (1), passando através das serpentinas internas do trocador de calor (2) até chegar ao coletor solar onde é confinada (3). Ao ser liberada, a água tratada (quente) segue novamente para o trocador de calor (4) preenchendo-o temporariamente para em seguida chegar ao reservatório de água tratada (5).

A Figura 4 ilustra a simplificação esquemática em que pode ser visualizada a sequência descrita.

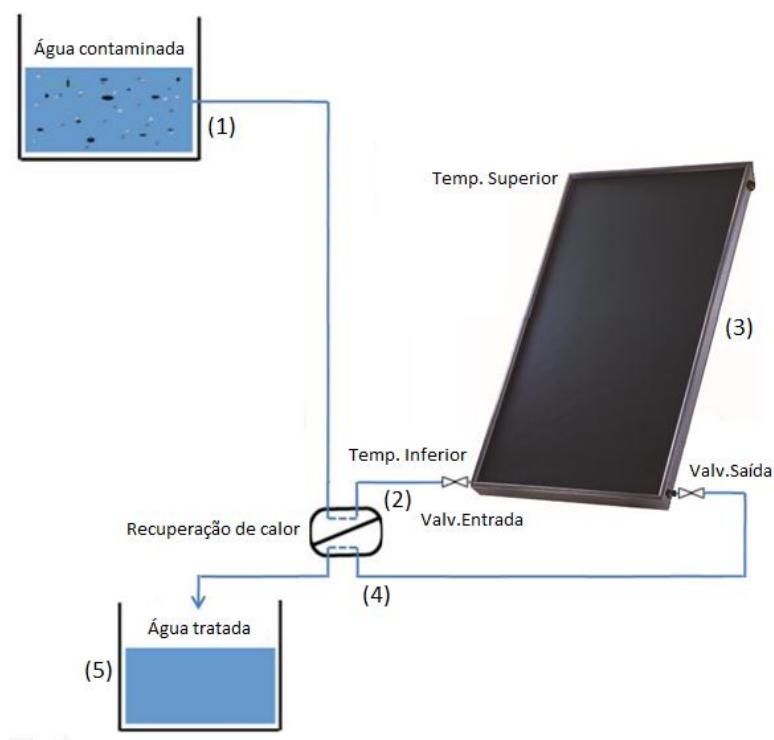


Figura 4. Esquema de funcionamento cíclico do sistema de pasteurização solar.

Enquanto o coletor é esvaziado, a válvula de entrada permanece fechada para garantir a segregação entre a água tratada e a contaminada. Em seguida, a válvula de saída é fechada e só então um novo lote de água contaminada (fria) é liberado para preencher o coletor solar, sendo pré-aquecido no momento que circula pelas serpentinas internas do trocador de calor. Após o segundo tratamento, a água quente existente no trocador de calor é expulsa para o reservatório de água tratada, dando lugar ao novo lote de água tratada (reinício do ciclo).

4.2.1 Equipamentos e dispositivos

Para o devido funcionamento do sistema, foram utilizados os seguintes equipamentos:

Coletor solar plano MC 20C (Heliotek) e Módulo fotovoltaico 12 V/10 Wp

O coletor solar utilizado possui capacidade volumétrica de 2 L, eficiência óptica de 0,74, eficiência energética média de 0,60, classificação “A” segundo PROCEL e superfície absorvedora de cobre. Sua parte externa é feita de alumínio e utiliza cobertura simples de vidro, com aproximadamente 2 m² de abertura. Também foi utilizado um módulo fotovoltaico com capacidade energética de 10 Wp.

Trocador de calor

Um trocador de calor foi utilizado com função de recuperação de calor na saída do sistema. O trocador foi fabricado com aço inoxidável em forma de cilindro (30 cm de altura, 20 cm de diâmetro externo e 5 cm de diâmetro interno), e com capacidade volumétrica de 2,3 litros. Internamente, um cilindro forma uma parede de isolamento preenchida com lã de rocha junto a um outro cilindro externo. No centro, um espiral feito de tubo de cobre interliga a entrada de água fria à saída de água pré-aquecida.

Reservatório para água contaminada e água tratada

Dois reservatórios de água foram utilizados: o reservatório de água contaminada com capacidade de 150 litros (2,39 m acima do solo sob a plataforma), e o reservatório de água tratada que fica 0,10 m abaixo do trocador de calor.

Respirador e tubulações de CPVC e componentes hidráulicos

Para o respirador foi utilizada uma mangueira de plástico reforçado com diâmetro de 1 cm. Na configuração original, o respirador foi instalado para: permitir a saída do ar existente dentro do coletor solar no momento de entrada da água; indicar o momento em que o coletor está completamente preenchido pela água contaminada; e caso aconteça vaporização, conduzi-la pelo tubo a

fim de promover a condensação guiada diretamente para o reservatório de água tratada. Na configuração modificada, dois respiradores foram utilizados com o intuito de garantir a completa saída de ar vindo do coletor mais rapidamente e conseqüentemente o completo preenchimento do mesmo pela água. Em todas as conexões hidráulicas foram utilizados componentes inoxidáveis de bronze, com diâmetro de meia polegada (0,0127 m). Em ambas as configurações, o respirador localiza-se na parte superior do coletor solar, em 1,13 e 1,10 m respectivamente.

Válvula manual

Em ambas as configurações do sistema, uma válvula manual para o controle da vazão de entrada foi instalada após a válvula solenoide de controle, com a função de regular o fluxo da água. Esse mecanismo tem a função de evitar possível escapamento de água pelo respirador, impulsionadas pelo ar existente enquanto o coletor estiver sendo preenchido.

Sensores de temperatura e irradiação global

Dois sensores foram utilizados para medir a temperatura (°C) na parte superior e parte inferior do coletor solar, e um sensor para medir a irradiância global (W/m^2) no plano do coletor. A temperatura foi medida utilizando PT100 calibrado e ajustado com sensor padrão de mercúrio a cada três meses e ajustado através do circuito eletrônico de controle. A irradiação foi obtida a partir do piranômetro (da LI-COR), calibrado em campo pelo sensor padrão CMP22 da KIPP & ZONEN a cada período de seis meses (ficha de calibração vide APÊNDICE A).

Sistema de aquisição de dados (Datalogger CR10X)

Um Datalogger CR10X foi usado para monitorar as principais variáveis que envolvem o funcionamento do pasteurizador: as temperaturas superior e inferior do coletor solar e a irradiância no plano do mesmo. O sistema foi configurado para armazenar os dados provenientes do sensor de irradiância

global e dos sensores de temperatura. O monitoramento e o armazenamento dos dados foram realizados durante todo o período operacional do pasteurizador (das 7:00 AM às 4:00 PM), em médias de 1 minuto.

4.2.2 Sistema de controle

Com a finalidade de garantir o confinamento do lote de água, um sistema de controle foi desenvolvido na plataforma prototípica livre Arduino, o qual controla duas válvulas solenoides do tipo “N/F” (normalmente fechadas) em função das temperaturas superior e inferior do coletor solar. As válvulas foram selecionadas considerando: tensão de acionamento DC (12 V) e a obstrução e abertura total (estado on/off). Cada uma das válvulas é interligada na entrada e na saída de água do coletor. A Figura 5 mostra a diagramação em blocos da alimentação FV (fotovoltaica) para o circuito de controle que utiliza o microcontrolador ATmega 1280 e os dispositivos de entrada (sensores) e saída (válvulas solenoides). O suprimento de energia fornecido pelo módulo é suficiente para garantir o pleno funcionamento das válvulas (consumo por batelada = 5 Wh) e do circuito eletrônico de controle.

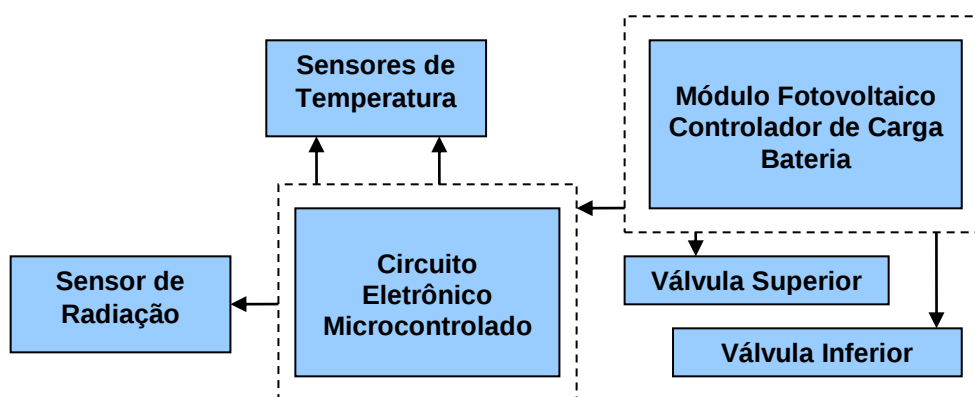


Figura 5. Diagrama de alimentação fotovoltaica do sistema de controle e dispositivos.

No sistema composto pelos componentes mencionados, a descontaminação microbiológica da água por pasteurização solar depende estritamente de dois fatores: a implementação funcional da lógica de controle para promover a completa segregação entre as massas de água e o controle do tempo de tratamento

Lógica de controle

A lógica de controle é responsável por garantir o acionamento e desacionamento das válvulas solenoides quando as temperaturas superior e inferior atingirem um determinado valor (“setpoint”). A Tabela 5 mostra cinco “setpoints” configurados e associados a um tempo de residência/tratamento para o controle durante o experimento. Esses valores foram utilizados em pesquisas anteriores as quais demonstraram eficácia do sistema para a descontaminação bacteriológica da água (CARIELO, 2011).

Tabela 5. Relação de temperatura e tempo utilizada no sistema de controle.

Setpoint (°C)	Tempo de residência (s)
55	3600
60	2700
65	1400
75	700
85	15

Fonte: CARIELO (2011).

O sistema permite pré-estabelecer os momentos inicial e final de funcionamento. Na experimentação proposta, o sistema de controle foi configurado para operar das sete horas da manhã às quatro da tarde, e programado para, assim que entrar em funcionamento, acionar a válvula de entrada e fazer a contagem do tempo de carga. Ao terminar a contagem, a válvula de entrada é desacionada e o monitoramento de temperatura inicia.

A carga inicial ocorre independente das temperaturas monitoradas (coletor completamente preenchido pela água contaminada). Após a carga inicial, as bateladas (ciclos de tratamento) subsequentes passa ma ser dependentes das temperaturas. Para que o contador inicie a contagem, faz-se necessário que as temperaturas superior e inferior sejam iguais ao “setpoint”. Enquanto apenas uma temperatura atingir o “setpoint”, o contador não inicia a contagem. Cada “setpoint” possui um contador próprio. Os “setpoints” são

acionados por vez, à medida que as temperaturas são alcançadas. Caso qualquer um dos contadores esteja em andamento e uma das temperaturas decair a um valor abaixo do “setpoint”, o respectivo contador para de contar, enquanto os outros continuam suas contagens se estiverem ativados por seus respectivos “setpoints”.

Quando um determinado contador atinge o tempo de residência a válvula de saída é acionada e a descarga é realizada, mantendo a válvula de entrada desacionada (fechada). Após a descarga completa, a válvula de saída é desacionada e a válvula de entrada é acionada ao mesmo tempo para iniciar a carga de um novo lote de água contaminada – reinício do ciclo. Neste processo, o respirador atua como componente que permite a entrada de ar durante a descarga e a saída durante a carga.

A lógica de controle das válvulas em função da temperatura assegura a segregação entre as massas de água contaminada e em tratamento, assim como permite configurar diversas temperaturas de tratamento, além de manter o tempo de residência.

4.2.3 Monitoramento do sistema

O monitoramento das variáveis do sistema foi realizado através de um computador conectado ao “Datalogger”, modelo CR10X da Campbell Scientific. Esse equipamento permite o monitoramento em tempo real, o armazenamento das informações e a coleta dos dados. O diagrama da Figura 6 mostra o esquema de ligação entre os dispositivos e os equipamentos.

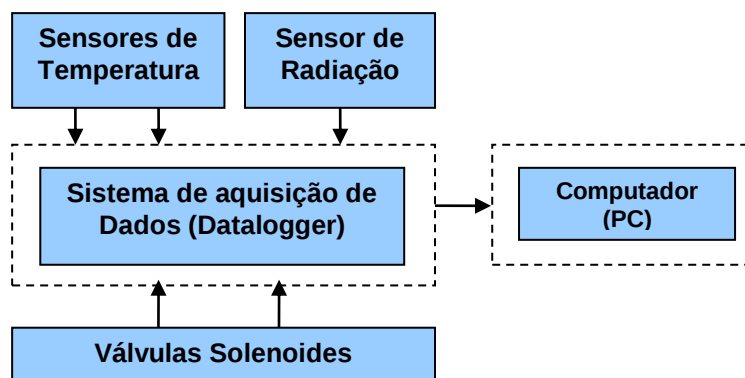


Figura 6. Diagrama de monitoramento do sistema de aquisição de dados.

O software Loggernet v3.x que acompanha o “Datalogger” permitiu elaborar um painel de monitoramento tanto para as variáveis do sistema, quanto para os parâmetros de controle do sistema. Os sinais recebidos pelo sistema de aquisição de dados são convertidos e visualizados através de um painel em tempo real. A rotina de monitoramento do sistema se dá pelas informações contidas e marcadas nos balões da Figura 7.

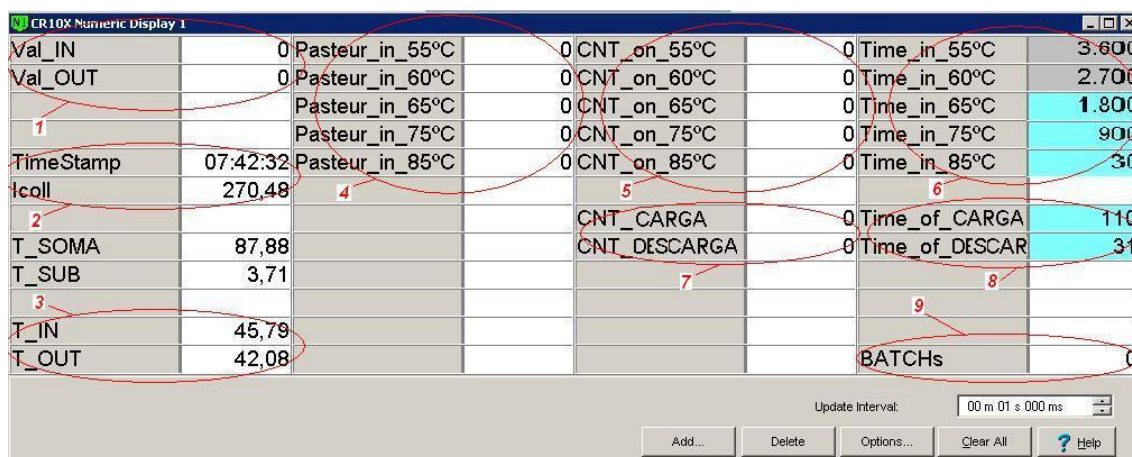


Figura 7. Painel de monitoramento das variáveis e parâmetros do sistema.

No balão 1, verifica-se o estado de ativação das válvulas através da indicação de nível alto ou baixo de sinal. No balão 2, é possível acompanhar o horário local e a potência solar global no plano do coletor (I_{coll}) com unidade em W/m^2 . O balão 3 mostra as temperaturas superior e inferior em unidade de °C. O balão 4 mostra os “setpoints” de tratamento pré-programados (55 °C, 60 °C, 65 °C, 75 °C e 85 °C). Os sinais de nível alto ou baixo indicam a atividade de tratamento em um determinado “setpoint”, podendo indicar mais de um tratamento concomitante. O balão 5 mostra os contadores relacionados a cada “setpoint”, os quais contabilizam individualmente os tempos de residência. No balão 6, verificam-se os tempos (períodos) de residência pré-definidos na programação de controle. Nos balões 7 e 8, encontram-se os contadores e tempos de carga e descarga do sistema. Para efeito de acompanhamento diário, um contador de bateladas foi configurado para contabilizar a quantidade de tratamentos realizados em um dia de operação (balão 9).

4.3 Avaliação da produtividade do sistema

O sistema foi testado e avaliado quanto à produtividade durante os períodos de Fevereiro à Maio de 2012 e de 2013 na configuração modificada e de Fevereiro à Abril de 2014 na configuração original. A produtividade foi verificada a partir da quantidade de bateladas ocorridas em função da irradiância solar acumulada (H_{coll}) no dia (das 7 h às 16 h), sendo cada batelada correspondente a aproximadamente um volume de 2 litros de água tratada.

Para verificar a capacidade diária de tratamento, onze conjuntos de dados foram armazenados e coletados para as experimentações, cada um com 15 dias de monitoramento feito pelo sistema de aquisição de dados.

A sequência cronológica da experimentação realizada é mostrada na Tabela 6. Inicialmente os testes de produtividade foram realizados na configuração modificada sem trocador de calor, com a variação da inclinação (β) do coletor de 2° a 25°. Após os testes de cada inclinação na configuração modificada sem o trocador de calor, foi escolhida a inclinação de maior produtividade para repetir o experimento utilizando o trocador de calor. Em seguida, os testes foram feitos na configuração original neste mesmo ângulo, sendo finalizados nesta configuração com trocador de calor, a fim de comparar os resultados entre as configurações no ângulo de melhor rendimento.

Tabela 6. Períodos de realização dos testes em diferentes configurações e inclinações do coletor solar.

Período	Arranjo	Configuração	Trocador de calor	β^*	Ano
Fevereiro	1	modificado	não	2°	2012
Março		modificado	não	4°	2012
Abril		modificado	não	6°	2012
Maio		modificado	não	8°	2012
Fevereiro		modificado	não	10°	2013
Março		modificado	não	15°	2013
Abril		modificado	não	20°	2013
Maio		modificado	não	25°	2013
Fevereiro	2	modificado	sim	20°	2014
Março	3	original	não	20°	2014
Abril	4	original	sim	20°	2014

*Inclinação do coletor solar voltada para o hemisfério Norte.

Inicialmente a alteração dos ângulos de 2° à 10° se deu com aumento gradual de dois graus. A partir deste último o aumento foi alterado de dois para cinco graus até atingir a inclinação de 25°.

Após a obtenção dos dados de produtividade foram aplicadas regressões lineares nos pontos de dispersão para analisar o comportamento do sistema nas diferentes configurações, a partir dos coeficientes angulares das retas e dos pontos de irradiância crítica (H_{corte}), os quais não promovem a produção de água tratada.

Adicionalmente foi estudado o comportamento do sistema nas faixas de irradiância moderada e alta, que segundo Amin e Han (2009), permeiam, respectivamente, os valores entre 450-700 W/m² (com valor médio em torno de 580 W/m²) e 650-1000 W/m² (com valor médio em torno de 880 W/m²).

4.4 Análises bacteriológicas e eficiência de tratamento

Após avaliar a produtividade, o sistema foi analisado quanto à eficiência de pasteurização utilizando o pasteurizador solar na sua configuração de melhor desempenho. Foi realizado um experimento onde as bateladas foram acompanhadas, e as amostras de água foram coletadas antes do preenchimento do pasteurizador e depois do tratamento na saída do mesmo, para proceder as análises dos parâmetros microbiológicos.

Os métodos utilizados para as coletas e análises bacteriológicas realizadas foram executados de acordo com o manual “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater”, 21st ed., de 2005, os quais são recomendados pela Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) do Ministério da Saúde.

Os indicadores de qualidade da água para consumo humano, utilizados como parâmetros microbiológicos preconizados pela Portaria do Ministério da Saúde Nº 2914 de 12/12/2011, foram: coliformes totais e *E. coli*. Em adição, também foram verificadas a eficiência de tratamento sob as bactérias do gênero *P. aeruginosa* e bactérias heterotróficas.

Dez ensaios foram realizados durante a experimentação. Cada ensaio foi realizado em um período de seis dias, considerando as etapas: coleta, recepção, preparação e análise das amostras. Neste processo estão incluídos

os períodos de incubação das amostras inoculadas antes e depois da pasteurização solar.

4.4.1 Coleta e preparo de amostras

As coletas das amostras de água contaminada foram realizadas entre Fevereiro/2015 e Maio/2015 em um tanque paisagístico situado no Campus Recife da UFPE, entre os prédios dos Departamentos de Antibióticos e de Hotelaria. O tanque é abastecido com água do riacho Cavouco que corta a Universidade Federal de Pernambuco, em Recife-PE. Foram coletadas 10 amostras para 10 ensaios em diferentes dias (Figura 8).



Figura 8. Coleta das amostras de água contaminada em tanque paisagístico situado na UFPE.

Cada ensaio consistiu em coletar a água contaminada em um garrafão de plástico estéril com capacidade volumétrica de 5 litros e transferir um volume de 500 mL para um frasco de borosilicato previamente esterilizado. O restante da água contida no recipiente plástico foi levado ao sistema de tratamento para serem vertidos no coletor solar. A tubulação de saída do sistema foi desinfetada com etanol 70%. Após o tratamento, na saída do sistema, também foi coletado 500 mL de água em frasco previamente esterilizado. Como a temperatura da água coletada na saída do coletor é

elevada, o frasco de borosilicato foi inserido em água com temperatura ambiente (banho-maria) a fim de resfriar a amostra para subsequente análise laboratorial.

Em cada ensaio, as amostras antes e depois do tratamento foram homogeneizadas antes da retirada da unidade analítica. A abertura dos frascos foi feita no interior de uma câmara de fluxo laminar a fim de prevenir contaminações externas. Todos os instrumentos e utensílios utilizados para a retirada das unidades analíticas foram previamente esterilizados em autoclave e flambados no momento do uso.

Os volumes de 500 mL de cada ensaio foram utilizados para realização das análises bacteriológicas: pesquisa de coliformes totais e de *E. coli*, de *P. aeruginosa* e bactérias heterotróficas; antes e depois do tratamento.

4.4.2 Determinação de coliformes totais e *E. coli*

Para a determinação de coliformes totais e *E. coli* foi utilizado um método que se baseia na capacidade de fermentar lactose dessas bactérias, num intervalo entre 24 e 48 horas a 35 °C, para a formação de gases e ácidos (geralmente ácidos láctico e acético, CO₂ e H₂). O teste denominado de PA (presença/ausência) se divide em dois ensaios: um presuntivo para coliformes totais e outro chamado confirmativo para coliformes totais e termotolerantes. Para a realização de cada ensaio foram utilizados:

- proveta estéril para medida da amostra;
- frascos de borosilicato de 250 mL de capacidade, 50 mL de Caldo PA em concentração tripla (caldo Lactosado, caldo lauril sulfato triptose, púrpura de bromocresol e água destilada);
- tubos de ensaio com Caldo Verde Brilhante Bile (VB) para confirmação de coliformes totais;
- estufa incubadora regulada a 35 ± 0,5 °C;
- tubos com Caldo *E. coli* (EC) para confirmação de coliformes fecais; estufa incubadora regulada a 44,5 °C com variação não superior a 0,2; placas com Ágar Eosina Azul de Metileno (EMB);

- alça de transplante e estufa incubadora regulada a $35 \pm 0,5$ °C, com todas as operações conduzidas assepticamente.

A amostra de água foi agitada e dela foram retirados 100 mL para adicionar a 50 mL do meio de cultura em concentração tripla (Caldo PA), para correção da diluição de 1:3 ocorrida no meio após inoculação da amostra. Os frascos foram incubados a $35 \pm 0,5$ °C durante 24 horas para observar a ocorrência de crescimento com produção de ácidos, evidenciado pela viragem do indicador de púrpura para amarelo.

A partir dos frascos contendo o caldo PA, foram transferidas alçadas carregadas da cultura para tubos de Caldo Verde Brilhante Bile (VB) com tubo de Durham (que evidenciam a produção de gás durante o cultivo). Os tubos com VB foram incubados a $35 \pm 0,5$ °C por 24-48 horas para observação de crescimento com produção de gás. Após a confirmação de formação de gás e turvação do meio VB, foram transferidas alçadas para tubos contendo caldo *E. coli* (EC) com tubo de Durham para confirmar a presença de coliformes termotolerantes. Os tubos contendo Caldo EC foram incubados a $44,5 \pm 0,2$ °C durante 24 horas para a observação de crescimento e produção de gás (Figura 9).

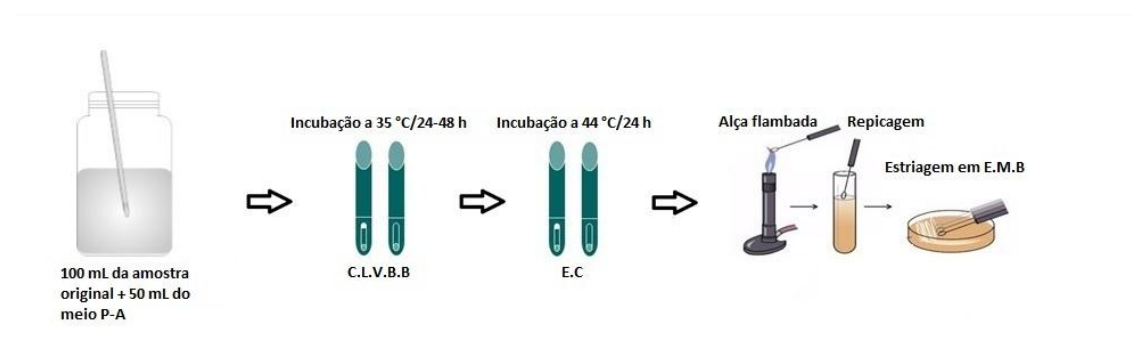


Figura 9. Esquema de análise para determinação de coliformes totais e *E. coli*.

Diante da confirmação de crescimento e produção de gás nos tubos de EC, foram transferidas alçadas de cada cultura obtida para placas contendo Ágar de Eosina Azul de Metileno (EMB), para confirmação da presença de *E. coli*. As placas estriadas foram incubadas a 35 °C durante 24 horas para

observação de desenvolvimento de colônias típicas de *E. coli* (nucleadas com centro preto, com ou sem brilho metálico).

Embora a determinação de coliformes baseada na fermentação da lactose seja trabalhosa, por necessitar de duas temperaturas de incubação e levar até cerca de 72 horas para a leitura conclusiva, a mesma foi realizada com êxito. Conquanto, a fim de confirmar duplamente a presença e ausência destes micro-organismos, também foi realizado o teste de presença e ausência com o método enzimático cromogênico. Este método é considerado superior em sensibilidade e especificidade na detecção de coliformes totais e *E. coli*, por ser baseado na hidrólise por enzimas específicas das espécies de substratos definidos (MS, 2005). Para a aplicação do método necessitou-se de: substrato cromogênico (Readycult®); lâmpada de luz ultravioleta de 3 a 6 W e comprimento de onda de 365 nm para a confirmação de *E. coli*; e estufa incubadora regulada a $35 \pm 0,5$ °C.

Os substratos cromogênicos estéreis contidos em flaconetes foram adicionados a frascos contendo 100 mL da amostra de água contaminada. Os frascos foram incubados a $35 \pm 0,5$ °C durante 24 horas para posterior observação de viragem com desenvolvimento de uma cor verde azulado, a fim de confirmar a presença de coliformes totais. Após a confirmação, os frascos foram submetidos à luz ultravioleta (365 nm) para a identificação da presença de *E. coli* por fluorescência azulada na água (Figura 10).



Figura 10. Esquema de análise para confirmação de coliformes termotolerantes e *E. coli*.

4.4.3 Determinação de *Pseudomonas aeruginosa*

A detecção de *P. aeruginosa* foi realizada a partir da técnica dos tubos múltiplos. Para a aplicação da técnica de detecção, que se divide em teste presuntivo e confirmativo, utilizou-se:

- pipetas de 10 mL para transferência dos volumes;
- tubos com 10 mL do Caldo Asparagina em concentração dupla para inoculação de 10 mL da amostra;
- lâmpada de luz ultravioleta, de 3 a 6 W (365 nm) para a confirmação de *P. Aeruginosa*;
- alça flambada; tubos com 10 mL de Ágar Acetamida para confirmação;
- e estufa incubadora regulada a 37 °C.

Após homogeneização das amostras por agitação, foram adicionadas dez porções de 10 mL da amostra de água para 10 tubos contendo 10 mL de Caldo Asparagina em concentração dupla. Os tubos foram incubados a 37 °C durante 24 horas para observação de crescimento (turvação) e produção de pigmentos verde-fluorescente sob luz ultravioleta (365 nm). A partir dos tubos positivos de Caldo Asparagina foram transferidos por alçadas da cultura para tubos contendo caldo Ágar Acetamida de cor vermelha e incubados a 37 °C durante 24-36 horas (Figura 11). Após 24 horas os tubos foram observados quanto à viragem alcalina do indicador para púrpura.

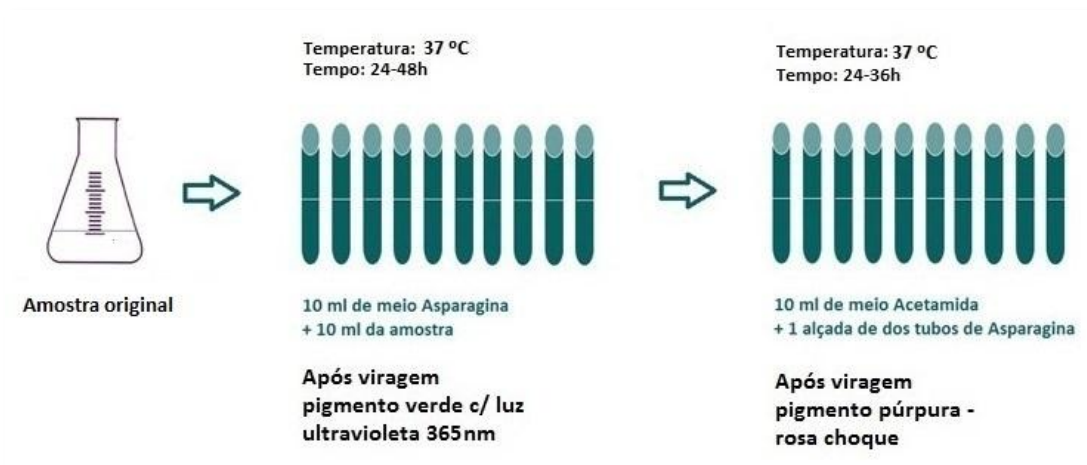


Figura 11. Esquema de análise para determinação de *Pseudomonas aeruginosa*.

O número mais provável (NMP) (com intervalo de confiança ao nível de 95% de probabilidade) de *P. aeruginosa* foi determinado para as combinações de tubos com inoculação de 10 porções de 10 mL da amostra por tubo, a partir dos valores da tabela em ANEXO A.

4.4.4 Contagem de bactérias heterotróficas

A contagem de bactérias heterotróficas foi realizada utilizando o método de contagem em placas (plaqueamento “Pour Plate”). Para a aplicação da técnica utilizou-se:

- tubos de diluição com porções de 9 mL de solução salina;
- Ágar Padrão para Contagem (PCA);
- placas de Petri estéreis vazias (descartáveis);
- pipetas estéreis de 10 mL para diluição; estufa incubadora regulada a $35 \pm 0,5$ °C.

Após homogeneização da amostra no frasco contendo a água contaminada, primeiramente, foi transferida assepticamente uma porção de 1 mL da amostra para 9 mL de água de diluição (solução salina) contida no primeiro tubo de diluição (10^{-1}). Em seguida, na preparação da segunda diluição (10^{-2}) foi transferido assepticamente 1 mL a partir da diluição de 10^{-1} para 9 mL do diluente. As diluições subsequentes foram obtidas de maneira similar, transferindo-se 1 mL da diluição anterior para 9 mL de diluente, até a quarta diluição (10^{-4}).

Devido à impossibilidade de estimar previamente o nível de contaminação da amostra, a preparação e a inoculação foram feitas com a amostra pura (10^0) e três diluições (10^{-1} , 10^{-2} , 10^{-3}). A fim de aumentar a precisão das contagens, cada amostra foi inoculada em “quadruplicata”, utilizando 1 mL para cada placa de Petri vazia e estéril. Os inóculos foram misturados a 9 mL do meio PCA nas placas, em movimentos circulares em superfície plana, dez vezes nos sentidos horário e anti-horário. Após a completa solidificação do meio de cultura, as placas foram invertidas e incubadas a $35 \pm 0,5$ °C durante 48 horas (Figura 12).

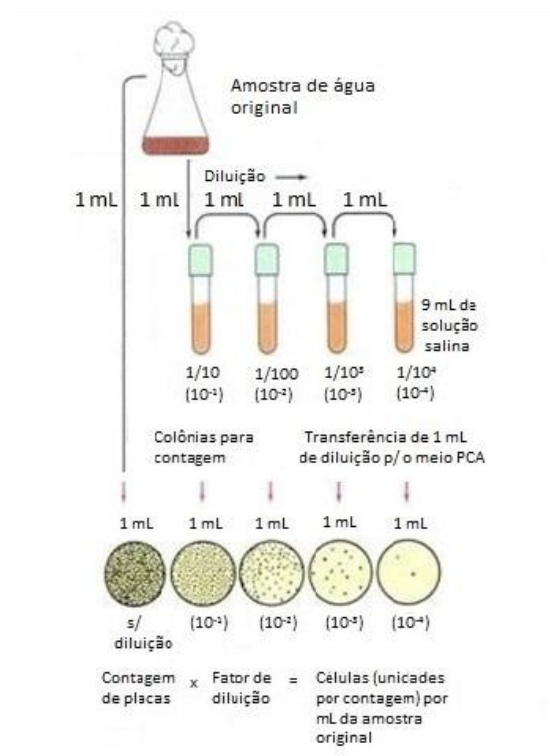


Figura 12. Esquema de análise para contagem de colônias heterotróficas.

A contagem das placas foi feita com o auxílio de contador de colônias com lupa, selecionando as placas com quantidades de 30 a 300 colônias. O cálculo foi feito a partir da média de colônias obtidas nas quadruplicatas e multiplicadas pelo fator de diluição selecionado em função da quantidade de colônias.

4.5 Medição do pH e da Turbidez

O pH e a turbidez das amostras foram determinados por leitura direta, utilizando, respectivamente, o pHmetro Qualxtrom 8010 e o turbidímetro microprocessado Del Lab – DLM – 2000-B.

Para medir o pH da água, 100 mL da amostra foram colocados em um Becker de borosilicato no qual o eletrodo foi introduzido para obtenção do valor. A medida da turbidez foi feita a partir de uma cubeta de vidro introduzida e posicionada de acordo com a marcação existente. A leitura forneceu os resultados em unidade nefelométrica de turbidez (NTU).

4.6 Análises estatísticas

Os dados obtidos nas análises bacteriológicas de *P. aeruginosa* e bactérias heterotróficas foram avaliados sob o aspecto quantitativo, utilizando o software registrado StatisticaTM, versão 8.0. Para analisar os dados médios entre dois grupos (antes e depois do tratamento) foi realizado o Teste “t” de Student, considerando o nível de significância de 5%. A diferença entre as amostras foi considerada estatisticamente significativa para valores de “p” menores que 0,05.

Os dados sobre coliformes totais e *E. coli* não foram submetidos à avaliação estatística por terem sido utilizados métodos qualitativos de presença e ausência.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos com o sistema de pasteurização solar remetem à produtividade e à eficiência de descontaminação bacteriológica. Os números de bateladas diárias foram observados em quatro arranjos experimentais: configuração original sem trocador de calor; original com trocador de calor; modificado sem trocador de calor; e modificado com trocador de calor. O sistema também foi analisado quanto à produtividade diária em diferentes inclinações. As análises de eficiência envolveram o grupo dos coliformes totais, *E. coli*, *P. aeruginosa* e bactérias heterotróficas. Adicionalmente às análises antes e depois do tratamento, parâmetros químicos e físicos como o pH e a turbidez também foram avaliados.

5.1 Produtividade do sistema em função da inclinação

Os testes de avaliação de produtividade iniciaram com a configuração modificada e sem o trocador de calor. A experimentação nesta configuração foi feita inclinando o coletor (faceando o norte com inclinação β em relação à horizontal) em oito diferentes " β ": 2°, 4°, 6°, 8°, 10°, 15°, 20° e 25°; a fim de identificar o ângulo de melhor relação com a produtividade, em função da irradiância acumulada (H_{coll}) coletada em um dia de operação (das 7:00 AM às 4:00 PM). Os resultados obtidos na experimentação do primeiro arranjo são apresentados na Figura 13.

Cada grupo de dados (pontos de dispersão) correspondente a um ângulo de inclinação gerou uma reta tendencial a partir de regressão linear. Observa-se que as retas indicam que o aumento da inclinação do coletor promove maior produtividade do sistema. Isso ocorre devido ao aquecimento mais rápido do sistema, por consequência do favorecimento da incidência de irradiância solar no plano do coletor.

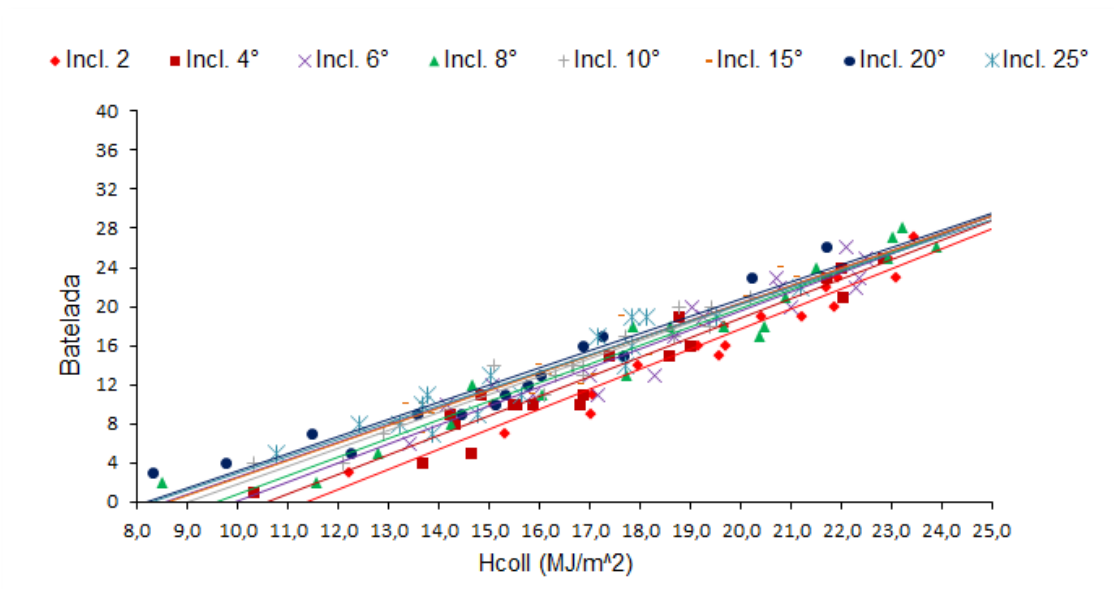


Figura 13. Tendência de produtividade do sistema na configuração modificada sem trocador de calor, nos diferentes ângulos de inclinação testados.

É possível observar que o nível crítico da irradiância solar também diminui com a inclinação, pois, os valores de H_{corte} passam de 11,4 MJ/m² a 8,2 MJ/m² quando a inclinação varia de 2 a 25°. Os resultados das regressões lineares são detalhados na Tabela 7.

Tabela 7. Resultados das regressões lineares aplicadas aos dados de produtividade para cada ângulo testado.

β	Regressão Linear			H_{corte}^{***}
	Equação	α^*	R^{2**}	
2°	$y = 2,055x - 23,406$	2,055	0,951	11,4
4°	$y = 1,992x - 21,082$	1,992	0,940	10,7
6°	$y = 1,941x - 19,260$	1,941	0,908	10,0
8°	$y = 1,893x - 18,054$	1,893	0,941	9,6
10°	$y = 1,829x - 16,372$	1,829	0,938	9,4
15°	$y = 1,781x - 15,295$	1,781	0,922	8,5
20°	$y = 1,757x - 14,455$	1,757	0,931	8,2
25°	$y = 1,729x - 14,298$	1,729	0,900	8,2

*Coeficiente angular.

**Coeficiente de determinação.

***Irradiância acumulada cuja produtividade é zero.

Como esperado, a produtividade é favorecida pelo aumento da inclinação do coletor devido à geometria solar para a latitude local. O

experimento foi realizado para testar a hipótese de que: quanto menor fosse a diferença entre as temperaturas superior e inferior nas inclinações inferiores (2° e 4°), mais próximo de zero, os “setpoints” seriam atingidos em menor tempo e a frequência de batelada aumentaria. Entretanto, verificou-se que há sempre um gradiente significativo de temperatura entre a parte superior e inferior do coletor solar independente da inclinação. Assim, o custo benefício dessa configuração (inclinações inferiores) não se mostrou promissor do ponto de vista da produtividade do sistema. Além disso, as irradiâncias de corte aumentaram indesejavelmente com as menores inclinações do coletor. Em síntese, para a latitude estudada, o ângulo de latitude mais 10 ou 15° se mostra como inclinação “ótima” para o sistema.

5.2 Produtividade do sistema nas diferentes configurações

Segundo Tiba *et al.* (1998), para a latitude local ($8,05^\circ$ S) em que o experimento foi realizado, a inclinação de coletores solares em 23° garante com razoabilidade uma uniforme coleta de energia solar ao longo do ano. Esse ângulo (β) favorece essencialmente o inverno nesta localidade, visto que o Sol se mantém declinado para o hemisfério Norte durante a maior parte do ano (março à outubro).

No teste inicial de variação de inclinação do coletor solar na configuração modificada sem trocador de calor, o ângulo de 20° mostrou-se como sendo a inclinação de maior produtividade. Dessa forma, os demais testes de produtividade tais como: a configuração modificada com trocador e a configuração original sem trocador de calor; foram realizados nesta mesma inclinação.

Configuração modificada

Nesta configuração o sistema foi testado sem e com trocador de calor para verificar o ganho de produtividade em função da irradiância acumulada. O resultado comparativo pode ser visualizado na Tabela 8. A seguir são descritas as comparações entre as configurações.

Tabela 8. Dados de produtividade sem e com recuperação de calor para a configuração modificada ($\beta = 20^\circ$).

Configuração Modificada ($\beta = 20^\circ$)			
s/ Recuperação de calor		c/ Recuperação de calor	
H_{coll}^*	Nº de Bat.**	H_{coll}^*	Nº de Bat.**
17,2	16	19,9	33
15,3	11	19,5	30
11,5	6	19,5	28
15,1	10	17,3	25
16,0	13	9,3	8
9,7	1	18,5	28
17,7	15	13,4	17
14,5	9	19,3	26
16,9	16	16,9	22
13,6	9	22,3	40
15,7	12	21,3	31
8,3	1	19,7	24
21,7	26	18,7	24
12,4	5	18,1	23
20,3	23	9,3	5
Médias			
$15,1 \pm 3,6$	$11,5 \pm 7,0$	$17,3 \pm 3,9$	$24,3 \pm 9,0$
*Irradiância acumulada no plano do coletor solar (MJ/m ²).			
**Número de bateladas em um dia de operação.			

Conforme a Tabela 8, os dados de produtividade média diária de água sem a recuperação de calor mostraram que o sistema é capaz de realizar em média $11,5 \pm 7,0$ bateladas para H_{coll} média de $15,1 \pm 3,6$ MJ/m². Com a irradiância próxima de $17,3 \pm 3,9$ MJ/m², a produtividade média do sistema com recuperação foi de $24,3 \pm 9,0$ bateladas, representando um ganho de 111,3%. Em termos de alcance máximo, o sistema foi capaz de atingir 40 bateladas (80 L) utilizando o trocador de calor, enquanto que sem o trocador atingiu 26 bateladas (52 L).

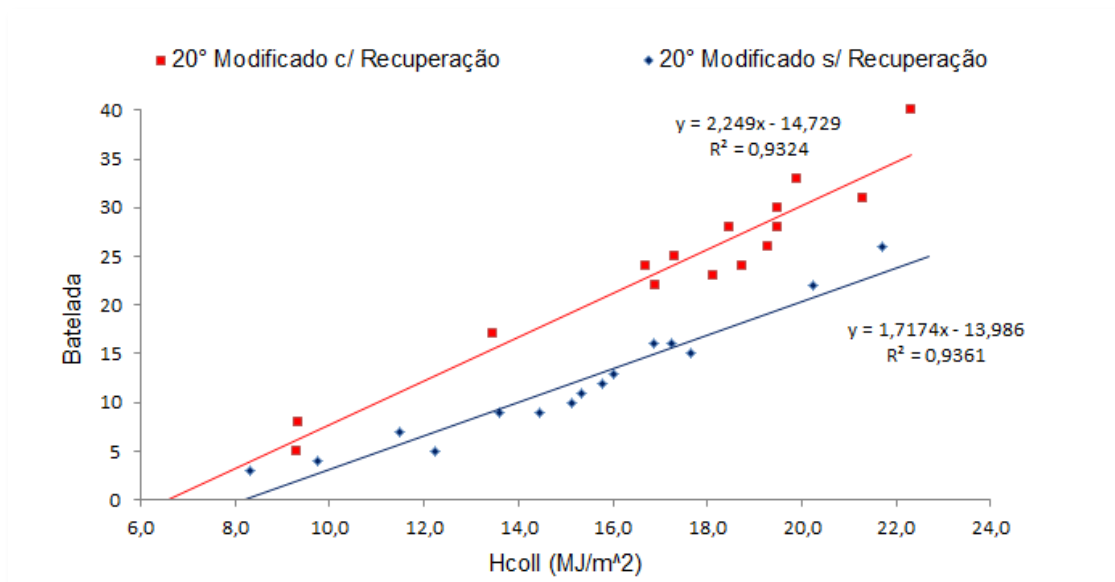


Figura 14. Produtividade do sistema na configuração modificada ($\beta = 20^\circ$), sem e com recuperação de calor.

Cada ponto no gráfico da Figura 14 corresponde a um dia de produtividade. As regressões lineares aplicadas em cada conjunto de dados sem e com recuperação de calor demonstram ajustes representativos dos valores de R^2 iguais a 0,936 e 0,932 respectivamente.

Ao extrapolar as retas tendenciais ao eixo das abscissas, observa-se que nenhuma batelada é obtida quando os valores de irradiância acumulada são menores ou iguais aos valores de corte (H_{corte}). Nos testes sem e com recuperação de calor, observa-se valores de H_{corte} em torno de 8,2 MJ/m² e 6,6 MJ/m², respectivamente. Estes valores indicam que na configuração modificada sem recuperação de calor, o sistema opera em dias nos quais H_{corte} é maior ou igual a 8,2 MJ/m², enquanto que com recuperação é capaz de operar nos dias em que o H_{corte} é maior ou igual a 6,6 MJ/m².

Configuração original

A configuração original também foi testada sem e com trocador de calor para verificar o ganho de produtividade em função da irradiância acumulada. O resultado pode ser visualizado na Tabela 9.

Tabela 9. Dados de produtividade sem e com trocador de calor para a configuração original ($\beta = 20^\circ$).

Configuração original ($\beta = 20^\circ$)			
s/ Recuperação de calor		c/ Recuperação de calor	
H_{coll}^*	Nº de Bat.**	H_{coll}^*	Nº de Bat.**
14,9	2	17,2	12
16,8	3	11,9	2
18,0	6	20,5	16
15,3	3	15,9	8
19,2	6	17,4	13
16,1	4	16,4	11
14,0	1	19,0	14
19,2	6	18,8	14
19,9	8	19,9	15
18,7	5	22,4	18
18,1	6	18,6	15
17,2	5	16,9	10
21,4	12	17,8	14
19,4	8	17,0	12
21,7	11	17,2	11
Médias			
$18,0 \pm 2,3$	$5,7 \pm 3,0$	$17,8 \pm 2,4$	$12,3 \pm 4,0$
*Irradiância acumulada no plano do coletor solar (MJ/m ²).			
**Número de bateladas em um dia de operação.			

Conforme a Tabela 9, para a configuração original, os dados de produtividade média diária sem a recuperação de calor indicaram que o sistema é capaz de realizar em média $5,7 \pm 3,0$ bateladas para H_{coll} média de $18,0 \pm 2,3$ MJ/m². Com a irradiância média similar de $17,8 \pm 2,4$ MJ/m², a produtividade média do sistema com recuperação foi de $12,3 \pm 4,0$ bateladas, o que representa um ganho de 115,8%. Em termos de alcance máximo, o sistema foi capaz de atingir 18 bateladas (36 L) utilizando a recuperação de calor, e 12 bateladas (24 L) sem a recuperação.

Assim como para os testes na configuração modificada, também foram obtidas as equações de regressões para a configuração original sem e com trocador de calor (Figura 15).

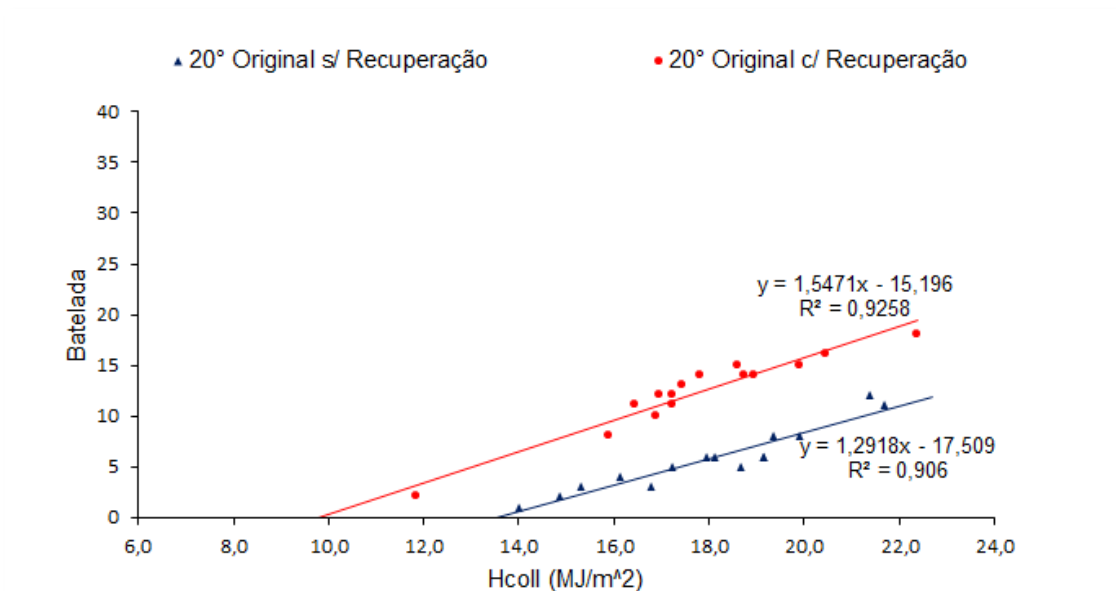


Figura 15. Produtividade do sistema na configuração original ($\beta = 20^\circ$), sem e com recuperação de calor.

Nos testes sem e com recuperação de calor, observa-se valores de H_{corte} em torno de $13,8 \text{ MJ/m}^2$ e 10 MJ/m^2 , respectivamente. Estes valores indicam que o sistema original sem recuperação de calor opera em dias nos quais o H_{corte} é maior ou igual a $13,8 \text{ MJ/m}^2$, enquanto que com a recuperação é capaz de operar nos dias em que o H_{corte} é maior ou igual a 10 MJ/m^2 .

Comparação entre as configurações

A comparação dos resultados obtidos nas experimentações sem e com trocador de calor para as configurações original e modificada é apresentada na Figura 16. As retas do gráfico demonstram a importância da recuperação no sistema através do ganho de produtividade, em relação às respectivas configurações do sistema.

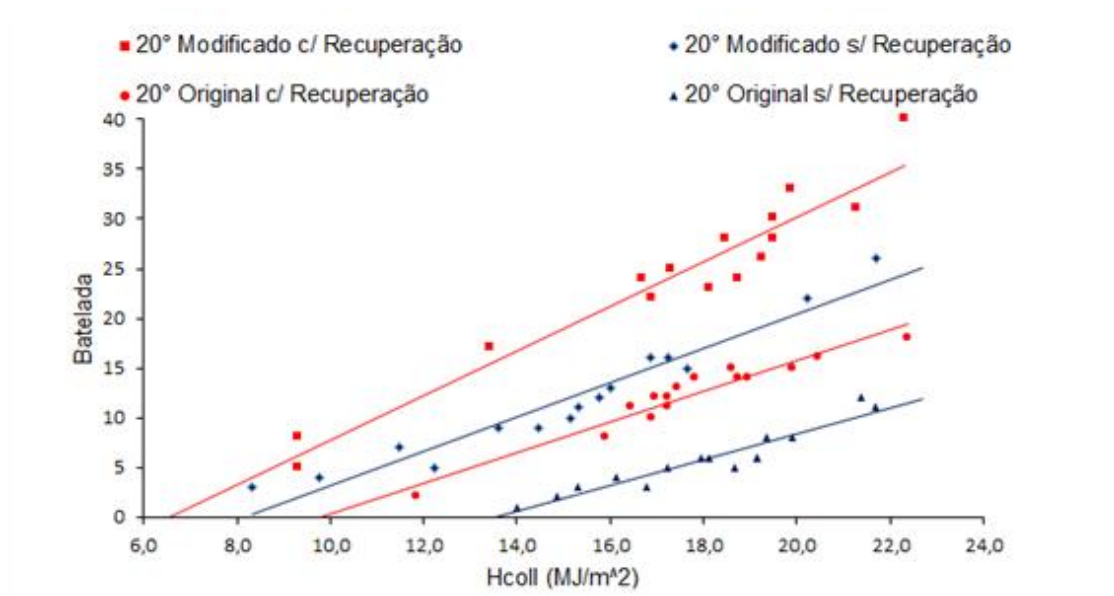


Figura 16. Comparação entre as produtividades nas configurações original e modificada sem e com recuperação de calor.

Além de obter ganho na produtividade, a modificação da configuração associada ao uso da recuperação de calor permitem que o sistema inicie o tratamento da água com H_{corte} de $6,6 \text{ MJ/m}^2$. O deslocamento da irradiância de corte para este valor caracteriza vantagem para o sistema, pois permite ao sistema produzir água potável em dias com nebulosidade, ou em períodos cujo Sol esteja declinado para o Sul (setembro à fevereiro).

A Tabela 10 relaciona as diferenças de produtividade média em função da irradiância média coletada, e suas respectivas H_{corte} , para as diferentes configurações.

Tabela 10. Relação entre a produtividade média diária em função da irradiância acumulada para as diferentes configurações do sistema.

Configuração ($\beta = 20^\circ$)	Irradiância acumulada (MJ/m^2)		Produtividade (Batelada/dia)
	H_{corte}^*	H_{coll} (média)	Média
Orig. s/ recup.	13,8	$18,0 \pm 2,3$	$5,7 \pm 3,1$
Orig. c/ recup.	10,0	$17,8 \pm 2,4$	$12,3 \pm 3,8$
Modif. s/ recup.	8,2	$15,1 \pm 3,6$	$11,7 \pm 7,1$
Modif. c/ recup.	6,6	$17,3 \pm 3,9$	$24,3 \pm 9,0$

*Valor mínimo de irradiância acumulada para operação do sistema (MJ/m^2).

Tanto no gráfico da Figura 16 quanto na Tabela 10 é notório que o sistema obteve um ganho de quase 100% na produtividade ao comparar as configurações modificada e original, ambas com recuperação de calor. Como já mencionado anteriormente, a otimização fez o pasteurizador atingir uma produção de 40 bateladas (80 L) em um dia de irradiância acumulada de 22,3 MJ/m².

De acordo com o Atlas Solarimétrico do Brasil, o Nordeste do Brasil tem valores de irradiância solar diária média anual comparáveis à regiões como: Dongola (Deserto arábico), Sudão, Dagget (Deserto de Mojave) e Califórnia (TIBA *et al.*, 2000). As cartas de radiação global diária, média mensal do Atlas, mostram que a radiação solar no Brasil varia entre 6 e 24 MJ/m².dia no ano (Figura 17). Em Pernambuco, a irradiância global diária, média mensal, varia de Janeiro à Dezembro entre 14 MJ/m².dia (maio-junho-julho) e 24 MJ/m².dia (out-nov-dez).

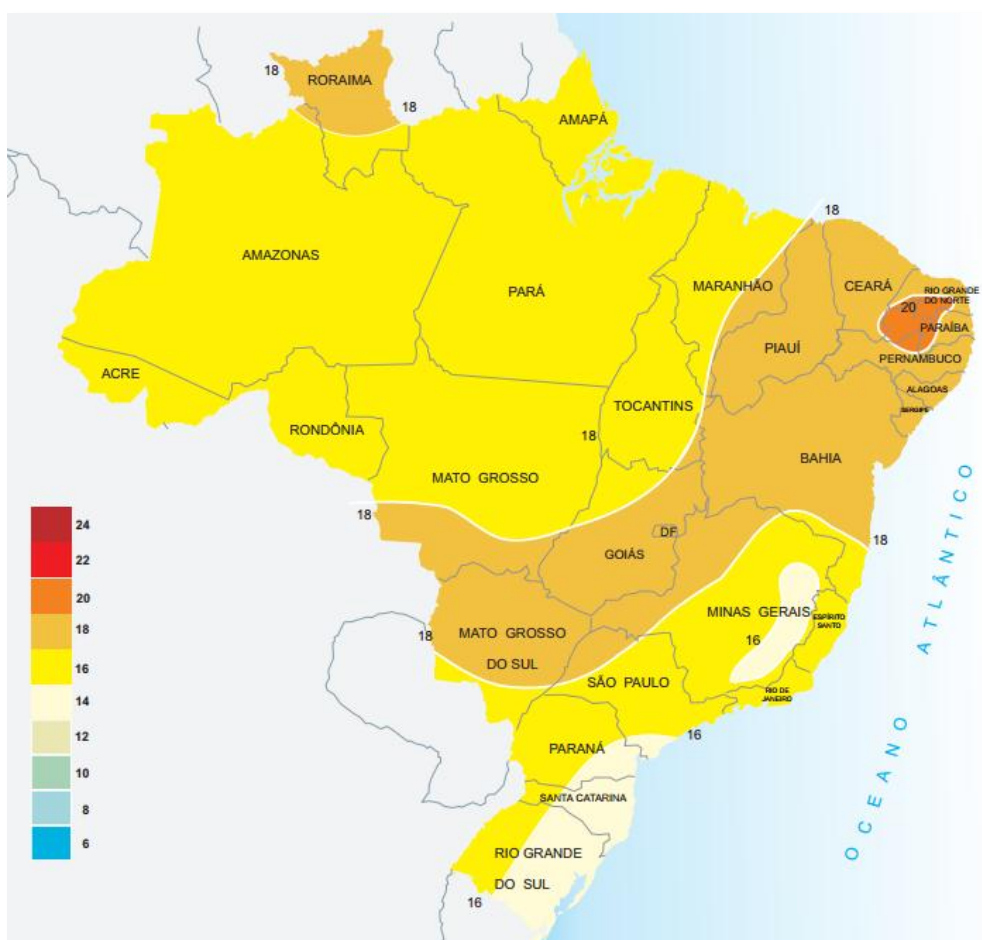


Figura 17. Mapa da distribuição média anual da radiação global no Brasil.
Fonte: Atlas Solarimétrico do Brasil (2000)

Considerando que a irradiância crítica (H_{corte}) de pasteurização para tratar a água foi reduzida para $6,6 \text{ MJ/m}^2$, verifica-se que o sistema tornou-se apto a operar em praticamente todo o território brasileiro. Sabe-se que em regiões semiáridas do Nordeste do Brasil, os níveis de radiação global são ainda maiores que os detectados na localidade em que o sistema foi testado. Os dados de produtividade obtidos indicam que o pasteurizador solar é capaz de prover água livre de contaminação bacteriológica, com potencial para suprir a necessidade de até 10 famílias, considerando 2 litros por dia/pessoa de acordo com a recomendação do Ministério da Saúde do Brasil (2005), e assumindo a quantidade média de quatro pessoas por família.

Comparação da produtividade entre pasteurizadores solares

Na literatura, a produtividade e a energia solar coletada são comumente apresentadas em L/h.m^2 , L/m^2 ou $\text{L/m}^2.\text{dia}$ e MJ/m^2 ou kWh/m^2 , respectivamente. Claramente a irradiação solar foi o fator que mais influenciou o desempenho do sistema em termos de produtividade. A produtividade diária máxima alcançada foi de 80 L (20 de Abril), em um dia ensolarado, enquanto que em dias com nuvens esparsas o sistema produziu menor quantidade de água.

Em outras localidades do planeta, pesquisadores têm se empenhado no desenvolvimento de sistemas de pasteurização solar adequados e acessíveis às regiões que necessitam desta tecnologia para o suprimento de água potável. A “World Pax Service” desenvolveu um pasteurizador solar de fluxo contínuo feito com 18 m de tubulação pintada de preto inserida em uma caixa com tampa de vidro. Este sistema é controlado por uma válvula termostática cuja abertura ocorre em $83,5^\circ\text{C}$, sendo capaz de produzir 16-24 L/dia de água tratada (apud ANDREATTA *et al.*, 1994). Jorgensen *et al.* (1998) alcançaram a quantidade de 50 L/m^2 de água tratada a 75°C em um dia. Nesse estudo utilizaram coletores solar térmicos planos e uma válvula termostática para controle do fluxo. Enquanto o pasteurizador desenvolvido por estes pesquisadores mostrou potencial de produzir 50 L/m^2 de água por dia, a “Safe Water Systems” produziu um sistema que também se baseia em uso de coletor solar plano, válvula termostática e trocador de calor. Este pasteurizador

trabalhou com uma válvula projetada para liberar água a uma temperatura de 79 °C, coletor com área igual a 3,7 m², e produziu aproximadamente 110 L/dia de água tratada (SAFE WATER SYSTEM, 2002). Duff e Hodgson (2005) desenvolveram um sistema de pasteurização aplicando o uso de coletor solar de tubo evacuado que sofreu modificações a partir de dificuldades e problemas encontrados na utilização de uma válvula termostática automotiva. A modificação do sistema consistiu em eliminar o uso da válvula que controlava o fluxo da água e fazê-lo funcionar por diferença de densidade. Esse funcionamento difere dos sistemas citados anteriormente, por passar a funcionar por fluxo contínuo. O estudo reportou que em um dia típico de céu claro, o sistema foi capaz de produzir 86 L de água tratada a 78 °C. El-Ghetany e Dayem (2010) testaram um sistema de pasteurização solar controlado por uma válvula solenoide. O sistema utiliza pré-aquecimento na saída de um coletor solar plano. A válvula por sua vez é acionada por um termostato que permite configurar uma determinada temperatura para o tratamento. Os pesquisadores reportaram que o sistema foi capaz de produzir 39 L/m².dia a 90°C. Amsberry *et al.* (2015) utilizaram uma unidade de coleta junto a concentradores refletivos para pré-aquecer a água, por fluxo contínuo, até pelo menos 70 °C (durante 7 minutos) antes da fase de desinfecção. Nos testes realizados o sistema atingiu produtividade de 55 L em um dia de operação.

Apesar de não ser o foco nesta seção, é importante ressaltar que alguns estudos, além de reportarem seus resultados de produtividade diária, trazem também resultados de análises microbiológicas da água. Um exemplo disto, foram as pesquisas realizadas por Onyango *et al.* (2009), Wayua *et al.* (2013), Bigoni *et al.* (2014) e Dobrowsky *et al.* (2015). No primeiro artigo os pesquisadores investigaram um sistema desenvolvido com um coletor solar plano, que realiza bateladas com o uso de uma válvula termostática quando excede 84 °C. Além de reportar a produtividade de 49 L de água por dia, aumentando-a para 95 L quando acoplado um refletor solar, mostraram resultados microbiológicos após o tratamento no que diz respeito aos coliformes totais e *E. coli*. Assim como o sistema de Onyango *et al.* (2009), o pasteurizador idealizado por Wayua *et al.* (2013) utilizou um coletor solar do tipo plano, mas para pasteurizar leite e mostrou resultados para coliformes totais e *E. coli*. No terceiro artigo, um pasteurizador solar que utiliza calha

parabólica de concentração (CPC) e uma válvula termostática alcançou produtividade de 66 L a 87 °C, e também mostrou resultados em relação a inativação de *E.coli*. O artigo publicado por Dobrowsky *et al.* (2015) relatou que o pasteurizador solar para coleta de água de chuva foi capaz de produzir uma média de 8,7 L/h a uma temperatura média de 81 °C, e mostrou resultados microbiológicos envolvendo bactérias heterotróficas, coliformes totais e *E. coli*.

Nas pesquisas acima citadas observa-se que embora os sistemas apresentem diversas configurações e utilizem diferentes dispositivos, sendo uns de fluxo contínuo e outros por bateladas, os pasteurizadores operam em temperaturas específicas que variam de 60 °C a 90 °C. Entretanto, esses sistemas realizam o tratamento em uma única temperatura por vez devido ao “setpoint” inerente às válvulas termostáticas. O funcionamento dessas válvulas é altamente afetado pela evolução da temperatura no interior do absorvedor, pelos raios solares incidentes na válvula e pelo horário do dia, resultando no efeito “stop-and-go” (BIGONI, 2014).

No pasteurizador solar apresentado no presente trabalho não há riscos de qualquer válvula se manter entreaberta a depender da temperatura da água, por serem do tipo “on/off”. Essas válvulas (solenoides) são acionadas e desacionadas em função dos contadores de cada “setpoint”, de forma programada. Um problema que ocorreu em poucos dias de experimentação foi o mal funcionamento da válvula devido ao lodo veiculado pela água. Ele impede que a válvula seja completamente fechada. Esse ocorrido indicou que para águas com alto conteúdo de matéria orgânica ou macropartículas, faz-se necessário acoplar uma etapa de pré-filtragem ao sistema, a fim de evitar o problema verificado.

Além da desconfiança no uso das válvulas termostáticas, os sistemas citados não possuem controle para o tempo de tratamento. Sabe-se que cada temperatura de inativação dos micro-organismos relaciona-se com tempos específicos de exposição. O sistema de pasteurização solar estudado é capaz de tratar a água em diferentes “setpoints” programáveis (55, 60, 65, 75 e 85°C), ocorrendo tratamento abaixo do “setpoint” de 75°C apenas nos momentos cuja irradiação média se mantém menor ou igual a 450 W/m². Normalmente esses valores são verificados no início e no final do dia.

Diante do exposto, pode-se dizer que o sistema de pasteurização testado no presente trabalho possui vantagem sobre os sistemas citados anteriormente, no que diz respeito às possibilidades de efetuar o tratamento em diversas temperaturas de tratamento, à garantia de segregação da água contaminada e ao controle do tempo de residência da água no coletor solar.

5.3 Perfil diário do comportamento do sistema

Durante os meses de experimentação do sistema com o ângulo de inclinação em relação à horizontal identificado como mais produtivo, a irradiância moderada média diária foi de $591,8 \text{ W/m}^2$ para os testes na configuração modificada, enquanto que para os testes na configuração original a irradiância alta média diária foi de 822 W/m^2 (Tabela 11).

Tabela 11. Relação entre a produtividade média diária em função da irradiância coletada para as diferentes configurações do sistema ($\beta = 20^\circ$; c/ recuperação de calor).

Faixa de irradiância*	I_{coll}^{**} (W/m^2)	Configuração do sistema	Produtividade média***
Moderada	591,8	Modificada	$21,5 \pm 3,0$
		Original	$14,1 \pm 1,0$
Alta	822	Modificada	$31,1 \pm 5,0$
		Original	$9,3 \pm 2,0$

*Faixa de valores determinados por Amin e Han (2009).
 **Irradiância instântanea média no plano do coletor durante os dias de experimentação
 ***Média da quantidade de bateladas do conjunto de dados da respectiva faixa de irradiância.

Na tabela estão reunidos os valores médios obtidos na experimentação, a partir de dias cujos valores encontraram-se dentro das faixas estabelecidas por Amin e Han (2009). Tanto na faixa moderada quanto na alta verifica-se maior produtividade média quando compara-se as duas configurações testadas.

Assim como verificada em termos de H_{coll} (irradiância acumulada), a produtividade do sistema também se mostra superior quando analisada em termos de I_{coll} .

As Figuras 18, 19 são exemplos do comportamento do sistema na faixa de irradiância moderada e as Figuras 20 e 21 exemplos na faixa de irradiância alta. Nelas é possível visualizar tanto o gráfico com a irradiância instantânea quanto o gráfico com as variações das temperaturas superior e inferior do coletor solar, ambos em função do horário local em que o sistema ficou em operação. Adicionalmente, no gráfico de irradiância instantânea estão plotados os momentos de ocorrência da batelada, assim como o tempo de residência, através de barras verticais. A numeração acima das barras verticais indica o tempo de ocorrência de cada batelada em minutos.

Os gráficos a seguir ilustram o comportamento da irradiância solar (média e alta) nas duas faixas estudadas. Verifica-se que em ambas as faixas a quantidade de batelada efetuada pelo sistema praticamente dobra, enquanto o tempo médio de ocorrência diminui consideravelmente com a modificação da configuração.

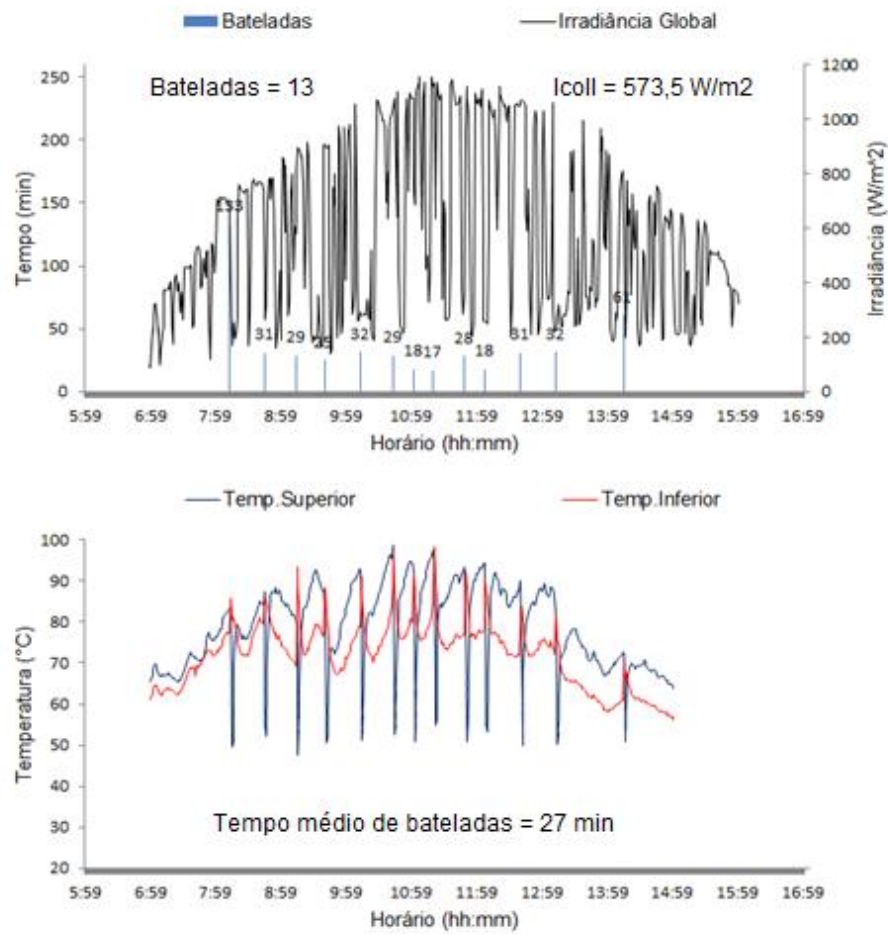


Figura 18. Comportamento das variáveis medidas e resultado dos dados computados com valores: $I_{coll} = 573,5 \text{ W/m}^2$; Bateladas = 13; Config. Original.

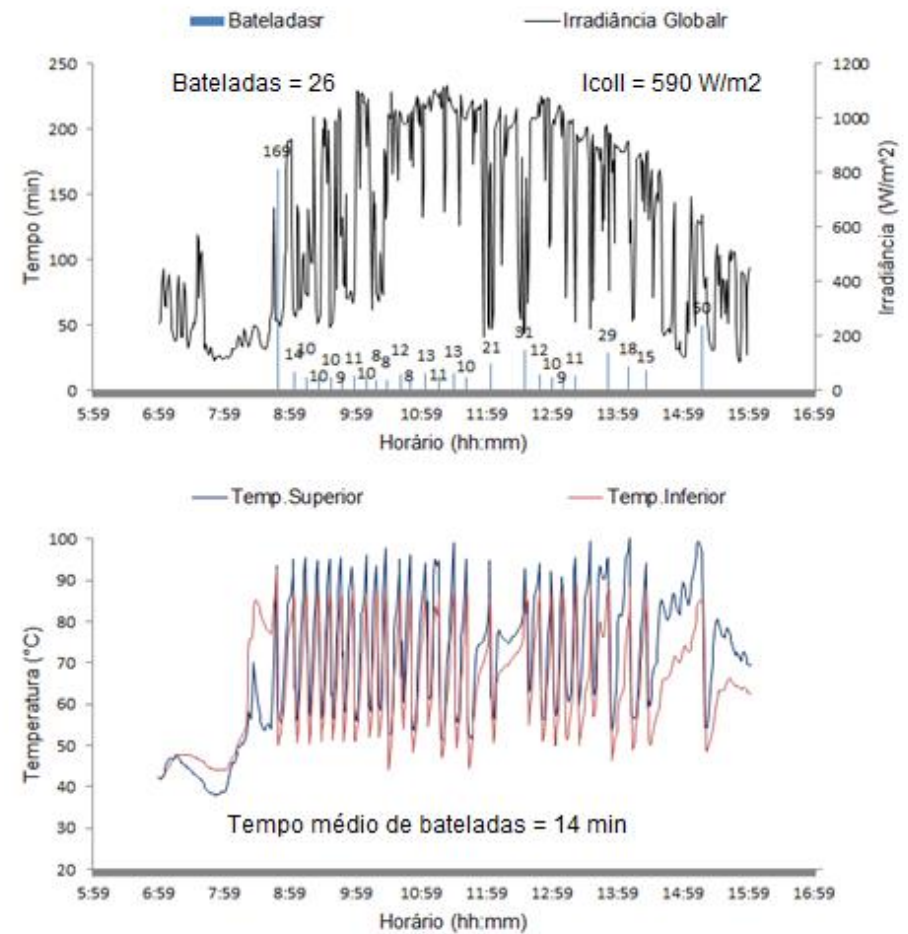


Figura 19. Comportamento das variáveis medidas e resultado dos dados computados com valores: $I_{coll} = 590 \text{ W/m}^2$; Bateladas = 26; Config. Modificada.

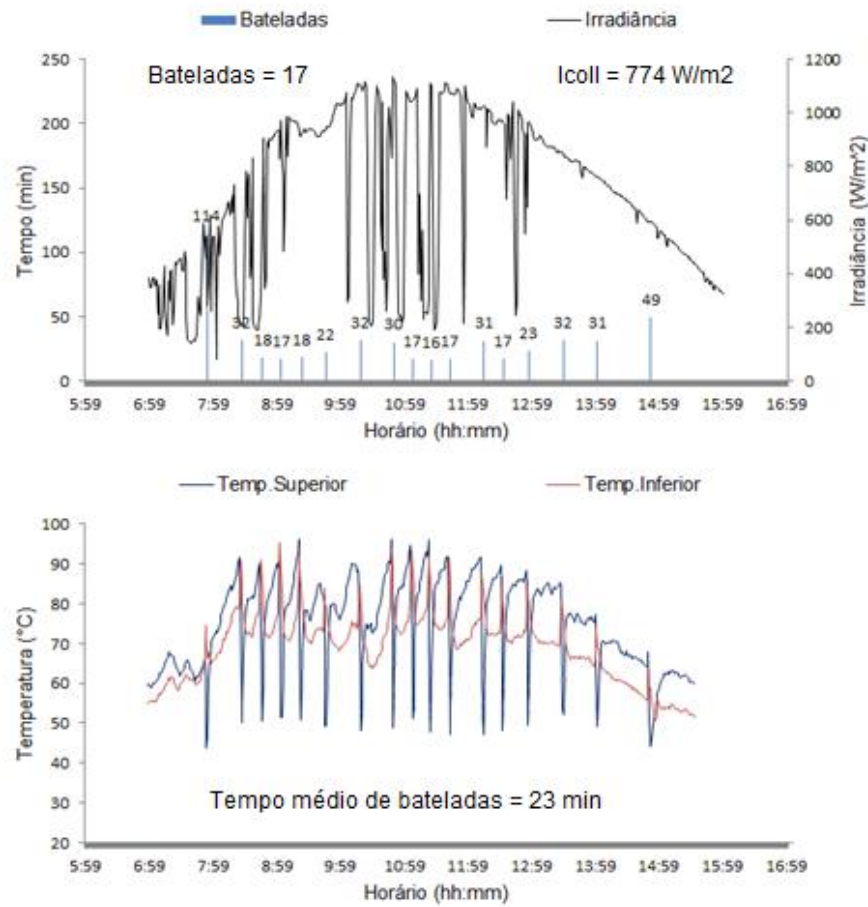


Figura 20. Comportamento das variáveis medidas e resultado dos dados computados com valores: $I_{coll} = 774 \text{ W/m}^2$; Bateladas = 17; Config. Original.

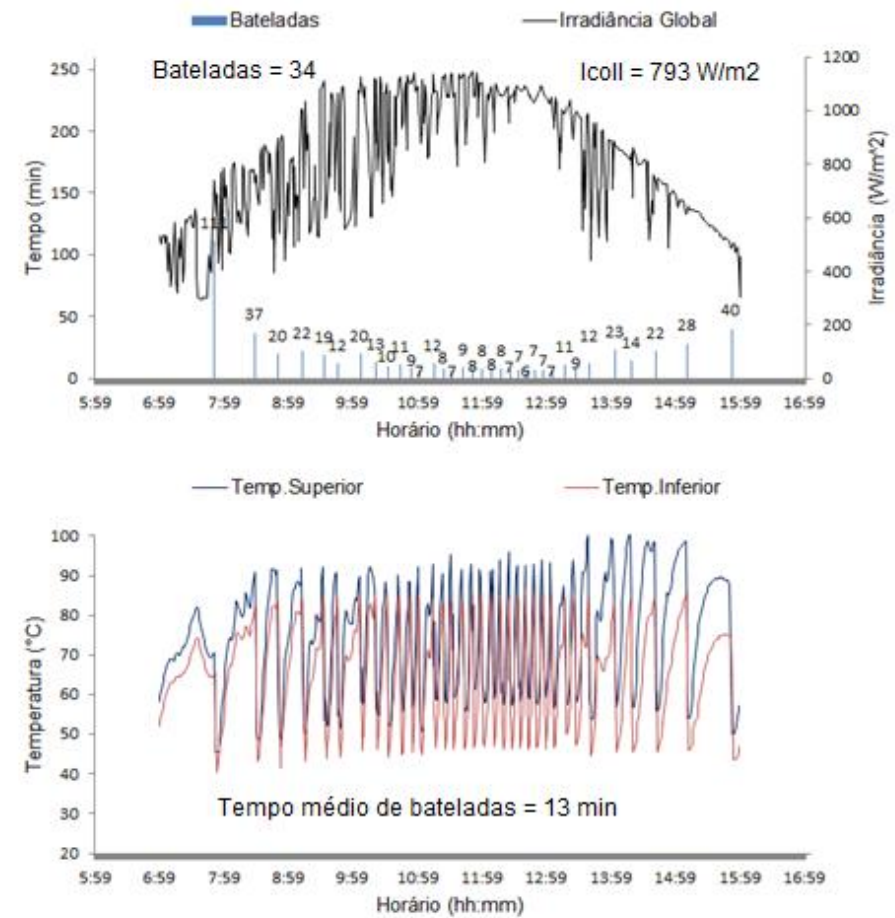


Figura 21. Comportamento das variáveis medidas e resultado dos dados computados com valores: $I_{coll} = 793 \text{ W/m}^2$; Bateladas = 34; Config. Modificada.

Observando as figuras 18 e 19 (faixa de irradiância moderada), verifica-se irradiâncias médias diárias de $573,5 \text{ W/m}^2$ e 590 W/m^2 , com respectivamente 13 e 26 bateladas. Já nas figuras 20 e 21 (faixa de irradiância alta), verifica-se 17 e 34 bateladas para irradiâncias médias diárias de 774 W/m^2 e 793 W/m^2 , respectivamente. Como pode ser visto, a primeira batelada leva sempre mais tempo para ocorrer independente da configuração e da faixa de irradiância. Isso se deve ao fato de o sistema ainda encontrar-se termicamente frio por passar horas sem receber radiação solar.

Ao comparar a configuração original com a modificada nos dias de irradiância média moderada exemplificadas acima, verifica-se que o tempo médio de ocorrência da batelada reduziu de 27 para 14 minutos. E para dias de irradiância média alta, o tempo médio reduziu de 23,6 para 13 minutos. Estas reduções são de grande importância, pois quanto menor o tempo de ocorrência da batelada, maior a produtividade. Ainda na mesma comparação entre as figuras 18 com 19, e 20 com 21, também é possível observar que na configuração original a temperatura da parte superior do coletor solar se mantém consideravelmente maior do que a temperatura inferior, após cada batelada. Esse comportamento é consequência do aprisionamento de ar dentro do sistema, o que compromete a produtividade diária do pasteurizador. Na Figura 22, o desenho ilustra a direção dos fluxos da água e do ar dentro do coletor solar, nas duas configurações.

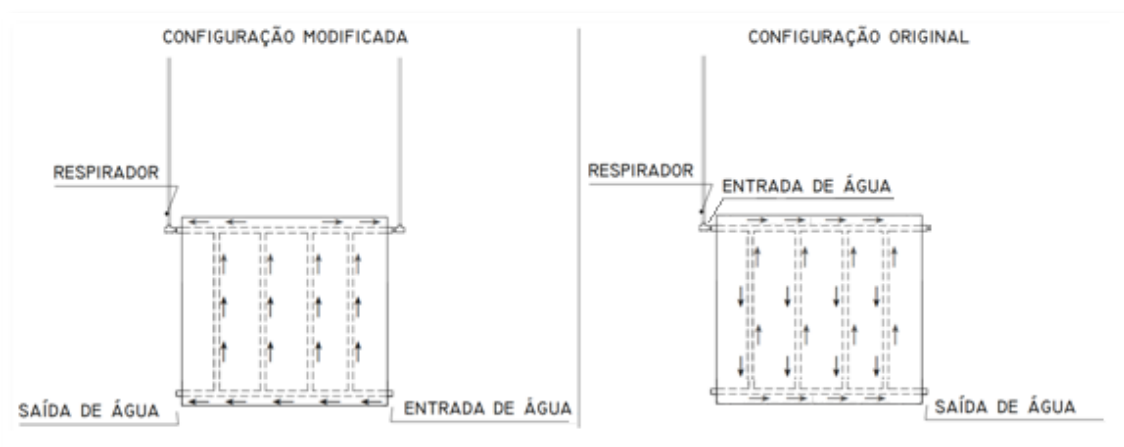


Figura 22. Esquema de circulação da água e do ar nas tubulações internas do coletor solar.

Na ilustração da Figura 22, é possível perceber que no desenho original (Figura 2), a entrada da água na parte superior do coletor solar concorre com a saída do ar pela mesma tubulação no momento de carga do sistema, por possuir apenas uma opção de saída de ar. Além de acarretar um maior tempo de carga, a concorrência entre os fluxos traz a consequência corriqueira de aprisionamento de ar indesejável dentro do coletor.

O acúmulo de ar dentro do coletor é caracterizado como um problema por dificultar a transferência e distribuição da energia térmica para toda a massa de água, fazendo com que as temperaturas superior e inferior se mantenham com diferença média de aproximadamente distantes 10 °C. A diferença entre estas temperaturas pode inviabilizar a batelada em um determinado “setpoint”, assim como atrasá-la. Como o tratamento só inicia quando ambas as temperaturas atingem um determinado valor e neste se mantêm pelo tempo programado, e.g. 75 °C durante 800 s, o sistema não efetuará a batelada nesta enquanto apenas a temperatura superior do coletor solar tiver alcançado o valor do “setpoint”.

A modificação do sistema evitou o aprisionamento de ar dentro do coletor com a adição de um segundo respirador associado ao deslocamento da entrada da água para a parte inferior do coletor solar (Figura 3). Além de o respirador adicional contribuir com a saída do ar por outra extremidade do coletor, a entrada de água por baixo ajudou a propelar o fluxo natural de saída do ar em direção ao respirador e garantir o completo preenchimento da tubulação apenas pela massa de água a ser tratada.

5.4 Análises bacteriológicas e eficiência de tratamento

Nesta seção serão mostrados os resultados do tratamento de amostras de água, realizado para eliminação de coliformes totais, *E. coli*, *P. aeruginosa* e bactérias heterotróficas. O processo de descontaminação da água foi realizado com o pasteurizador solar na configuração modificada com trocador de calor, operando à temperatura de 85 °C por batelada.

5.4.1 Pesquisa de coliformes totais e *E. coli*

O método utilizado baseou-se no fato de as bactérias coliformes fermentarem seletivamente a lactose, com produção de ácido e gases. Essa evidência metabólica possibilita a formulação de meios e, conseqüentemente, métodos seletivos e diferenciais para a identificação dessas bactérias em amostras ambientais que se caracterizam por uma microbiota complexa. As análises realizadas apresentaram resultados positivos para o grupo dos coliformes totais e *E. coli* antes do tratamento e negativos após o tratamento. Após a mistura da amostra de água ao meio de cultura PA, e posterior incubação, observou-se o crescimento evidenciado pela turvação, produção de gás e viragem da coloração púrpura para vermelho claro, tendendo ao amarelado, devido à produção de ácidos. Esses resultados são indicativos da contaminação nas amostras antes do tratamento, enquanto que nas amostras após o tratamento não foi observada essa reação mesmo após reincubação, indicando ausência de coliformes totais e de *E. coli* em 100 mL de água (Figura 23).



Figura 23. Resultado da inoculação em caldo Lauril Tryptose, antes (à esquerda) e depois do tratamento (à direita). Os ensaios após o tratamento foram realizados com amostras resultantes de tratamento no “setpoint” de 85 °C.

No teste de confirmação para coliformes totais, alíquotas das amostras positivas e negativas foram transferidas com alça de inoculação para os tubos

contendo VB e tubo de Durham. Após incubação, foi observado crescimento com produção de gás, confirmando a presença de coliformes totais. As amostras negativas não apresentaram formação de gás, indicando ausência de coliformes totais (Figura 24).

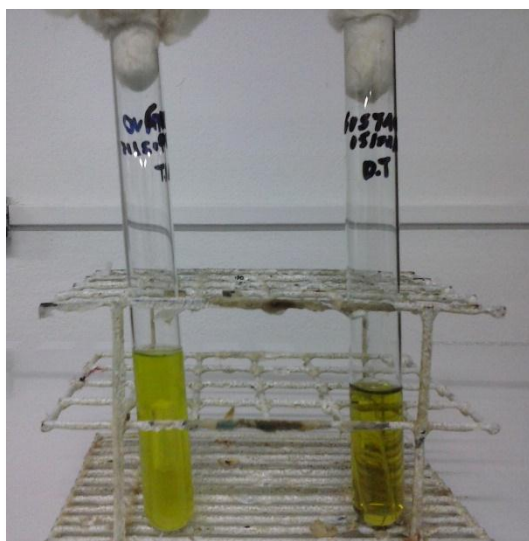


Figura 24. Resultado da inoculação em meio VB, antes (tubo à esquerda) e depois do tratamento (tubo à direita).

No teste para confirmação de termotolerantes as amostras positivas em caldo VB foram transferidas com alça de inoculação para os tubos, contendo EC com tubo de Durham a $45 \pm 0,2$ °C. Após o tempo de cultivo verificou-se crescimento evidenciado pela turvação do meio com formação de gás, indicando presença de coliformes termotolerantes. As amostras negativas não apresentaram crescimento com formação de gás, o que indica ausência de coliformes termotolerantes (Figura 25).



Figura 25. Resultado da inoculação em meio EC, antes (tubo à esquerda) e depois do tratamento (tubo à direita).

Para evitar resultados falso-positivos provocados por bactérias Gram-positivas esporogênicas, foi feito também o teste confirmativo das culturas obtidas nos tubos de VB, através de alçadas e estrias em placas de Petri com meio EMB. Nas placas correspondentes às amostras antes do tratamento, observou-se crescimento de colônias típicas com centro escurecido e brilho metálico. Nas amostras depois do tratamento não foi observado crescimento de colônias atípicas, indicando ausência de coliformes fecais (Figura 26). Esse padrão de resultados positivo e negativo antes e após o tratamento foi observado em todos os ensaios realizados.



Figura 26. Resultado da inoculação em meio EMB, antes (à esquerda) e depois do tratamento (à direita).

A eficiência da pasteurização solar também foi testada com método enzimático que se baseia na hidrólise de um substrato cromogênico. Na leitura do teste, observou-se o desenvolvimento de cor amarela, confirmando a presença de coliformes totais nas amostras testadas antes do tratamento. Dando continuidade ao teste, os meios de cultivos foram irradiados com luz UV (366 nm) para a verificação da presença de *E. coli* antes e depois do tratamento. Todos os meios inoculados com água antes do tratamento apresentaram desenvolvimento de coloração azul violeta sob luz UV, demonstrando a presença de *E. coli*, conforme a Figura 27.



Figura 27. Resultado da inoculação em substrato cromogênico antes (no frasco à esquerda) e depois (no frasco à direita) do tratamento sob luz UV.

Os resultados obtidos confirmaram a ausência de contaminação após o tratamento.

5.4.2 Pesquisa de *Pseudomonas aeruginosa*

A técnica dos tubos múltiplos para *P. aeruginosa* apresentou resultados positivos no teste presuntivo e confirmativo para as amostras coletadas antes do tratamento, ou seja, os tubos contendo caldo asparagina apresentaram turvação e fluorescência ao serem submetidos à luz ultravioleta (Figura 28). A

não fluorescência das amostras após o tratamento indicou, portanto, ausência de *P. aeruginosa*.

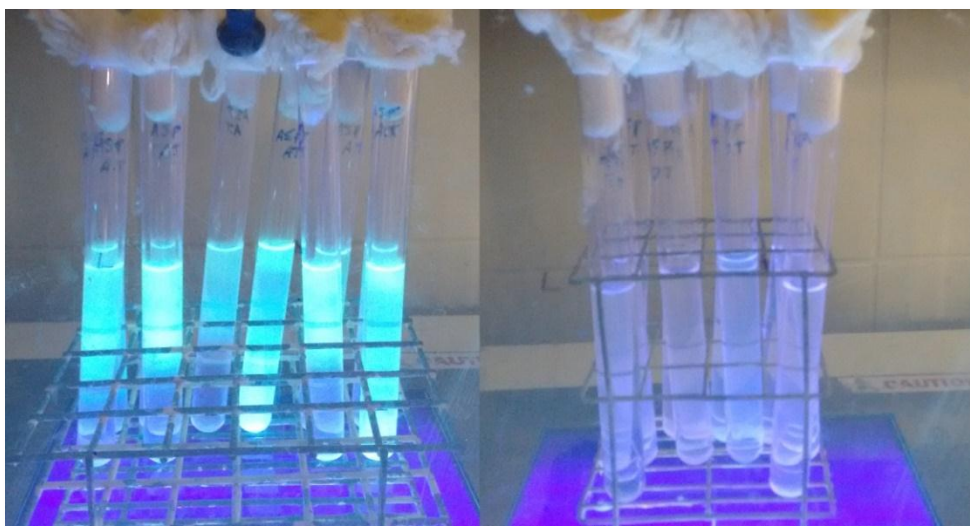


Figura 28. Resultado da inoculação em meio Asparagina sob luz ultravioleta, antes (à esquerda) e depois (à direita) do tratamento.

No teste confirmativo utilizando caldo Acetamida com as amostras antes do tratamento, apresentaram crescimento com viragem alcalina do indicador, modificando a coloração do meio de vermelho claro para púrpura (Figura 29). Ao aplicar a técnica nas amostras após o tratamento, verificou-se que não houve viragem para a cor púrpura nos tubos analisados, confirmando a ausência de *P. aeruginosa* em 100 mL da amostra. Os resultados objetivos nesse teste são expressos como número mais provável em 100 mL da amostra analisada.



Figura 29. Resultado da inoculação em meio Acetamida, antes (à esquerda) e depois (à direita) do tratamento.

Para as *P. aeruginosa*, o número mais provável (NMP) na amostra foi determinado antes e depois do tratamento em todos os ensaios realizados (Apendice B). Na Tabela 12 tem-se o resumo dos resultados. É importante enfatizar que o resultado estatístico <1,1 apresentado na tabela só é alcançado quando todos os tubos utilizados no ensaio apresentam resultado negativo para o micro-organismo testado.

Tabela 12. Resultado do número mais provável para *Pseudomonas aeruginosa*, antes e depois do tratamento. Os ensaios após o tratamento foram realizados com amostras resultantes de tratamento no “setpoint” de 85 °C.

Ensaio	NMP/100 mL	
	A.T*	D.T**
1°	16,1	<1,1
2°	23,0	<1,1
3°	>23,0	<1,1
4°	16,1	<1,1
5°	23,0	<1,1
6°	12,0	<1,1
7°	>23,0	<1,1
8°	16,1	<1,1
9°	16,1	<1,1
10°	>23,0	<1,1
Media	19,8 ± 4,3	<1,1
p	0,0068	-

*Antes do tratamento.

**Depois do tratamento.

A aplicação do teste “t” aos resultados obtidos mostra que houve diferença significativa entre as amostras antes do tratamento e as amostras depois do tratamento, com $p=0,000046$. Em relação à comparação entre as amostras dentro do grupo “antes do tratamento” (A.T.) houve diferença estatística com $p=0,0068$, enquanto que depois do tratamento (D.T.) não houve diferença significativa. Isto significa que o nível de contaminação por *P. aeruginosa* nas amostras de água antes do tratamento eram bastante distintos. Ainda assim, para a faixa de contaminação avaliada, todas as amostras submetidas ao tratamento apresentaram o mesmo nível de qualidade de água, com um NMP menor que 1,1.

Os resultados indicam que o pasteurizador solar é eficaz quanto à redução das *P. aeruginosa* nos níveis de contaminação estudados, quando

submetidas ao tratamento térmico no “setpoint” de 85 °C. Embora a Portaria 2914 do Ministério da Saúde não estabeleça um valor máximo permitido (VMP) para essas bactérias, a Resolução 275 da ANVISA (regulamento técnico de características microbiológicas para água mineral natural e natural) estabelece que o valor de micro-organismo detectado deve ser menor que 1,15 NMP/100 mL (BRASIL, 2005).

Sabe-se que a *P. aeruginosa* é um micro-organismo que pode causar infecção nosocomial, especialmente em pacientes imunocomprometidos, levando a significativa morbidade e mortalidade, uma vez que existem poucas orientações para a prevenção dessas infecções. Esse preocupante problema de saúde pública atinge uma magnitude que apela para uma ação de prevenção contra estes agentes patogênicos. Além disso, é um dos principais micro-organismos recuperados de efluentes hospitalares. Largamente distribuído no meio ambiente, é capaz de sobreviver em ambientes adversos por tempo prolongado, utilizar grande diversidade de substratos para crescimento e desenvolver resistência a agentes microbianos e outras substâncias químicas, inclusive ao cloro (EMORI e GAYNES, 1993; LEPOW, 1994; VASCONCELOS e CALAZANS, 2010; MEDEIROS *et al.*, 2007; FUENTEFRÍA *et al.*, 2008).

Os resultados obtidos com a utilização da pasteurização solar automatizada sugerem o sistema como uma alternativa de solução relativamente simples para minimizar ou eliminar esse contaminante de água para consumo humano.

5.4.3 Pesquisa de Bactérias heterotróficas

A contagem de bactérias heterotróficas pelo método “Pour Plate” (plaqueamento em profundidade) mostrou altos níveis de contaminação das amostras usadas para teste de eficiência do pasteurizador, a cada ensaio antes do tratamento.

Após o tratamento observou-se redução das unidades formadoras de colônias (UFC) nos diferentes níveis de contaminação previamente detectados, representando uma eficiência média de tratamento igual a 98,7%. Um exemplo

de resultado da inoculação em meio PCA, antes e depois do tratamento, em diluição de 10^{-1} , é apresentado na Figura 30.

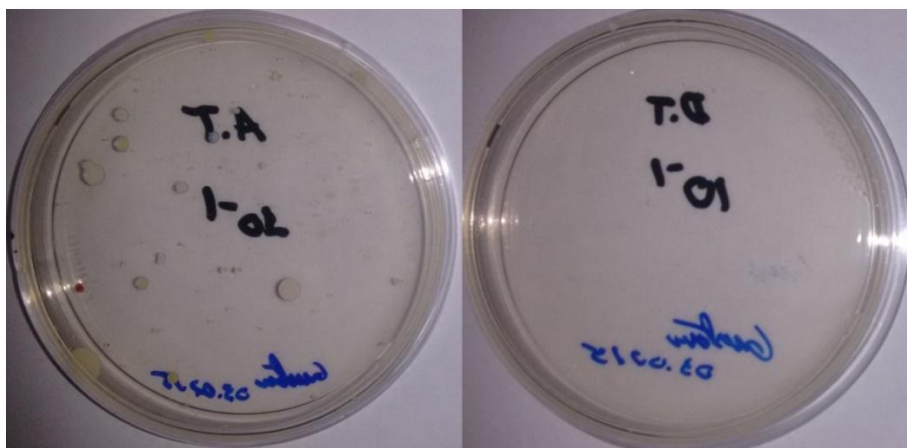


Figura 30. Resultado da inoculação em meio PCA, antes (à esquerda) e depois do tratamento (à direita).

Neste exemplo, para as quatro replicações antes e depois do tratamento, foram contados e calculados valores médios de 304 e 9 unidades formadoras de colônias, respectivamente. Ao multiplicar pelo fator de diluição, foram obtidos os valores de 3×10^3 e 9×10^0 UFC. Esta redução representou 99,7 % de eficiência no tratamento das bactérias heterotróficas para o ensaio em questão. Os valores de UFC obtidos e as respectivas eficiências de cada ensaio realizado são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13. Resultado da contagem de unidades formadoras de colônias para as bactérias heterotróficas antes e depois do tratamento. Os ensaios após o tratamento foram realizados com amostras resultantes de tratamento no “setpoint” de 85 °C.

Ensaio	UFC/mL		Eficiência de tratamento (%)
	Antes do Tratamento	Depois do Tratamento	
1°	$1,08 \times 10^4$	$3,0 \times 10^2$	97,2
2°	$2,08 \times 10^4$	$3,7 \times 10^2$	98,2
3°	$6,9 \times 10^3$	$1,78 \times 10^2$	97,4
4°	$1,77 \times 10^4$	1×10^0	99,9
5°	$2,1 \times 10^4$	$8,8 \times 10^0$	99,9
6°	$3,0 \times 10^3$	$9,0 \times 10^0$	99,7
7°	$4,3 \times 10^5$	$1,63 \times 10^1$	99,9
8°	$1,3 \times 10^4$	$2,4 \times 10^1$	99,8
9°	$7,8 \times 10^3$	$3,7 \times 10^2$	95,3
10°	$9,8 \times 10^3$	$1,95 \times 10^1$	99,8
Média	$1,1 \times 10^4$	$1,29 \times 10^2$	$98,7 \pm 1,5$
p	0,000368	0,030104	-

A aplicação do teste “t” para os resultados obtidos nas análises das bactérias heterotróficas mostrou que houve diferença significativa entre as amostras antes do tratamento (A.T.) quando comparado ao grupamento das amostras depois do tratamento (D.T.), com $p=0,000035$. Na comparação entre as amostras dentro do grupo, observa-se antes do tratamento (A.T.) houve diferença estatística com $p=0,000368$, assim como nas amostras depois do tratamento (D.T.) houve diferença significativa, com $p=0,0301$. Isto significa que o nível de contaminação por bactérias heterotróficas nas amostras de água foram distintos tanto antes quanto depois do tratamento. No entanto, o grau de contaminação das amostras por bactérias heterotróficas depois do tratamento foi reduzido consideravelmente, colocando esse parâmetro em valores abaixo do VMP (5×10^2 UFC/mL) preconizado pela legislação vigente na Portaria 2914 do Ministério da Saúde, para águas de consumo em reservatórios e na rede de distribuição.

Diante dos resultados obtidos para as bactérias heterotróficas, o pasteurizador solar desenvolvido pode funcionar como um sistema eficiente na higienização da água, reduzindo a quantidade de bactérias heterotróficas para níveis considerados excelentes. Muitas amostras de água quando testadas quanto à presença de coliformes, apresentam resultados negativos, sendo liberadas para consumo humano. No entanto, por apresentarem níveis elevados na contagem de bactérias totais, representam um problema de saúde para pessoas sensíveis, lactentes, idosos e imunocomprometidos, provocando diarreias e desconforto intestinal. Apesar de não serem responsáveis por uma patogenia reconhecida, o seu quantitativo deve ser visto com cautela, uma vez que são de difícil eliminação e muitas vezes até de redução, pelos métodos convencionais. Esse fato representa um problema para o controle de qualidade da higiene da água, até mesmo para a indústria, em particular, para as indústrias farmacêuticas, que muito utilizam a água no preparo de medicamentos.

Comparação de resultados bacteriológicos entre sistemas que utilizaram pasteurizador solar

Os coliformes totais e a bactéria *E. coli* comumente são aceitos como bons organismos indicadores de contaminação da água por fezes (WHO, 2011). Nos estudos de Onyango *et al.* (2009), as análises microbiológicas realizadas antes do tratamento indicaram presença de coliformes totais em 15/15 das amostras e presença de *E. coli* em 13/15. Após o tratamento com o pasteurizador solar desenvolvido (83 °C a 84 °C) não foi encontrada *E. coli*, contudo em 2/15 das amostras foram detectados coliformes totais com eficiência de redução de 97%. Wayua *et al.* (2013) desenvolveram um pasteurizador solar para leite, utilizando coletor solar plano que alcançou 81,4 °C durante o experimento. Embora a pesquisa publicada não mostre a concentração de contaminação antes do tratamento, foi reportada redução de coliformes totais para valores abaixo de 10 UFC/mL em 12 amostras coletadas após o tratamento. Bigone *et al.* (2014) analisaram amostras de água de rio com *E. coli* após experimento com pasteurizador solar que usa concentrador. Os resultados reportados mostraram que o sistema reduziu a concentração do micro-organismo com eficiência maior que 90% em todas as amostras analisadas, a uma temperatura de 82-83 °C. Embora os resultados apresentados pelos estudos citados acima tenham conseguido reduzir a contaminação, não indicaram completa ausência de *E. coli* após o tratamento da água. Uma exceção foi o estudo de Dobrowsky *et al.* (2015). Neste estudo os pesquisadores obtiveram resultados mais próximos ao presente trabalho, com redução >99% para *E. coli* nas temperaturas entre 72 e 91 °C, em diferentes níveis de contaminação.

Carielo (2011) pesquisou coliformes totais e *E. coli* em amostras de água com diferentes níveis de contaminação. Nos cinco ensaios realizados as amostras submetidas às análises antes do tratamento indicaram NMP de 1400 em 100 mL para coliformes totais, e para *E. coli* entre 40 e 250 NMP. Após o tratamento nas temperaturas de 55 °C, 60 °C, 65 °C, 75 °C e 85 °C, os resultados encontrados em todos os ensaios indicaram total descontaminação completa para os micro-organismos analisados.

Testes bacteriológicos que utilizam *P. aeruginosa* e bactérias heterotróficas para medir a eficiência de tratamento em sistemas de pasteurização solar são encontrados em menor número na literatura. Normalmente se utilizam os indicadores universais de qualidade da água preconizados pelas diversas legislações, os coliformes totais e *E. coli*.

Contudo, recentemente, Dobrowsky *et al.* (2015) estudaram a eficácia de um pasteurizador solar desenvolvido na China, e doado pela Stellenbosch University by Crest, para redução de bactérias heterotróficas. Neste estudo a contagem desses micro-organismos foi feita em amostras de água de chuva antes e depois do tratamento, utilizando o método “Spread Plate” (R2A). Foi reportado que as amostras tratadas em torno de 56 °C e 65 °C não foram reduzidas suficientemente, permanecendo com valores médios de contagem entre $5,5 \times 10^5$ e $4,5 \times 10^5$ UFC/mL, respectivamente. No entanto, nas temperaturas mais altas, entre 72 °C e 91 °C, foi reportado que houve redução acima de 99% nas amostras após o tratamento.

Spinks *et al.* (2006) sugeriram que deve-se aquecer a água entre 55 °C e 65 °C para eliminar bactérias entéricas patogênicas. Outros estudos têm sugerido que temperaturas abaixo da ebulição reduzem satisfatoriamente o número de bactérias em amostras de água tornando-a potável, dentro dos limites preconizados pela Australian Drinking Water Guidelines (LYE, 1991; COOMBES *et al.*, 1999).

Ao observar que os resultados do presente estudo estão em consonância com os resultados obtidos por Dobrowsky *et al.* (2015), verifica-se que o sistema de pasteurização solar em estudo, pode, no futuro, fornecer água tratada para fins de consumo humano.

5.4.4 Avaliação do pH e da turbidez

A temperatura da água foi aferida em laboratório durante a avaliação de pH e turbidez. A temperatura média da amostra contaminada foi 26,2 °C, e da amostra tratada 31,7 °C. As variações do pH e da turbidez durante a experimentação podem ser observadas na Tabela 15.

Tabela 14. Resultados de pH e turbidez da água como parâmetros de água potável para consumo humano, antes e depois do tratamento.

Duração dos ensaios		Parâmetros			
Data inicial	Data final	pH		Turbidez (NTU*)	
		Antes	Depois	Antes	Depois
11/02/15	16/02/15	7,1	7,0	4,2	5,7
18/02/15	23/02/15	7,4	8,3	5,6	3,8
04/03/15	09/03/15	6,5	7,2	6,4	4,3
11/03/15	16/03/15	6,9	7,6	6,1	5,5
25/03/15	30/03/15	7,2	8,1	4,5	3,9
01/04/15	06/04/15	7,5	8,7	7,2	4,9
15/04/15	20/04/15	7,3	7,7	6,7	3,6
21/04/15	27/04/15	6,9	7,2	9,8	7,4
06/05/15	11/05/15	7,2	7,7	6,5	4,8
13/05/15	18/05/15	7,3	8,4	5,3	4,2
Máximo		7,5	8,7	7,8	6,4
Mínimo		6,5	7,0	4,2	3,6

*NTU = Unidade Nefelométrica de Turbidez

Antes do tratamento o pH variou entre 6,5 e 7,5 (com média = $7,13 \pm 0,3$), e depois do tratamento entre 7,0 e 8,7 (com média = $7,8 \pm 0,6$). Todos os valores, considerando os respectivos desvios padrão, estão dentro dos limites mínimo e máximo (entre 6,0-9,5) recomendados pelo regulamento da Portaria 2914 do Ministério da Saúde do Brasil (BRASIL, 2011). Apesar da tendência de alcalinização da água após o tratamento, o pasteurizador solar não influenciou de maneira negativa o pH da água, mantendo-o dentro da faixa aceitável para o consumo humano.

Em relação à turbidez, observou-se que o tratamento foi capaz de reduzir os valores nefelométricos, indicando mais uma vantagem do processo empregado. Os valores antes do tratamento foram, em média ($6,03 \pm 1,1$), maiores que os valores aceitáveis pela portaria vigente (entre 1-5 NTU). Entretanto, foi possível verificar que após o tratamento a turbidez foi reduzida para valores dentro do limite máximo preconizado pelo regulamento (com média $4,7 \pm 0,9$). Embora nem todos os valores de NTU tenham apresentado valor aceitável, ressalta-se que nenhuma filtração foi realizada como etapa de pré-tratamento.

As temperaturas atingidas durante a pasteurização solar podem ter influência sobre a redução da turbidez, desde que o calor modifique a quantidade de gases dissolvidos na água, como o oxigênio, e em processos biológicos (TUNDISI, 2008; MADIGAN, *et al.*, 2010). A água bruta é rica em matéria orgânica e contém micro-organismos patogênicos. O empobrecimento do oxigênio influencia nas reações bioquímicas e na coagulação das proteínas que constituem a matéria viva (BRANCO, 1986). A coagulação e posterior precipitação ou decantação deste material em suspensão, leva a uma menor dispersão dos feixes de fótons, resultando assim em água menos turva.

Outra consideração, neste caso hipotética, é a influência da temperatura na degradação térmica das estruturas orgânicas em suspensão. Este processo físico de tratamento pode hidrolisar tais estruturas em partículas ainda menores. No entanto, faz-se necessária uma avaliação mais aprofundada para confirmar esta hipótese.

6 CONCLUSÕES

O sistema mostrou-se promissor para operar na região semiárida do Nordeste brasileiro, onde outras tecnologias apresentam dificuldades de serem adaptadas por escassez de recursos energéticos ou ambientais, uma vez que seu pleno funcionamento é garantido em função das irradiâncias médias mensais que são em torno de 22 MJ/m^2 .

Os testes realizados demonstraram que o pasteurizador solar é capaz de produzir 80 L em um dia com boa insolação, utilizando a recuperação de calor (ganho de 113%) no pré-aquecimento da água. Este resultado mostra que o sistema é superior aos demais comparados, por garantir redução total dos micro-organismos indicadores de qualidade da água, mantendo a produtividade consistente com os valores encontrados no estado da arte internacional.

Os resultados bacteriológicos indicaram eficiência de inativação para os micro-organismos: coliformes totais (100%), *E. coli* (100%), *P. aeruginosa* (100%) e bactérias heterotróficas (98,7%), no setpoint de 85°C , em conformidade com os parâmetros de potabilidade da água preconizados pela legislação vigente no Brasil (Portaria 2914 do MS). Tais resultados indicam que o sistema de controle garante a segregação da água contaminada, não comprometendo a qualidade da água na saída do sistema.

Os experimentos realizados em condições meteorológicas reais com um coletor solar plano, e equipado com duas válvulas solenoides, mostraram que o método de pasteurização solar da água é uma opção atraente para tornar a água potável, especialmente para regiões semiáridas de países em desenvolvimento com insolação abundante e outros recursos energéticos escassos. A replicação dessa tecnologia pode mitigar o problema da escassez de água potável para consumo humano, necessária para a vida das populações que vivem em regiões remotas.

O sistema de 2 m^2 de área absorvedora mostrou potencial para fornecimento de água potável a 10 famílias (4 pessoas) no mês de verão, em que a irradiância solar diária é da ordem de 25 MJ/m^2 . Em nível comunitário, o potencial de redução de custo é enorme a medida em que os custos do sistema de controle e suprimento de energia são basicamente fixos, sendo somente a área do coletor e do sistema de armazenamento escaláveis. Nesta

consideração, estima-se que o protótipo será capaz de produzir 1000 L de água tratada, suprimindo a necessidade de aproximadamente 125 famílias (500 pessoas).

Em adição, o sistema pode ser sugerido para auxiliar na desinfecção da água de uso hospitalar, como as de abastecimento, assim como ser usado como técnica auxiliar para tratamento de efluentes de hospitais ou de laboratórios de risco biológico elevado.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Aperfeiçoar o sistema no que concerne ao coletor solar utilizado, como por exemplo, a substituição do mesmo (eficiência de 0,40 a 75 °C) por um coletor de tubo evacuado com eficiência de 0,70;
- Avaliar os custos de desenvolvimento do projeto no que diz respeito aos dispositivos e equipamentos utilizados, assim como a manutenção do sistema;
- Testar a eficácia do sistema para a inativação de parasitos vetores de graves problemas de saúde pública, como a *Giardia* e o *Cryptosporidium*, que comumente contaminam as águas de consumo;
- Desenvolver um projeto piloto para suprir a demanda de água potável de uma comunidade do semiárido de até 500 habitantes;
- Adaptar o pasteurizador para hospitais e/ou laboratórios utilizando o sistema de controle desenvolvido, com o objetivo de garantir a desinfecção desses ambientes que geram águas residuárias com elevada carga microbiana as quais podem comprometer o meio ambiente.

REFERÊNCIAS

- ACRA, A.; JURDI, M.; MUALLEM, H.; KARAHAGOPIAN, Y.; RAFFOUL, Z. Water disinfection by solar radiation: assessment and application. Ottawa: International Development Research Center; 1991.
- ACRA, A.; RAFFOUL, Z.; KARAHAGOPIAN, Y. Solar Disinfection of Drinking Water and Oral Rehydration Solutions - Guidelines for Household Application in Developing Countries. UNICEF, American University of Beirut. 1984.
- ABRAHAM, J. P.; PLOURDE, B. D.; MINKWOYCZ, W. J. Continuous flow solar thermal pasteurization of drinking water: methods, devices, microbiology, and analysis. *Renewable Energy*, v. 81, p. 795-803. 2015.
- AMSBERRY, A.; TYLER, C.; STEINHAUFF, W.; POMMERENCK, J.; YOKOCHI, A. T. F. Simple continuous-flow device for combined solar thermal pasteurization and solar disinfection for water sterilization. *Journal of Humanitarian Engineering*, v. 3, n. 1. 2015.
- AMIN, M.T.; HAN, M.Y. Roof-harvested rainwater for potable purposes: Application of solar collector disinfection (SOCO-DIS). *Water Research*, v. 43 (20), p. 5225-5235. Dec. 2009.
- ANDERSON, B. C. Moist heat inactivation of *Cryptosporidium* sp. *Am J Public Health*. Dec; v. 75 (12), p. 1433–1434. 1985.
- ANDREATTA, D.; YEGIAN, D.; CONNELLY, L.; METCALF, R. Recent advances in devices for the heat pasteurization of drinking water in the developing world. In: *Proceedings of the 29th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*, p. 1741–1746. 1994.
- APHA. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. Ed. 21, Washington, 2005.
- AQUÍFERO GUARANI. Disponível em: <<http://www.daaearaquara.com.br/guarani.htm>>. Acessado: 03 nov 2015.
- BIGONI, R.; KÖTZSCH, S.; SORLINI, S.; EGLI, T. Solar water disinfection by a Parabolic Trough Concentrator (PTC): flow-cytometric analysis of bacterial inactivation. *Journal of Cleaner Production*, v. 67, p. 62-71. 2014.
- BARTLEY, J. W.; OLMSTED, R. N. *APIC Infection Control and Applied Epidemiology: Principles and Practice*. St Louis, Mo Mosby–Year Book Inc; p. 118.1-118.4.1996.
- BLACKBURN, D.M.; BUSTAMANTE, Y.; JALFIM, F.; VIANA, A. A.; JUNIOR, M.F.; LIMA, M. Avaliação da potabilidade da água na região de atuação da Diaconia no semi-árido nordestino. Recife. 2005.

BOSCHI-PINTO, C.; SHIBUYA, K.; VELEBIT, L. Estimating child mortality due to diarrhea in developing countries. *Bulletin*, v. 86 (9), p. 657-736. 2008.

BRANCO, S. M. Hidrobiología aplicada à engenharia Sanitária. CETESB/ASCETESB, p. 616. 1986.

BANDRES, J.C; MATHESON, J.J; DUPONT, H.L. Heat susceptibility of bacterial enteropathogens. *Arch. Intern. Med.*, v. 148, p.2261-2263. 1988.

BRASIL. Ministério da Saúde. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Resolução n. 275, de 22 de setembro de 2005. Regulamento Técnico de Características Microbiológicas para Água Mineral Natural e Água Natural. DOU, Brasília, 23 set. 2005.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria nº 2914, de 12/2011. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF. Seção I, 14 de dez. 2011, p. 39. 12 dez. 2011.

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.

BURCH, J. D.; THOMAS, K.E. An overview of water disinfection in developing countries and the potencial for solar thermal water pasteurization. National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP-550-23110. 1998.

CANTUSIO, R. N. Estudo dos métodos: Floculação em carbonato de cálcio e adaptação das técnicas de filtração em membrana e separação imunomagnética paa a detecção de *Cryptosporidium* e *Giardia* em amostras hídricas. Tese de Doutorado. Unicamp, Campinas. 2008.

CARIELO, G.; TIBA, C; CALAZANS, T. M. G. Desenvolvimento de um sistema para descontaminação microbiológica da água por pasteurização solar. 107 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Energética e Nucleares). Universidade Federal de Pernambuco. Recife-PE. 2011.

CHURCH D.; ELSAYED, S.; REID, O.; WINSTON, B; LINDSAY, R. Burn wound infections. *Clin Microbiol Rev*, v. 19 (2), p. 403-434. 2006.

COOKE, R.P.D.; WHYMANT-MORRIS, A.; UMASANKAR, R. S.; goddard, S. V. Bacteria-free water for automatic washer-disinfectors: an impossible dream? *J Hosp Infect.*, p. 3963- 3965. 1998.

CETESB. Análises Microbiológicas de Amostras Ambientais. São Paulo, p. 134. 2009.

CIMERMAN B; FERRAZ, C. A. M.; PAOLI, L. A.; TAMBURUS, W. Tratamento de giardíase em crianças com tinidazol. *Revista Brasileira de Clínica e Terapêutica* 6; p. 451-452. 1977.

CLASEN, T.F.; BASTABLE. A. Faecal Contamination of Drinking Water During Collection and Household Storage: the need to extend protection to the point of use. *Journal of Water and Health*, London, v. 1, n. 3, p. 109-115. 2003.

COOMBES, P. J.; ARGUE, J. R.; KUCZERA, G. Figtree place: a case study in water sensitive urban design (WSUD). *Urban water* v. 1 (4), p. 335-343. 1999.

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.

CRITTENDEN, J.C. *Water Treatment - Principles and Design*. Ed. 2. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. ISBN 978 0 471 11 0187. 2005.

DIAS, M. F. F. Qualidade microbiológica de águas minerais em garrafas individuais comercializadas em Araraquara – SP. 2008. 66 f. Dissertação (Mestrado em Ciências dos Alimentos) – Universidade Estadual Paulista, Araraquara, SP. 2008.

DOBROWSKY, P. H.; CARSTENS, M.; VILLIERS, J.; CLOETE, T. E.; KHAN, W. Efficiency of a closed-coupled solar pasteurization system in treating roof harvested rainwater. Department of microbiology, Faculty of Science, Stellenbosch University, Stellenbosch, South Africa. *Science of the total environment*, v. 536, p. 206-214. 2015.

DUBOIS, V. ARPIN, C.; MELON, M.; MELON, B.; ANDRE, C.; FRIGO, C.; QUENTIN, C. Nosocomial outbreak due to a multiresistant strain of *Pseudomonas aeruginosa*. p12: Efficacy of cefepime-amikacin therapy and analysis of β -lactam resistance, *J. Clin. Microbiol.*, v. 39, n. 6, p. 2072-2078. 2001.

DUFF W. S.; HODGSON D. A simple high efficiency solar water purification system. *Sol Energ*, v. 79, n. 1, p. 25-32. 2005.

EL-GHETANY, H. H.; DAYEM, A. A. Numerical simulation and experimental validation of a controlled flow solar water disinfection system; *Desalination and water treatment*. v. 20, n. 1-3, p. 11-21. 2010.

ELLIS, K. V. Water disinfection: A review with some consideration of the requirements of third world. *Crit Rev Env Contr*, v. 20, n. 5, 6, p. 341– 407. 1991.

EMORI, TG; GAYNES, RP; An overview of nosocomial infections, including the role of the microbiology laboratory. *Clin Microbiol Rev.*, p. 6428- 6442. 1993.

EPA. Disinfectant use in water treatment. In: *Alternative disinfectants and oxidants guidance manual*. United States, p. 346. 1999.

FALAGAS, M. E.; KOLETISI, P.K.; BLIZIOTIS, I.A. The diversity of definitions of multidrug-resistant (MDR) and pandrug-resistant (PDR) *Acinetobacter baumannii* and *Pseudomonas aeruginosa*. J Med Microbiol., v. 55, p. 1619-1629. 2006.

FAYER, R. Effect of high temperature on infectivity of *Cryptosporidium parvum* oocysts in water. Appl. Environ. Microbiol., v.60, p. 2732-2735. 1994.

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.

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.

FRANCO, R. M. B. Protozoários de Veiculação Hídrica: Relevância em saúde pública. Revista panamericana de infectologia, v. 9. 2007.

FUENTEFRIA, D. B.; FERREIRA, A. E.; GRÄF, T.; CORÇÃO, G. *Pseudomonas aeruginosa*: disseminação de resistência antimicrobiana em efluente hospitalar e água superficial. Revista da Sociedade Brasileira de Medicina Tropical, v. 41 (5), p. 470-473. 2008.

GADGIL, A. J.; SHOWN, L. J. To drink without risk: The use of ultraviolet light to disinfect drinking water in developing countries. 1995. Disponível em: <<http://energy.lbl.gov/iep/archive/uv/drink.html>>. Acessado em: 27 jul 2015.

GAJADHAR, A. A.; FORBES, L. B. An internationally recognized quality assurance system for diagnostic parasitology in animal health and food safety, with example data on trichinellosis. Veterinary Parasitology, v. 103, p. 133–140. 2002.

GELDREICH, E. E. Creating microbial quality in drinking water. ed. Microbial Qualities of Water Supply in Distribution Systems. Boca Raton, Fla CRC Press Inc., p. 39-102. 1996.

GELDREICH, E. E. The bacteriology of water. In: Microbiology and microbial infections. 9th ed. London: Arnold. 1998.

GEO BRASIL. Recursos hídricos: Componente da série de relatórios sobre o estado e perspectivas do meio ambiente no Brasil. Ministério do Meio Ambiente; Agência Nacional de Águas; Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente. Brasília: 264p. il. MMA; ANA, 2007.

GEMS/WATER Operational Guide. Global freshwater quality - a first assessment. Global environment monitoring system (GEMS). Third edition. GEMS/W. 92.1. 1992.

GONZÁLEZ, M. M.; SARMIENTO, L.; CASTAÑO, J. C.; GIRALDO, A. M.; SALAZAR, A.; MUÑOZ, N. J. Detecção de polivírus em águas residuais de Armenia, Colombia. *Revista de Salud Publica, Bogotá*, n. 1, p. 13-13, Sup. 8. 2006.

GONZALEZ, R.G.; TAYLOR, M. L.; 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 assesment and control. Água de consumo humano como fator de risco à saúde em propriedades rurais. *Revista de Saúde Pública, São Paulo*, v. 37, n. 4, p. 510-514, 2003.

HARGREAVES, J.; SHIRELEY, L.; HANSEN, S.; BREN, V.; FILLIPI, G.; LACHER, C., ESSLINGER, V.; WATNE, T.; Bacterial contamination associated with electronic faucets: a new risk for healthcare facilities. *Infect. Control Hosp. Epidemiol.* v. 22, 202-205. 2001.

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.

HAUSER, A.R.; SRIRAM, P. Severe *Pseudomonas aeruginosa* infections: tackling the conundrum of drug resistance. *J. Postgrad. Med.*, Mumbai, v. 117, n. 1, p. 41-48. 2005.

HAVENS, W.P. Properties of the etiologic agent of infectious hepatitis, *Proceedings of the Society for Experimental Biology and Medicine*, v. 58, p. 203-204. 1945.

HUANG, S. S.; LABUS, B. J.; SAMUEL, M. C.; WAN, D.T; REINGOLD, A. L. Antibiotic resistance patterns of bacterial isolates from blood in San Francisco County, California, 1996-1999. *Emerg. Infect. Dis.*, v. 8, p. 195-201. 2002.

JORGENSEN, A. J.; NOHR, K.; SORENSEN, H.; BOISEN, F. Decontamination of drinking water by direct heating in solar panels. *J Appl Microbiol.* v. 85, n.3, p. 441-447; 1998.

JULIÃO, F. C.; SEGURA-MUÑOZ, I.S. Avaliação das condições microbiológicas e físico-químicas da água de reservatório domiciliar e predial: importância da qualidade dessa água no contexto da saúde pública. 157 f. Tese (Doutorado em Ciências). Universidade de São Paulo. Ribeirão Preto-SP. 2011.

KARANIS, P.; KOURENTI, C.; SMITH, H. Waterborne transmission of protozoan parasites: a worldwide review of outbreaks and lessons learnt. *Journal of Water and Health*, v. 5, n. 1, p. 1-38, 2007.

KRUGMAN, S.; GILES, J.; HAMMOND, J. Hepatitis virus: effect of heat on the infectivity and antigenicity of the MS-1 and MS-2 strains. *J Infect Dis*, v. 122 (5), p. 432-436. 1970.

LECLERC, H., SCHWARTZBROD, L.; DEI-CAS, E. Microbial agents associated with waterborne diseases. *Crit. Rev. Microbiol.*, v. 28 (4), p. 371–409. 2002.

LEGRINI, O.; OLIVEROS, E.; BRAUN, A. M. Photochemical processes for water treatment. *Chem Rev*, v. 93, p. 671-698. 1993.

LEPOW, M.L. *Pseudomonas aeruginosa* colonization and infection of the gastrointestinal tract. In: *Pseudomonas aeruginosa* infections and treatment (ed. A.I. Baltch and R. P. Smith), Marcel Dekker, New York, p. 421-440. 1994.

LIVSMEDELSVERKET, Rapport nr 25: riskprofil - dricksvatten och mikrobiologiska risker. Lindberg, t., lindqvist, R. ISSN 1104-7089. 2005.

LYE, D. J. Microbial levels in cistern systems: acceptable or unacceptable. Proceedings of the 5th international conference on rainwater catchment systems, August, Keelung, Taiwan. p. 80-86. 1991.

MARTINCO, P.; GAGNIERE, H.; BERRY, H.; BRET, L. Antibiotic resistance and virulence properties of *Pseudomonas aeruginosa* strains from mechanically ventilated patients with pneumonia in intensive care units: comparison with imipenem-resistant extra-respiratory tract isolates from uninfected patients. *Microbes infect.*, v. 4, n. 6, p. 613-620. Paris. 2002.

MACPHERSON, C. N. L. Human behavior and epidemiology of parasitic zoonoses. *International Journal Parasitology*, v. 35, p. 1319-1331. 2005.

MADIGAN, M. T.; MARTINKO, J. M.; DUNLAP, P. V.; CLARK, D. P. *Microbiologia de Brock*. Porto Alegre: Artmed. Ed. 12, p. 156-157; 780-781. 2010.

MARENGO, J. A. Água e mudanças climáticas. *Estudos avançados*. v. 22, n. 63, p. 83 – 96. 2008.

MARQUES, A. R.; OLIVEIRA, F. C.; PONTES, M. P.; PARREIRA, J. S.; SANTOS, V. P. Efficiency of PET reactors in solar water disinfection for use in southeastern Brazil. *Sol Energy*, v. 87, p.158-167. 2013.

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.

MARTIN-DOMINGUEZ, A.; HERRERA, A. M. T. Efficiency in the disinfection of water for human consumption in rural communities using solar radiation, *Sol. Energy*, v. 78, p. 31–40. 2005.

MCGUIGAN, K.G.; JOYCE, T.M.; CONROY, R.M.; GILLESPIE, J.B.; ELMORE-MEEGAN, M. Solar disinfection of drinking water contained in transparent plastic bottles: characterizing the bacterial inactivation process, *J. Appl. Microbiol.*, v. 84, p. 1138–1148. 1998.

MEDEIROS, L. V.; VASCONCELOS, U.; CALAZANS, G. M. T. Ocorrência de linhagens de *Pseudomonas aeruginosa* cloro resistentes em águas de diferentes origens. *Acta. Sci. Biol. Sci. Maringá*, v. 29, n. 3, p. 309-313. 2007.

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

MS. Secretaria de Vigilância em Saúde. Comentários Sobre a Portaria MS N.º 518/2004: Subsídios Para Implementação, ed. 1, p. 19. 2005.

MMA. Água um recurso cada vez mais ameaçado. 2011. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/sedr_proecotur/_publicacao/140_publicacao009062009025910.pdf>. Acesso em: 28 fev 2016.

MOFFET, H.L.; WILLIAMS, T. Bacteria recovered from distilled water and inhalation therapy equipment. *AJDC*. p. 1147-12. 1967.

MORAES, D.S.L.; JORDAO, B.Q. Degradação de recursos hídricos e seus efeitos sobre a saúde humana. *Revista de Saúde Pública*, v. 36, n. 3, p. 370-374. 2002.

NGUYEN, Y.; SPERANDIO, V. Enterohemorrhagic *E. coli* (EHEC) pathogenesis. *Frontiers in cellular and infection microbiology*. n. 2, p. 1-4. 2012.

NREL. Village water treatment technologies in: NREL. Opportunities for Renewable Energy Technologies in Water Supply in Developing Country Villages. Golden: National Renewable Energy Laboratory; p. 13-22. 1997.

ONYANGO, E. A.; THORUWA, T. F. N.; MAINGI, S.M.; NJAGI, E. M. Performance of 2-element plane reflector augmented galvanised piupe flat plate collector for solar water pasteurization, *Journal of Food Technology*, v. 7, n. 1, p. 12-19. 2009.

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. São Paulo. Makron Books, v.1, p. 476. 1996.

PIRNAY, J. P.; DE VOS, D.; COCHEZ, C.; BILOCQ, F.; PIRSON, J., STRUELENS, M. Molecular epidemiology of *Pseudomonas aeruginosa* colonization in a burn unit: persistence of a multidrug-resistant clone and a silver sulfadiazine-resistant clone. J Clin Microbiol., v. 41 (3), p. 1192-1202. 2003.

PULLMAN, G.S.; DEVAY, J.E. e GARBER, R.H. Soil solarization and thermal death: a logarithmic relationship between time and temperature for four soilborne plant pathogens. Phytopathology, St. Paul, v. 71 (9), p.959-964. 1981.

QUIROZ, C. C. Água embotellada y su calidad bacteriológica. Água Latinoamérica. 2002. Disponível em: <<http://www.agualatinoamerica.com/docs/pdf/9-10-02aguaemb.pdf>>. Acesso em: 23 ago. 2014.

RAJARATNAM, G.; WINDER, C.; AN, M. Metals in drinking water from new housing estates in the Sydney area. Environmental Research., v. 89, p. 165-170, section A. New York. 2002.

RENDTROFF, R. C. The experimental transmission of human intestinal protozoan parasites II. *Giardia lamblia* cysts given in capsules. American Journal of Hygiene v. 59, p. 209-222. 1954.

REX, J.H; WALSH, T. J.; ANAISSIE, E. J. Fungal infections in iatrogenically compromised hosts. Adv Intern Med., p. 43321-43371. 1998.

RIJAL, G.K.; FUJIOKA, R.S. Use of reflectors to enhance the synergistic effects of solar heating and solar wavelengths to disinfect drinking water sources, Water Sci. Technol. v. 48, p. 481–488. 2003.

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

RUTALA, W.; WEBER, D. Water as a reservoir of nosocomial pathogens. Infect Control Hosp Epidemiol., p. 18609-18616. 1997.

SAFE WATER SYSTEMS. Sol Saver product information sheet, safe water systems, 2800 woodlawn drive, suite 265 Honolulu, HI 96822. 2002. Disponível em: <<http://www.safewatersystems.com>>. Acessado: 8 Abr 2015.

SAITOH, T. S.; EL-GHETANY, H. H. Solar water-sterilization system with thermally controlled flow. Appl Energy, v. 64, p. 99 e 387. 1999.

SANTOS, L. U.; BONATTI, T. R.; CANTUSIO, R. N.; FRANCO, R. M. B. Detection of *giardia* spp. cysts and *cryptosporidium* oocysts in activated sludge by ether clarification technique and sucrose flotation. Revista do Instituto de Medicina Tropical São Paulo, v. 46, p. 309-313, 2004.

- SCHULZ, C. R.; OKUN, D. A. Surface water treatment for communities in developing countries. John Wiley and Sons, New York. 1984.
- SNEL, S. J. M. G.; BAKER, V.; KAMALESH, N. F.; LEARMONTH, J. A tale of two parasites: the comparative epidemiology of cryptosporidiosis and giardiasis. *Epidemiology and infections*, v. 137, p. 1641-1650. 2009.
- SOMMERE, B.; MARINO, A; SOLARTE, Y.; SALAS, M. L.; DIEROLF, C.; VALIENTE, C.; MORA, D.; RECHSTEINER, R.; SETTER, P.; WIROJANAGUD, W.; AJARMEH, H.; ALHASSAN, A.; WEGELIN, M. Sodis – An Emerging Water Treatment Process, *J. Water Srt – Aqua*, v. 46, p. 127–137. 1997.
- SPINKS, A. T.; DUNSTAN, R. H.; HARRISON, T.; COOMBES, P.; KUCZERA, G. Thermal inactivation of water-borne pathogenic and indicator bacteria at sub-boiling temperatures. *Water Res.*, v. 40, 1326-1332. 2006.
- STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER, 21st ed. Centenial Edition 2005. p. 9-48. 2005.
- STANLEY, L. E.; MEYER, E. A. *Giardia and giardiasis: biology, pathogenesis and epidemiology*. Plenum Press, New York. 1984.
- SVENSKT VATTEN. Dricksvattenteknik 4. Ytvatten. Publikation U6, vatten i natur och samhalle, Elanders, AB. ISSN 16545117. 2011.
- SVREK C.; SMITH, D.W. Cyanobacteria toxins and the current state of knowledge on water treatment options: a review. *J. Environ Eng Sci*, v. 3, p. 155-185. 2005.
- SUNG, N.; COLLINS, M. T. Thermal tolerance of *Mycobacterium paratuberculosis*. *Appl. Environ. Microbiol.*, v. 64, n. 3, p. 999-1005. 1998.
- TIBA, C.; FRAIDENRAICH, N.; BARBOSA, E. M. S. Instalação de sistemas fotovoltaicos para residências rurais e bombeamento de água. p. 7-9. 1998.
- TIBA, C.; FRAIDENRAICH, N.; MOSZKOWICZ, M.; CAVALCANT, E. S. C.; LYRA, F.; NOGUEIRA, A. Atlas Solarimétrico Brasileiro: Banco de Dados Terrestres. Editora Universitária da UFPE, Recife, 2000.
- TRAUTMANN, M.; MICHALSKY, T.; HEIDEMARIE, W.; RADOSAVLJEVIC, V.; RUHNKE, M.; Tap water colonization with *Pseudomonas aeruginosa* in a surgical intensive care unit (ICU) and relation to *Pseudomonas* infections of ICU patients. *Infect Control Hosp Epidemiol.*, p. 2249-2252. 2001.
- TORTORA, G. J.; FUNKE, B. R.; CASE, C. L. *Microbiologia*. 8ª ed. São Paulo: Artmed, p. 827. 2005.
- TUNDISI, J. G.; TUNDISI, T. M. *Limnologia*. São Paulo: Oficina de Textos, ed. 1, p. 490. 2008.

UNICEF and WHO. Progress on Drinking-water and Sanitation: 2012 Update. World Health Organization, New York, USA. 2012.

UNIVERSITY OF DHAKA. Looking for safe drinking water? – Techniques using free sunshine and rain. Department of Biomedical Physics & Technology. Dhaka, Bangladesh. 2011. Disponível em: <<http://bmpt.du.ac.bd/wp-content/uploads/2012/04/bookletonsafedrinkingwaterusingsimpletechniques.pdf>> Acessado: 21 Out 2015.

VALENZUELA, E.; ALVAREZ, P. E.; EAPEN, D.; BRITO, D.; CAMAS, K.; DIAZ, G.; DIAZ, K.; SPINOSA, F.; VAZQUEZ, C. Water disinfection by solar radiation in a green house effect device. *Int J Global Warm*, v. 2, n. 1, p. 48-56. 2010.

VASCONCELOS, U.; LIMA, M. A. G. A.; CALAZANS, G. M. T. *Pseudomonas aeruginosa* associated with negative interactions on coliform bacteria growth. *Canadian Journal of Pure and Applied Sciences*, v. 4, n. 2, p. 1133-1139. ISSN: 1715-9997. 2010.

WARD, R., KRUGMAN, S., GILES, J.P., JACOBS, A.M., BODANSKY, O. Infectious hepatitis; studies of its natural history and prevention. *New England Journal of Medicine*, v. 258, p. 407-416. 1958.

WAYUA, F. O.; OKOTH, M. W.; WANGO, J. Design and performance assessment of a flat-plate solar milk pasteurizer for arid pastoral areas of Kenya. *Journal of Food Processing and Preservation*, v. 37; p. 120–125. 2013.

WEGELIN, M.; CANONICA, S.; MECHSNER, K.; FLEISCHMANN, T.; PESARO, F.; METZLER, A. Solar water disinfection: scope of the process and analysis of radiation experiments. *J Water SRT- Aqua*, v. 43, n. 3, p. 154-169. 1994.

WILEY, B.; WESTERBERG, S. Survival of Human Pathogens in Composted Sewage. *Applied Microbiology*, v. 18 (6), p. 994-1001. 1969.

WHO. Managing Water in the Home: Accelerated Health Gains from Improved Water Supply. Geneva: World Health Organization. 2002.

WHO. Guidelines for drinking water. Geneva: World Health Organization. 2003.

WHO. Primary Health Care Now More Than Ever. Geneva: World Health Organization. 2008.

WHO. Water Sanitation Health: Guidelines for drinking-water quality. Fourth edition. Chapter 7 and 11. 2011. Disponível em: <http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/44584/1/9789241548151_eng.pdf> Acessado: 05 nov 2015.

WHO and UNICEF. Progress on sanitation and drinking-water - 2013 update. WHO Library Cataloguing-in-Publication. Data. France: WHO Press. ISBN 978 241 50 5390. 2013.

WHO. Fact sheet N°330: Diarrhoeal disease. 2013. Disponível em: <<http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs330/en/>>. Acessado: 05 nov 2015.

YU, V.; LIU, Z.; STOUT, J. E.; GOETZ, A. Legionella disinfection of water distribution systems: principles, problems, and practice. Infect Control Hosp Epidemiol., p. 14571- 14575. 1993.

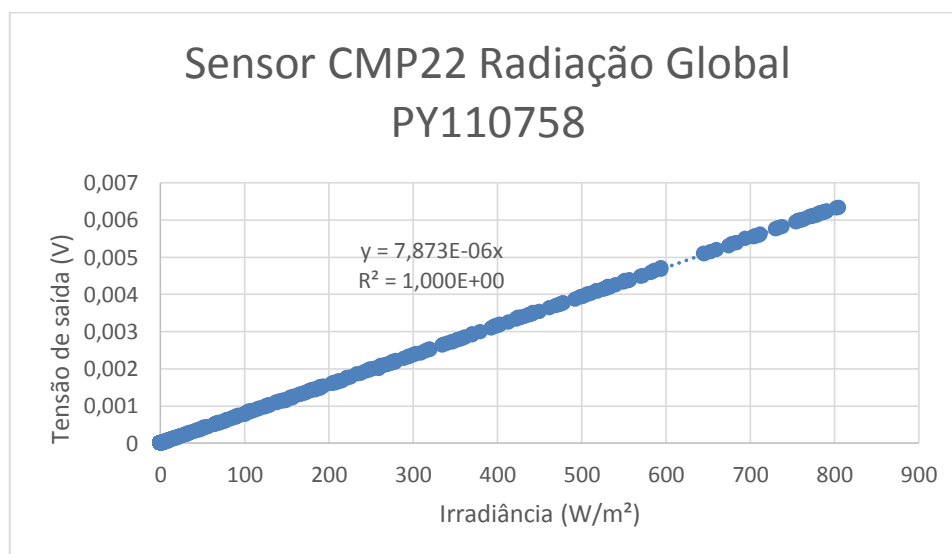
XAVIER, R. P.; SIQUEIRA, L. P.; VITAL, F. A. C.; ROCHA, F. J. S.; IRMÃO, J. I.; CALAZANS, G. M. T. Microbiological quality of drinking rainwater in the inland region of Pajeú, Pernambuco, Northeast Brazil. Rev. Inst. Med. Trop. São Paulo, v. 53 (3), p. 121-124. 2011.

ZAHRA, G.C.; AHMAD, K.; FARZANEH, F.; HOSEIN, A; AZAM, M. Z. Biofilm formation and virulence factors among *Pseudomonas aeruginosa* isolated from burn patients. Jundishapur J Microbiol, v. 8 (10), e22345. 2015.

APÊNDICE A – Ficha de Calibração

Nº DA CALIBRAÇÃO: 001
INSTRUMENTO: PIRANÔMETRO MOD. LI200
FABRICANTE: LI-COR
SERIAL: PY110758
DESIGNAÇÃO DO SENSOR: RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL NO PLANO DO COLETOR
PADRÃO UTILIZADO: KIPP & ZONEN CMP22
PERÍODO DE CALIBRAÇÃO: FEV/2012
LOCAL: RECIFE-PE

CONSTANTE VERIFICADA: $K = 7,873 \times 10^{-6} \text{ V} / \text{W} \cdot \text{m}^{-2}$



Rinaldo Oliveira de Melo

Técnico Responsável

ANEXO A – Tabela com NMP para *Pseudomonas aeruginosa*

Número mais provável (NMP) e intervalo de confiança em nível de 95% de probabilidade, para diversas combinações de tubos positivos e negativos na inoculação de 10 porções de 10 mL da amostra por tubo (Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 21th ed. APHA, AWWA, WEF, 2005).

Número de tubos positivos	NMP/100 mL	Intervalo de confiança (95%) (valores aproximados)	
		Mínimo	Máximo
0	<1,1	0	3,0
1	1,1	0,03	5,9
2	2,2	0,26	8,1
3	3,6	0,69	10,6
4	5,1	1,3	13,4
5	6,9	2,1	16,8
6	9,2	3,1	21,1
7	12,0	4,3	27,1
8	16,1	5,9	36,8
9	23,0	8,1	59,5
10	>23,0	13,5	infinito

Fonte: (STANDARD METHODS OF WATER AND WASTEWATER, 2005)