

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE CIÊNCIAS BÁSICAS DA SAÚDE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MICROBIOLOGIA AGRÍCOLA E DO
AMBIENTE

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA DE DESINFECÇÃO
SOLAR DE ÁGUA EM FLUXO CONTÍNUO NA INATIVAÇÃO DE CISTOS
DE *ACANTHAMOEBA CASTELLANII* E DE BACTÉRIAS**

Beni Jequicene Mussengue Chaúque

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Marilise Brittes Rott

Co-Orientador: Prof. Dr Antônio Domingues Benetti

Porto Alegre
Fevereiro/2020

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE CIÊNCIAS BÁSICAS DA SAÚDE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MICROBIOLOGIA AGRÍCOLA E DO
AMBIENTE

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA DE DESINFECÇÃO
SOLAR DE ÁGUA EM FLUXO CONTÍNUO NA INATIVAÇÃO DE CISTOS
DE *ACANTHAMOEBA CASTELLANII* E DE BACTÉRIAS**

Beni Jequicene Mussengue Chaúque
Graduado em Ensino de Biologia

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Microbiologia Agrícola e do Ambiente da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Microbiologia Agrícola e do Ambiente.

Área de concentração: Microbiologia do Ambiente

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Marilise Brittes Rott
Co-Orientador: Prof. Dr Antônio Domingues Benetti

Porto Alegre, Rio Grande do Sul - Brasil
Fevereiro/2020

Somos
seres humanos, dormindo
brincamos, cantamos
quando não choramos
amamos.

Depois despertamos,
vivemos
eternamente.

Beni Chaúque

AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida e sustento.

‘À minha querida esposa Leosvilda Gomes Henriques Chaúque por manter firme a nossa família na minha ausência, e aos meus filhos Briany e Beni pelo apoio e perdoar a minha ausência. Aos meus irmãos, em especial Adinelo Chaúque pelo apoio.

À minha Orientadora Marilise Brittes Rott e ao meu Co-orientador Antônio Domingues Benetti pelos apoios indescritíveis sem os quais não seria possível este trabalho.

À Professora Ana Paula Guedes Frazzon pela recepção, acolhimento e apoiar na minha integração em Porto Alegre.

Ao Luís Carlos e Adagoberto Medeiros pela ajuda na construção e instalação do protótipo.

A professora Gertrudes Corção pelo apoio e por oferecer as cepas bacterianas para os experimentos. Ao Rodrigo Fernando Goncalves pela grande ajuda durante a realização dos experimentos no campo.

Ao Centro de Espectroscopia Óptica de Materiais, situado no Laboratório Laser e Óptica no Instituto de Física da UFRGS na pessoa do Professor Marcelo Barbalho Pereira pela ajuda nas medições ópticas.

Ao professor Carlos Eugênio Silva pela ajuda durante a realização das análises estatísticas.

Ao Anacleto Marito pelo mapa da localização da área do estudo.

A todos professores do PPGMAA pelos ensinamentos. Aos professores e técnicas do laboratório de Parasitologia pela amizade e apoio. Ao PPGMAA pelo auxílio financeiro para deslocamento na fase de coleta de amostras.

À Denise Leal, à Júlia Paes, ao Francisco Kercher e a Renata Kepler pela convivência e apoio.

Ao Damasco Mateus Chalenga e Virgílio Carménia Cossa pela amizade e apoios.

A CAPES (GCUB / ProAfri / nº001 / 2018, edição Moçambique) pela bolsa.

DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA DE DESINFECÇÃO SOLAR DE ÁGUA EM FLUXO CONTÍNUO NA INATIVAÇÃO DE CISTOS DE *ACANTHAMOEBA CASTELLANII* E DE BACTÉRIAS¹

Autor: Beni Jequicene Mussengue Chaúque

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Marilise Brittes Rott

Co-Orientador: Prof. Dr Antônio Domingues Benetti

RESUMO

A desinfecção solar (SODIS) é uma técnica eficaz de tratamento microbiológico de água que é barata e de fácil acesso, aplicável às comunidades desprovidas de sistemas convencionais de distribuição de água potável, entretanto o menor volume de água tratada por dia é uma limitação para o processo convencional de SODIS. Visando contribuir para a superação desta limitação, no presente trabalho foi desenvolvido um sistema de desinfecção solar de água em fluxo contínuo que utiliza o efeito sinérgico do calor e da radiação ultravioleta, e foi testado para inativação de cistos de *Acanthamoeba castellanii*, e *Escherichia coli*, *Salmonella Typhimurium*, *Enterococcus faecalis* e *Pseudomonas aeruginosa*. O sistema consistiu de um aquecedor solar, constituído de um concentrador cilíndrico-parabólico e um irradiador de UV, constituído de um concentrador do tipo fresnel combinado com um concentrador cilíndrico-parabólico. A água contaminada foi bombeada para o interior do absorvedor tubular colocado no foco do aquecedor, passando em seguida pelos reatores tubulares de quartzo colocados nos focos dos concentradores no irradiador de UV. A inativação efetiva de cistos de *A. castellanii* foi obtida quando a água foi exposta ao efeito sinérgico da UVA e UVB a uma temperatura de 60°C por 10 minutos. A inativação de todas as bactérias *aeruginosa* foi obtida quando a água foi aquecida até 55°C e feita passar uma única vez pelo irradiador de UVA e UVB. O protótipo processou 1 litro de água a cada 90 segundos, funcionando das 08:30 as 16:30 horas, em dias ensolarados. O sistema é eficaz, e tem potencial para ser aplicado como uma alternativa para o suprimento público de água potável em larga escala.

Palavras-chave: SODIS, fluxo contínuo, irradiador de UV solar, aquecedor solar.

¹Dissertação de Mestrado em Microbiologia Agrícola e do Ambiente – Instituto de Ciências Básicas da Saúde, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil. 2020.

DEVELOPMENT AND EVALUATION OF A CONTINUOUS FLOW SOLAR WATER DISINFECTION SYSTEM IN THE INACTIVATION OF ACANTHAMOEBA CASTELLANII CYSTS AND BACTERIA¹

Author: Beni Jequicene Mussengue Chaúque

Advisor: Dr. Marilise Brittes Rott

Co-Advisor: Dr Antonio Domingues Benetti

ABSTRACT

Solar water disinfection (SODIS) is an effective microbiological water treatment technique and is inexpensive and easily accessible, applicable to communities lacking conventional drinking water distribution systems; however, the smaller volume of treated water per day is a limitation for the conventional SODIS process. In order to contribute to overcome this problem, a continuous flow solar water disinfection system was developed and tested for inactivation of *Acanthamoeba castellanii* cysts, and *Escherichia coli*, *Salmonella* Typhimurium, *Enterococcus faecalis* and *Pseudomonas aeruginosa*. The system consisted of a solar heater consisting of a cylindrical-parabolic concentrator and a UV irradiator consisting of a fresnel-type flat concentrator combined with a cylindrical-parabolic concentrator. Contaminated water was pumped into the tubular absorber placed on the heater focus and then passed through the quartz tubular reactors placed on the concentrator foci on the UV irradiator. The inactivation of all *A. castellanii* cysts was achieved when water was exposed to the synergistic effect of UVA and UVB at a temperature of 60°C for 10 minutes. The inactivation of all bacteria was achieved when the water have been preheated to 55°C and passed once through the UVA and UVB irradiator. The prototype processes 1 liter of water every 90 seconds. The system is effective and has the potential to be applied as an alternative to the large-scale public drinking water supply.

Keywords: SODIS, continuous flow, solar UV radiator, solar heater.

¹Master of Science Thesis in Agricultural and Environmental Microbiology – Institute of Health Sciences, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil. 2020.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	3
2.1. Objetivo geral.....	3
2.2. Objetivos específicos.....	3
3. REFERENCIAL TEÓRICO	4
3.1 A importância da água.....	4
3.2. Doenças transmissíveis pela água.....	5
3.3. Desinfecção Solar da Água.....	7
3.3.1. Coletores Solares.....	8
3.4. Aplicação de SODIS.....	10
3.4.1. Mecanismos moleculares de danos induzidos pela radiação UV.....	10
3.4.2. Desinfecção solar de água em fluxo contínuo.....	12
3.5. Acanthamoeba spp.	13
3.6. Bactérias.....	15
4. MATERIAIS E MÉTODOS	15
4.1. Local de desenvolvimento do estudo.....	18
4.2. Construção do sistema de fluxo contínuo de desinfecção solar de água	19
4.2.1. Aquecedor solar.....	19
4.2.2. Irradiador de UV solar.....	21
4.3. Obtenção de dados Solarimétricos.....	23
4.4. Medição das propriedades ópticas do sistema.....	23
4.5.1. Estimativa da radiação UV no interior dos reatores.....	24
4.6. Procedimentos experimentais.....	25
4.6.1. Preparação da água.....	25
4.6.2. Preparo do estoque dos cistos de <i>Acanthamoeba castellanii</i>	25
4.6.3. Cultivo de bactérias.....	26
4.6.4. Contaminação da água.....	26
4.6.5. Procedimentos de desinfecção.....	26
4.6.5.1. Desinfecção da água contaminada por cistos.....	26
4.6.5.2. Desinfecção da água contaminada por bactérias.....	27
4.6.5.3. Coleta e acondicionamento de amostras.....	27
4.6.6.4. Análise de viabilidade dos cistos.....	28
4.6.6.5. Análise da viabilidade das bactérias.....	28
4.7. Análise de dados.....	29
5. RESULTADOS	30
5.1. Sistema de desinfecção solar de água em fluxo contínuo.....	30
5.2. Mecanismo de funcionamento do sistema.....	30
5.3. Propriedades ópticas do sistema.....	32
5.3.1. Refletância a IV e UV.....	32
5.3.2. Transmitância a UVA e UVB.....	34

5.4. Condições de funcionamento do sistema.....	34
5.5. Cinética de aquecimento da água.....	35
5.6. Inativação de cistos.....	36
5.6.1. Análises estatísticas sobre os dados de <i>A. castellanii</i>	38
5.7. Inativação de bactérias.....	39
5.7.1. Análises estatísticas sobre os dados de bactérias.....	41
6. DISCUSSÃO.....	44
7. CONCLUSÃO.....	56
7.1. Perspectivas.....	56
8. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	58
APÊNDICES.....	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Principais doenças de veiculação hídrica.....	6
Tabela 2: Microrganismos de transmissão hídrica inativáveis por SODIS..	11
Tabela 3: Resistencia dos cistos de protozoários aos fatores físicos e químicos.....	15
Tabela 4: Distribuição dos experimentos pelos dias.....	19
Tabela 5: Temperaturas e tempos de contato para bactérias e cistos.....	28
Tabela 6: Condições radiológicas nos dias do experimento.....	35
Tabela 7: Médias de trofozoítos recuperados dos cistos.....	37
Tabela 8: Resultados da ANOVA para trofozoítos nos tratamentos.....	38
Tabela 9: Comparação de média de trofozoítos por tratamentos.....	39
Tabela 10: Médias de UFC/mL por abordagem de cada tratamento.....	40
Tabela 11: Resultados da ANOVA para bactérias nos tratamentos.....	41
Tabela 12: Comparação de médias gerais de UFC/mL por abordagens e tratamento.....	42
Tabela 13: Significância da diferença da eficácia de inativação de bactérias entre os tratamentos.....	42
Tabela 14: Porcentual de crescimento bacteriano por temperatura.....	43

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Distribuição de água na terra.....	4
Figura 2: Insolação média mensal do Brasil e do Rio Grande do Sul.....	7
Figura 3: Concentrador parabólico.....	9
Figura 4: Propriedades óticas dos concentradores solares.....	9
Figura 5: Subdivisão do espectro solar de UV solar.....	12
Figura 6: Estágios do ciclo de vida de <i>Acanthamoeba</i> spp.)	14
Figura 7: Localização geográfica da área de estudo.....	18
Figura 8: Representação do aquecedor solar e suas dimensões.....	20
Figura 9: Representação do irradiador UV.....	22
Figura 10: Representação do concentrador secundário.....	22
Figura 11: Sistema de desinfecção solar de água em fluxo contínuo.....	30
Figura 12: Representação do trajeto da água pelo sistema.....	31
Figura 13: Detalhes do concentrador secundário.....	31
Figura 14: Sistema de SODIS de água em fluxo contínuo em funcionamento.....	32
Figura 15: Refletância do adesivo de poliéster metalizado de alumínio a IV e UV.....	33
Figura 16: Refletância do adesivo poliéster metalizado de alumínio a UV.	33
Figura 17: Transmitância da parede dos reatores de quartzo a UV.....	34
Figura 18: Variação da temperatura da água ao longo do tempo.....	35

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A_{sc}	Área da Superfície de Concentração
AVL	Amebas de Vida Livres
BEM	Blue Eozin Methylene
CAT	Catalase
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
EAG	Encefalite Amebiana Granulomatosa
ICBS	Instituto de Ciências Básicas da Saúde
INPE	Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais
IPH	Instituto de Pesquisas Hidráulicas
I_{UVd}	Irradiação ultravioleta direta
I_{UVr}	Irradiância total de radiação ultravioleta no interior do reator
IV	Radiação infravermelha
eq.	Equação
ERO	Espécies Reativas de Oxigênio
MJ/m	Mega Joules por metro
MRA	Microrganismos Resistentes a Amebas
NMP	Número Mais Provável
OMS	Organização Mundial de Saúde
PET	Poli Tereftalato de Etileno
POD	Peroxidase
R_{CP}	Refletância do Concentrador Primário
R_{CS}	Refletância do Concentrador Secundário
RUV	Radiação Ultravioleta
SOD	Superóxido Dismutase
SODIS	Desinfecção Solar (do inglês: <i>Solar Desifecction</i>)
SOPAS	Pasteurização Solar (do inglês: <i>Solar Pasteurization</i>)
T°C	Temperatura
T_r	Transmitância da Parede do Tubo de Quartzo.
UFC	Unidade Formadora de Colônia
UNT	Unidade Nefelométrica de Turvação
UV	Radiação ultravioleta
XLD	Xylose Deoxycyclate

1. INTRODUÇÃO

Desde o primeiro relato da desinfecção solar (SODIS) (Acra *et al.*, 1980), esta técnica despertou muito interesse dos pesquisadores, principalmente nas últimas duas décadas. A SODIS é uma forma eficaz e acessível de tratamento de água por utilizar o sol que é uma fonte gratuita de energia, que mundialmente acessível e abundante principalmente em regiões intertropicais (Chigueru *et al.*, 2000; McGuigan *et al.*, 2012, Pichel *et al.*, 2019). Nestas regiões coincidentemente, vive uma grande porcentagem das populações sem acesso à água potável (Mbonimpa *et al.* 2012) e, as doenças de transmissão hídrica são mais prevalentes (Balduressor & Karanis, 2011).

Em vários estudos usando SODIS ou pasteurização solar (SOPAS), foi alcançada uma eliminação de total ou uma redução significativa de várias espécies bacterianas, ovos de helmintos, alguns vírus, bem como cistos e oocistos de protozoários, usando abordagens de desinfecção por batelada (McGuigan *et al.*, 2012, Pichel *et al.*, 2019).

Foi relatada a eliminação de *Escherichia coli* durante os testes de um sistema de SOPAS de água em fluxo contínuo (Domingos *et al.*, 2018) ou um sistema que utiliza a UVB solar (Mbonimpa *et al.* 2012). Apesar da *E. coli* ser um indicador padrão de qualidade microbiológica da água, estas bactérias são relativamente mais sensíveis do que muitos microrganismos de transmissão hídrica, como protozoários (Malato *et al.*, 2009; McGuigan *et al.*, 2012, Pichel *et al.*, 2019).

Conseguir uma eficácia da desinfecção de água em fluxo contínuo é uma etapa decisiva para que a SODIS seja aplicável na indústria de abastecimento público de água pois ela soluciona o problema de pequeno volume de água tratada por dia e o longo tempo de exposição requerido para alcançar níveis microbiológicos seguros (Vivar *et al.*, 2015) principalmente em dias de baixa insolação.

Para que a SODIS em fluxo contínuo seja considerada uma estratégia segura de tratamento microbiológico da água para o consumo humano, deve ser capaz de inativar tanto bactérias bem como outros microrganismos e suas respectivas formas de resistência ambiental, como os cistos de *Acanthamoeba* spp. Os cistos de *Acanthamoeba* são resistentes a condições físicas e químicas extremas, incluindo pH 2,0, congelamento, radiação gama (250 rads) e radiação UV (800 mJ/cm²) (Aksozek *et al.*, 2002; Chatterjee, 1968); calor úmido

(Kilvington, 1989; Cervero-Aragó *et al.* 2013); ou 24 anos a 4°C em água (Mazur, 1995); bem como à dessecação por mais de 20 anos (Sriram *et al.*, 2008), e são resistentes ao cloro (Thomas *et al.*, 2004). Além disso, o gênero *Acanthamoeba* é de grande interesse clínico, ambiental e sanitário porque, além destes microrganismos serem anfizoicos, têm sido implicados na persistência de vasto grupo de microrganismos resistentes a amebas (MRA) no ambiente. Este grupo inclui, *Vibrio cholerae*, *Listéria monocytogenes* e *Escherichia coli* O157, assim como *Legionella pneumophilla* nos sistemas de distribuição de água clorada (Rowbotham, 1980; Kilvington & Price, 1990; Marston *et al.* 1997) e vírus (Thomas *et al.*, 2004). Os MRA por vezes recombina seu material genético no interior das amebas ou trocam ou ativam genes silenciados (dos MRA ou da ameba) resultando na aquisição ou aumento da patogenicidade (Berk, 2008; Nakagawa *et al.*, 2019).

Em todo, cerca de 2 bilhões de pessoas consomem água de uma fonte contaminada por fezes (WHO, 2019) e a maioria destas pessoas residem em países em desenvolvimento (WHO / UNICEF, 2017) onde são registrados altos índices de gastroenterites e desnutrição infantil (EFSTRATIOU *et al.*, 2017). Este fato faz com que a construção de um sistema de SODIS de água em fluxo contínuo seja relevante, principalmente se for capaz de inativar para além de bactérias, as estruturas de resistência ambiental de protozoários, como são os cistos de *Acanthamoeba castellanii*.

No presente estudo, para se conseguir a inativação de microrganismos de resistentes através da SODIS de água em fluxo contínuo foi projetado e construído um sistema que utilize o efeito sinérgico do calor e UV para maximizar o potencial biocida do sol. Até onde sabemos nenhum trabalho o fez, a maioria utilizou ou apenas o calor (SOPAS) ou UV, por exemplo (Gill & Price, 2010, Bigoni *et al.*, 2014; Carielo *et al.*, 2016; Castro-Alfárez *et al.*, 2018; Reyneke *et al.*, 2018; Mbonimpa *et al.* 2012; Domingos *et al.*, 2018; Kulkarni *et al.*, 2019).

O sistema de SODIS de água em fluxo contínuo desenvolvidos consistiu de um aquecedor solar que é um concentrador do tipo cilíndrico parabólico e um irradiador de UV que se constitui de um concentrador do tipo Fresnel associado a um concentrador cilíndrico parabólico (Abbas *et al.*, 2012; Ghodbane *et al.*, 2019). O sistema foi testado para a inativação de cistos de *A. castellanii* e

Escherichia coli, *Salmonella* Typhimurium, *Enterococcus faecalis* e *Pseudomonas aeruginosa*.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

- Desenvolver um sistema de desinfecção solar de água em fluxo contínuo que utilize o efeito sinérgico da radiação térmica e ultravioleta, capaz de inativar microrganismos e suas formas de resistência ambiental.

2.2. Objetivos específicos

- Projetar e construir um sistema de desinfecção solar de água em fluxo contínuo constituído de aparatos de aquecimento e de concentração e redirecionamento de radiação UV solar.

- Avaliar a eficácia do sistema de desinfecção solar de água em fluxo contínuo na inativação de cistos de *Acanthamoeba castellanii* e de bactérias, *Escherichia coli*, *Salmonella* Typhimurium, *Enterococcus faecalis* e *Pseudomonas aeruginosa*.

- Comparar a taxa de inativação de cistos e de bactérias nas diferentes formas de tratamento, em função de diferentes tempos de exposição e índices de turbidez, a fim de estabelecer as melhores condições operacionais do sistema.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 A importância da água

A água é o principal fator que pode favorecer ou limitar a existência, manutenção e proliferação da vida; igualmente é um dos recursos que condiciona a qualidade de vida da população humana; quanto maior a disponibilidade de água de boa qualidade físico-química e microbiológica melhor é a saúde (Zancul, 2009).

A água figura entre os recursos mais abundantes na terra, no entanto apenas 2,8% de toda água é doce, isto é, apresenta uma salinidade inferior a 1% e, desta percentagem 2,31% se encontra retida em gelo nas calotas polares, 0,66% é subterrânea e apenas 0,03% é acessível e distribui-se pelos lagos, atmosfera, solos, organismos vivos e rios (Figura 1) (Midões & Fernandes, 2001; Victorino, 2007). A crescente poluição das águas decorrentes de diversos fatores, tais como: expansão demográfica, atividades humanas, sejam elas, domésticas, comerciais ou industriais, tem comprometido sua qualidade para o consumo humano (Silva & Pruski, 2000).

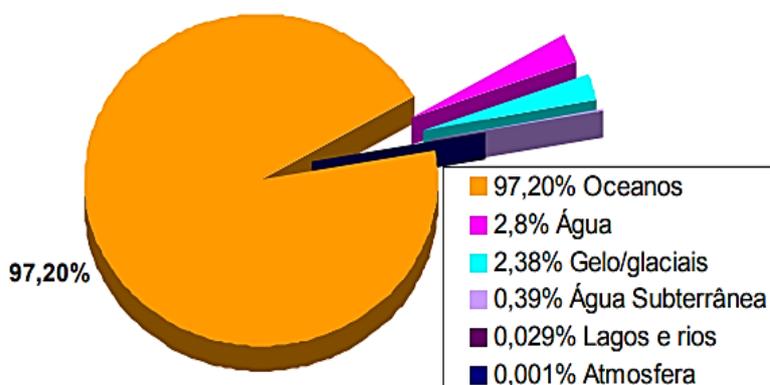


Figura 1: Distribuição de água na terra
Fonte: Victorino, 2007

De acordo com Zancul (2009) a água para o consumo humano deve ser límpida, inodora, insípida e isenta de microrganismos patogênicos e substâncias nocivas à saúde, para prevenir danos e promover o bem-estar das pessoas. Isso significa que a água deve sofrer um tratamento adequado que a torne potável para evitar doenças.

Atualmente cerca de 1,1 bilhão de pessoas em todo o mundo não têm acesso à água potável, 2,4 bilhões carecem de serviços de saneamento básico e 1,8 milhões de pessoas morrem, a cada ano de doenças diarreicas, sendo a maioria crianças que vivem em precárias condições de higiene, principalmente, em países em desenvolvimento (WHO/UNICEF 2017). Cerca de 263 milhões de pessoas gastam mais de 30 minutos por viagem de ida e volta para coletar água de uma fonte melhorada (constituindo um serviço limitado de água potável). Ainda cerca de 159 milhões de pessoas coletam água potável diretamente de fontes de água superficiais e usam água de poços rasos, o que aumenta a probabilidade de contrair doenças de transmissão hídrica (WHO/UNICEF 2015). Nestes países, os índices de desnutrição, principalmente em crianças está relacionado às perturbações gastrointestinais advindas do consumo de água não potável (RICE *et al.*, 2000), por isso se faz necessário a proposta de alternativas de baixo custo e sustentáveis para solucionar o problema da qualidade de água principalmente para nações em desenvolvimento.

3.2. Doenças transmissíveis pela água

Relatos de doenças transmissíveis pela água vêm desde a antiguidade, já por volta de 2000 a.C. Hipócrates, o pai da medicina, escreveu acerca da importância da escolha de mananciais (Daniel *et al.*, 2001). Porém a correlação entre a veiculação de doenças e água só veio a ser confirmada quando se comparou taxas de mortalidade em duas populações de um bairro de Londres abastecidas por mananciais diferentes, num estudo realizados por John Snow em 1854. Foi constatado que em uma das populações, a taxa de mortalidade por cólera era seis vezes menor que outra população abastecida por um manancial que recebia esgoto a montante (Luttenbarck & Costa, 1994).

Na água normalmente são encontrados inúmeros microrganismos de vida-livre, não parasitários ou anfizoicos. De acordo com a Organização Mundial de Saúde – OMS (2001), todas as pessoas têm o direito de ter acesso a um suprimento adequado e seguro de água potável, em qualquer estágio de desenvolvimento e condições econômicas.

Várias doenças ocasionadas por microrganismos podem ser transmitidas pela água. Na tabela 1 é possível observar algumas das principais doenças de veiculação hídrica, e respectivos microrganismos causadores.

Tabela 1: Principais doenças de veiculação hídrica.

Organismos	Doenças	Agente etiológico	
Bactérias	Disenteria bacilar	<i>Shigella dysenteriae</i>	
	Enterite	<i>Campylobacter jejuni</i> <i>Campylobacter coli</i>	
	Cólera	<i>Vibrio cholerae</i>	
	Gastroenterite	<i>Escherichia coli</i> – enteropatogênica	
	Febre Paratifoide	<i>Salmonella</i> spp.	
	Salmonelose	<i>Salmonella</i> spp.	
	Febre Tifoide	<i>Salmonella typhi</i>	
	Diarreia por <i>E. coli</i> Entero-hemorrágica	<i>E. coli</i> O157:H7	
	Protozoários	Giardíase	<i>Giardia lamblia</i>
		Criptosporidíase	<i>Cryptosporidium</i> spp.
Balantidíase		<i>Balantidium coli</i>	
Ceratite amebiana		<i>Acanthamoeba</i> spp.	
Encefalite granulomatosa			
Meningoencefalite Amebiana		<i>Naegleria fowleri</i>	
Toxoplasmose		<i>Toxoplasma gondii</i>	
Amebíase		<i>Entamoeba histolytica</i>	
Vírus	Hepatite do Tipo A	<i>Hepatitis A vírus</i>	
	Hepatite do Tipo E	<i>Hepatitis B vírus</i>	
	Gastrenterite viral	<i>Rotavirus</i> sp.	

Fonte: Adaptado de Sperling (2005).

Com isso, a implementação de métodos adequados no tratamento da água, a prevenção da contaminação secundária da água potável e a promoção da higiene são importantes e necessárias medidas para evitar doenças e morte nas populações menos favorecidas (WHO, 2000).

3.3. Desinfecção Solar da Água

SODIS é um processo de inativação de microrganismos presentes na água através da sua exposição à radiação solar, usualmente em reatores transparentes como sacolas, garrafas plásticas ou de vidro de cerca de 2 litros em processo estático, por pelo menos 4 a 5 horas em dias de céu limpo, ou por mais tempo nos dias nublados, (Sommer *et al.*, 1997). A desinfecção pode ser realizada em reatores de fluxo contínuo onde o tempo varia em função da concepção do reator, (Mbonimpa *et al.*, 2012; Domingos, *et al.*, 2018).

O Brasil, por ser uma nação localizada na sua maior parte na região intertropical, possui grande potencial para aproveitamento de energia solar durante todo ano (Tiba, 200; Colle & Pereira, 1998). No Estado do Rio Grande do Sul os índices mais altos de irradiação solar são registados nos dois primeiros e últimos meses do ano (Figura 2) (Chigueru *et al.*, 2000).

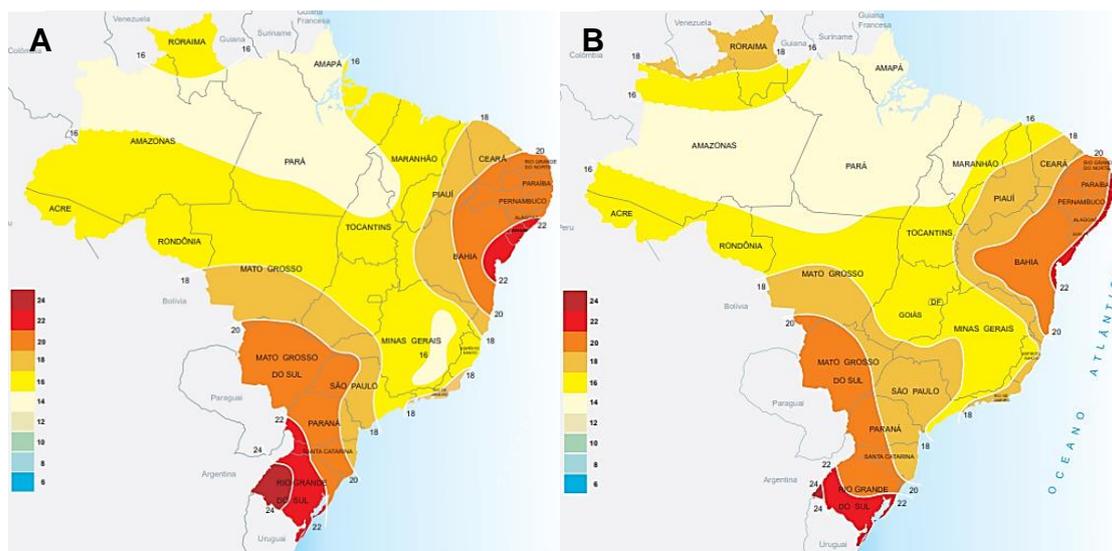


Figura 2: Insolação média mensal do Brasil e do Rio Grande do Sul (RS). Mostrando os picos anuais de 24MJ/m² dia em dezembro (A) e 22MJ/m².dia em Janeiro (B) para o RS.

Fonte: CHIGUERU *et al.*, (2000)

O método SODIS, foi inicialmente reportado por Acra *et al.* (1980), após ter constatado que as soluções de reidratação oral e água continham zero de coliformes fecais após serem expostos à incidência da radiação solar por duas horas. Com esses experimentos, foi demonstrado que o sol era uma fonte barata de radiação potencialmente mortal aos microrganismos e poderia ser usado para

inativar agentes nocivos à saúde. Desde então, muitos estudos vêm sendo realizados a fim de confirmar e mensurar a sua eficácia e encontrar formas de torná-lo mais efetivo e difundido na sociedade (McGuigan et al., 2012).

A radiação ultravioleta (UV) tem sido reconhecida como um eficaz agente antimicrobiano por aproximadamente 125 anos (Owning & Blunt, 1878). No entanto, o uso de processos baseados em UV para desinfecção da água emergiu como uma importante opção de processo apenas nas últimas 3 décadas, e virtualmente todas essas aplicações foram construídas usando fontes artificiais de radiação UV germicida, geralmente na forma de luz de mercúrio. Foi demonstrado que a SODIS, que se baseia no efeito sinérgico da radiação infravermelha (calor) e UV é mais eficaz que a pasteurização solar (SOPAS) que se baseia na conversão da radiação solar em calor interno para inativar microrganismos (Bosshard *et al.*, 2010; McGuigan *et al.*, 2011; Domingos *et al.*, 2018), por esta estar associada à degradação do DNA das células expostas (Mbonimpa *et al.*, 2012).

3.3.1. Coletores Solares

Coletores solares são trocadores de calor que transformam radiação solar em calor. O coletor capta a radiação solar, a converte em calor, e transfere esse calor para um fluido (ar, água ou óleo em geral) (Kalogirou, 2009).

Os coletores podem ser basicamente de dois tipos: não concentradores e concentradores. Os coletores não concentradores possuem a mesma área de abertura (área para interceptação e absorção da radiação) e são aplicáveis para sistemas que necessitem de baixa temperatura. Em aplicações que demandem temperaturas mais elevadas, são mais adequados os concentradores solares, que possuem em geral uma superfície refletora (em alguns modelos são utilizadas lentes) que direcionam a radiação direta a um foco, onde há um receptor pelo qual escoam o fluido absorvedor de calor (Kalogirou, 2009). Os concentradores parabólicos são a mais madura tecnologia solar de geração de calor e permitem o aquecimento de fluidos a temperaturas de até 400°C. A energia deste fluido pode ser usada para geração elétrica ou para calor de processo (Kalogirou, 2009).

Os coletores cilíndrico-parabólicos são revestidos por um material refletor em formato parabólico. Ao longo da linha de foco do refletor parabólico é

colocado um tubo metálico preto, coberto por um tubo de vidro para evitar perdas de calor por convecção, denominado absorvedor (Figura 3) (Kalogirou, 2009)



Figura 3: Concentrador parabólico
Fonte: Renewable (2009) *apud* Malaguetta (2012)

Quando a parábola se vira para o sol, os raios diretos do sol são refletidos pela superfície e concentrados no absorvedor. A radiação concentrada aquece o fluido que circula internamente no tubo (Avallone *et al.*, 2014; Waghmare & Gulhane, 2018).

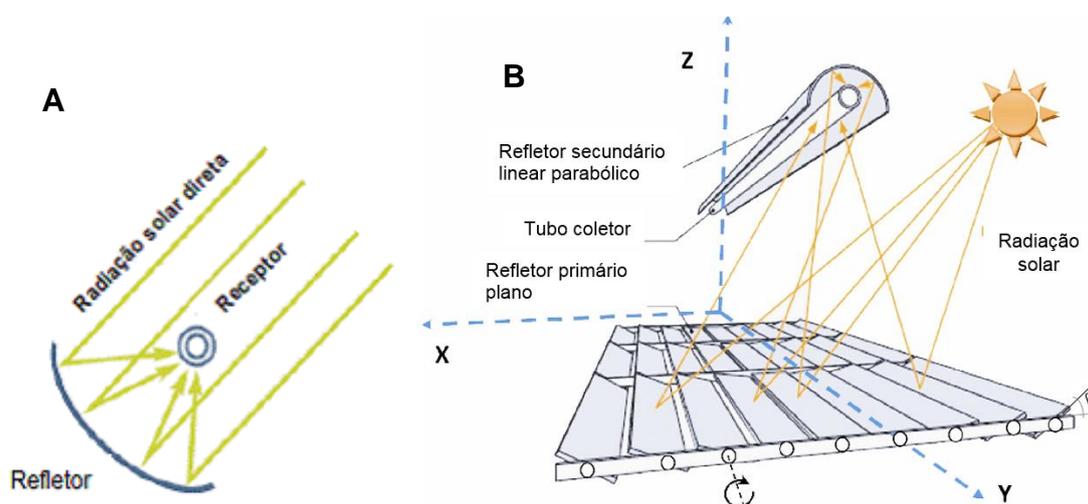


Figura 4: Propriedades óticas dos concentradores solares: Parabólico (A) e Fresnel (B).

Fonte: Adaptado de Solarpaces (2011) *apud* Lodi (2011) e Ajudad, (2014)

Um concentrador Fresnel (Figura 4) consiste de uma série de espelhos planos ajustados individualmente a um ângulo específico, normalmente ajustável (em função da sua distância e posição em relação ao absorvedor e do sol) de modo que toda a radiação que incide sobre si possa ser refletida para um determinado ponto ou linha focal, onde normalmente se encontra um absorvedor (Abbas *et al.*, 2012; Ghodbane *et al.*, 2019).

3.4. Aplicação de SODIS

A aplicação de SODIS como método de desinfecção da água tem se mostrado uma alternativa eficaz na redução de infecções gastrointestinais infantis em países em desenvolvimento (Conroy *et al.*, 1996), pois ela tem provado ser um método de desinfecção capaz de inativar diversos microrganismos patogênicos de transmissão hídrica (Tabela 2). O sucesso da SODIS deve-se ao fato de apresentar-se como um método relativamente barato, pois a radiação solar é uma fonte gratuita de calor e radiações UVA e UVB que são isoladamente biocidas e muito mais eficazes quando utilizados em simultâneo (Castro-Alferez *et al.*, 2017; Vivar *et al.*, 2017).

3.4.1. Mecanismos moleculares de danos induzidos pela radiação UV

O DNA é uma das principais moléculas celulares e sua estabilidade é de extrema importância para o funcionamento e a existência de todos os sistemas vivos. Radiações genotóxicas exercem efeitos prejudiciais na estabilidade do genoma (Rastogi *et al.* 2010).

Em todos os espectros de UV emitidos pelo sol, nomeadamente a UVA: 315-400 nm; UVB: 280-315 nm e UVC: <280 nm, a radiação UVB produz efeitos nocivos em diversos habitats embora a maioria da UV-B extraterrestre seja absorvida pelo ozônio estratosférico (Mckenzie, *et al.*, 2003) e compreende uma fração menor do que 1% da energia solar total (Rastogi *et al.*, 2010) (Figura 5). A radiação UVA induz menos danos no DNA, os quais ocorrem apenas por reações fotossensibilizadoras indiretas, porque não é absorvida pelo DNA (Alscher *et al.*, 1997). A radiação UV-C é absorvida pelo oxigênio e ozônio na atmosfera da Terra, portanto, não apresenta muitos efeitos prejudiciais na biota (Pfeifer & Besaratinia, 2011).

Tabela 2: Microrganismos de transmissão hídrica inativáveis por SODIS

Espécie	Tratamento	Tempo (min.)	Fonte
<i>Acanthamoeba polyphaga</i> (trofozoítos)	Luz simulada (870 W m ⁻²) + TiO ₂	480	Lonnen <i>et al.</i> , (2005)
<i>C. parvum</i> (oocistos)	Luz natural + TiO ₂ + 22°C	1080	Mendez-Hermida <i>et al.</i> , (2007)
<i>C. parvum</i> (oocistos)	Luz simulada (850 W m ⁻²) + 50°C	720	Mendez-Hermida <i>et al.</i> , (2005)
<i>C. parvum</i> (oocistos)	Luz natural	720	Gomez-Couso <i>et al.</i> , (2009);
<i>A. polyphaga</i> (cistos)	Luz simulada (550 W m ⁻²) + riboflavina	360	Heaselgrave <i>et al.</i> , (2011)
<i>A. castellanii</i> (cistos)			
<i>Naegleria gruberi</i>			
<i>Giardia</i> sp. (cistos)	Luz simulada (830 W m ⁻²) + 40°C	720	McGuigan <i>et al.</i> , (2006)
<i>Campylobacter jejuni</i>	Luz natural (50 W m ⁻²)	20	Boyle <i>et al.</i> , (2008)
<i>Staphylococcus epidermidis</i>		45	
<i>Yersinia enterocolitica</i>		150	
<i>E. coli</i> Enteropatogénica		90	
<i>Enterococcus</i> sp.	Luz natural (555 W · h/ m ²)	300	Wegelin <i>et al.</i> , (1994)
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Luz natural	120	Acra <i>et al.</i> , (1980)
<i>Salmonella typhi</i>	Luz natural	120	Acra <i>et al.</i> , (1984)
<i>Shigella dysenteriae</i> Tipo I			
<i>S. Typhimurium</i>	Luz natural	480	Smith <i>et al.</i> , (2001)
<i>Shigella flexneri</i>	Luz natural 42 W m ⁻² + 42°C	90	Kehoe <i>et al.</i> , (2004)
<i>Streptococcus faecalis</i>	Luz natural (555 W · h/ m ²)	300	Wegelin <i>et al.</i> , (1994)
<i>Vibrio cholerae</i>	Luz natural (54 Wh/ m ⁻²) + 50°C	132	Sommer <i>et al.</i> , (1997)
<i>Vibrio cholerae</i>	Luz natural		Conroy <i>et al.</i> , (2001)
<i>Vibrio cholerae</i>	Luz natural (60 kJ ⁻¹)	900	Kehoe <i>et al.</i> , (2004)
Bacteriófago f2	Luz natural (555 W · h/ m ²)	300	Wegelin <i>et al.</i> , (1994)
Encephalomyocarditis virus	Luz natural (555 W · h/ m ²)	600	Wegelin <i>et al.</i> , (1994)
Polio virus	UV-A, B 850 W m ⁻² + 25°C	360	Heaselgrave <i>et al.</i> , (2006)
Rotavirus	Luz natural (555 Wh/m ²) + 30°C	300	Wegelin <i>et al.</i> , (1994)
<i>Candida albicans</i>	UV-A, B 870 W m ⁻²	480	Lonnen <i>et al.</i> , (2005)
<i>Fusarium</i> sp.			

Um dos alvos mais proeminentes da radiação solar UV é o DNA celular, que absorve a radiação UVB causando efeitos adversos em sistemas vivos, como bactérias (Peak & Peak, 1982; Peak, *et al.*, 1984), cianobactérias (Sinha *et al.* 2001), protozoários anfióticos (Maya *et al.* 2003), animais e humanos (Quaite *et al.* 1992; Stein *et al.* 1989) (Tabela 2).

Certas enzimas, como superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT), peroxidase (POD) e removedores como vitamina C, B e E, cisteína e glutatona desempenham um papel adicional na defesa contra a radiação UV (Xie *et al.*, 2009). No entanto, vários organismos desenvolveram mecanismos de reparo específicos e altamente conservados que compreendem uma segunda linha de defesa, tais como fotoreativação, reparo de excisão, reparo de mal pareamento, reparo de ruptura de fita dupla e outros mecanismos como tolerância a danos (bypass), resposta SOS (do inglês: *save our soul*), ativação do ponto de checagem e morte celular programada ou apoptose que remove com eficiência as lesões de DNA, assegurando a integridade genômica (Sinha & Häder, 2002).

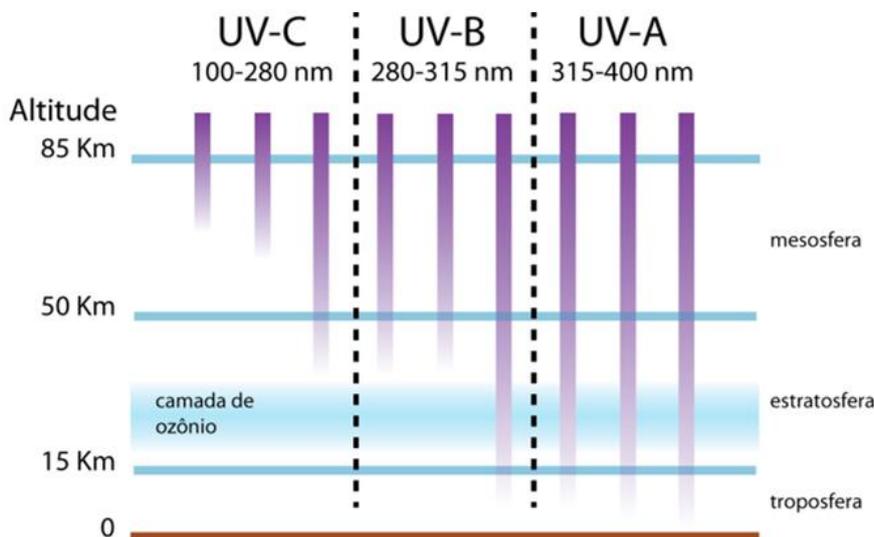


Figura 5: Subdivisão do espectro solar de UV solar.

Fonte: Pfeifer & Besaratinia (2011)

3.4.2. Desinfecção solar de água em fluxo contínuo

Na literatura são descritos alguns sistemas de fluxo contínuo para o tratamento solar de água, (Castro-Alfárez *et al.*, 2016; Castro-Alfárez *et al.*, 2017; Castro-Alfárez *et al.*, 2018; Reyneke, *et al.*, 2018). A maioria dos sistemas descritos é do tipo SOPAS (Bigoni *et al.*, 2014; Carielo *et al.*, 2016; Castro-Alfárez *et al.*,

2018; Domingos *et al.*, 2018; Reyneke *et al.*, 2018; Kulkarni *et al.*, 2019), no entanto, desconhece-se sistemas de SODIS de água em fluxo contínuo que utilize a ação sinérgica do calor e a radiação ultravioleta do sol para efetivar a inativação de microrganismos. Sabe-se de poucos sistemas que utilizam a radiação isolada de UV (Gill & Price, 2010, Mbonimpa *et al.* 2012) ou calor (Domingos *et al.*, 2018).

3.5. *Acanthamoeba* spp.

O gênero *Acanthamoeba* pertence às amebas de vida livre e patógenos oportunistas, e foi estabelecido pela primeira vez por Volkonsky em 1930 (Visvesvara, 1991). Os primeiros casos de estabelecimento claro da patogenia por *Acanthamoeba* em humanos foram reportados a partir de 1970 (Marciano-Cabral & Cabral, 2003).

Acanthamoeba spp. causam doenças graves, em humanos, como a encefalite amebiana granulomatosa-EAG (em inglês GAE, *granulomatous amebic encephalitis*), infecções cutâneas e nasofaríngeas e a ceratite amebiana (Castrillon *et al.*, 2013, Lorenzo-Morales, Khan, & Walochnik, 2015).

As espécies de *Acanthamoeba* estão entre os protozoários mais frequentes encontrados na natureza, com uma distribuição cosmopolita, e foram isolados do solo, água, ar. Também foram isolados da vegetação e de animais, incluindo espécies de peixes, anfíbios, répteis e mamíferos; da cavidade nasofaríngea de pessoas aparentemente saudáveis e pacientes imunocomprometidos (De Jonckheere, 1991; Schuster & Visvesvara, 2004, Castrillon & Orozco, 2013).

Apresentam dois estágios em seu ciclo de vida: trofozoítos e cistos (Figura 6). Trofozoíto é a forma vegetativa do protozoário com tamanho entre 25 e 40 µm de diâmetro e o cisto é a forma de resistência com diâmetro variando entre 15 e 28 µm, formado quando as condições do meio são desfavoráveis, como a dessecação, falta de nutrientes e uma variedade de agentes químicos e físicos (Castrillon & Orozco, 2013).

Os cistos resistem por longos períodos no meio ambiente, podendo sobreviver em condições ambientais normalmente inóspitas a maioria dos microrganismos, incluindo água clorada, pH extremos, temperaturas muito baixas, irradiação por raios gama e raios UV (Mazur, 1995; Chatterjee, 1968; (Thomas *et al.*, 2004; Aksozek *et al.*, 2002), calor úmido (Cervero-Aragó *et al.*,

2013), assim como ambientes ressequidos por muitos anos (Sriram *et al.*, 2008). Os cistos são mais resistentes que os trofozoítos, e os cistos de *A. castellanii* são mais resistentes ou tanto quanto os de *Acanthamoeba polyphaga*, *Hartmannella vermiformis*, *Toxoplasma gondii*, *Cryptosporidium parvum* e *Entamoeba histolytica* (Tabela 3).

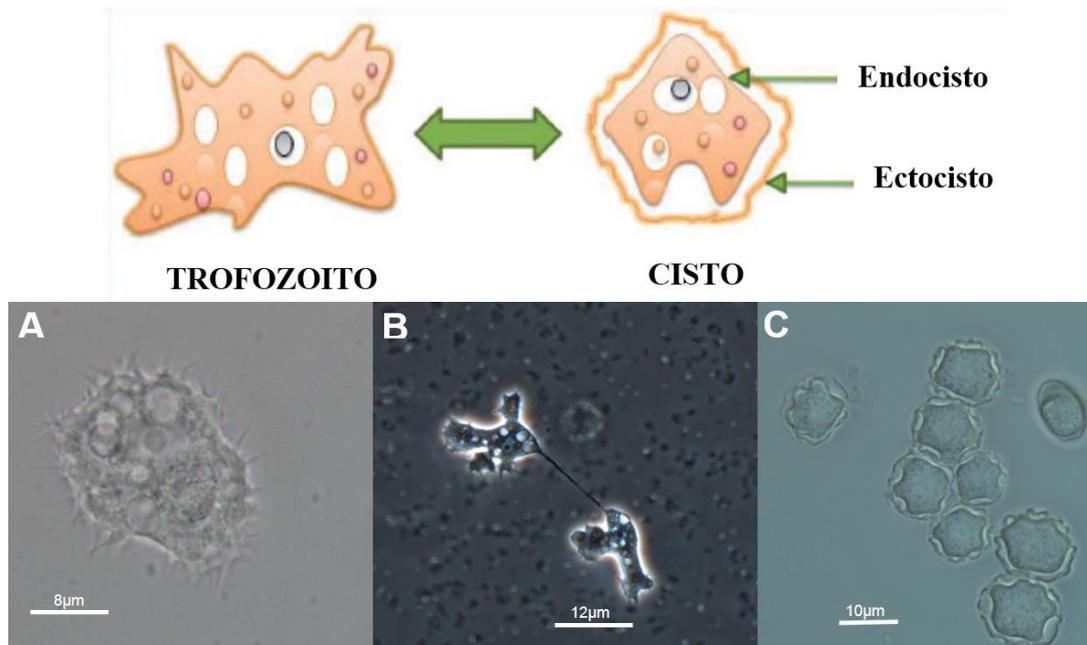


Figura 6: Estágios do ciclo de vida de *Acanthamoeba* spp. Representação (acima) e fotos de *Acanthamoeba* spp. (abaixo) trofozoítos, (A) e cistos (B).
Fonte: Representação (Castrillon & Orozco, 2013); fotos (Laboratório de Parasitologia – Departamento de Microbiologia/UFRGS-Grupo AVL).

As AVL podem funcionar como reservatórios de várias bactérias patogênicas, pois elas alimentam-se fagocitando partículas e microrganismos como bactérias, fungos e vírus. Algumas das bactérias por exemplo, possuem mecanismos de escape à via de digestão no interior do citoplasma amebiano, sendo por isso denominadas microrganismos resistentes a amebas (MRA). Muitos dos MRA além de sobreviverem podem multiplicar-se no interior da ameba (Rodriguez-Zaragoza, 1994; Marciano-Cabral & Cabral, 2003).

Muitas espécies de bactérias internalizadas infectam a ameba levando a sua destruição (Winiecka-Krusnell & Linder, 2001) regressando ao ambiente. Muitas bactérias que infectam e destroem os hospedeiros amebianos são importantes porque também podem ser patogênicas para humanos (Horn &

Wagner, 2004) ou tornarem-se patógenos antropogênicos podendo ter sua virulência aumentada após a interação com AVL (Berk, 2008; Faulkner, 2008).

Tabela 3: Resistencia dos cistos de protozoários aos fatores físicos e químicos.

Microrganismo	Estrutura	Tratamento	Tempo de exposição	Inviável	Fonte
<i>A. castellanii</i>	Trofozoítos	60°C	15 minutos	Sim	Cervero-Aragó, <i>et al.</i> (2013)
<i>A. castellanii</i>	Cistos	70°C	2 minutos	Sim	Aksozek (2002)
<i>A. castellanii</i>	Cistos	65°C	>5 minutos	Sim	Heaselgrave & Kilvington (2011)
<i>A. castellanii</i>	Cistos	UV A-B 550 W m ⁻² + Riboflavina	6 horas	Sim/Não	Aksozek (2002)
<i>A. castellanii</i>	Cistos	UV 200-800 J/cm ²	2 horas	Não	Lonnen, <i>et al.</i> (2005)
<i>A. polyphaga</i>	Trofozoítos	UV A-B 1000 J	4-5 horas	Sim	Cervero-Aragó, <i>et al.</i> (2013)
<i>A. polyphaga</i>	Cistos	UV A-B 1000 J	>8horas	Não	Dumetre <i>et al.</i> (2008)
<i>H. vermiformis</i>	Trofozoítos	60°C	2 minutos	Sim	Wainwright <i>et al.</i> (2007)
<i>H. vermiformis</i>	Cistos	60°C	2 minutos	Sim	Dubey (1998)
<i>T. gondii</i>	Oocistos	UV 40 mJ/cm ²		Sim/Não	Zhou <i>et al.</i> (2014)
<i>T. gondii</i>	Oocistos	UV >500mJ/cm ²		Sim/Não	
<i>T. gondii</i>	Oocistos	55°C	2 minutos	Sim	
<i>T. gondii</i>	Oocistos	60°C	1 minuto	Sim	
<i>C. parvum</i>	Oocistos	UV A-B	55 minutos	Não	
<i>C. parvum</i>	Oocistos	Cloro	55 minutos	Não	
<i>C. parvum</i>	Oocistos	UV A-B + cloro	55 minutos	Sim/Não	

Sim/Não – Inviáveis e viáveis (não houve inativação de todas indivíduos)

Além disso a presença de endossimbiontes pode determinar mudanças na fisiologia das amebas que os carregam, como por exemplo, alterações expressivas de patogenicidade (Nakagawa *et al.*, 2019). Todos estes fatores, aliados à resistência das formas císticas do protozoário fazem com que os cistos de *Acanthamoeba* spp. sejam modelos ideais para testar a eficácia do sistema de fluxo contínuo de inativação solar de microrganismos.

3.6. Bactérias

As gastroenterites associadas à água são uma preocupação mundial, e embora sejam predominantes em países em desenvolvimento, continuam sendo um desafio em países desenvolvidos (Pandey *et al.*, 2014). *Escherichia coli* 0157: H7, *Salmonella* spp., e *Pseudomonas* spp. fazem parte da lista dos

principais patógenos bacterianos relatados como estando na origem de vários surtos envolvendo água (Craun *et al.*, 2006; Guzman-Herrador *et al.*, 2015).

Por décadas os coliformes fecais, *E. coli* e *Enterococcus* spp. têm sido utilizados como indicadores de qualidade microbiana de água doce pelos cientistas e autoridades de saúde pública (AWWA, 1990; Malakoff, 2002; WHO, 2006; Pandey e Soupir, 2013). *E. coli* e *Enterococcus* spp. estão comumente presente e em números elevados nas fezes de animais homeotérmicos, a sua presença em uma fonte de água indica é uma evidência de contaminação fecal e alta probabilidade de presença de patógenos entéricos (Ahmed *et al.*, 2015; Hamilton *et al.*, 2019).

Das 539 espécies de bactérias conhecidas como sendo patogênicas ao homem e ou aos animais não humanos, 102 foram descritas como sendo MRA. Elas têm capacidade de escapar dos vacúolos fagocíticos antes da sua fusão com os lisossomos e de sobreviver e se proliferar no interior da célula amebiana (Thomas *et al.* 2010). As bactérias, *E. coli*, *Legionella* sp. e *Pseudomonas aeruginosa* fazem parte dos endossimbiontes de AVL (Bertelli & Greub, 2012; Scheid, 2018).

A normalização de um determinado microrganismo parece ser influenciada pela importância epidemiológica de microrganismos correlacionáveis como indicador, o custo dos procedimentos analíticos, a disponibilidade da água bruta e pelo interesse do país, no entanto o uso de coliformes parece uma regra de ouro.

A legislação Brasileira (p.e.) define água potável como sendo aquela destinada à ingestão, preparação e produção de alimentos, e à higiene pessoal, independentemente da sua origem e esta deve atender ao padrão de potabilidade e não deve oferecer riscos à saúde (Portaria Nº 2.914, de 12 de dezembro de 2011).

O artigo 31 do capítulo V, da mesma portaria somente obriga a realização de monitoramento mensal de *Escherichia coli* no ponto de captação de água, sendo que o monitoramento de cistos de *Giardia* spp. e oocistos de *Cryptosporidium* spp. no(s) ponto(s) de captação de água só se torna obrigatória quando a média geométrica anual de *E. coli* for maior ou igual a 1.000 NMP/100mL.

Na água amostrada na saída do tratamento as bactérias *E. coli* e coliformes totais devem estar ausentes em cada 100mL analisado. Para a rede de sistemas que atendem até 20.000 habitantes, tolera-se que apenas uma entre as amostras examinadas durante um mês apresente resultado positivo para coliformes totais. Na rede de sistemas que atendem mais de 20.000 habitantes tolera-se que até 5% das amostras mensais sejam positivas para coliformes totais.

A legislação moçambicana define água potável, como sendo aquela que é própria para o consumo humano pelas suas qualidades organolépticas, físicas, químicas e biológicas (BR, 2004).

Esta legislação torna obrigatória apenas a análise da presença de coliformes totais, coliformes fecais e *Vibrio cholerae*. Sendo que para a água tratada destinada para o consumo humano, fornecida por sistemas de abastecimento público, redes de distribuição, camiões ou navios cisternas, ou utilizada na indústria de alimentos, a ausência de todos indicadores supracitados deve ser comprovada em 100 mL de cada amostra. Para a água fornecida de fontes de abastecimento público sem tratamento tolera-se a presença de até 10 coliformes fecais em 100mL.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Local de desenvolvimento do estudo

O estudo foi realizado em Porto Alegre, na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Os experimentos foram realizados no Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), situado a uma latitude de -30.07593675, longitude de -51.11450851 e 77 m de altitude.

As medições da turvação e pH foram realizadas no Laboratório de Saneamento Ambiental do IPH, o cultivo dos microrganismos bem como as análises microbiológicas foram realizadas no Laboratório de Parasitologia do Departamento de Microbiologia, Imunologia e Parasitologia do Instituto de Ciências Básicas da Saúde (ICBS) (Figura 7).

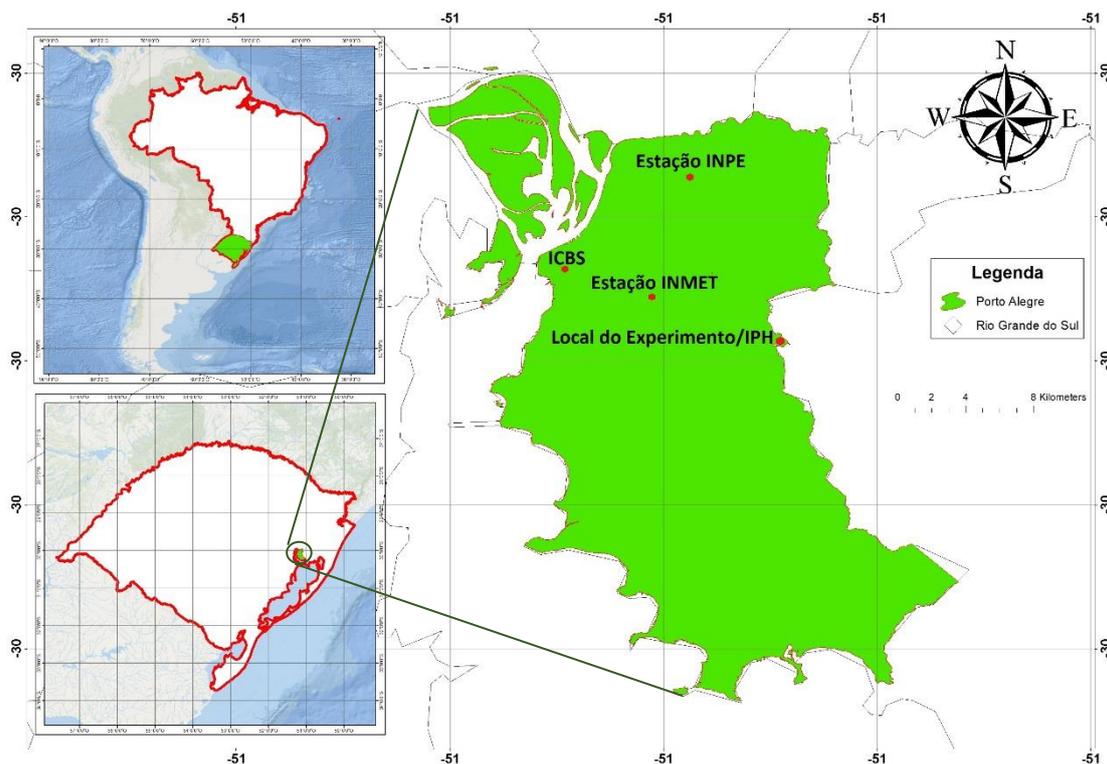


Figura 7: Localização geográfica da área de estudo.

Cortesia de: Anacleto Marito

Os experimentos foram realizados no verão, nos meses de janeiro, fevereiro e março de 2019, a partir das 10 horas, em dias com a temperatura ambiental variando entre 19°C e 30°C, com uma insolação direta variando entre

7,5 e 10,9 w.m⁻²/h e a irradiação de UV variando entre 150 e 275 mW/m² (Tabela 4).

Tabela 4: Distribuição dos experimentos pelos dias

Alvo	Tratamento	Turbidez	Data	Hora	Nº de ensaios
Cistos	Calor + UV	<1	06/02/19	10:00	1
	Calor + UV	<1	07/03/19	10:00	2
	Calor + UV	50	26/03/19	10:00	3
	Calor	<1	14/03/19	10:00	3
Bactérias	Calor → UV	<1	29/01/19	10:00	1
	Calor → UV	<1	31/01/19	10:00	1
	Calor + UV	<1	19/02/19	10:00	3
	Calor + UV	50	26/03/19	10:00	3
	Calor	<1	29/01/19	10:00	1
	Calor	<1	31/01/19	10:00	1
	Calor	<1	01/02/19	10:00	1

4.2. Construção do sistema de fluxo contínuo de desinfecção solar de água

O protótipo do sistema de desinfecção solar de água em fluxo contínuo foi constituído de duas subunidades, nomeadamente, um aquecedor solar e um irradiador solar de radiação ultravioleta A e B, e foi confeccionado com base nos materiais de fácil acesso.

4.2.1. Aquecedor solar

O aquecedor consistiu de um concentrador solar cilíndrico-parabólico (Figura 8), e o princípio de funcionamento se baseia nas propriedades óticas dos espelhos cilíndrico-circulares (Abbas, *et al.*, 2012). Quando a face espelhada do concentrador se volta para o sol a radiação que incide sobre si é refletida para uma linha focal onde os feixes de radiação se interceptam (foco), neste foco foi colocado tubos de alumínio pintado de preto (absorvedor) que transforma a energia da radiação Infravermelha (IV) do sol em energia térmica interna (Kalogirou, 2009; Norouzi *et al.* 2020).

A estrutura do aquecedor solar foi feita essencialmente de madeira compensada, e madeira de cedro, e mediu 3,0 m de comprimento e 1,173 m de largura (Figura 8), as medidas da abertura e altura da parábola foram calculadas como descrito na literatura (Kandlikar & Vij, 1978; Rashid, 2018), usando um arco

(A) de 1,25 m e um ângulo de abertura (α) de 70° , por ser o ângulo de borda com maior concentração mesmo quando se altera os desvios (Kandlikar & Vij, 1978).

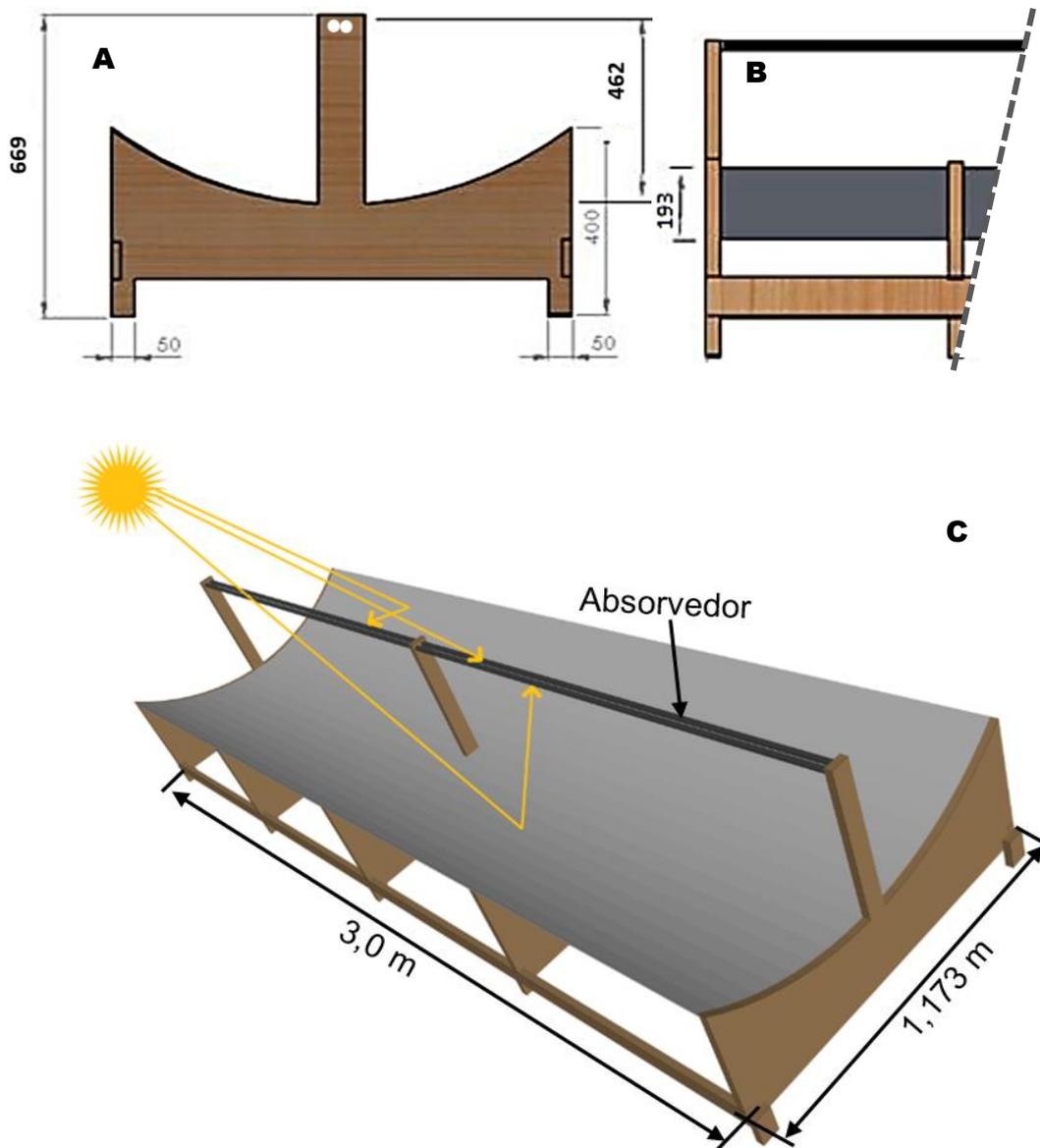


Figura 8: Representação do aquecedor solar e suas dimensões. Vistas laterais esquerda (A) e frontal (B). e visão 3D (C).

O esboço do aquecedor foi feito com auxílio do software *SolidWorks*, com base nos desenhos de Kroth (2016) (imagem A e B) com modificações (Figura 8).

A parábola cilíndrica foi feita de chapa de madeira compensada de 3 mm de espessura e a sua superfície foi revestida de um adesivo de poliéster metalizado de alumínio.

Na linha de foco, foi colocado um absorvedor constituído de dois tubos de alumínio pintados de preto fosco, medindo 1 cm de diâmetro interno. O alumínio foi escolhido por possuir alta condutividade e ser um bom trocador de calor (Perry & Green, 1997; Rashid, 2018; Norouzi et al., 2020). Os tubos de alumínio foram interconectados com mangueiras plásticas transparentes medindo 1,2 cm de diâmetro interno.

4.2.2. Irradiador de UV solar

O irradiador de UVA e UVB construído no presente trabalho combina um concentrador cilíndrico-parabólico (concentrador secundário) e um concentrador do tipo fresnel. O irradiador consistiu de uma série de espelhos planos ajustáveis individualmente a um ângulo específico de modo que toda a radiação que incide sobre si possa ser refletida para a linha focal onde foi colocado o concentrador cilíndrico-parabólico (Figura 9).

O irradiador de UV consistiu de um suporte horizontal para espelhos medindo 5,0 m de comprimento e 1,05 m de largura, no qual espelhos planos medindo 1,0 m x 20 cm estão encaixados através de presilhas móveis, que permite a movimentação bidirecional dos espelhos para se ajustar ao ângulo de inclinação do sol ao longo do dia.

A superfície frontal dos espelhos de vidro foi revestida de adesivo de poliéster metalizado de alumínio. O concentrador fresnel comportou 25 espelhos, cobrindo uma superfície de incidência de 4,5 m².

Na extremidade do suporte maior, na direção para a qual as faces dos espelhos estão voltadas se encontram dois braços verticais com 0,92 m de altura que sustentam um concentrador secundário cilíndrico parabólico medindo 1,0 m de comprimento e 27,0 cm de largura, (Figura 9).

As medidas da abertura e altura da parábola do concentrador secundário foram calculadas como descrito em estudos prévios (Kandlikar & Vij, 1978; Rashid, 2018) usando um arco (A) de 0,40 m e um ângulo de abertura (α) de 70° (Apêndice A).

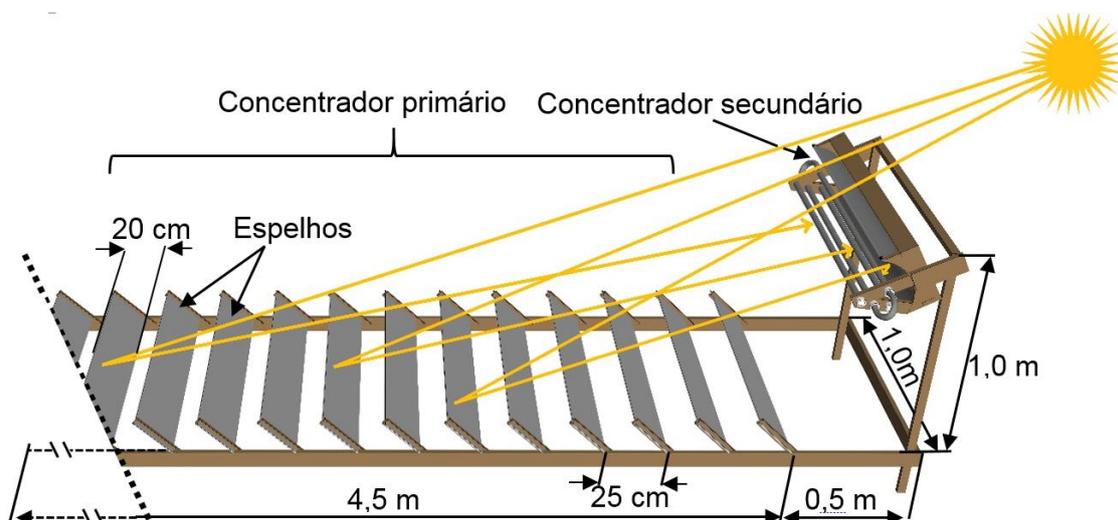


Figura 9: Representação do irradiador UV.

A parábola do concentrador secundário foi feita de chapa de alumínio encaixada sobre moldes de madeira compensada. A superfície da parábola foi revestida com adesivo de poliéster metalizado de alumínio, o mesmo que foi usado para revestir a face dos espelhos, como descrito anteriormente.

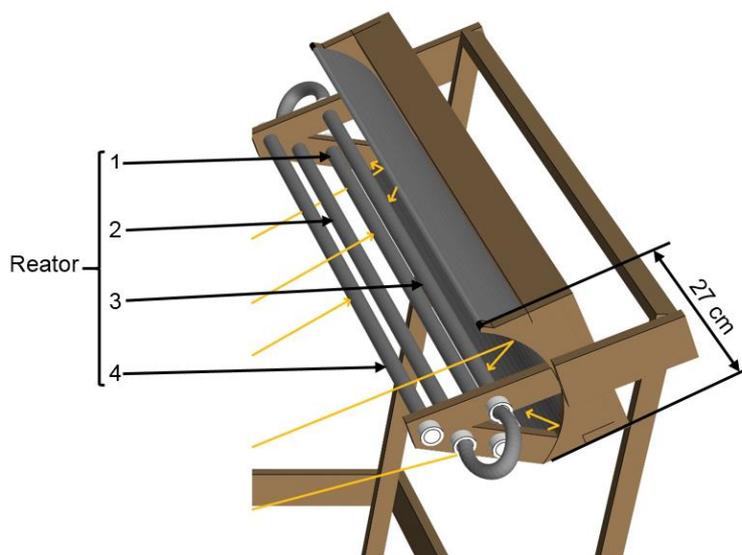


Figura 10: Representação do concentrador secundário.

Na linha focal do concentrador foi colocado um reator tubular de quartzo transparente (reator 3), medindo 26 mm de diâmetro, paralelamente a este, foram colocados outros tubos de quartzo situados dentro da abertura da parábola (reatores 1 e 2). Todos os reatores tubulares foram interconectados por

mangueiras termo estáveis. A parábola foi encaixada voltada na direção da face dos espelhos e inclinada a $\sim 50^\circ$ (Figura 10).

O irradiador de UV foi conectado ao aquecedor por mangueiras transparentes.

4.3. Obtenção de dados Solarimétricos

As medidas de insolação foram obtidas no site do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), (<http://www.inmet.gov.br/portal/>) e foram mensurados na Estação 83967, situada em Porto Alegre, no Estado do Rio Grande do Sul, localizada na latitude -30.05, longitude -51.16 a uma altitude de 46.97 m. O INMET é um órgão do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento do Brasil, e detém uma rede de estações meteorológicas automáticas modernas que coletam dados que são divulgados em tempo real.

As medidas de índices de radiação ultravioleta foram obtidas no site do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais (INPE) (<http://satelite.cptec.inpe.br/uv/>) e foram mensurados na Estação 83971, situada em Porto Alegre, no Estado do Rio Grande do Sul, localizada na latitude -29.99, longitude -51.17 a uma altitude de 3 m. O valor de índice de UV foi convertido no valor equivalente em energia, multiplicando-se por 25, que é o valor correspondente em energia de cada unidade de índice (Madronich, 2007).

4.4. Medição das propriedades ópticas do sistema

As medições ópticas foram realizadas no Centro de Espetroscopia Óptica de Materiais, situado no Laboratório Laser e Óptica no Instituto de Física da UFRGS. As medições da transmitância e refletância foram realizadas com auxílio de um espectrofotômetro Cary 5000.

Para a medição da transmitância, uma amostra da parede do tubo de quartzo medindo $3,5 \text{ cm}^2$ foi obtida. Feixes de radiação comportando diferentes faixas incidiram sobre a amostra e as frações de radiação que atravessavam a amostra foram quantificadas. Além da amostra da parede do tubo de quartzo, realizou-se a medição de uma janela de quartzo de alta pureza a fim de estabelecer comparação.

Para a medição da refletância, foram obtidas amostras de $\sim 3 \text{ cm}^2$ de todos os materiais reflexivos considerados para a construção do protótipo (adesivo de poliéster metalizado de alumínio, espelhos de vidro comum e chapa de aço inoxidável (galvanizado). Feixes de radiação comportando diferentes faixas espectrais foram feitos incidir sobre as amostras e, os feixes refletidos eram captados e quantificados por um sensor.

4.5.1. Estimativa da radiação UV no interior dos reatores

Foi estimada a irradiância de UV no interior dos reatores 1 e 2 (I_{UV1} e I_{UV2}) que é expressa pela equação 1.

$$I_{UV1} \text{ ou } I_{UV2} = (I_{UVD} \cdot A_{SC} \cdot R_{CP})^{\frac{1}{8}} \cdot T_r \quad (\text{eq. 1})$$

Onde: I_{UVD} é a irradiação ultravioleta direta mensurada na hora do experimento na Estação 83971 do INPE. A_{SC} é a área da superfície de concentração, que corresponde a área ocupada pelos espelhos do concentrador primário do irradiador, que foi de $4,5 \text{ m}^2$. R_{CP} é a refletância do concentrador primário, corresponde a refletância do adesivo poliéster metalizado de alumínio. Foi considerada a média das refletâncias do adesivo para a faixa do espectro UVA e UVB. A refletância para UVA foi determinada calculando a média aritmética da refletância incluindo cada ponto desde o limite superior até o inferior da faixa espectral (315 nm a 400 nm). O mesmo se fez para UVB considerando a faixa espectral de 280 nm e 315 nm. T_r é a transmitância da parede do tubo de quartzo. Foi considerada a média de transmitância para faixa UVA e UVB, usando os mesmos procedimentos previamente descritos para a refletância. O valor do divisor (1/8) corresponde a área ocupada pelo reator dentro da espessura da linha de foco (20 cm) do concentrador primário. É produto da espessura da linha de foco do concentrador primário pelo diâmetro do reator de quartzo (2.5 cm).

A irradiância de UV no interior do reator 3 (I_{UV3}) foi estimada com base na equação 2.

$$I_{UV3} = [(I_{UVD} \cdot A_{SC} \cdot R_{CP}) R_{CS}] T_r + I_{UV1} \quad (\text{eq. 2})$$

Onde: R_{cs} é a refletância do concentrador secundário, e corresponde a refletância do adesivo poliéster metalizado de alumínio que foi usado para revestir a superfície da parábola do concentrador secundário. Foi considerada a média das refletâncias para UVA e UVB como descrito anteriormente para equação 1.

4.6. Procedimentos experimentais

4.6.1. Preparação da água

No presente estudo foi usada água deionizada por osmose reversa.

Nos experimentos foi usada água de baixa (<1 UNT) e de alta turbidez (50 UNT). A água de alta turbidez foi obtida pela suspensão de caulim; o caulim foi adicionado gradualmente sob agitação vigorosa monitorando-se da turvação utilizando-se um turbidímetro (HACH 2100), quando a turvação desejada foi obtida, a adição de caulim foi interrompida.

A água foi esterilizada em autoclave (121°C por 15 minutos) antes do uso.

4.6.2. Preparo do estoque dos cistos de *Acanthamoeba castellanii*

Neste estudo foram usados cistos de *Acanthamoeba castellanii*, cepa Neff, ATCC 30010. O cultivo axênico de trofozoítos de *Acanthamoeba castellanii* foi realizado em garrafas de cultura celular contendo meio PYG (proteose peptona 2%, extrato de levedo 0,2% e glicose 1,8%) a 30°C por cinco dias, ao final do período o meio foi descartado, lavando-se as garrafas por 2 vezes com a solução de encistamento Neff (KCl 0,1 M, Tris-amina 0,02 M, MgSO₄ 8 mM, 0,4 mM, CaCl₂, NaHCO₃ 1 mM). As células foram mantidas por sete dias na solução de encistamento suplementada com 100 µL de antibióticos (numa proporção de 1:1 de Penicilina G Potássica e Estreptomicina) por garrafa de cultivo contendo 10 mL de solução de encistamento. Os cistos foram colhidos por centrifugação (2800 rpm por 5 minutos) e depois de descartar-se o sobrenadante, foram ressuspensos na mesma solução, e estocados a 4°C até a sua utilização.

A viabilidade dos cistos de *A. castellanii* foi confirmada pela coloração de exclusão com azul de tripan 0,3% momentos antes de transferi-los para água a ser utilizada no experimento.

4.6.3. Cultivo de bactérias

O sistema de desinfecção solar de água em fluxo contínuo foi igualmente testado para inativação de bactérias, incluído: *Escherichia coli* ATCC® 25922, *Salmonella* Typhimurium DT177, *Enterococcus faecalis* ATCC® 29212 e *Pseudomonas aeruginosa* ATCC® 27853. As bactérias foram previamente cultivadas em ágar Tryptic Soy por 24 horas a 37°C. Depois, duas colônias de cultura pura de cada bactéria foram inoculadas assepticamente em 2 mL do meio de cultura BHI (Brain Heart Infusion) e incubadas a 37°C por 18 horas. Cada espécie de bactéria foi cultivada separadamente

4.6.4. Contaminação da água

A água deionizada previamente autoclavada foi contaminada com 10^8 cistos viáveis de *A. castellanii* por litro, e com 10^5 a 10^6 unidades formadoras de colônias (UFC) bacterianas por mililitro.

Os testes com cistos e com bactérias foram realizados separadamente.

4.6.5. Procedimentos de desinfecção

Todos experimentos foram conduzidos em triplicata e com três repetições.

Antes de cada sessão de experimento, o sistema foi desinfetado fazendo-se fluir água destilada pelo aquecedor e pelo irradiador de UV até que ela atingisse uma temperatura de 80°C, sendo descartada em seguida. A temperatura foi mensurada no fundo do tanque de aquecimento.

4.6.5.1. Desinfecção da água contaminada por cistos

No experimento com cistos implementou-se três tratamentos diferentes:

Calor e UV (Calor + UV) - a água foi aquecida ao mesmo tempo que era irradiada por UV, sendo bombeada do tanque de aquecimento, para o aquecedor fazendo-a fluir para o irradiador de UV, retornando em seguida para o tanque de aquecimento. Deixou-se que a água continuasse fluindo até que ela atingisse 70°C. As amostras foram coletadas imediatamente ou 10 minutos depois de ter atingido 60°C, 65°C e 70°C consecutivamente. Neste tratamento foi testada água com: **(I)** baixa turbidez (Calor + UV/<1UNT) e com **(II)** alta turbidez (Calor + UV/50UNT).

(III) Calor - a água foi aquecida, sendo bombeada do tanque, fluindo pelo aquecedor e retornando ao tanque de aquecimento, até atingir 70°C, sendo coletadas amostras imediatamente ou 10 minutos após a água atingir e/ou se manter a 60°C, 65°C e 70°C (Tabela 5).

4.6.5.2. Desinfecção da água contaminada por bactérias

No experimento com bactérias implementou-se 4 tratamentos diferentes:

(I) Pré-aquecimento depois UV (Calor → UV) – A água foi aquecida e só depois exposta a UV. A água foi aquecida até atingir 45°C, depois até 55°C e finalmente até 60°C, sendo que depois de atingida cada uma das temperaturas a água foi imediatamente feita passar uma única vez pelo irradiador de UV, coletando-se amostras assim que a água saía deste. Neste tratamento foi usada apenas água de baixa turbidez <1UNT, (Calor → UV/<1).

Calor e UV (Calor + UV/) - a água foi aquecida ao mesmo tempo que era irradiada por UVA e UVB, sendo bombeada do tanque, para o aquecedor e fluindo deste para o irradiador de UV e, retornando de seguida para o tanque de aquecimento. Deixou-se que a água continuasse fluindo até que ela atingisse uma temperatura de até 60°C. As amostras eram coletadas quando se atingiam as temperaturas de 45°C, 55°C e 60°C. Neste tratamento foi testada água com: **(II)** baixa turbidez (Calor + UV/<1UNT) e com **(III)** alta turbidez (Calor + UV/50UNT),

(IV) Calor - a água foi aquecida, bombeando-a do tanque de aquecimento para o aquecedor e, permitindo que ela refluísse para o tanque de aquecimento, até atingir temperaturas de 45°C, 55°C e 60°C (Tabela 5).

4.6.5.3. Coleta e acondicionamento de amostras

As amostras foram coletadas na saída do irradiador de UV, nos tratamentos Calor → UV e Calor+UV ou na saída do aquecedor, no tratamento Calor. Amostras de 45 mL foram coletadas em tubos falcon e imediatamente arrefecidas em banho-maria à temperatura ambiente (24°C ± 2) abrigadas da luz solar, e mantidas nestas condições até a análise. As amostras foram processadas em até 4 horas após a coleta.

Tabela 5: Temperaturas e tempos de contato para bactérias e cistos.

	Bactérias			Cistos		
	45	55	60	60	65	70
Temperatura da água (°C)	45	55	60	60	65	70
Tempo contato (minutos)	0	0	0	0	10	0

4.6.6.4. Análise de viabilidade dos cistos

Para a avaliar a viabilidade dos cistos de *A. castellanii*, as amostras foram centrifugadas a 2500 rpm, durante 10 minutos, um inóculo de 50µL do sedimento foi depositado sobre cada um dos três quadrantes do ágar não nutriente com uma sobrecamada de *Escherichia coli* previamente inativada pelo calor (56°C/2h).

As placas foram deixadas em repouso até a gota de inóculo se secar, em seguida as placas foram incubadas a 30°C, procedendo-se o monitoramento diário do processo de desencistamento. A partir do terceiro dia após a inoculação procedeu-se a contagem diária de cistos e trofozoítos durante 20 dias.

O número de cistos e/ou trofozoítos eram expressos por campo de microscopia, usando-se uma objetiva e oculares de 10X. Pelo menos seis campos com maior densidade e distribuição mais homogênea de cistos e/ou trofozoítos foram considerados para contagem em cada ponto de inoculação.

4.6.6.5. Análise da viabilidade das bactérias

As amostras de água contaminada com bactérias (que passou pelo tratamento) foram submetidas a diluições seriadas como descrito na literatura (Garre *et al.*, 2019).

A técnica de semeadura *drop plate* foi utilizada para inocular as placas ágar seletivo, EMB (eozin methylene / blue ágar - levine), XLD (xylose deoxycyclate ágar), Bile esculino e cetrimide, para *Escherichia coli*, *Salmonella* Typhimurium, *Enterococcus faecalis* e *Pseudomonas aeruginosa*, respectivamente. As placas foram incubadas a 35°C, e a contagem de UFC foi realizada após 18 horas de incubação. As placas sem crescimento foram monitoradas, permanecendo na incubadora por mais 18 horas. O número de colônias contadas foi multiplicado pelo respectivo fator de diluição.

4.7. Análise de dados

O programa Excel do Windows 2010, foi utilizado como planilha de coleta e organização de dados, bem como a realização da estatística descritiva. Os softwares estatísticos BioEstat versão 5.0 e PAST foram utilizados para realização de inferências estatísticas. O teste t-student (bicaudal) foi utilizado para avaliar a significância das diferenças entre os dados obtidos em cada abordagem e o respectivo controle. A ANOVA seguida de teste Tukey ou teste LSD, foram utilizados para avaliar a significância das diferenças entre os dados nas distintas abordagens incluindo o controle, nos distintos tratamentos. A significância da diferença entre os tratamentos também foi analisada. A probabilidade de $p < 0,05$ foi considerada significativa.

O programa GraphPad prisma 5, foi utilizado para construção de gráficos.

5. RESULTADOS

5.1. Sistema de desinfecção solar de água em fluxo contínuo

O protótipo de desinfecção solar de água em fluxo contínuo desenvolvido no presente estudo, foi projetado para utilizar o efeito sinérgico da radiação térmica, UVA e UVB solares para inativar microrganismos presentes na água. Para isso foi construído um aquecedor solar que consiste de um concentrador cilíndrico-parabólico e um irradiador de UVA e UVB, que é um concentrador Fresnel (Figura 11).



Figura 11: Sistema de desinfecção solar de água em fluxo contínuo.

No foco do concentrador cilíndrico-parabólico está colocado o tubo absorvedor, no qual ocorre a conversão da radiação solar em calor interno, que é de seguida transferida para água que flui através do tubo, aquecendo-a.

Os reatores de quartzo do irradiador de UVA e UVB foram colocados na zona focal do concentrador primário tipo Fresnel e no foco do concentrador secundário do tipo cilíndrico-parabólico (Figura 13).

5.2. Mecanismo de funcionamento do sistema

Quando o aquecedor se voltou para o sol a radiação que incidiu sobre ele foi refletida e feita convergir para a linha focal, incidindo sobre o absorvedor tubular que a transformou em calor interno (Kalogirou, 2009) que é transferido para água que circulava dentro do absorvedor aquecendo-a. A água chegou ao

aquecedor através de mangueira transparente, impulsionada por uma bomba submersa de 13W. No aquecedor, a água percorreu 6 m de extensão do absorvedor e foi conduzida de volta para o tanque de aquecimento (isotérmico) ou para o irradiador solar de UVA e UVB, dependendo da abordagem de desinfecção adotada (como detalhado em 4.6.5.) (Figura 12).

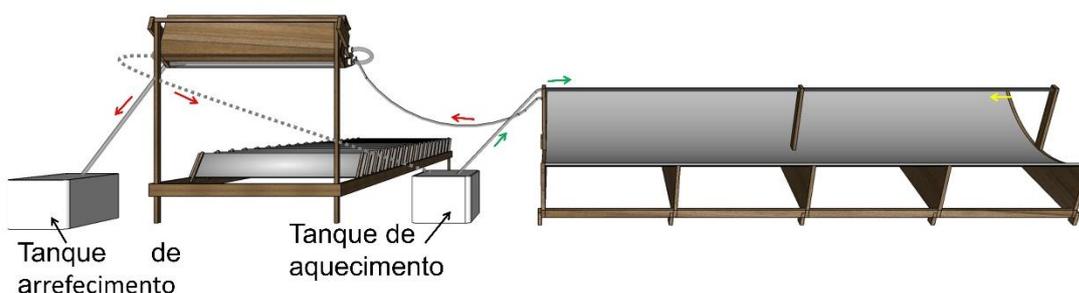


Figura 12: Representação do trajeto da água pelo sistema.

Quando o irradiador solar de UV foi alinhado na direção do sol, com as faces dos espelhos orientadas e ajustadas ao ângulo de inclinação do sol, a radiação que incidiu sobre cada um dos espelhos foi refletida para dentro do concentrador secundário, incidindo sobre os reatores de quartzo colocados na abertura deste. A radiação que atingiu a superfície espelhada do concentrador secundário foi por sua vez, concentrada sobre o reator 3 (Figura 13 e 14).

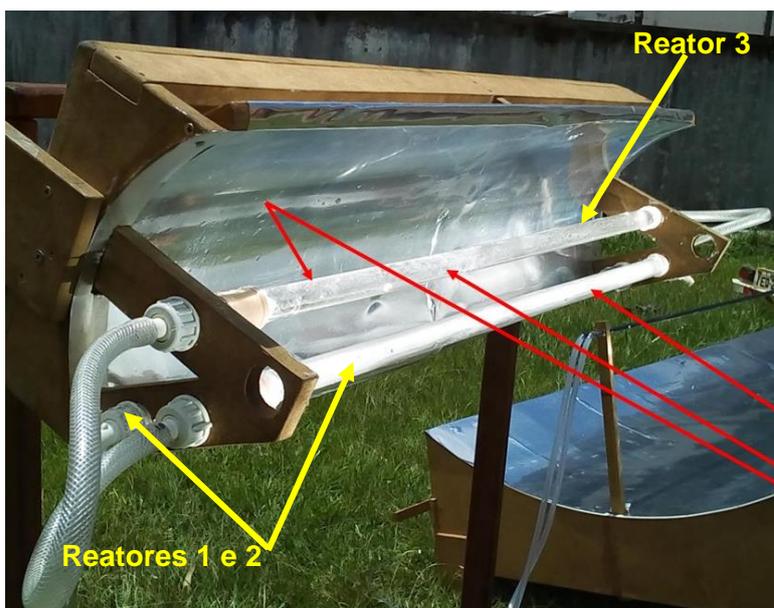


Figura 13: Detalhes do concentrador secundário.

A água chegou ao irradiador solar de UV trazida através de uma mangueira que conectava a saída do absorvedor do aquecedor e a entrada do reator 1 do irradiador.

No irradiador de UV a água percorreu 4 m de extensão total dos reatores que receberam a radiação que chegou do concentrador primário. Por fim a água que passou pelo reator 3 recebeu além da radiação que chegou do concentrador primário, toda a radiação concentrada pelo concentrador secundário. A água irradiada pela UVA e UVB, foi por fim conduzida de volta ao tanque isotérmico de aquecimento ou para o tanque de arrefecimento, dependendo da abordagem de desinfecção adotada (Figura 12-14).

Durante os experimentos a bomba foi ajustada para uma vazão de 500 litros por hora.

Um ajuste constante do sistema em função da posição do sol foi necessário.



Figura 14: Sistema de SODIS de água em fluxo contínuo em funcionamento.

5.3. Propriedades ópticas do sistema

5.3.1. Refletância a IV e UV

O adesivo poliéster metalizado de alumínio utilizado como espelho neste estudo, possui um rendimento médio de refletância maior do que o de outros materiais considerados, para toda extensão de comprimentos de onda testados (200 a 2459 nm) (Figura 15).

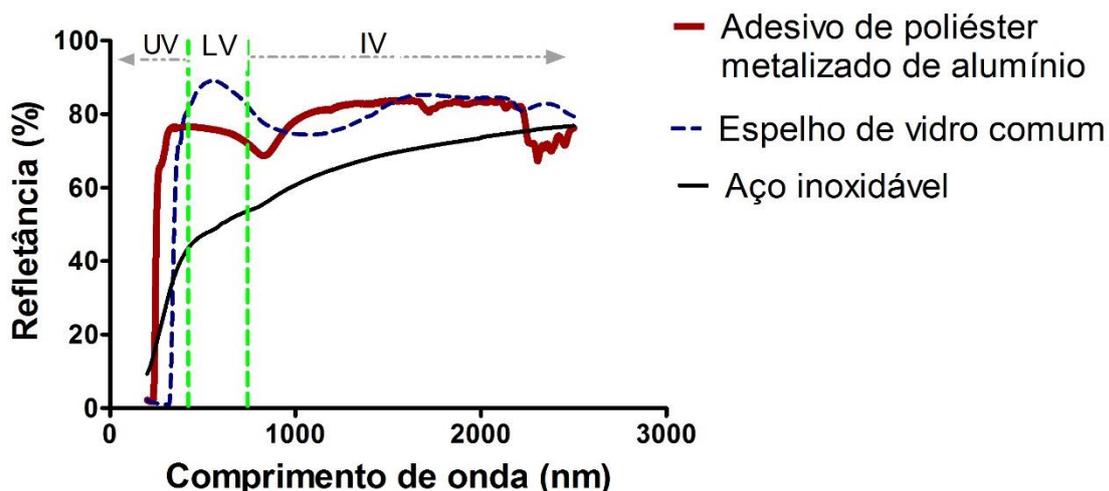


Figura 15: Refletância do adesivo de poliéster metalizado de alumínio a IV e UV.

A refletância média do adesivo de poliéster metalizado de alumínio para a extensão do espectro IV (700 - 2459 nm) é de 79,2%. A refletância do espelho de vidro comum é de 80,8 %, e do aço inoxidável é de 68,4%, para este espectro.

O adesivo de poliéster metalizado de alumínio possui um alto poder de refletividade comparativa em relação a outros materiais, para o espectro UV. Sua refletância média é de 74,7%. A refletância média do espelho de vidro comum e do aço inoxidável para a mesma faixa espectral, é respectivamente 36,6% e 34,1%. Importa realçar que a refletância média do espelho de vidro comum decai para um valor muito próximo de 0 quando a faixa espectral de UVB é considerada (Figura 16).

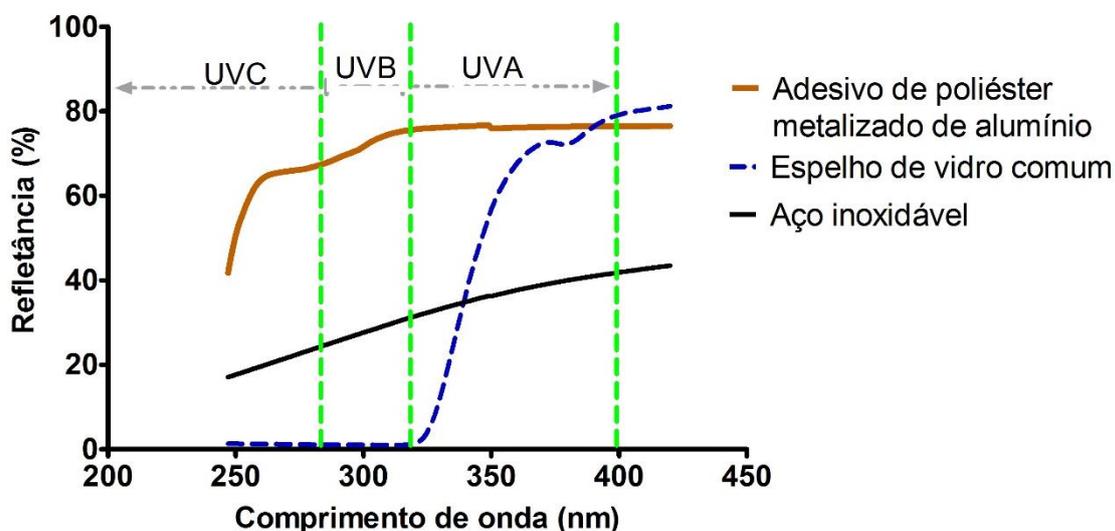


Figura 16: Refletância do adesivo poliéster metalizado de alumínio a UV.

5.3.2. Transmitância a UVA e UVB

A transmitância da parede do tubo de quartzo usado como reator no irradiador de UVA e UVB, foi mensurada para o espectro UV. Sua transmitância média para a faixa do espectro UVA foi de 87,2% e para UVB foi 83,3% (Figura 17).

Uma janela de quartzo de alta pureza também foi submetida aos testes de transmitância, e demonstrou possuir maior transmitância que a parede do reator tubular de quartzo usado neste experimento. Sua transmitância média foi de 91,8% e 91,2% para UVA e UVB, respectivamente.

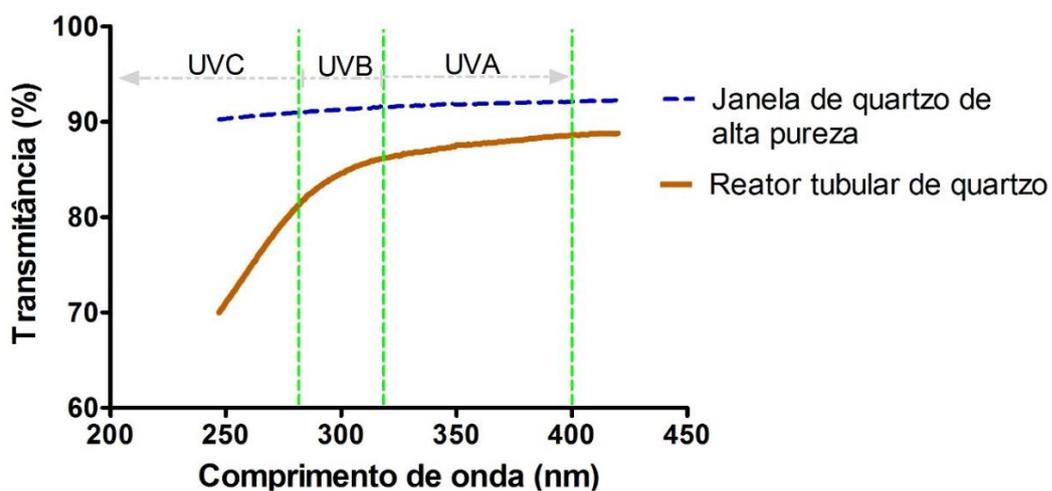


Figura 17: Transmitância da parede dos reatores de quartzo a UV.

5.4. Condições de funcionamento do sistema

A temperatura do ar nos momentos da realização de experimento nos diferentes dias variou entre 24 e 30,8°C. A insolação variou de 224 kJ/m² e 1471 kJ/m², enquanto a radiação UV direta assumiu valores entre 150 e 250 mW/m².

Os valores estimados de radiação UV concentrada e que atravessa a parede dos reatores 1, 2 e 3 de quartzo são apresentados na tabela 6.

Os valores estimados de UV nos reatores 1, 2 referem-se à radiação captada pelo concentrador primário e direcionada sobre os reatores tubulares de quartzo que se encontram dentro da área da abertura do concentrador secundário. Já os valores de radiação UV no reator 3 referem-se ao somatório da radiação concentrada pelo concentrador primário e pelo concentrador secundário e que converge sobre o reator 3 que se encontra no foco do concentrador secundário (Figura 13).

Tabela 6: Condições radiológicas nos dias do experimento.

Alvo	Tratamento	NTU	Data	T°C	Insolação (kJ/m ²)	I_{UVD} (mW/m ²)	$I_{UV1;2}$ (mW/m ²)	I_{UV3} (mW/m ²)
Cistos	Calor + UV	<1	06/02/19	24	1471	225	80,6	562,2
		<1	07/03/19	26	263	175	62,7	437,3
	Calor	50	26/03/19	19	230	150	53,7	374,8
		<1	14/03/19	23	355			
Bactérias	Calor → UV	<1	29/01/19	30,4	224	150	53,7	374,8
		<1	31/01/19	30,8	1287	275	98,5	687,2
	Calor + UV	<1	01/02/19	29,4	1349	250	89,6	624,8
		50	19/02/19	19	224	150	53,7	374,8
	Calor	<1	26/03/19	24,4	354	200	71,6	499,7
		<1	29/01/19	30,4	1452			
		<1	31/01/19	30,8	1287			
		<1	01/02/19	29,4	1349			

NTU – Unidade nefelométrica de turvação. **T°C** – Temperatura ambiente na hora do experimento. **UV** – Radiação ultravioleta. I_{UVD} - Radiação ultravioleta direta. $I_{UV1;2}$ - Radiação ultravioleta no interior do reator 1 e 2. I_{UV3} - Radiação ultravioleta no interior do reator 3.

5.5. Cinética de aquecimento da água

A temperatura média da água antes do tratamento foi de cerca de 26,4°C.

A temperatura do lote de 10 litros de água tratados (em cada sessão de tratamento) foi monitorada a cada 5 minutos durante 20 minutos, a partir do início do fluxo da água pelo sistema.

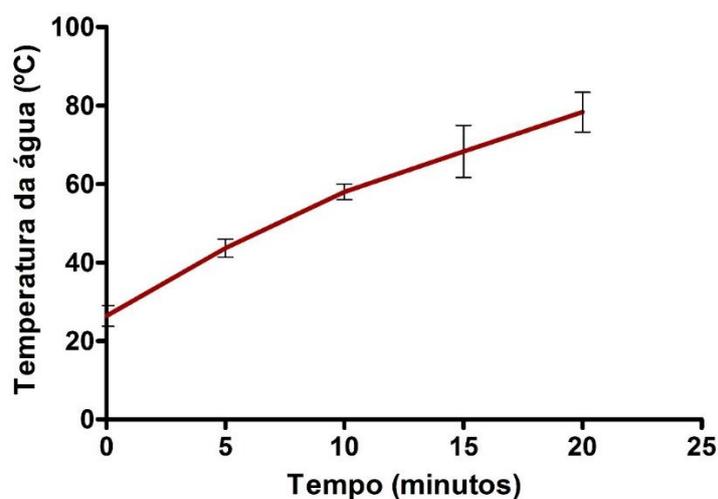


Figura 18: Variação da temperatura da água ao longo do tempo. (As medições foram conduzidas com 10 litros de água).

Foi observado um rápido aumento de temperatura nos primeiros 10 minutos, atingindo em média 58,0°C (Figura 18).

A velocidade do aumento da temperatura a partir dos 15 minutos mostrou-se influenciada pela nebulosidade e velocidade do vento, sendo que em dias de céu límpido e com baixa velocidade de vento, temperaturas de até 83°C foram alcançadas em 20 minutos.

Uma produtividade média de 40 litros por hora foi obtida, considerando a abordagem 60°C+UV-10. Uma produção média de 360 litros de água por dia foi alcançada em dias ensolarados funcionando das 08h e 30min às 16h e 30min.

5.6. Inativação de cistos

A visualização de trofozoítos nos controles se efetivou na maioria dos casos a partir de 24 horas, em poucos casos 48 horas após a incubação das placas.

Nas amostras pós tratamento, não foi observado desencistamento de cistos de *A. castellanii* em todas abordagens do tratamento Calor+UV/<1 em todas as repetições do experimento, não tendo sido contabilizado nenhum trofozoíto (Tabela 7).

Não foi observado desencistamento de cistos na maioria das abordagens do tratamento Calor+UV/50UNT, nomeadamente 60°C+UV-10/50UNT (onde a água com alta turbidez foi irradiada ao mesmo tempo que era aquecida até atingir 60°C e foi mantida nesta temperatura enquanto fluía pelo irradiador por 10 minutos), 65°C+UV-0/50UNT, 65°C+UV-10/50UNT e 70°C +UV-0/50UNT, em todas as repetições do experimento, por isso nessas abordagens nenhum trofozoíto foi contado.

Em uma das três repetições do tratamento Calor+UV/50UNT na abordagem 60°C+UV-0/50UNT ocorreu desencistamento, e consequente contagem de trofozoítos a partir do 6º dia de incubação. O número de trofozoítos contados nesta abordagem veio a ser maior do que o número de trofozoítos contados no respectivo controle a partir do 14º dia.

Da mesma maneira, não foi observado desencistamento na maioria das abordagens do tratamento Calor, nomeadamente 60°C-10 (onde a água foi aquecida até atingir 60°C, e foi mantida a esta temperatura por 10 minutos), 65°C-0, 65°C-10 e 70°C-0, em todas as repetições do experimento, por isso nessas abordagens nenhum trofozoíto foi contado.

Tabela 7: Médias de trofozoítos recuperados dos cistos

Intervalo de dias	Condições experimentais		Média de trofozoítos por abordagem de cada tratamento					
	Turbidez (UNT)	UV (mW/m ²)	Contr.	60°C-0	60°C-10	65°C-0	65°C-10	70°C-0
Tratamento: Calor + UV								
1 ^o	<1	580,4	0	0	0	0	0	0
3 ^o -6 ^o	<1	580,4	344	0	0	0	0	0
7 ^o -10 ^o	<1	580,4	75	0	0	0	0	0
11 ^o -14 ^o	<1	580,4	16	0	0	0	0	0
15 ^o -18 ^o	<1	580,4	9	0	0	0	0	0
19 ^o -20 ^o	<1	580,4	1	0	0	0	0	0
Tratamento: Calor + UV								
1 ^o	50	482,2	0	0	0	0	0	0
3 ^o -6 ^o	50	482,2	229	0	0	0	0	0
7 ^o -10 ^o	50	482,2	119	28	0	0	0	0
11 ^o -14 ^o	50	482,2	42	98	0	0	0	0
15 ^o -18 ^o	50	482,2	10	26	0	0	0	0
19 ^o -20 ^o	50	482,2	5	2	0	0	0	0
Tratamento: Calor								
1 ^o	<1	0	0	0	0	0	0	0
3 ^o -6 ^o	<1	0	390	0	0	0	0	0
7 ^o -10 ^o	<1	0	280	35	0	0	0	0
11 ^o -14 ^o	<1	0	20	164	0	0	0	0
15 ^o -18 ^o	<1	0	0	38	0	0	0	0
19 ^o -20 ^o	<1	0	0	2	0	0	0	0

Onde: **Contr.** - Controle. **UV** – Radiação Ultravioleta. **NTU** - Unidade Neflométrica de Turvação.

Em uma das três repetições do tratamento Calor na abordagem 60°C-0 ocorreu desencistamento, e consequente contagem de trofozoítos a partir do 5^o dia de incubação. O número de trofozoítos contados nesta abordagem foi maior do que o número de trofozoítos contados no respectivo controle a partir do 11^o dia (Tabela 7).

5.6.1. Análises estatísticas sobre os dados de *A. castellanii*

Os dados gerados pela contagem de trofozoítos nas abordagens com 0 minutos de tempo de contato em todos os tratamentos (i.e., Calor + UV-0/<1UNT, Calor + UV-0/50UNT e Calor-0) foram submetidos a análise de variância (ANOVA) com nível de significância de 5%, a fim de avaliar as significâncias das diferenças entre as médias de trofozoítos obtidos para as diferentes abordagens e os respectivos controles por tratamento. As outras abordagens não foram incluídas na análise porque seus valores não apresentam variabilidade e não diferem de 0 (Tabela 8).

Tabela 8: Resultados da ANOVA para trofozoítos nos tratamentos.

Tratamento / abordagem	SQ	gl	MQ	F	valor-P
Calor + UV-0/<1UNT	51.0 e+04	3	17.0 e+04	14.5517	0.0001
Calor + UV-0/50UNT	66.3 e+04	3	22.1 e+04	13.5964	0.0001
Calor-0	53.3 e+04	3	17.8 e+04	10.1260	0.0005

Legenda: **SQ:** soma dos quadrados; **GL:** grau de liberdade; **MQ:** média quadrada; **F:** Fator e **valor-P:** valor da probabilidade.

Através dos resultados da tabela 8, observa-se que o valor-P é menor que 0,05 (nível de significância definido), por isso, foi considerado que há diferença estatística entre os dados.

Sabendo-se que os dados analisados diferem estatisticamente entre si, utilizou-se o pós-teste de Tukey para identificar pontos nos quais a diferença estatística é mais expressiva (Tabela 9).

A partir dos resultados na tabela 9 pode-se inferir que, as médias de trofozoítos nos controles de todos tratamentos diferem significativamente de todas respectivas abordagens, mas as médias de trofozoítos nas abordagens de todos os tratamentos não diferem significativamente entre si, pelo pós-teste de Tukey ($p < 0,05$).

Tabela 9: Comparação de média de trofozoítos por tratamentos.

	Calor + UV-0/<1UNT	Calor + UV-0/50UNT	Calor-0
Controle (~26°C)	336,50 ^a	391,66 ^a	355,50 ^a
60°C	0,00 ^b	25,33 ^b	39,67 ^b
65°C	0,00 ^b	0,00 ^b	0,00 ^b
70°C	0,00 ^b	0,00 ^b	0,00 ^b

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não apresentam diferença significativa na ANOVA seguida de teste Tukey.

5.7. Inativação de bactérias

Não houve crescimento bacteriano nas abordagens envolvendo 60°C em todos tratamentos nomeadamente: 60°C→UV, 60°C+UV/<1, 60°C+UV/50 e 60°C, para todas as espécies bacterianas.

No tratamento Calor→UV (onde a água foi pré-aquecida e depois feita passar uma única vez pelo irradiador) não houve crescimento bacteriano nas abordagens 55°C→UV e 60°C→UV, para todas as espécies bacterianas.

Na abordagem 45°C→UV houve crescimento de todas as espécies de bactérias testadas. Uma redução de cerca de 1 log de *S. Typhimurium* e de 2 logs de *P. aeruginosa* foram observadas nesta abordagem. Para outras bactérias uma redução de menos de 1 log foi obtida (Tabela 10).

No tratamento Calor+UV/<1UNT, nas abordagens 45°C+UV/<1UNT bem como 55°C+UV/<1UNT houve crescimento para todas as espécies de bactérias testadas. Reduções médias de cerca de 3 logs para *E. coli* e *P. aeruginosa*, e de cerca de 5 logs para *S. Typhimurium*, e 4 logs para *E. faecalis* foram observadas na abordagem 55°C+UV/<1UNT. Na abordagem 45°C + UV/<1UNT foi observada uma redução média de cerca de 1 log para todas espécies bacterianas testadas (Tabela 10).

No tratamento Calor+UV/50UNT, nas abordagens 45°C+UV/50UNT assim como 55°C+UV/50UNT houve contagem de UFC para diversas espécies de bactérias (Tabela 10). Na abordagem 55°C+UV/50UNT nenhuma UFC de *P. aeruginosa* foi observada, sendo que reduções médias de 1 log para *E. coli*, 2 logs para *S. Typhimurium*, e 5 logs para *E. faecalis* foram obtidas nesta abordagem. Na abordagem 45°C+UV/50UNT uma redução média de 2 logs para *E. faecalis* foi obtida. Para outras espécies de bactérias testadas uma redução

média de pelo menos 1 log não foi alcançada, sendo que o número médio de UFC para *E. coli* e *P. aeruginosa* nesta abordagem chegou a ser ligeiramente maior que o número médio de UFC no controle (Tabela 10).

Tabela 10: Médias de UFC/mL por abordagem de cada tratamento.

Alvo	Condições experimentais		Média de UFC por abordagem de cada tratamento			
	Turbidez (UNT)	UV (mW/m ²)	Controle	45°C	55°C	60°C
Tratamento: Calor → UV						
<i>E. coli</i>	<1	723.5	2,8x10 ⁵	4,1x10 ⁴	0,0	0,0
<i>S. Typhimurium</i>	<1	723.5	2,4x10 ⁵	3,6x10 ⁴	0,0	0,0
<i>E. faecalis</i>	<1	723.5	2,7x10 ⁵	1,4x10 ⁵	0,0	0,0
<i>P. aeruginosa</i>	<1	723.5	5,5x10 ⁵	3,3x10 ³	0,0	0,0
Tratamento: Calor + UV						
<i>E. coli</i>	<1	482.2	3,8x10 ⁷	6,5x10 ⁶	1,1x10 ⁴	0,0
<i>S. Typhimurium</i>	<1	482.2	3,7x10 ⁷	7,8x10 ⁶	1,4x10 ²	0,0
<i>E. faecalis</i>	<1	482.2	3,0x10 ⁷	4,6x10 ⁶	1,6x10 ³	0,0
<i>P. aeruginosa</i>	<1	482.2	4,5x10 ⁶	2,9x10 ⁵	2,2x10 ³	0,0
Tratamento: Calor + UV						
<i>E. coli</i>	50	642.9	2,1x10 ⁵	3,6x10 ⁵	2,7x10 ⁴	0,0
<i>S. Typhimurium</i>	50	642.9	2,0x10 ⁵	1,2x10 ⁵	5,0x10 ³	0,0
<i>E. faecalis</i>	50	642.9	1,6x10 ⁶	8,8x10 ⁴	2,2x10	0,0
<i>P. aeruginosa</i>	50	642.9	5,3x10 ⁴	9,2x10 ⁴	0,0	0,0
Tratamento: Calor						
<i>E. coli</i>	<1	0,0	2,8x10 ⁵	2,4x10 ⁵	9,7x10 ³	0,0
<i>S. Typhimurium</i>	<1	0,0	2,2x10 ⁵	9,1x10 ⁴	2,2x10	0,0
<i>E. faecalis</i>	<1	0,0	2,9x10 ⁵	2,2x10 ⁵	1,4x10 ³	0,0
<i>P. aeruginosa</i>	<1	0,0	3,7x10 ⁵	2,1x10 ⁴	0,0	0,0

No tratamento Calor, nas abordagens 45°C assim como 55°C houve contagem de UFC de diversas espécies testadas. Na abordagem 55°C nenhuma UFC de *P. aeruginosa* foi observada, sendo que reduções médias de 2 logs para

E. coli e *E. faecalis*, e de 4 logs de *S. Typhimurium* foram alcançadas. Na abordagem 45°C+UV/50UNT uma redução média de 1 log para *S. Typhimurium* e *P. aeruginosa* foi alcançada. Para outras espécies testadas uma redução média de pelo menos 1 log não foi alcançada nesta abordagem, (Tabela 10).

5.7.1. Análises estatísticas sobre os dados de bactérias

Os dados que resultaram da contagem de UFC/mL de todas espécies de bactérias por tratamento foram submetidos a análise de variância (ANOVA). Um nível de significância de 5% foi utilizado, a fim de avaliar as significâncias das diferenças entre os dados de UFC/mL obtidos para as diferentes abordagens e os respectivos controles por tratamento (Tabela 11).

Através da tabela 11, observa-se que o valor-P em todos os tratamentos é inferior a 0,05 (probabilidade), sendo por isso que os dados de UFC/mL obtidos em cada abordagem e nos respectivos controles por tratamento foram considerados como possuindo diferença estatística significativa.

Tabela 11: Resultados da ANOVA para bactérias nos tratamentos.

Tratamento	SQ	GL	MQ	F	valor-P	F crítico
Calor→UV	3.09E+11	3	1.03e+11	16.935	0.00013	3.490
Calor + UV/<1UNT	2.05E+15	3	6.85e+14	10.700	0.00104	3.490
Calor + UV/50UNT	6.92E+10	2	3.46e+10	6.663	0.02992	5.143
Calor	2.22E+11	4	5.55e+10	14.111	0.00026	3.356

Legenda: **SQ:** soma dos quadrados; **GL:** grau de liberdade; **MQ:** média quadrada; **F:** Fator; **valor-P:** valor da probabilidade e **F crítico:** Fator crítico.

Sabendo-se que existe diferença entre os dados analisados, foi utilizado o pós-teste de *Tukey* para verificar o ponto no qual a diferença estatística é mais expressiva (Tabela 12).

Através dos resultados obtidos pelo pós-teste de *Tukey* (Tabela 12), pode-se inferir que as médias dos resultados de UFC obtidos nos controles dos tratamentos Calor→UV, Calor + UV/<1UNT e Calor são estatisticamente diferentes das respectivas abordagens, no entanto os dados das abordagens

nestes tratamentos não são estatisticamente diferentes, uma vez que a diferença entre si não foi considerada como sendo estatisticamente significativa ($p < 0,05$).

Tabela 12: Comparação de médias gerais de UFC/mL por abordagens e tratamento.

	Calor→UV	Calor + UV/<1UNT	Calor +UV/50UNT	Calor
Controle (-26°C)	335000,00 ^a	27375000,00 ^a	635000,00 ^a	290000,00 ^a
45°C	55075,00 ^b	4797500,00 ^b	165000,00 ^a	93500,00 ^b
55°C	0,00 ^b	3735,00 ^b	8005,50 ^b	2780,50 ^b
60°C	0,00 ^b	0,00 ^b	0,00 ^b	0,00 ^b

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo pós-teste de *Tukey* ($p > 0,05$).

Para o tratamento Calor +UV/50UNT, as médias dos resultados de UFC/mL obtidos nos controles são estatisticamente diferentes apenas das abordagens 55°C+UV/50UNT e 60°C+UV/50UNT (Tabela 12).

Na tabela 13 são apresentados resultados do pós-teste de *Tukey*, para as médias gerais de dados UFC/mL obtidas em tratamento para todas espécies bacterianas testadas.

Tabela 13: Significância da diferença da eficácia de inativação de bactérias entre os tratamentos.

	Calor→UV	Calor+UV/<1UNT	Calor+UV/50UNT	Calor
Calor→UV		1.798E-08 ^{**}	0.0028 ^{**}	0.00023 ^{**}
Calor+UV /<1UNT	1.08E-08 ^{**}		0.0027 ^{**}	0.00915 ^{**}
Calor+UV /50UNT	0.0168 ^{**}	0.0166 ^{**}		0.4826 ^{nds}
Calor	0.0014 ^{**}	0.054 ^{nds}	1 ^{nds}	

^{**} - Diferem significativamente entre si, pelo pós-teste de *Tukey* ($p < 0,05$). **nds** - Não diferem significativamente entre si, pelo pós-teste de *Tukey* ($p < 0,05$).

A partir da tabela 13 pode-se inferir que, as médias dos dados de UFC/mL obtidos nos tratamentos Calor→UV bem como no tratamento Calor+UV/<1UNT são estatisticamente diferentes entre si, e com todos outros tratamentos, já que a diferença entre si foi considerada estatisticamente significativa pelo pós-teste

de *Tukey* ($p < 0,05$). Entretanto é importante destacar que as médias dos dados de UFC obtidos nos tratamentos Calor possuem algum grau de similaridade com os obtidos no tratamento Calor+UV/<1UNT.

As médias dos dados de UFC obtidos nos tratamentos Calor+UV/50UNT e o tratamento Calor não diferem significativamente entre si pelo pós-teste de *Tukey* ($p < 0,05$) (Tabela 13).

Os dados de UFC de cada espécie bacteriana testada por tratamento foram convertidos em porcentagem e submetidos a análise de variância (ANOVA) com nível de significância de 5% seguida de teste LSD (Mínima Diferença Significativa), com intenção de avaliar a significância das diferenças entre as porcentagens de crescimento de cada espécie de bactéria em função da variação da temperatura nos tratamentos (Tabela 14).

Tabela 14: Porcentual de crescimento bacteriano por temperatura.

	<i>E. coli</i>	<i>S. Typhimurium</i>	<i>E. faecalis</i>	<i>P. aeruginosa</i>
Controle (~26°C)	100,00 ^a	100,00 ^a	100,00 ^a	100,00 ^a
45°C	72,25 ^a	34,25 ^b	20,25 ^b	7,50 ^b
55°C	4,00 ^b	0,75 ^c	0,00 ^c	0,00 ^c
60°C	0,00 ^b	0,00 ^c	0,00 ^c	0,00 ^c

Médias porcentuais seguidas pela mesma letra na coluna não diferem significativamente entre si pela ANOVA seguida de teste LSD ($p > 0.05$).

Através dos dados da tabela 14 pode-se inferir que as bactérias *P. aeruginosa* e *E. faecalis* foram mais sensíveis ao efeito da variação da temperatura e *S. Typhimurium* e *E. coli* mostraram-se mais resistentes, sendo que estas últimas, mais resistentes entre as duas.

O sistema relatado neste trabalho resultou em um depósito de patente sub número BR 10 2020 001683-0.

6. DISCUSSÃO

Neste trabalho, foi desenvolvido um sistema de desinfecção solar de água em fluxo contínuo visando propor uma solução ao problema do pequeno volume de água que pode ser tratada através da SODIS convencional.

Os materiais considerados para a construção do sistema foram escolhidos por se adequarem a necessidade e por serem relativamente mais baratos e disponíveis principalmente em países em desenvolvimento onde o abastecimento público de água potável continua desafiador, como por exemplo Moçambique (UNICEF, 2015).

O adesivo poliéster metalizado de alumínio foi selecionado para a construção de superfícies refletoras por ser fácil de manipular e higienizar, bem como por possuir uma refletância média de 79,2% para o espectro infravermelho (IV) (Figura 15) e uma refletância média de 74,7%, para o espectro UV (Figura 16). Embora se admita existir materiais de maior rendimento de refletância, este foi escolhido por ser mais acessível.

A escolha do quartzo para a construção dos reatores do irradiador de UV deveu-se pelo fato deste material possuir alta transmitância à UVA e UVB, quando comparado aos outros materiais, assemelhando-se apenas ao borossilicato (Ayoub e Malaeba, 2019).

O sistema foi testado para inativação de cistos de *A. castellanii*, que são formas de resistência ambiental desta AVL, e são cosmopolitas e onipresente (Schuster, 2002). A sua expressiva característica recalcitrante face aos fatores biocidas de natureza química, física e radiológica (Aksozek *et al.*, 2002; Chatterjee, 1968; Cervero-Aragó *et al.* 2013) é atribuída a sua parede espessa constituída por duas camadas que possuem celulose, o ectocisto e endocisto (Pasternak *et al.*, 1970; Siddiqui *et al.*, 2009; Derda *et al.*, 2009; Garajová *et al.*, 2019). *Acanthamoeba* spp. têm sido implicadas na resiliência ambiental e desenvolvimento de virulência de uma vasta gama de patógenos bacterianos e virais (Rowbotham, 1980; Abu *et al.*, 1998; Schuster, 2002, Thomas, *et al.*, 2004; Lambrecht *et al.*, 2017) e na prevalência destes na água tratada com cloro e nas redes de distribuição de água potável (Thomas, *et al.*, 2004; Thomas *et al.*, 2014).

A desinfecção solar tem sido demonstrada como sendo efetiva para o tratamento microbiológico da água (Reyneke *et al.*, 2018; Pichel *et al.*, 2019). A eficácia da SODIS na inativação de microrganismos inclui a utilização sinérgica da energia térmica e UV solar, independentemente assim de aditivos químicos (Castro-alférez *et al.*, 2016, Castro-alférez *et al.*, 2017).

A quantidade de água processada pela SODIS convencional é condicionada pela disponibilidade de recipientes transparentes, geralmente garrafas de polietileno tereftalato (PET), por serem de baixo custo e não representarem um risco toxicológico e ou carcinogênico significativo para a saúde dos consumidores da água tratada (Schmid *et al.*, 2008).

A maioria dos sistemas de desinfecção solar de água em fluxo contínuo descritos na literatura foram projetados para utilizar essencialmente a energia térmica (SOPAS) ou UVA e UVB solar (Bigoni *et al.*, 2014; Carielo *et al.*, 2016; Castro-Alférez *et al.*, 2018; Reyneke *et al.*, 2018; Domingos *et al.*, 2018; Gill & Price, 2010; Mbonipa *et al.*, 2012). Até onde se sabe, a partir da literatura e das bases patentárias, o sistema de desinfecção solar de água em fluxo contínuo desenvolvido neste trabalho é o primeiro cuja configuração permite utilizar sinérgicamente a energia térmica e a radiação UV solar.

O sistema desenvolvido neste trabalho compreende concentradores de duas configurações distintas: (i) um concentrador cilíndrico parabólico, com uma superfície de concentração de 3,52 m² em que a energia é concentrada sobre um absorvedor tubular (Malato *et al.* 2009), medindo 6 metros de extensão total. (ii) um concentrador Fresnel (Abbas *et al.*, 2012; Ghodbane *et al.*, 2019) com uma superfície de concentração da radiação direta medindo 4,5 m², a radiação é concentrada sobre reatores tubulares transparentes de quartzo, no interior do qual a água flui.

Para maximizar o aproveitamento da UV, a radiação que passa pela armação dos reatores é captada e concentrada por um concentrador cilíndrico parabólico, que por sua vez concentra a radiação sobre um dos reatores, isto permite que a água atravesse os reatores que estão sob irradiação de doses expressivamente elevadas. Isto permitiu que em poucos minutos os cistos e bactérias, recebessem doses bem mais altas de UV do que receberiam durante muitas horas de exposição num processo de SODIS convencional, sob mesmas condições de irradiância (Rashid, 2018).

Este sistema apresenta vantagem quando comparado ao processo convencional de SODIS comum. A SODIS convencional consiste na exposição estática de água à luz solar em garrafas plásticas PET. A quantidade de água tratada está condicionada à disponibilidade destas garrafas que são feitas de películas PET, cujas paredes são essencialmente impermeáveis à radiação UVB (Mbonimpa *et al.* 2012). Assim, se pode dizer que a SODIS convencional usando PET depende do efeito da faixa espectral da radiação UVA e do calor para efetivar a inativação microbiana (GOMEZ-COUSO *et al.*, 2010; Castro-Alfárez *et al.*, 2016; Castro-Alfárez *et al.*, 2017). Sabe-se que a radiação UVA embora importante é muito menos eficaz para a inativação microbiana do que a radiação UVB ou UVC (Jagger, 1967), tendo sido descrito que a radiação UVB é de 2 a 3 ordens de magnitude mais eficaz do que a radiação UVA para inativação microbiana (Setlow, 1974). O sistema de SODIS em fluxo contínuo desenvolvido neste trabalho foi projetado para utilizar o efeito sinérgico da UVA, UVB e o calor do sol para inativar microrganismos recalcitrantes durante um menor tempo de exposição.

Dentre as vantagens do *design* do sistema aqui apresentado, podem-se ainda destacar: (i) possui um potencial para ser utilizado durante a maior parte dos dias do ano, pois o refluxo da água para o tanque de aquecimento permite que o equipamento funcione com o mesmo padrão de eficiência em todas as horas do dia, bem como em diferentes estações do ano (desde que haja radiação direta disponível), obviamente variando a quantidade de água tratada por unidade de tempo em função da irradiância direta disponível. É importante destacar que se forem realizados ajustes no tamanho e/ou extensão do aquecedor se permitirá que a temperatura ideal seja atingida numa única passagem da água pelo aquecedor, podendo não ser necessário que esta reflua para o tanque de aquecimento. Isto reduziria ainda mais o tempo necessário de exposição da água e conseqüentemente incrementaria a quantidade de água tratada por instante e por dia. (ii) O mesmo se aplica para os dias parcialmente nublados, o sistema irá manter o seu padrão de qualidade, no entanto, tratando maior volume de água nos instantes do dia em que o sol estiver descoberto. (iii) O sistema possui uma aplicabilidade em escala industrial, pois permite ajustes de tamanho, de configuração e de automação para o rastreamento autônomo da radiação em dois eixos, em função da quantidade de água que se pretende tratar

por unidade de tempo. (iv) Uma das vantagens diz respeito ao irradiador. A configuração de concentrador Fresnel adotado neste sistema permite acoplamento de uma grande sequência de espelhos ou adição de mais suportes de espelhos, ou ainda a subtração destes, quando não forem necessários. A adição dos espelhos pode ser necessária nos meses, dias ou latitudes de baixa irradiância relativa de UV solar.

A utilização de materiais com maior eficiência óptica, como espelhos de alto rendimento de reflexão na faixa do espectro infravermelho, combinado com a utilização de absorvedores de alta eficiência de captação, conversão e transferência de calor (Avallone *et al.*, 2014; Waghmare & Gulhane, 2018; Ghodbane *et al.*, 2019; Norouzi *et al.* 2020), permitirá aumentar a eficiência do aquecedor solar. Semelhantemente, a utilização de reatores de quartzo de alta pureza (Ayoub & Malaeba, 2019) combinado com a utilização de espelhos de alto rendimento de refletância da faixa do espectro ultravioleta, permitirá a exploração do máximo potencial do sistema projetado e concretizado neste trabalho.

Quando cistos viáveis de *Acanthamoeba* spp. são inoculados em placas com ágar não-nutriente com uma sobrecamada de bactérias, a ocorrência do desencistamento e a consequente visualização de trofozoítos se efetiva em seguida, podendo ser 24 horas depois, ou em até 3 dias. Em alguns casos mais tempo pode ser necessário, especialmente quando estes são expostos a um certo estressor, no entanto, dificilmente excede 9 dias (Aksozek *et al.*, 2002; Sriram *et al.*, 2008). No presente estudo, a visualização de trofozoítos nos controles ocorreu na maioria dos casos após 24 horas, sendo que em poucos casos após 48 horas. As placas foram monitoradas por até 20 dias, deste modo pode-se dizer com segurança que os cistos que não desencistaram durante este período estavam inviáveis.

Uma inativação efetiva de cistos de *A. castellanii* foi obtida em todas as abordagens do tratamento Calor + UV/<1 (Tabela 7).

No presente estudo usando um sistema de desinfecção solar de água em fluxo contínuo, a inativação efetiva foi alcançada na água com baixa turbidez mesmo em amostras coletadas imediatamente após a água ter atingido 60°C. Estes resultados mostram a importância do efeito sinérgico da UV e do calor para inativação efetiva de cistos de *A. castellanii*, como demonstrado por Castro-

Alfárez e seus colegas (2016) bem como Castro-Alfárez e seus colegas (2017) para bactérias.

Nos tratamentos Calor+UV/50UNT e Calor obteve-se resultados parecidos, onde uma inativação efetiva foi obtida em todas abordagens a partir da abordagem 60°C+UV-10/50UNT e 60°C-10, respectivamente. Na abordagem 60°C+UV-0/50UNT e 60°C-0 trofozoítos viáveis foram recuperados, apenas a partir do 6º e 5º dias, respectivamente.

A literatura mostra dados heterogêneos sobre a inativação térmica de cistos de AVL. Enquanto Ludwig e sua equipe (1986) relataram inativação térmica efetiva de cistos de *A. castellanii* a 80°C por 10 minutos, Kilvington (1989) relatou a inativação efetiva de cistos de *A. polyphaga* a partir de 65°C com um tempo de contato igual ou maior a 15 minutos. Por sua vez, Cervero-Aragó e sua equipe (2013) demonstraram que cistos de *Hartmannella vermiformis*, são menos termotolerantes que os cistos de *A. castellanii*. Seus achados mostram que a inativação térmica efetiva de cistos de *Hartmannella vermiformis* foi alcançada a 60°C com um tempo de contato igual e superior a 2 minutos, no entanto, os cistos de *A. castellanii* foram efetivamente inativados a 70°C a partir de um tempo de contato de 2 minutos, no entanto, no estudo de Aksozek e sua equipe (2002) esta foi alcançada a 65°C, por um tempo de contato superior a 5 minutos. Uma inativação térmica de até 4,7 logs de *A. castellanii* - 30010, a mesma cepa usada neste estudo foi relatada por Coulon e sua equipe (2010) a 65°C com um tempo de contato de 10 minutos.

A diversidade de resultados pode ser atribuída às diferenças nas características intrínsecas de cada cepa e à falta de padrões oficiais para ensaios de inativação, o que dificulta a comparação de diferentes estudos sobre o efeito biocida da temperatura sobre os cistos de AVL, especialmente quando os autores usam diferentes meios de cultura, concentrações de células e métodos para quantificar a viabilidade celular (Thomas *et al.*, 2010; Coulon *et al.*, 2010; Cervero-Aragó *et al.*, 2013), ou ainda do tempo que a ameba vem sendo mantida em laboratório.

Os dados obtidos em nossos testes anteriores ao presente estudo (Apêndice B1), realizados em laboratório, de acordo com os procedimentos metodológicos descritos (Heaselgrave *et al.*, 2006) corroboram em parte com pesquisas anteriores (Aksozek *et al.*, 2002), onde os cistos de *A. castellanii* foram

resistentes à exposição à radiação UVC (490 mW/m²) por até 120 minutos. Entretanto, os cistos foram suscetíveis ao efeito sinérgico da radiação UVC e 60°C por 5 minutos (Apêndice B3). Da mesma forma, eles foram suscetíveis quando expostos ao efeito do calor (60°C) por mais de 10 minutos (Apêndice B2), ao contrário dos achados de outros estudos (Aksozek *et al.*, 2002; Ludwig *et al.*, 1986; Cervero -Aragó *et al.*, 2013; Coulon *et al.*, 2010).

Como no presente estudo, Aksozek e sua equipe (2002) relataram o desencistamento tardio de cistos submetidos ao tratamento radiológico em relação aos respectivos controles. Os dados destes autores mostram que quanto maior a dose de radiação à qual os cistos foram submetidos, mais tempo levaram para desencistar. No presente estudo, os cistos que sobreviveram ao efeito sinérgico do calor e da radiação UV (60°C+UV-10/50UNT) levaram mais tempo (6 dias) para desencistar, do que aqueles que sobreviveram ao efeito isolado do calor (5 dias).

Apesar de um desencistamento tardio em relação aos respectivos controles, assim como no estudo dos autores, citados anteriormente, no presente estudo, os trofozoítos apresentaram posteriormente uma multiplicação intensa, e o número de trofozoítos nestas abordagens superou o número de trofozoítos nos respectivos controles.

Pode-se especular que a intensa multiplicação observada deveu-se a ocorrência isolada ou simultânea de dois fatores. Primeiro, que a exposição dos cistos ao efeito do calor e dos oxidantes reativos como OH⁻ e O₃ formados durante a fotólise da água pela UV (Mora & Mohseni, 2018; Chung *et al.*, 2020), ocasionou danos genômicos que levaram a uma multiplicação intensa das células amebianas. Segundo, que o início tardio do desencistamento nas placas com cistos tratados, fez com que a fase logarítmica de crescimento amebiano nestas placas coincidissem com a fase de declínio nas placas controle, devido à escassez de alimentos, a maior parte de trofozoítos havia se encistado.

O tipo de dano provocado pelo calor e/ou da radiação UV sobre os cistos de *Acanthamoeba* spp. que desencistaram tardiamente não foi determinado. Hipoteticamente pode-se assumir que a exposição dos cistos ao efeito sinérgico ou isolado destes fatores biocidas nestas abordagens, desencadeou danos celulares reversíveis que foram reparados (Aksozek *et al.*, 2002), talvez de modo similar como as bactérias *Deinococcus radiodurans* são capazes de reparar de

forma eficaz os danos genômicos causados pela radiação ionizante como a UV (Venkateswaran *et al.*, 2000).

Na abordagem 60°C+UV-0/<1UNT foi alcançada uma inativação efetiva, dos cistos, entretanto o mesmo resultado não foi obtido quando a água estava com alta turbidez (60°C+UV-0/50UNT). Os resultados obtidos do tratamento Calor+UV/50UNT são semelhantes aos do tratamento Calor (Tabela 7).

Esses dados assemelham-se aos obtidos durante os testes com bactérias (Tabela 9) e, confirmam a importância da turbidez para a inativação de cistos pela SODIS, sendo sua eficácia inversamente proporcional ao índice de turvação. Quanto mais alta a turbidez menor a transmitância da água, e isso dificulta o acesso da UV aos microrganismos dispersos na água (Gómez-Couso *et al.*, 2009; Dawney & Pearce, 2012; Haider *et al.*, 2014). A similaridade dos dados nestes dois tratamentos (Calor+UV/50UNT e Calor (Tabelas 7 e 10)) pode ser atribuída ao fato de ambos os resultados poderem resultar unicamente do efeito biocida do calor, pois apesar da UVA e UVB estarem presentes no tratamento Calor+UV/50UNT, o seu efeito possivelmente tornou-se nulo ou inexpressivo devido a alta turbidez da água. Os autores parecem concordar que índices de turvação a partir de 25 UNT começam a comprometer eficácia da SODIS convencional (Gómez-Couso *et al.*, 2009; Dawney & Pearce, 2012).

Outrossim, estes achados reforçam a necessidade de se alcançar uma inativação de todos cistos, e não apenas uma redução significativa durante o tratamento de água para o consumo humano, pois poucos cistos sobreviventes podem permitir uma intensa floração de protozoários bem como muitas bactérias patogênicas endossimbiontes. Assim a água pode vir a ter uma carga microbiana semelhante ou até superior à que possuía antes de ser submetida ao tratamento, principalmente nas situações em que esta precisasse ser armazenada por algum tempo (Rowbotham, 1980; Aksozek *et al.*, 2002; Thomas, *et al.*, 2004; Lambrecht *et al.*, 2017), ou de ser fornecida através da rede de distribuição de água potável (Thomas *et al.*, 2014). Esta pode ser a explicação para o fato de *E. coli* presente na água pasteurizada a 87°C voltar a crescer depois de permanecerem na incubadora por 72 horas (Bigoni *et al.*, 2014).

Pode-se dizer que o sistema de desinfecção solar de água em fluxo contínuo, foi eficaz na inativação de cistos de *A. castellanii* em todos os tratamentos, pois inativação efetiva foi alcançada. O tratamento Calor+UV foi

mais eficaz na inativação de cistos de *A. castellanii* do que o tratamento Calor nas condições de baixa turbidez. Nas condições de alta turbidez o tratamento Calor+UV, apresentou eficácia similar à do tratamento Calor.

A radiação UV tem sido reconhecida como um agente antimicrobiano por aproximadamente 125 anos (Downes & Blunt, 1877). Desde que o efeito sinérgico do calor e radiação UV, na inativação de microrganismos foi elucidada (McGuigan *et al.*, 1998), a compreensão e a aplicação destes fatores no tratamento solar de água aumentou. Uma forte sinergia entre inativação de bactérias pela UV e calor foi observada em temperaturas acima de 45°C (McGuigan *et al.*, 1998; Vivar *et al.*, 2017).

No presente estudo, como esperado, nenhuma UFC/mL das bactérias testadas foi observada nas abordagens envolvendo 60°C, em todos tratamentos nomeadamente: 60°C→UV, 60°C+UV/<1, 60°C+UV/50 e 60°C (Tabela 10). Estes dados estão de acordo com os achados de outros pesquisadores (Carielo *et al.*, 2016; Domingos *et al.*, 2018)

Na maioria dos estudos baseados em sistemas de desinfecção por SOPAS, temperaturas acima de 60°C foram necessárias para a inativação de bactérias, por exemplo, a inativação de *E. coli* foi alcançada a 87°C (Bigoni *et al.*, 2014), ou temperaturas igual ou acima de 66°C para inativar *Legionella* spp., *Pseudomonas* spp. e *Salmonella* spp. (Reyneke *et al.*, 2018). A inativação térmica de *E. coli* foi alcançada a 55°C com um tempo de contato \geq 120 minutos, ou a 60°C num tempo de contato \geq 45 minutos ou ainda a 70°C por um tempo de contato \geq 15 minutos (Kulkarni *et al.*, 2019).

Os dados do presente estudo mostram uma maior eficácia do tratamento Calor→UV em relação aos outros tratamentos, incluindo o tratamento Calor+UV/<1UNT, pois no tratamento Calor→UV não houve crescimento bacteriano nas abordagens 55°C→UV e 60°C→UV. No tratamento Calor+UV/<1 o mesmo resultado foi obtido apenas na abordagem 60°C+UV/<1, sendo que nas restantes abordagens uma redução significativa foi alcançada. Isto por um lado confirma a importância do tempo de exposição das bactérias ao calor para se efetivar a inativação, como nos achados de outros pesquisadores (Kulkarni *et al.*, 2019). Por outro lado, estes dados mostram a importância do efeito sinérgico da UVA, UVB solar e calor (Coohill & Sagripanti, 2008) para se alcançar inativação todas

bactérias durante um tempo tão curto de exposição (<1,5 minutos por litro de água tratada) e em fluxo contínuo.

Sabe-se que a radiação UV solar ao atingir a superfície da Terra contém comprimentos de onda entre 290 e 380 nm, sendo que uma quantidade considerável destes se encontram no espectro UVA (~8% da produção solar) (Coohill, 1996), que é responsável por danos genômicos que na maioria dos casos podem ser reversíveis por mecanismos de reparo celular. Apenas alguns décimos de um por cento da luz solar estão no espectro UVB, mas é nesta faixa que ocorre a maior parte da morte celular pela luz solar (Coohill & Sagripanti, 2008). Além de danos diretos a radiação UV pode desencadear uma série de reações de transferência de elétrons, produzindo-se diferentes espécies reativas de oxigênio (EROs) na água e ou no ambiente intracelular das bactérias e cistos. As EROs são oxidantes muito ativos, especialmente o oxidante reativo OH⁻ (Fujishima *et al.*, 2000). As EROs podem não apenas destruir uma grande variedade de contaminantes químicos na água durante a SODIS, mas também causar danos fatais a microrganismos (Blake *et al.*, 1999). O efeito intracelular das EROs associado a um aumento da temperatura da água acelera o processo de inativação de microrganismos (Castro-Alferez *et al.*, 2016; Castro-Alferez *et al.*, 2017).

A recirculação da água pelo sistema durante o processo de tratamento permite que se consiga incrementar a temperatura para o nível térmico que favoreça a aceleração de inativação de microrganismos pelo efeito sinérgico da UV e calor solares (25°C a 50°C) (Castro-Alferez *et al.*, 2016; Castro-Alferez *et al.*, 2017) mesmo nos dias e ou horas do dia onde a insolação é baixa, como em dias parcialmente nublados ou no início da manhã e nas horas próximas ao crepúsculo. Esta é uma das vantagens deste sistema quando comparado ao disco solar automatizado para desinfecção da água por pasteurização aperfeiçoado por Domingos e sua equipe (2018) cujo horário de funcionamento seguro é entre 10h e 15h, onde uma temperatura de 60°C pode ser alcançada.

É importante destacar que a implementação do tratamento Calor coincidiu com dias relativamente mais quentes que o dia em que se implementou o tratamento Calor+UV/50UNT, isto pode explicar a aparente maior redução média de UFC no tratamento Calor, pois temperaturas do ar mais baixas favorecem um rápida perda de calor pela superfície exterior do absorvedor para o ambiente

(Imadojemu, 1995; Avallone *et al.*, 2014), principalmente quando este não se encontra separado do ambiente por um vácuo termo isolante, que se pode criar através da colocação de um tubo de vidro (de alta transmitância ao espectro infravermelho e visível) concêntrico e de diâmetro maior que o tubo preto (Rashid, 2018; Waghmare & Gulhane, 2018; Ghodbane *et al.*, 2019; Norouzi *et al.* 2020). Isto em parte explica os resultados do pós-teste de Tukey apresentados na tabela 12, onde uma diferença estatisticamente insignificativa entre o controle e a abordagem envolve 45°C foi obtida apenas no tratamento Calor+UV/50UNT.

Quando se empregou o tratamento Calor→UV a inativação de todas bactérias foi obtida pela ação sinérgica da UV e a temperatura de até 55°C, entretanto, nos restantes tratamentos a inativação de todas as espécies bacterianas testadas observou-se quando a temperatura de até 60°C foi envolvida (Tabela 10).

Os cistos de *A. castellanii* se mostraram mais resistentes que as bactérias.

A inativação efetiva dos cistos foi alcançada apenas pelo efeito de UVA e UVB, aquecendo-se a água no mínimo até 60°C. Quando a água de baixa turbidez (1UNT) foi testada, a inativação efetiva de cistos foi observada mesmo quando as amostras foram coletadas imediatamente após atingir 60°C no fundo do tanque de aquecimento. Para que se alcançasse uma inativação efetiva de cistos de *A. castellanii* na água com alta turbidez (50 UNT) foi necessário que no mínimo a água continuasse fluindo pelo irradiador de UV durante pelo menos mais 10 minutos depois que esta atingiu 60°C.

Quando foi usado o efeito isolado do calor, a inativação de cistos de *A. castellanii*, foi alcançada a partir de uma temperatura de 60°C como um tempo de exposição mínimo de 10 minutos.

Na literatura são descritos vários sistemas de tratamento em batelada e alguns em fluxo contínuo, com distintas configurações baseados em SOPAS, tratando água em temperaturas que variam de 55°C a 87°C (Carielo *et al.* 2016; Bigoni *et al.*, 2014; Reyneke *et al.*, 2018, Domingos *et al.*, 2018). Por exemplo Bigoni e sua equipe (2014) testaram um pasteurizador baseado em um concentrador cilíndrico parabólico com um absorvedor colocado no foco, no qual a inativação de *E. coli* foi alcançada a 87°C, produzindo-se no máximo 66 litros e água em dias ensolarados. Carielo e sua equipe (2016), utilizaram um sistema

baseado em um trocador plano de calor, alcançando uma produção máxima de 30 litros de água por dia em dias ensolarados. Reyneke e sua equipe (2018) testaram um sistema de pasteurização de água de chuva armazenada em tanques, baseado em um trocador plano de calor, e estimaram que cerca de $12,81 \text{ kg/h}^{-1}$ de água pasteurizada era produzida na temperatura entre 53°C a 58°C , enquanto que cerca de $16,25 \text{ kg/h}^{-1}$ de água pasteurizada poderia ser produzida se fosse considerada temperatura de 66°C . Domingos e sua equipe (2018) testaram um disco solar parabólico automatizado para desinfecção da água por pasteurização de água em fluxo contínuo, adaptado a partir do protótipo patenteado por Cruz e Bomant (2013). A água atingiu uma temperatura média entre 58°C e 65°C em dias com radiação solar média de 150 W m^{-2} . A inativação efetiva de *E. coli* foi alcançada a 60°C , com uma vazão de 63 litros por hora, permanecendo estável entre 10h e 15h.

Mbonimpa e sua equipe (2012) construíram um protótipo de sistema para desinfecção por UVB solar de água em fluxo contínuo, no qual uma redução significativa para *E. coli* foi obtida, mediante uma exposição por 54,5 minutos. Gill & Price (2010) implementaram um sistema de desinfecção solar de água em fluxo contínuo, baseado essencialmente em UV, funcionando num limiar mínimo de 25 W/m^2 , por pelo menos 8 horas por dia, a uma vazão de 10,4 litros/minuto e um tempo de residência médio de 20 minutos. Neste sistema a inativação de coliformes foi obtida.

O sistema de fluxo contínuo projetado e construído neste trabalho é o primeiro a utilizar a sinergia da radiação UVA, UVB e calor solares em um processo de SODIS. O sistema provou ser capaz de inativar bactérias e formas de resistência de microrganismos recalcitrantes como são os cistos de *A. castellanii* nas condições reais de tratamento. O sistema pode funcionar durante todo o período ensolarado do dia, tratando cada vez maiores volumes de água em menos tempo, na medida que a insolação do dia aumenta, e vice-versa.

Nas dimensões do sistema testado neste trabalho foi alcançada uma produtividade média de 40 litros por hora, tendo como alvo os cistos de *Acanthamoeba castellanii*. Uma produção média de 360 litros de água por dia foi alcançada em dias ensolarados funcionando das 08h e 30min às 16h e 30min. O reaproveitamento do calor da água tratada para pré-aquecer a água bruta

poderá diminuir o tempo de permanência da água no sistema e consequentemente aumentar o volume de água tratada por hora.

As melhorias no sistema como a otimização do tamanho do aquecedor, para não tornar necessária a recirculação da água, a utilização de espelhos e absorvedores de maior rendimento, bem como reatores de quartzo de alta pureza, e a automação do rastreamento solar em dois eixos incrementará em grande medida a eficácia e a quantidade de água tratada por dia, nas condições similares às testadas.

7. CONCLUSÃO

O protótipo de um sistema de desinfecção solar de água em fluxo contínuo que utilize o efeito sinérgico da radiação térmica e UV, foi desenvolvido com sucesso.

Até onde se sabe a partir da literatura e da base patentearia, este é o primeiro sistema desenvolvido que utiliza o efeito sinérgico da radiação térmica e UV solares, na desinfecção de água em fluxo contínuo.

O sistema foi capaz de inativar efetivamente os cistos de *Acanthamoeba castellanii*, bem como células de *Escherichia coli*, *Salmonella Typhimurium*, *Enterococcus faecalis* e *Pseudomonas aeruginosa*, nas condições naturais de insolação e temperatura. A inativação de cistos de *A. castellanii* na água foi alcançada ao submetê-los ao efeito sinérgico da UVA e UVB e uma temperatura de 60°C durante 10 minutos. A inativação de *E. coli*, *S. Typhimurium*, *E. faecalis* e *P. aeruginosa* na água foi obtida, quando a água pré-aquecida até 55°C, foi feita passar uma única vez pelo irradiador onde recebeu UVA e UVB.

Tendo como alvo os cistos de *A. castellanii*, o sistema em escala experimental desenvolvido nesta pesquisa processa 1 litro de água em cada 90 segundos, mantendo-se estável das 08h e 30min as 16h e 30min, em dias ensolarados.

O sistema é eficaz e tem potencial para ser aplicado como uma alternativa para o suprimento público de água potável em larga escala.

7.1. Perspectivas

Construir unidades do sistema de desinfecção solar de água em fluxo contínuo em tamanho real, usando materiais de alto rendimento óptico e, que seja capaz de rastrear de forma autônoma a radiação solar em dois eixos.

Testar o sistema para a degradação de resíduos de fármacos na água, e para inativação de vírus.

Instalar uma estação piloto de tratamento solar de água em uma comunidade desprovida de um sistema convencional de abastecimento de água potável.

8. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- Abbas, R., Montes, M.J., Piera, M., Martínez-Val, J.M. 2012. Solar radiation concentration features in Linear Fresnel Reflector arrays. *Energy Conversion and Management*. 54:133–144.
- Abu K.Y., Gao, L.Y., Stone, B. J., Venkataraman, C. & HARB, O.S., 1998. Invasion of protozoa by *Legionella pneumophila* and its role in bacterial ecology and pathogenesis. *Applied and Environmental Microbiology*. 64:3127–3133.
- Acra, A., Karahagopian, Y., Raffoul, Z., Dajani, R., 1980. Disinfection of oral rehydration solutions by sunlight. *THE LANCET*. 316(8206):1257-1258. Doi:10.1016/S0140-6736(80)92530-1
- Acra, A., Raffoul, Z., Karahagopian, Y., 1984. Solar disinfection of drinking water and oral rehydration solutions: guidelines for household application in developing countries.
- Adl, S.M, Simpson, A.G., Farmer, M.A., Andersen, R.A., Anderson O R, Barta, J.R., *et al.*, 2005. The new higher level classification of eukaryotes with emphasis on the taxonomy of protists. *J. Eukaryot Microbiol*. 52:399-451. Doi:10.1111/j.1550-7408.2005.00053.x
- Ahmed, W., Gyawali, P., Toze, S., 2015. Quantitative PCR measurements of *Escherichia coli* including shiga toxin-producing *E. coli* (STEC) in animal feces and environmental waters. *Environ. Sci. Technol*. 49:3084–3090.
- Ajdad, H., Benyakhlef, S, Al Mers, A., Bouatem, A., A., Boutammacht, N., El Alj, S., Merroun, O., 2014. Heat transfer analysis of a cylindrical receiver for a linear Fresnel System. 25-27. DOI:10.1109/IREC.2014.6826972
- Aksozek, A., McClellan, K., Howard, K., Niederkorn, J. Y., Alizadeh, H., 2002. Resistance of *Acanthamoeba castellanii* Cysts to Physical, Chemical, and Radiological Conditions. *Journal of Parasitology*. 88(3):621-623. Doi: 10.1645/0022-3395(2002)088[0621:ROACCT]2.0.CO;2
- Alscher, R.G., Donahue, J.L., & Cramer, C.L., 1997. Reactive oxygen species and antioxidants: relationships in green cells, *Physiologia Plantarum*. 100(2):224–233.

- Avallone, E., Sato, A.I., Scalon, V.L., and Padilha, A., 2014. Analysis of thermal efficiency of a modified solar collector type evacuated tube. *Eng. Térmica*. 13:3-8
- AWWA (American Water Works Association), 1990. *Water Quality and Treatment: A Handbook of Community Water Supplies*. 4th ed. McGraw-Hill; New York, NY, USA.
- Ayoub, G.M., Malaeba, L., 2019. Solar Water Disinfection: UV Radiation Transmittance of Various Solar Reactor Tubes. *Energy Procedia*. 157:498-51. Doi:10.1016/j.egypro.2018.11.214
- Baldursson, S., & Karanis, P., 2011. Waterborne transmission of protozoan parasites: review of worldwide outbreaks - an update 2004-2010. *Water Res.* 45(20): 6603-6614. Doi:10.1016/j.watres.2011.10.013. PMID:22048017.
- Berk, S.G., Faulkner, G., Garduno, E., Joy, M.C., Ortiz-Jimenez, M.A., Garduno, R.A., 2008. Packaging of live *Legionella pneumophila* into pellets expelled by *Tetrahymena* spp. does not require bacterial replication and depends on a Dot/Icm-mediated survival mechanism. *Appl Environ Microbiol.* 74:2187–2199. Doi:10.1128/AEM.01214-07
- Bertelli, C., & Greub, G., 2012. Lateral gene exchanges shape the genomes of amoeba-resisting microorganisms. *Front. Cell. Infect. Microbiol.*, 2:110. Doi.org/10.3389/fcimb.2012.00110
- Bigoni, R., Kötzsch, S., Sorlini, S., Egli, T., 2014. Solar water disinfection by a Parabolic Trough Concentrator (PTC): Flowcytometric analysis of bacterial inactivation, *J. Cleaner Prod.* 67:62–71. Doi:10.1016/j.jclepro.2013.12.014
- Birtles, R.J., Rowbotham, T. J., Storey, C., Marrie, T. J., Raoult, D., 1997. *Chlamydia*-like obligate parasite of free-living amoebae. *Lancet*. 349:925–926. Doi:10.1016/S0140-6736(05)62701-8
- Blake, D.M., Maness, P.C., Huang, Z, Wolfrum, E.J., Huang, J., 1999. Application of the photocatalytic chemistry of titanium dioxide to disinfection and the killing of cancer cells. *Sep. Purif. Method* 28:1–50.

- Bosshard, F., Bucheli, M., MEUR, Y., Egli, T., 2010. The respiratory chain is the cell's Achilles' heel during UVA inactivation in *Escherichia coli*. *Microbiology-Sgm* 156. Doi:10.1099/mic.0.038471-0
- Boyer, M., Yutin, N., Pagnier, I., Barrassi, L., Fournous, G., Espinosa, L., Robert, C., Azza, S., SUN, S., Rossmann, M. G., Suzan-Monti, M., La Scola, B., Koonin, E. V., Raoult, D., 2009. Giant marseillevirus highlights the role of amoebae as a melting pot in emergence of chimeric microorganisms. *Proc Natl Acad Sci USA*. 106:21848–21853. Doi:10.1073/pnas.0911354106.
- Boyle, M.A., Sichel, C., Fernández-Ibáñez, P., Arias-Quiroz, G.B., Iriarte-Puña, M., McGuigan, K.G., 2008. Identifying the bactericidal limits of Solar Disinfection (SODIS) of water under real sunlight conditions, *Appl. Environ. Microbiol.* 74:2997–3001.
- Boyle, M.A., Sichel, C., Fernández-Ibáñez, P., Arias-Quiroz, G.B., Iriarte-Puña, M., McGuigan, K.G., 2008. Identifying the bactericidal limits of Solar Disinfection (SODIS) of water under real sunlight conditions, *Appl. Environ. Microbiol.* 74:2997–3001.
- BR (Boletim da Republica), 2004. Regulamento sobre a qualidade da água para o consumo humano. Diploma ministerial n.º180/2004 de 15 de Setembro.
- Caldnazza. 2016. Disponível em: <<http://www.caldnazza.com/2012/02/arco-cordaflecha-eangulo-de-um-arco.html#.V0OB4DUrLIV>>. Acessado em: 16 de setembro. 2018.
- Carielo D.S.G., tiBA, C., & Calazans, G.M.T., 2016. Solar pasteurizer for the microbiological decontamination of water, *Renewable Energy*. 87:711–719.
- Carielo, G., Calazans, G., Lima, G., Tiba, C., 2017. Solar water pasteurizer: Productivity and treatment efficiency in microbial decontamination, *Renewable Energy*, Elsevier. 105(C):257-269. Doi:10.1016/j.renene.2016.12.042
- Castrillon, Juan C; Orozco, Lina P., 2013. *Acanthamoeba* spp. como parásitos patógenos y oportunistas. *Rev. chil. infectol.* Santiago. 30(2):147-155, abr. Doi:10.4067/S0716-10182013000200005

- Castro-Alfárez, M., Polo-López, M. I., Marugán, J., Fernández-Ibáñez, P., 2017. Mechanistic modeling of UV and mild-heat synergistic effect on solar water disinfection. 316:111-120. Doi:10.1016/j.cej.2017.01.026
- Castro-Alfárez, M., Polo-López, M.I., Marugán, J., fernández-Ibáñez, P., 2018. Validation of a solar-thermal water disinfection model for *Escherichia coli* inactivation in pilot scale solar reactors and real conditions, *Chem. Eng. J.* **331**:831 – 840. Doi:10.1016/j.cej.2017.09.015
- Castro-Alfárez, M., Polo-López, M.I. & Fernández-Ibáñez, P., 2016. Intracellular mechanisms of solar water disinfection. *Scientific Reports.* 6:38145.
- Cervero-Aragó, S., Rodríguez-Marínez, S., Canals, O., Salvadó, H., Araujo, R.M., 2013. Effect of thermal treatment on free-living amoeba inactivation. *Journal of Applied Microbiology.* 116 (3):1364-5072. Doi:10.1111/Jam.12379
- Chatterjee, S., 1968. X-ray induced changes in the cell body of amoeba. *Z. Biol.* 116:68–80.
- Chigueru, T., Fraidenaich, N., Moszkowicz, M., Cavalcant, E.S.C., Lyra, F.J.M., Nogueira, A.M.B., Gallegos, H.G., 2000. Atlas Solarimétrico do Brasil: Banco de dados Solarimétricos. 1ª edição. Ed. Universitária da UFPE.
- Chung, K-H., Kim, B-J., Kim, S-J., Park, Y-K. and Jung, S-C., 2020. Correlation of hydrogen generation and optical emission properties of plasma in water photolysis on perovskite photocatalysts. *Int J Hydrogen Energ.* doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.01.089.
- Colle, S., Pereira, E.B., 1998. Atlas de irradiação solar do Brasil – 1ª. versão para irradiação global derivada de satélite e validada na superfície. Brasília: Instituto Nacional de Meteorologia.
- Conroy, R.M., Elmore-Meegan, M., Joyce, T., McGuigan, K.G. & Barnes, J., 1996. Solar disinfection of drinking water and diarrhoea in Maasai children: a controlled field trial. *Lancet.* 348:1695–1697.
- Conroy, R.M., Meegan, M.E., Joyce, T., McGuigan, K., Barnes, J., 2001. Solar disinfection of drinking water protects against cholera in children under 6 years of age, *Arch. Dis. Child.* 85:293–295

- Coohill, T.P., Sagripanti, J.L., 2008. Overview of the Inactivation by 254 nm Ultraviolet Radiation of Bacteria with Particular Relevance to Biodefense. *Photochem Photobiol.* 84(5):1084-90. Doi:10.1111/j.1751-1097.2008.00387.x
- Coohill, T.P., 1996. Stratospheric ozone loss, ultraviolet effects and action spectroscopy. *Adv. Space. Res* 18(12), 27–33. DOI: 10.1016/0273-1177(96)00024-5
- Coulon, C., Collignon, A., McDonnell, G., Thomas, V., 2010. Resistance of *Acanthamoeba* cysts to disinfection treatments used in health care settings. *J Clin Microbiol.* 48:2689–2697. DOI:10.1128/JCM.00309-10
- Craun, G.F., Fraun, M.F., Calderon, R.L, Beach, M.J., 2006. Waterborne outbreaks reported in the United States. *J Water Health.* 4:19–30.
- Cruz Y Bomant, S. L., 2013. Disco colector de radiación solar, concentrador de múltiples haces independientes de rayos reflejados especularmente sobre un plano receptor fijo, Pat. 201200347.
- Daniel, L. A., Brandão, C.C.S., Guimarães, J.R., libânio, M., Luca, S.J., 2001. Processos de Desinfecção e Desinfetantes Alternativos na Produção de Água Potável. ABES. PROSAB 2. Rio de Janeiro. 139.
- Dawney, B. & Pearce, J.M., 2012. Optimizing the solar water disinfection (SODIS) method by decreasing turbidity with NaCl. *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development.* 2(2):87-94. Doi:10.2166/washdev.2012.04
- De Jonckheere, J.F., 1991. Ecology of *Acanthamoeba*. *Reviews of infectious diseases.* Chicago. 13:385-387.
- Derda, M., Winięcka-Krusnell, J., Linder, M.B., & Linder, M., 2009. Labeled *Trichoderma reesei* Cellulase as a Marker for *Acanthamoeba* Cyst Wall Cellulose in Infected Tissues. *Appl Environ Microbiol.* 75(21):6827–6830. Doi:10.1128/AEM.01555-09
- Domingos, M., Sanchez, B., Vieira-DA-Motta, O., Samarão, S. S., & Canela, M. C., 2018. A new automated solar disc for water disinfection by pasteurization. *Photochem. Photobiol. Sci.* 18, 905-911. Doi:10.1039/C8PP00316E

- Downes, A., Blunt, T.P., 1877. Researches on the effect of light upon bacteria and other organisms. Proceedings of the Royal Society of London 26, 488-500. Doi:10.1098/rspl.1877.0068
- Downing, M. W. & Blunt, T.P., 1878. Researches on the effect of light upon Bacteria and other organisms. Royal Society. 26:179-184. Doi:10.1098/rspl.1877.0070
- Dubey, J.P., 1998. *Toxoplasma gondii* oocyst survival under defined temperatures. Journal of Parasitology. 84:862–865.
- Dumètre, A., Le Bras, C., Baffet, M., Meneceur, P., Dubey, J.P., Derouin, F., Duguet, J.P., Joyeux, M., Moulin, L., 2008. Effects of ozone and ultraviolet radiation treatments on the infectivity of *Toxoplasma gondii* oocysts. Veterinary Parasitology. 153:209–213.
- Efstratiou, A., Ongerth, J.E., Karanis, P., 2017. Waterborne transmission of protozoa parasites: review of worldwide outbreaks - an update 2011-2016. Water Res. 114, 14-22.
- Faulkner, G., Berk, S. G., Garduno, E., Ortiz-Jimenez, M.A., Garduno, R.A., 2008. Passage through *Tetrahymena tropicalis* triggers a rapid morphological differentiation in *Legionella pneumophila*. J Bacteriol. 190:7728– 7738. Doi:10.1128/JB.00751-08
- Fenner, L., Richet, H., Raoult, D., Papazian, L., Martin, C., La Scola, B., 2006. Are clinical isolates of *Pseudomonas aeruginosa* more virulent than hospital environmental isolates in amebal co-culture test? Crit Care Med. 34:823–828. Doi:10.1097/01.CCM.0000201878.51343.F1.
- Freeman, M. & Hul, C., 2003. Optics Butterworth-Heinemann. ISBN 9780750642484. Acessado no dia 25 de julho de 2019, em: https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Optics&publication_year=2003&author=M.%20Freeman&author=C.%20Hull
- Fuchs, B. B., Mylonakis, E., 2006. Using non-mammalian hosts to study fungal virulence and host defense. Curr Opin Microbiol. 9:346–351. Doi:10.1016/j.mib.2010.06.004

- Fujishima, A., Rao, T.N., Tryk, D.A., 2000. Titanium dioxide photocatalysis, J. Photochem. Photobio. C. 1:1–21.
- Garajová, M., Mrva, M., Vaškovicová, N., Martinka, M., Melicherová, J., Valigurová, A., 2019. Cellulose fibrils formation and organisation of cytoskeleton during encystment are essential for *Acanthamoeba* cyst wall architecture. *Sci Rep* 9, 4466.
- Garre, A., Egea, J.A., Esnoz, A., Palop, A., Fernandez, P.S., 2019. Tail or artefact? Illustration of the impact that uncertainty of the serial dilution and cell enumeration methods has on microbial inactivation. *Food Research International*. 119, 76-83
- Ghodbane, M., Boumeddane, B., Said, Z., Bellos, E., 2019. A numerical simulation of a linear Fresnel solar reflector directed to produce steam for the power plant. *Journal of Cleaner Production*. 231:494-508. Doi:10.1016/j.jclepro.2019.05.201
- Gill, L.W., Price, C., 2010. Preliminary observations of a continuous flow solar disinfection system for a rural community in Kenya. *Energy* 35(12):4607-4611. Doi:10.1016/j.energy.2010.01.008
- Gomez-Couso, H., Fontan-Sainz, M., Ares-Mazas, E., 2010. Thermal contribution to the inactivation of *Cryptosporidium* in plastic bottles during solar water disinfection procedures, *Am. J. Trop. Med. Hyg.* 82:35–39. Doi:10.4269/ajtmh.2010.09-0284
- Gómez-Couso, H., Fontán-Saínez, M., Sichel, C., Fernández-Ibáñez, P., Ares-Mazás, E., 2009. Efficacy of the solar water disinfection method in turbid waters experimentally contaminated with *Cryptosporidium parvum* oocysts under real field conditions. *Tropical Medicine and International Health*. 14(6):620–627. Doi:10.1111/j.1365-3156.2009.02281.x
- Greub G, Raoult D., 2004. Microorganisms resistant to free-living amoebae. *Clinical Microbiology Reviews*. 17:413-33.
- Guzman-Herrador, B., Carlander, A., Ethelberg, S., Freiesleben de Blasio, B., Kuusi, M., Lund, V., Löfdahl, M., MacDonald, E., Nichols, G., Schönning, C., Sudre, B., Trönnberg, L., Vold, L., Semenza J.C., Nygård, K., 2015.

- Waterborne outbreaks in the Nordic countries, 1998 to 2012. *Euro Surveill.* 18:20(24).
- Haider, H., Tesfamariam, S., Ali, W., Haydar, S. and Sadiq, R., 2014. Modeling exposure period for solar disinfection (SODIS) under varying turbidity and cloud cover conditions. *Clean Techn Environ Policy.* 16:861–874.
- Halliday, D., Resnick, R., Walker, J., 2016. *Fundamentos de física.* 10^a ed. Rio de Janeiro: LTC.
- Hamilton, K., Reyneke, B., Waso, M., Clements, T., Ndlovu, T., Khan, W., DiGiovanni, K., Rakestraw, E., Montalto, F., Haas, C.N., Ahmed, W., 2019. A global review of the microbiological quality and potential health risks associated with roof-harvested rainwater tanks. *npj Clean Water.* 2:7.
- Harding, A.S., Schwab, K.J., 2012. Using limes and synthetic psoralens to enhance solar disinfection of water (SODIS): a laboratory evaluation with norovirus, *Escherichia coli*, and MS2, *Am. J. Trop. Med. Hyg.* 86:566–572
- Heaselgrave, W., Kilvington, S., 2011. The efficacy of simulated solar disinfection (SODIS) against *Ascaris*, *Giardia*, *Acanthamoeba*, *Naegleria*, *Entamoeba* and *Cryptosporidium*, *Acta Trop.* 119. p. 138–143.
- Heaselgrave, W., Patel, N., Kehoe, S.C., Kilvington, S., Mcguigan, K.G., 2006. Solar disinfection of poliovirus and *Acanthamoeba polyphaga* cysts in water –a laboratory study using simulated sunlight, *Lett. Appl. Microbiol.* 43:125–130. Doi:10.1111/j.1472-765X.2006.01940.x
- Horn, M., Wagner, M., 2004. Bacterial endosymbionts of free-living amoebae. *Journal of Eukaryotic Microbiology.* 51:509-15.
- Imadojemu, H.E., 1995. Concentrating parabolic collectors: A patent survey. *Energy Convers. Mgmt.* 36(4):225-237. Doi:10.1016/0196-8904(94)000588
- Jagger, J., 1967. *Introduction to Research in Ultraviolet Photobiology.* Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.
- Kahn, F.H. And Visscher, B.R., 1975. Water disinfection in the wilderness – a simple method of iodination. *West J Med.* 122:450–453.

- Kalogirou, S.A., 2009. Solar energy engineering: processes and systems. 1ª edição Academic Press, Elsevier, EUA.
- Kandlikar, S.G., Vij, S.K., 1978. Geometrical aspects of a cylindrical parabolic collector. in Proceedings of the International Solar Energy Congress. New Delhi. India. Pergamon Press Inc.1254-1258.
- Kehoe, S.C., Barer, M.R., Devlin, L.O., McGuigan, K.G., 2004. Batch process solar disinfection is an efficient means of disinfecting drinking water contaminated with *Shigella dysenteriae* type I, Lett. Appl. Microbiol. 38:410–414. Doi:10.1111/j.1472-765X.2004.01515.x
- Kilvington, S. & Price, J., 1990. Survival of *Legionella pneumophila* within cysts of *Acanthamoeba polyphaga* following chlorine exposure. Journal of Applied Bacteriology. 68:519–525.
- Kilvington, S., 1989. Moist-heat disinfection of pathogenic *Acanthamoeba* cysts. Lett. Appl. Microbiol. 9:187–189.
- Kroth, F. A., 2016. Construção e avaliação de um concentrador solar cilíndrico parabólico para aquecimento de água residencial. Monografia. UNIVATES. Lajeado.
- Kulkarni, A., Kapley, A., Dhodapkar, R.S., Nagababu, P., Rayalu, S., 2019. Plasmonics driven engineered pasteurizers for solar water disinfection (SWADIS). Journal of Hazardous Materials. 369:474-482. Doi:10.1016/j.jhazmat.2019.02.052
- La Scola, B., Boyadjiev, I., Greub, G., Khamis, A., Martin, C., Raoul, T.D., 2003. Amoeba-resisting bacteria and ventilator-associated pneumonia. Emerg Infect Dis. 9:815–821.
- Lodi, C., 2011. Perspectivas para a Geração de Energia Elétrica no Brasil Utilizando a Tecnologia Solar Térmica Concentrada. Dissertação de M.Sc., Universidade Federal do Rio de Janeiro, PPE/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Lonnen, J. Kilvingtona, S. Kehoe, S.C. Al-Touatic, F. McGuiganc. K.G., 2005. Solar and photocatalytic disinfection of protozoan, fungal and bacterial

microbes in drinking water. *Water Research*. 39:877-883.
Doi:10.1016/j.watres.2004.11.023

Lorenzo-Morales, J., Khan, N.A., & Walochnik J., 2015. An update on *Acanthamoeba keratitis*: diagnosis, pathogenesis and treatment. *Parasite*. 22:10,

Ludwig, I.H., Meisler, D.M., Rutherford, I., Bican, F.E., Langston, R.H. & Visvesvara, G.S., 1986. Susceptibility of *Acanthamoeba* to soft contact lens disinfection systems. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 27:626–628.

Luttenbarck, B.B., Costa T. C. R., 1994. Água. Saúde e Desinfecção. Série Manuais. n.13. CETESB. São Paulo. p. 59.

Madronich, S., 2007. Analytic Formula for the Clear-sky UV Index. *Photochemistry and Photobiology*. 83(15):37–1538. Doi:10.1111/j.1751-1097.2007.00200.x

Malagueta, D.C., 2012. Tutorial de Geração Heliotérmica. CRESESB / CEPEL. Acessado em 26 de janeiro de 2019 Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&catid=161.

Malakoff, D., 2002. Water quality: microbiologists on the trail of polluting bacteria. *Science*. 4(5564):2352–2353.

Malato, S., fernandez-Ibáñez, P., Maldonado, M.I., Blanco, J., Gernjak, W., 2009. Decontamination and disinfection of water by solar photocatalysis: recent overview and trends. *Catal. Today*. 147-159.

Marciano-Cabral, F., Cabral, G., 2003. *Acanthamoeba* spp. as Agents of Disease in Humans. *Clin. Microbiol. Rev*. 16(2):273-07.

Marston, B. J., Plouffe, J.F., File, T.M., Hackman, B. A., Salstrom, S.J., Lipman, H.B., Kolczak, M.S. & Breiman, R.F., 1997. Incidence of community-acquired pneumonia requiring hospitalization – results of a population-based active surveillance study in Ohio. *Archives of Internal Medicine*. 157:1709–1718.

- Mateus, A.L., Reis, D. d'Á., Mortimer, E. F., Paula, H. F., Brasileiro, L. B. Galeria, *et al.*, Pontociência. UFMG – várias experiências, um só lugar. Disponível em:<http://pontociencia.org.br/galeria/?content%2Fpictures3%2FQuimicaAmbiental%2FUvozonio.jpg>. Acessado em 26 de janeiro de 2019.
- Matrai, B.B., 2008. Projeto e construção de um aquecedor solar concentrador. Acesso em: 09 de setembro de 2018. disponível em: http://sites.poli.usp.br/d/pme2600/2008/artigos/art_tcc_011_2008.pdf.
- Maya, C., Beltrán, N., Jiménez, B., Bonilla, P., 2003. Evaluation of the UV disinfection process in bacteria and amphizoic amoebae inactivation. *Water Sci. Technol.: Water Supply*. 3(4):285–291.
- Mazur, T., Hadas, E. & Iwanicka, I., 1995. The duration of the cyst stage and the viability and virulence of *Acanthamoeba* isolates. *Trop. Med. Parasitol.* 46:106–108.
- Mbonimpa, E.G., Vadheim, Bryan, Blatchley III, E.R., 2012. Continuous-flow solar UVB disinfection reactor for drinking water. *water research*. 46:2344-2354. Doi:10.1016/j.watres.2012.02.003
- McGuigan, K.G., Conroy, R.M., Mosler, H., Du Preez, M., Ubomba-Jaswa, E., Fernandez-Ibañez, P., 2012. Solar water disinfection (SODIS): A review from bench-top to roof-top. *Journal of Hazardous Materials*. 235(236):29-46. Doi:10.1016/J.Jhazmat.2012.07.053
- McGuigan, K.G., Méndez-Hermida, F., Castro-Hermida, J.A., Ares-Mazás, E., Kehoe, S.C., Boyle, M., Sichel, C., Fernández-Ibañez, P., Meyer, B.P., Ramalingham, S. & Meyer, E.A., 2006. Batch solar disinfection inactivates oocysts of *Cryptosporidium parvum* and cysts of *Giardia murisin* drinking water. *Journal of Applied Microbiology*. 10(2):453-463. Doi:10.1111/j.1365-2672.2006.02935.x
- McGuigan, K.G., Samaiyar, P., Du Preez, M., Conroy, R.M., 2011. High compliance randomized controlled field trial of solar disinfection of drinking water and its impact on childhood diarrhea in rural Cambodia. *Environmental Science & Technology*. 45 (18):7862-7867.

- McGuigan, K.G., Joyce, T.M., Conroy, R.M., Gillespie, J.B., Elmore-Meegan, M., 1998. Solar disinfection of drinking water contained in transparent plastic bottles: characterizing the bacterial inactivation process. *J Appl Microbiol.* 84(6):1138-1148. Doi:10.1046/j.1365-2672.1998.00455.x
- Mckenzie, R. L., Björn, L. O., Bais, A., & Ilyasd, M., 2003. Changes in biologically active ultraviolet radiation reaching the Earth's surface. *Photochemical and Photobiological Sciences.* 2(1):5–15.
- Mendez-Hermida, F., Ares-Mazas, E., McGuigan, K.G., Boyle, M., Sichel, C., Fernández-Ibáñez, P., 2007. Disinfection of drinking water contaminated with *Cryptosporidium parvum* oocysts under natural sunlight and using the photocatalyst TiO₂. *J. Photochem. Photobiol.* 88:105–111.
- Mendez-Hermida, F., Castro-Hermida, J.A., Ares-Mazas, E., Kehoe, S.C. & McGuigan, K.G., 2005. Effect of batch process solar disinfection on survival of *Cryptosporidium parvum* oocysts in drinking water. *Appl Environ Microbiol.* 71:1653–1654.
- Midões, C., Fernandes, J., 2001. Água subterrânea: Conhecer para Proteger e Preservar. Impressão: GrafiTime, UNESCO. Acessado em 06 de Setembro, de 2018. em: unesdoc.unesco.org/images/0024/002440/244041por.pdf.
- Mora, A.S. and Mohseni, M., 2018. Temperature dependence of the absorbance of 185 nm photons by water and commonly occurring solutes and its influence on the VUV advanced oxidation process. *Environ. Sci.: Water Res. Technol.*, 4, 1303-1309.
- Nakagawa, H., Koike, N., Ehara, T., Hattori, T., Narimatsu, A., Kumakura, S., Goto, H., 2019. Corticosteroid eye drop instillation aggravates the development of *Acanthamoeba* keratitis in rabbit corneas inoculated with *Acanthamoeba* and bacteria. *Sci Rep* 9, 12821. Doi.org/10.1038/s41598-019-49128-7
- Norouzi, A.M., Siavashi, M., Oskouei, M.H.K., 2020. Efficiency enhancement of the parabolic trough solar collector using the rotating absorber tube and nanoparticles. *Renewable Energy.* 145:569-584. Doi:10.1016/j.renene.2019.06.027

- Oddo, B.D., 2006. Infections caused by free-living amebas. Historical commentaries, taxonomy and nomenclature, protozoology and clinicopathologic features. *Rev Chilena Infectol.* 23:200-14.
- Ogata, H., La Scola, B., Audic, S., Renesto, P., Blanc, G., Robert, C., Fournier, P. E., Claverie, J. M., Raoult, D., 2006. Genome sequence of *Rickettsia bellii* illuminates the role of amoebae in gene exchanges between intracellular pathogens. *PLoS Genet.* v. 2. p. 76. Doi: 10.1371/journal.pgen.0020076.
- OMS - Organização Mundial de Saúde, 2001. Água e Saúde. Brasil: OMS.
- Pagnier, I., Merchat, M., Raoult, D., La Scola, B., 2009. Emerging Mycobacteria spp. in cooling towers. *Emerg Infect Dis.* 15:121–122. Doi: 10.3201/eid1501.071356.
- Pandey PK, Soupir M.L., 2013. Assessing the impacts of *E. coli* laden streambed sediment on *E. coli* loads over a range of flows and sediment characteristics. *J Am Water Resour Assoc.* 4(6):1261–1269
- Pandey, P.K., Kass, P.H., Soupir, M.L., Biswas, S., Singh, V.P., 2014. Contamination of water resources by pathogenic bacteria. *AMB Express*, 4:51.
- Pasternak, J.J., Thompson, J.E., Schultz, T.M., & Zachariah, K., 1970. A scanning electron microscopic study of the encystment of *Acanthamoeba castellanii*. *Experimental Cell Research* 60:290–298. Doi:10.1016/0014-4827(70)90517-3
- Peak, M. J., Peak, J.G., Moehring, M. P., & Webb, R. B., 1984. Ultraviolet action spectra for DNA dimer induction, lethality, and mutagenesis in *Escherichia coli* with emphasis on the UVB region. *Photochemistry and Photobiology.* 40(5):613–620.
- Peak, M.J. & Peak, J.G., 1982. Single-strand breaks induced in *Bacillus subtilis* DNA by ultraviolet light: action spectrum and properties. *Photochemistry and Photobiology.* 35(5):675–680.
- Perry, R.H., Green, D.P., 1997. Chemical engineers' handbook. 7. ed. Nova York: McGraw-Hill.

- Pfeifer, G.P. & Besaratinia, A., 2011. UV wavelength-dependent DNA damage and human non-melanoma and melanoma skin cancer. *Photochem. Photobiol. Sci.* 11:90-97. Doi:10.1039/C1PP05144J
- Philippe, N., Legendre, M., Doutre, G., Coute, Y., Poirot, O., Lescot, M., ARSLAN, D., Seltzer, V., Bertaux, L., Bruley, C., Garin, J., Claverie, J.M., abergel, C., 2013. *Pandoraviruses*: amoeba viruses with genomes up to 2.5 Mb reaching that of parasitic eukaryotes. *Science*. 341:281–286.
- Pichel, N. Vivar, M., Fuentes, M., 2019. The problem of drinking water access: A review of disinfection technologies with an emphasis on solar treatment methods. *Chemosphere*. 218:1014-1030.
- Portaria Nº 2.914, de 12 de dezembro de 2011
- Pukatzki, S., Kessin, R.H., Mekalanos, J.J., 2002. The human pathogen *Pseudomonas aeruginosa* utilizes conserved virulence pathways to infect the social amoeba *Dictyostelium discoideum*. *Proc Natl Acad Sci USA*. 99:3159–3164. Doi:10.1073/pnas.052704399.
- Quaite, F.E., Sutherland, B.M., & Sutherland, J. C., 1992. Quantitation of pyrimidine dimers in DNA from UVB-irradiated alfalfa (*Medicago sativa* L.) seedlings. *Applied and Theoretical Electrophoresis*. 2(6):171–175.
- Rashid, A., 2018. Use of a Parabolic Trough Collector in the Kingdom of Bahrain Conditions for Water Desalination in Sustainability and Resilience Conference: Mitigating Risks and Emergency Planning. *KnE Engineering*.122–134. DOI 10.18502/keg.v3i7.3077
- Rastogi, R.P., Singh, S.P., Häder, D.-P. & Sinha, R.P., 2010. Detection of reactive oxygen species (ROS) by the oxidant-sensing probe 2',7'-dichlorodihydrofluorescein diacetate in the cyanobacterium *Anabaena variabilis* PCC 7937. *Biochemical and Biophysical Research Communications*. 397(3):603–607
- Reyneke, B., Cloete, T.E., Khan, S. & Khan, W., 2018. Rainwater harvesting solar pasteurization treatment systems for the provision of an alternative water source in peri-urban informal settlements, *Environ. Sci.: Water Res. Technol.*, 4:291-302. Doi:10.1039/C7EW00392G

- Rice, A.L., Sacco L., Hyder A., Black R., 2000. Malnutrition as an underlying cause of childhood deaths associated with infectious diseases in developing countries. *Bull WHO*. 78(10):1207-1221.
- Rodríguez-Zaragoza S., 1994. Ecology of free-living amoebae. *Critical Reviews in Microbiology*. 20(3):225–41.
- Rowbotham, T.J., 1980. Preliminary report on the pathogenicity of *Legionella pneumophila* for freshwater and soil amoebae. *J Clin Pathol*. 33:1179–1183.
- Rowbotham, T.J., 1983. Isolation of *Legionella pneumophila* from clinical specimens via amoebae, and the interaction of those and other isolates with amoebae. *J Clin Pathol*. 36:978–986.
- Scheid, P., 2018. Free-Living Amoebae as Human Parasites and Hosts for Pathogenic Microorganisms. *Proceedings*, 2(11):692
- Schmid, P., Kohler, M. Meierhofer, R. Luzi, S., Wegelin, M., 2008. Does the reuse of PET bottles during solar water disinfection pose a health risk due to the migration of plasticisers and other chemicals into the water? *Water Research*. 42(20):5054-5060. Doi:10.1016/J.Watres.2008.09.025
- Schuster, F.L., 2002. Cultivation of Pathogenic and Opportunistic Free-Living Amebas. *Clinical Microbiology Reviews*. 15(3):342–354
- Setlow, R.B., 1974. Wavelengths in sunlight effective in producing skin cancer - theoretical analysis. *Proc Natl Acad Sci USA*. 71(9):3363-3366. Doi:10.1073/pnas.71.9.3363
- Siddiqui, R., Khan, N.A., Jarroll, E.L., 2009. The cyst wall carbohydrate composition of *Balamuthia mandrillaris*. *Parasitology Research* 104(6):1439–1443. Doi: 10.1007/s00436-009-1346-8
- Silva, D.D.; Pruski, F.F., 2000. Gestão de recursos hídricos. Aspectos legais, econômicos, administrativos e sociais. Porto alegre: associação brasileira de recursos hídricos. 659.
- Sinha, R. P., Dautz, M., & Häder, D.P., 2001. A simple and efficient method for the quantitative analysis of thymine dimers in cyanobacteria, phytoplankton and macroalgae. *Acta Protozoologica*, vol. 40(3):187–195.

- Sinha, R.P. & Häder, D.P., 2002. UV-induced DNA damage and repair: a review. *Photochemical and Photobiological Sciences*. 1(4):225–236. 2002.
- Smith, R.J., Kehoe, S.C., McGuigan, K.G., Barer, M.R., 2001. Effects of simulated solar disinfection of water on infectivity of *Salmonella typhimurium*, *Lett. Appl. Microbiol.* 31:284–288.
- Sommer, 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., 1997. SODIS – an emerging water treatment process, *J. Water SRT– Aqua*. 46:127–137.
- Sperling, M. V., 2005. *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais.
- Sriram, R., Shoff, M., Booton, G., Fuerst, P., Visvesvara, G.S., 2008. Survival of *Acanthamoeba* Cysts after Desiccation for More than 20 Years. *Clinical Microbiology*. 46(12):4045–4048. Doi:10.1128/JCM.01903-0
- Stein, B., Rahmsdorf, H. J., Steffen, A., Litfin, M., & Herrlich, P., 1989. UV-induced DNA damage is an intermediate step in UV-induced expression of human immunodeficiency virus type 1, collagenase, c-fos, and metallothionein. *Molecular and Cellular Biology*. 9(11):5169–5181.
- Steinert, M., Heuner, K., 2005. *Dictyostelium* as host model for pathogenesis. *Cell Microbiol.* v. 7. p. 307–314. Doi:10.1111/j.1462-5822.2019.00493.x.
- Strauss, A., Dobrowsky, P. H., Ndlovu, T., Reyneke, B., & Khan, W., 2016. Comparative analysis of solar pasteurization versus solar disinfection for the treatment of harvested rainwater, *BMC Microbio.* 16:289.
- Thomas, V., Bouchez, T., Nicolas, V., Robert, S., Loret, J. F., & LÉVI, Y., 2004. Amoebae in domestic water systems: resistance to disinfection treatments and implication in *Legionella* persistence. *Journal of Applied Microbiology*. 97:950–963. Doi:10.1111/j.1365-2672.2004.02391.x

- Thomas, V., Herrera-Rimann, K., Blanc, D.S., Greub, G., 2006. Biodiversity of amoebae and amoeba-resisting bacteria in a hospital water network. *Appl Environ Microbiol.* 72:2428–2438. Doi:10.1128/AEM.72.4.2428-2438.2006
- Thomas, V., McDonnell, G., Denyer, S.P. and Maillard, J.Y., 2010. Free-living amoebae and their intracellular pathogenic microorganisms: risks for water quality. *FEMS Microbiol Rev.* 34:231–259.
- Tiba, C., 2000. Atlas Solarimétrico do Brasil – banco de dados terrestres. Recife: Editora Universitária da UFPE.
- UNICEF, 2015. An AMCOW Country Status Overview, Water Supply and Sanitation in Mozambique: Turning Finance into Services for 2015 and Beyond. <https://www.wsp.org/sites/wsp/files/publications/CSO-Mozambique.pdf>. Acessado em 24 junho de 2019.
- Venkateswaran, A., McFarlan, S.C., Ghosal, D., Minton, K.W., Vasilenko, A., Makarova, K., Wackett, L.P., & Daly, M.J., 2000. Physiologic determinants of radiation resistance in *Deinococcus radiodurans*. *Applied and Environmental Microbiology.* 66:2620–2626. DOI: 10.1128/AEM.66.6.2620-2626.2000
- Victorino, C.J.A., 2007. Planeta água morrendo de sede: uma visão analítica na metodologia do uso e abuso dos recursos hídricos. Editora EDIPUCRS. Porto Alegre.
- Visvesvara, G.S., 1991. Classification of *Acanthamoeba*. *Rev Infect Dis.* 13(5):S369-72.
- Vivar, M., Pichel, N., Fuentes, M., López-Vargas, A., 2017. Separating the UV and thermal components during real-time solar disinfection experiments: The effect of temperature. *Solar Energy.* 146:334-341.
- Waghmare, S.A., Gulhane, N.P., 2018. Optimization of receiver height in compound parabolic collector by optical analysis and experimental method. *Optik.* 157:1331–1341. Doi:10.1016/j.ijleo.2017.12.110
- Wainwright, K.E., Lagunas-Solar, M., Miller, M.A., Barr, B.C., Gardner, I.A., Pina, C., Melli, A.C., Packham, A.E., Zeng, N., Truong, T., Conrad, P.A., 2007.

Physical inactivation of *Toxoplasma gondii* oocysts in water. *Applied and Environmental Microbiology*. 73:5663–5666.

Wang, T. V. & Smith, K. C., 1986. Postreplication repair in ultraviolet-irradiated human fibroblasts: formation and repair of DNA double-strand breaks. *Carcinogenesis*. 7(3):389–392.

Wegelin, M., Canonica, S., Mechsner, K., Fleischmann, T., Pesaro, F., Metzler, A., 1994. Solar water disinfection: scope of the process and analysis of radiation experiments, *J. Water SRT – Aqua*. 43:154–169.

WHO (World Health Organization), 2000. *The world health report: Making a difference*. Geneva, World Health Organization.

WHO, 2006. *Guidelines for Safe Recreational Water Environments—Volume 2 Swimming Pools and Similar Environments*. World Health Organization; Geneva, Switzerland.

WHO, 2019. *Results of Round II of the WHO International Scheme to Evaluate Household Water Treatment Technologies*. World Health Organization; 2019. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.

WHO/UNICEF, 2015. *25 YEARS Progress on Sanitation and Drinking Water: 2015 Update and MDG Assessment*, NY UNICEF World Heal. Organ., New York, 4.

WHO/UNICEF. 2017. *Progress on Drinking Water, Sanitation and Hygiene: Update and SDG Baselines*. Geneva: WHO and UNICEF, Disponível em: www.unicef.org/publications/files/Progress_on_Drinking_Water_Sanitation_and_Hygiene_2017.df. Acesso in: 26 Junho 2018.

Wierzchowski, K. L. & Shugar, D., 1961. Photochemistry of cytosine nucleosides and nucleotides, II. *Acta Biochimica Polonica*. 8:219–234.

Winięcka-Krusnell, J, Linder, E., 2001. Bacterial infections of free-living amoebae. *Research in Microbiology*. 152:613-19.

Xie, Z., Wang, Y., Liu, Y., & Liu, Y., 2009. Ultraviolet-B exposure induces photo-oxidative damage and subsequent repair strategies in a desert

cyanobacterium *Microcoleus vaginatus* Gom. European Journal of Soil Biology. 45(4):377–382.

Zancul, M.S., 2009. Água e Saúde. Rev. Eletrônica de Ciências. Disponível em: <http://cdcc.sc.usp.br/ciencia/artigos/art32/atualidades>, acesso em 06 Setembro 2018.

Zhou, P., Giovanni, G.D.D., Meschke, J.S., & Dodd, M.C., 2014. Enhanced Inactivation of *Cryptosporidium parvum* Oocysts during Solar Photolysis of Free Available Chlorine. Environ. Sci. Technol. Lett. 7:453-458.

APÊNDICE A

Equações usadas para o cálculo das dimensões dos concentradores cilíndrico parabólicos

$$A = \frac{\alpha \cdot \pi \cdot R}{180^\circ} \quad (\text{eq. A1})$$

Sendo,

$$A = 1,25 \text{ m}$$

$$\alpha = 70^\circ$$

$$1,25 = \frac{70^\circ \cdot \pi \cdot R}{180^\circ} \quad R = 1,0231 \text{ m (raio)}$$

$$C = 2 \cdot R \cdot \text{sen}(\alpha/2) \quad (\text{eq. A2})$$

Sendo,

$$R = 1,0231 \text{ m}$$

$$\alpha = 70^\circ$$

$$C = 2 \cdot 1,0231 \cdot \text{sen}(70^\circ/2)$$

$$C = 1,17 \text{ m (abertura da parábola)}$$

$$F = R - (R \cdot \cos \alpha) \quad (\text{eq. A3})$$

Sendo,

$$R = 1,0231 \text{ m}$$

$$\alpha = 70^\circ$$

$$F = 1,0231 - (1,0231 \cdot \cos 70^\circ/2)$$

$$F = 0,1931 \text{ m (altura da parábola)}$$

Legenda

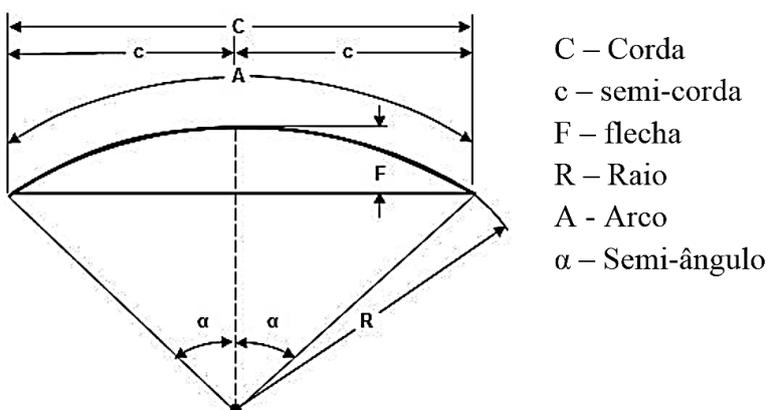


Figura A: Raio, corda, flecha e ângulo de um arco de círculo

Fonte: adaptado de Caldazza, 2016; Kandlikar e Vij (1978).

APÊNDICE B

Apêndice B:1 Efeito da exposição aos UVC na viabilidade de cistos de *Acanthamoeba castellanii*.

Alvo	Tratamento	Tempo de exposição (minutes)	Resultado
Cistos de <i>A. castellanii</i>	UVC (490 mW/m ²)	5	Resistente
		10	Resistente
		15	Resistente
		25	Resistente
		30	Resistente
		45	Resistente
		60	Resistente
		90	Resistente
		120	Resistente

Apêndice B2: Efeito da exposição ao calor na viabilidade de cistos de *Acanthamoeba castellanii*.

Alvo	Tratamento	Tempo de exposição (minutes)	Resultado
Cistos de <i>A. castellanii</i>	60°C	5	Resistente
		10	Resistente
		15	Susceptível
		20	Susceptível

Apêndice B3: Efeito sinérgico do UVC e do calor na viabilidade de cistos de *Acanthamoeba castellanii*

Alvo	Tratamento	Tempo de exposição (minutes)	Resultado
Cistos de <i>A. castellanii</i>	60°C + UVC (490 mW/m ²)	5	Susceptível
		10	Susceptível
		15	Susceptível
		20	Susceptível

APÊNDICE C

Apêndice C1: Matriz de cálculos de estimação da radiação UV no interior dos reatores 1 e 2.

Data	<i>I_{UV}D</i>	*<i>A_{sc}</i>	* <i>R_{CP}</i>	*$\frac{1}{8}$	*<i>T_r</i> / <i>I_{UV1} ou 2</i>
06/02/19	225	1012.5	756.3375	94.54219	80.6
07/03/19	175	787.5	588.2625	73.53281	62.7
26/03/19	150	675	504.225	63.02813	53.7
14/03/19	200	900	672.3	84.0375	71.6
29/01/19	150	675	504.225	63.02813	53.7
31/01/19	275	1237.5	924.4125	115.5516	98.5
01/02/19	250	1125	840.375	105.0469	89.6
19/02/19	150	675	504.225	63.02813	53.7
26/03/19	200	900	672.3	84.0375	71.6

Os valores são expressos em mW/m²

Apêndice C2: Matriz de cálculos de estimação da radiação UV no interior do reator 3.

Data	<i>I_{UV}D</i>	<i>A_{sc}</i>	* <i>R_{CP}</i>	* <i>R_{cs}</i>	* <i>T_r</i>	+ <i>I_{UVr1} ou 2</i>	<i>I_{UVr3}</i>
06/02/19	225	1012.5	756.3375	564.9841	481.649	80.59721	562.2
07/03/19	175	787.5	588.2625	439.4321	374.6159	62.68672	437.3
26/03/19	150	675	504.225	376.6561	321.0993	53.73148	374.8
14/03/19	200	900	672.3	502.2081	428.1324	71.64197	499.8
29/01/19	150	675	504.225	376.6561	321.0993	53.73148	374.8
31/01/19	275	1237.5	924.4125	690.5361	588.6821	98.50771	687.2
01/02/19	250	1125	840.375	627.7601	535.1655	89.55246	624.7
19/02/19	150	675	504.225	376.6561	321.0993	53.73148	374.8
26/03/19	200	900	672.3	502.2081	428.1324	71.64197	499.8

Os valores são expressos em mW/m²