

**UNIVERSIDADE ESTADUAL NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO CIÊNCIAS NATURAIS**

MARCELO DOMINGOS

**DESINFECÇÃO DE ÁGUA POR ENERGIA SOLAR: UTILIZAÇÃO DE
SODIS E SOPAS**

CAMPOS DOS GOYTACAZES

2019

MARCELO DOMINGOS

**DESINFECÇÃO DE ÁGUA POR ENERGIA SOLAR: UTILIZAÇÃO DE
SODIS E SOPAS**

Tese de Doutorado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Naturais, do Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Ciências Naturais, na área de concentração em Ciências Ambientais.

Orientadora: Prof^a Dra. Maria Cristina Canela

Co-orientador: Dr. Benigno Sanchez Cabrero

CAMPOS DOS GOYTACAZES

2019

MARCELO DOMINGOS

DESINFECÇÃO DE ÁGUA POR ENERGIA SOLAR: UTILIZAÇÃO DE SODIS E SOPAS

Tese de Doutorado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Naturais, do Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Ciências Naturais, na área de concentração em Ciências Ambientais.

Aprovado em 29 de maio de 2019

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Dr.^a Maria Cristina Canela (Orientadora) – UENF

Prof. Dr. Benigno Sanchez Cabrero (Co-orientador) – CIEMAT

Prof. Dr. Vicente, de Paulo Santos de Oliveira – IFF

Prof. Dr. Enrico Mendes Saggiaro - FIOCRUZ

Prof.^a Dr.^a Marina Satika Suzuki – UENF

Dedico esta Tese aos meus pais, João Domingos e Teresinha de Jesus Domingos, que muitas vezes se doaram para que eu pudesse realizar meus sonhos. Quero dizer que essa conquista não é só minha, mas nossa. Tudo que consegui só foi possível graças a Deus e ao amor, apoio e dedicação que vocês sempre tiveram por mim. E graças à vocês, que são as pessoas mais importantes no mundo pra mim, os obstáculos foram ultrapassados, vitórias foram conquistadas e alegrias divididas.

AGRADECIMENTOS

Embora o simples bater de asas de uma borboleta não cause um tornado do outro lado do mundo, certamente pequenas mudanças nas condições iniciais de grandes sistemas, podem levar a mudanças drásticas nos resultados. E assim começou de verdade meu doutorado depois de dez meses de matrícula quando a Professora Dr^a Maria Cristina Canela me aceitou como orientadora em seu grupo de pesquisa. Então, o primeiro e especial agradecimento vai para a Dr^a Maria Cristina, de todo coração, pela grande oportunidade, pelo conhecimento compartilhado durante os anos de doutorado, por não medir esforços para que sempre tivesse as melhores condições, por ajudar a realizar um sonho que sempre tive que era conhecer outros países e partir daí ampliar significativamente meus conhecimentos e minha perspectiva de fazer ciência. Obrigado por compartilhar comigo o dia a dia no laboratório. Obrigado pela sua paciência, por seus conselhos, sua confiança, seus puxões de orelha, por acreditar que eu era capaz de realizar este desafio.

Jefe Dr. Benigno Sanchez, solo tengo palabras de agradecimiento. Gracias por haber apostado por mí, por todo tu apoyo y confianza. He aprendido muchísimo a tu lado, tanto personal como profesionalmente. Beni, gracias por aceptar dirigir esta tesis en la distancia, para mi has sido esencial para desarrollarla. Gracias por tus consejos, por guiarme y gracias de corazón por tu papel crítico, siempre muy constructivo.

Agradeço em especial ao grupo GPQA. Muito obrigado aos meus colegas de laboratório Murilo, Camila, Thayana, Ruth, Poliana, Rodrigo, Iago, Izabela, Rafael e Juliana, pelo apoio na hora de desenvolver os experimentos, discussão e troca de ideias. Sempre lembrarei dos momentos produtivos de conversa, orientação e conselhos dos amigos.

Agradeço a Dr^a Pilar Fernandez Ibañez e Dr^a Inmaculada Polo Lopez pela oportunidade de desenvolver o doutorado sanduíche na Plataforma Solar de Almeria, um dos melhores centros de pesquisa de toda Europa na área de desinfecção de água utilizando energia solar. E lá, conhecer pessoas fundamentais para minha formação e crescimento como Samira, Irene, Ana, Azhara, Tereza, Ivan,

Chus, Laura, Melina, Konstantina e Kostas. Em especial Isa, Eli e Agustín, profissionais fantásticos que são o pilar de toda pesquisa desenvolvida naquele centro, foi uma honra e privilégio ter compartilhado tempo com essas pessoas.

Agradeço a Anaína e Diego que realizaram iniciação científica no Disco Solar e contribuíram com muito trabalho, esforço e dedicação para os resultados aqui alcançados. Da mesma forma agradeço Uíris, Silvio, Michel e Juarez pelo suporte técnico e material no Disco Solar

Agradeço o Professor Dr. Olney Vieira da Motta e Dr^a Solange Silva Samarão por disponibilizar os equipamentos e estrutura do Laboratório de Sanidade Animal e pelas análises realizadas neste laboratório.

Ao amigo Engenheiro Adriano Henrique Nunes Barcelos e a empresa Rio Térmica Engenharia, pelo tratamento profissional e essencial suporte na recuperação e montagem do Disco Solar.

Ao governo brasileiro e seus órgãos de fomento CAPES, CNPq e FAPERJ por fornecer suporte financeiro durante o meu doutorado.

A minha família João, Teresinha, Mauricio, Jaqueline e Camila que são minha base, meu apoio, minha estrutura incondicional. Em especial minha esposa Camila que está ao meu lado todos os dias, me dando amor e carinho, me proporcionando o essencial para alcançar o sucesso que tanto busco.

A todas as pessoas que de uma forma ou outra, me ajudaram a chegar a este momento da minha vida

Muito Obrigado!

“Ninguém é suficientemente perfeito, que não possa aprender com o outro e, ninguém é totalmente destituído de valores que não possa ensinar algo ao seu irmão.”

São Francisco de Assis

RESUMO

A importância de propor soluções para o suprimento de água potável no mundo é inquestionável, principalmente em regiões subdesenvolvidas que não tem acesso a água tratada, essencial para a sobrevivência humana. Atualmente, 2 bilhões de pessoas em todo o mundo sofrem sem acesso a água potável e esse número é ainda maior quando se trata de falta de saneamento básico. No Brasil, 21 milhões de pessoas, que vivem em áreas rurais, não tem acesso a água tratada e encanada e são obrigadas a buscar alternativas em “poços rasos”, que são fonte de contaminação microbológica. A desinfecção de água por energia solar é uma alternativa eficiente, segura e sustentável. O objetivo da tese é propor novas alternativas de desinfecção em águas contaminadas com microrganismos patogênicos para pequenas comunidades rurais, comparando a eficiência e utilidade prática de dois sistemas de desinfecção solar. Para isto foi utilizado um Disco Solar que promove a desinfecção por pasteurização solar e um reator cilíndrico parabólico composto (CPC) que promove a desinfecção utilizando a radiação UVA do Sol como principal agente. Os experimentos no disco solar demonstraram desinfecção de água mineral previamente autoclavada e contaminada com *E.coli* a concentrações iniciais de 10^6 UFC.mL⁻¹ em fluxo contínuo, alcançando uma temperatura de 60°C, produzindo 315 litros de água desinfetada em 5 horas de trabalho. O reator CPC construído no Brasil, com volume final de 40 litros foi eficiente para tratar *E.coli* após 3 horas, com radiação UVA média de 20 W.m⁻² a temperatura de 37°C. Após colocar uma tampa de vidro borossilicato entre a parte refletora e o tubo e fechar as laterais com isolamento térmico, a temperatura da água alcançou 44°C e o tempo de desinfecção diminuiu para 1 hora, otimizando o sistema de desinfecção do reator. Em todos os experimentos, os testes de recrescimento das bactérias foram negativos, comprovando a sua eliminação. Os protótipos foram testados ainda com água naturalmente contaminada (*Raoultella ornithinolytica*, *Escherichia.coli*, *Shigella sonnei*, *Klebsiella pneumoniae*, *Citrobacter freundii*, *Pseudomonas aeruginosa* e *Pseudomonas oleovorans*) proveniente de poços rasos do assentamento Oziel Alves. Tanto o disco solar como os reatores CPC foi capaz de promover a desinfecção desta água, eliminando todas as bactérias detectadas inicialmente. Comparando os dois sistemas, o disco solar possui maior produtividade diária, porém menor robustez e necessidade de constante manutenção. Os reatores CPC podem ser replicados e devidamente isolados, um volume maior de água diária pode ser tratado para que atenda às necessidades básicas de uma comunidade e as pessoas possam consumir esta água livre de contaminantes biológicos.

Palavras-chave: Pasteurização Solar (SOPAS), Desinfecção Solar (SODIS), Concentrador Parabólico Composto (CPC), Disco Solar.

ABSTRACT

The importance of proposing solutions for the supply of drinking water in the world is unquestionable, especially in underdeveloped regions that do not have access to treated water, essential for human survival. Today, 2 billion people worldwide suffer from no access to safe drinking water, and that number is even greater when it comes to lack of basic sanitation. In Brazil, 21 million people living in rural areas do not have access to water and are forced to seek alternatives in "shallow wells," which are a source of microbiological contamination. The disinfection of water by solar energy is an efficient, safe and sustainable alternative. The objective of the thesis is to propose news alternatives of disinfection for water contaminated with pathogenic microorganisms used in rural areas comparing the efficiency and practical utility of two solar disinfection systems. For this, a Solar Disc was developed that promotes disinfection by solar pasteurization and a composite parabolic cylindrical reactor (CPC) that promotes disinfection using the Sun's UVA radiation as the main agent. The experiments in the solar disk demonstrated disinfection of water with *E. coli* at initial concentrations of 10^6 CFU.mL⁻¹ in a continuous flow, reaching a temperature of 60 °C, producing 315 liters in 5 working hours. The CPC reactor built in Brazil, with a final volume of 40 liters, was able to treat *E.coli* in 3 hours with mean UVA radiation of 20 W.m⁻² at 37 °C. Performing an isolation system, temperature of water reached 44°C and the disinfection time decreased to one-hour Reactor optimizing the disinfection system. The prototypes were also tested with naturally contaminated water (*Raoultella ornithinolytica*, *Escherichia.coli*, *Shigella sonnei*, *Klebsiella pneumoniae*, *Citrobacter freundii*, *Pseudomonas aeruginosa* e *Pseudomonas oleovorans*) coming from shallow wells of the Oziel Alves settlement. Both the solar disk and the CPC reactors were able to promote the disinfection of this water, eliminating all the bacteria detected initially. Comparing these two systems, the solar disk has higher daily productivity, but less robustness and need for constant maintenance than CPC. CPC reactors can be replicated and properly isolated, a larger volume of daily water can be treated to meet the basic needs of a community.

Keywords: Solar Pasteurization (SOPAS), Solar Disinfection (SODIS), Compound Parabolic Concentrator (CPC), Solar Disc.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tipos de Radiação solar.....	35
Figura 2 - Movimento da Terra em torno do Sol e as estações no hemisfério Sul. ..	36
Figura 3 - Mudança anual na posição solar no céu para o hemisfério sul.....	37
Figura 4 - Caminho aparente do Sol no céu, durante o dia (nascente e poente)	38
Figura 5 - Descrição gráfica da técnica SODIS	39
Figura 6 - Principais danos biológicos causados pelos diferentes espectros de UV	40
Figura 7 - Modificações estruturais químicas do DNA durante a exposição à luz solar. Formação de CPDs, 6,4- Pirimidina Pirimidona e isômeros de valência de Dewar.....	42
Figura 8 - Diferentes vias iniciadas a partir da radiação UVB e UVA do Tipo I e II. .	44
Figura 9 - Estados de Oxidação do Oxigênio	45
Figura 10 - Ciclo interno de ROS, antes da adição de luz.....	47
Figura 11 - Danos induzidos pela luz UV ao microrganismo	49
Figura 12 - Efeito da temperatura na taxa de crescimento e as consequências moleculares para a célula. As três temperaturas cardiais variam nos diferentes organismos.....	52
Figura 13 - Danos Induzidos pela Temperatura em Microrganismo	54
Figura 14 - Coletor de placa plana	57
Figura 15 - Pasteurizador solar para tratamento de água. (a) Dimensões; (b) Esquema do protótipo.	57
Figura 16 - Diagrama esquemático do ciclo operacional do sistema de pasteurização solar	58
Figura 17 - Um diagrama esquemático do perfil superior e lateral do sistema de tratamento de pasteurização solar de captação de águas pluviais	59
Figura 18 - Protótipo do coletor solar.	60
Figura 19 - Sistema de Pasteurização Solar da Água: (1) Pasteurizador Solar com coletor de alumínio e vidro; (2) Reservatório de água de 50L; (3) Caixa de abastecimento de 310L; (4) Reservatório de água de 50L; (5) Pasteurizador Solar sem coletor e sem vidro; (6) Sistema de aquisição de dados; (7) Sensor de temperatura equipamento 1; (8) Sensor de temperatura equipamento 2; (9) Medidor de radiação; (10) Lâmpada UV.	61

Figura 20 - Sistema PTC (<i>Parabolic Trough Concentrator</i>) utilizado para a pasteurização de água	62
Figura 21 - Coletor de Disco Parabólico	63
Figura 22 - Coletor de Disco Parabólico usado para desinfecção de água	63
Figura 23 - Esquema de reflexão de um coletor Fresnel	64
Figura 24 - Desenho do Disco Solar utilizado para desinfecção de água	67
Figura 25 - A) topo superior do reator exposto à radiação solar concentrada e pintado de preto para máximo de absorção; B) Serpentina interna no reator; C) Junta de vedação de Vitón.....	68
Figura 26 - Preparação e colocação dos espelhos primários no suporte	69
Figura 27 - Focalização dos espelhos primários.	69
Figura 28 - Estrutura de sustentação do Disco Solar	70
Figura 29 - Disco solar montado na UENF. 1 – Placa fotovoltaica para geração de energia para a bateria que alimenta o sistema de rotação do disco. 2 – Espelho secundário que direciona o foco para a parte central do sistema. 3 – Parte central onde fica o reator. 4- Roda dentada responsável pela rotação do disco através de um motor. 5 – Espelhos primários nos quais há incidência direta do sol e que são focalizados no espelho secundário. 6 – Compartimento de armazenamento da bateria que alimenta o sistema.....	71
Figura 30 - Calorímetro Hy-cal usado em testes de potência e a placa usada para medir as coordenadas.....	74
Figura 31 - Uma visão geral do Disco Solar e zonas térmicas	75
Figura 32 - Configuração de experimento microbiológico realizado no Disco Solar .	78
Figura 33 - Mecanismo de detecção de coliformes totais.....	79
Figura 34 - Método de detecção de <i>E.coli</i>	80
Figura 35 - Técnica de Quantificação de Coliformes Totais e coliformes Fecais por Colilert	81
Figura 36 - Fotografia de colônias de <i>E. coli</i> cultivadas em placa de Petri de LB Agar colocando gotas de diluições de 10 vezes (D0, D1, D2 e D3) de uma amostra de 10^6 UFC.mL ⁻¹	82
Figura 37 - Medições de concentração da radiação em um calorímetro de modelo Hy-Cal C-1301-A-30-72, Padrão de Referência 149331 ao longo do dia no reator. .	83
Figura 38 - Medições de concentração de radiação ao longo dos anos no Disco Solar.....	84

Figura 39 - Rampa de temperatura do Disco Solar	86
Figura 40 - Comportamento da Temperatura de saída da água no reator do Disco Solar em 23 de maio de 2016	87
Figura 41 - Variação da temperatura de saída da água no disco solar e intensidade solar ao longo do período de 8:30h até as 15:30h em 10 de janeiro de 2017	88
Figura 42 - Variação da Temperatura de saída do Disco em 16 de março de 2018	88
Figura 43 - Resultado das análises microbiológicas pelo método Colilert	90
Figura 44 - Resultado das análises microbiológicas pelo método Colilert após incidência de UV	91
Figura 45 - Resultados quantitativos da água contaminada passada pelo Disco Solar método Colilert	92
Figura 46 - Resultados quantitativos da água contaminada passada pelo Disco Solar método de diluições seriadas	93
Figura 47 - Experimento realizado no Disco Solar mantendo a temperatura a 60 °C, avaliando o volume total	95
Figura 48 - Módulos dos reatores utilizados na Espanha - Reator em W (tipo CPC) e Reator em U	99
Figura 49 - Protótipo do Reator CPC localizado na PSA	100
Figura 50 - Reator CPC construído no Brasil	100
Figura 51 - Comparação dos espectros de Transmitância dos diferentes materiais	101
Figura 52 - Desenho esquemático de CPC com um ângulo de aceitação de 90° ..	102
Figura 53 - Dimensões e cotas do Reator CPC construído no Brasil	103
Figura 54 - Diferentes vistas do reator CPC - (A) Vista Frontal, (B) Vista de trás superior, (C) Vista lateral	105
Figura 55 - SODIS em reator piloto com água de chuva simulada. (A) Experimentos SODIS em Reator W e Reator U para <i>E.coli</i> , (B) Experimentos SODIS em Reator W e Reator U para <i>E.faecalis</i>	109
Figura 56 - SODIS em reator piloto com água de chuva simulada com aquecimento prévio. (A) Experimentos SODIS em Reator W e Reator U para <i>E.coli</i> com aquecimento de 30 min 29°C a 32°C (B) Experimentos SODIS em Reator W e Reator U para <i>E.faecalis</i> com aquecimento	110
Figura 57 – SODIS em reator piloto com água de chuva simulada com aquecimento prévio. (A) Experimentos SODIS em Reator W e Reator U para <i>E.coli</i> com	

aquecimento de 60 min 32°C a 37°C (B) Experimentos SODIS em Reator W e Reator U para <i>E.faecalis</i>	111
Figura 58 - SODIS em reator piloto com água de chuva simulada com aquecimento prévio. (A) Experimentos SODIS em Reator CPC e Reator U para <i>E.coli</i> com aquecimento de 90 min 31°C a 39°C (B) Experimentos SODIS em Reator CPC e Reator U para <i>E.faecalis</i> com aquecimento	112
Figura 59 - SODIS em reator CPC construído no Brasil com <i>E.coli</i> ATCC 25922..	113
Figura 60 - Experimento SODIS no reator CPC construído no Brasil com aumento de Temperatura.....	114
Figura 61 - Configuração dos experimentos para determinação da influencia dos íons no SODIS	119
Figura 62 - SODIS para <i>E.coli</i> variando a concentração do íon Sulfato (A) Experimentos SODIS sobre luz natural com céu limpo em água com frascos de 250 ml de borossilicato, (B) Tempo para inativação de 5 Log ₁₀ em diferentes concentrações de sulfato com <i>E.coli</i>	122
Figura 63 - SODIS para <i>E.faecalis</i> variando a concentração do íon Sulfato (A) Experimentos SODIS sobre luz natural com céu limpo em água com frascos de 250 ml de borossilicato, (B) Tempo para inativação de 5 Log ₁₀ em diferentes concentrações de sulfato com <i>E.faecalis</i>	123
Figura 64 - SODIS para <i>E.coli</i> variando a concentração do íon Nitrato (A) Experimentos SODIS sobre luz natural com céu limpo em água com frascos de 250 ml de borossilicato, (B) Tempo para inativação de 5 Log ₁₀ em diferentes concentrações de nitrato com <i>E.coli</i>	124
Figura 65 - SODIS para <i>E.faecalis</i> variando a concentração do íon Nitrato (A) Experimentos SODIS sobre luz natural com céu limpo em água com frascos de 250 mL de borossilicato, (B) Tempo para inativação de 5 Log ₁₀ em diferentes concentrações de nitrato com <i>E.faecalis</i>	124
Figura 66 - SODIS para <i>E.coli</i> variando a concentração do íon cloreto (A) Experimentos SODIS sobre luz natural com céu limpo em água com frascos de 250 ml de borossilicato, (B) Tempo para inativação de 5 Log ₁₀ em diferentes concentrações de cloreto com <i>E.coli</i>	125
Figura 67 - SODIS para <i>E.faecalis</i> variando a concentração do íon cloreto (A) Experimentos SODIS sobre luz natural com céu limpo em água com frascos de 250	

ml de borossilicato, (B) Tempo para inativação de 5 Log ₁₀ em diferentes concentrações de cloreto com <i>E.faecalis</i>	126
Figura 68 - SODIS para <i>E.coli</i> variando a concentração do íon amônio (A) Experimentos SODIS sobre luz natural com céu limpo em água com frascos de 250 ml de borossilicato, (B) Tempo para inativação de 5 Log ₁₀ em diferentes concentrações de amônio com <i>E.coli</i>	127
Figura 69 - SODIS para <i>E.faecalis</i> variando a concentração do íon amônio (A) Experimentos SODIS sobre luz natural com céu limpo em água com frascos de 250 ml de borossilicato, (B) Tempo para inativação de 5 Log ₁₀ em diferentes concentrações de amônio com <i>E.faecalis</i>	127
Figura 70 - Mecanismos de inativação proposto pela formação de peroxinitrito devido à concentração de amônia.....	129
Figura 71 - Localização do Assentamento Oziel Alvez.....	130
Figura 72 - Imagem do Assentamento Oziel Alvez.....	131
Figura 73 - Fotos dos poços rasos localizados nas residências onde foram coletadas as amostras de água para análise	132
Figura 74 - Resultados de desinfecção solar no Disco Solar com água coletada no assentamento Oziel Alvez no dia 13 de fevereiro de 2019	136
Figura 75 - Resultados de desinfecção solar no Reator CPC com água coletada no assentamento Oziel Alvez no dia 14 de fevereiro de 2019	137

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Patógenos transmitidos através da água (adaptada de WHO, 2011).	26
Tabela 2 - Enfermidades causadas pela ingestão de água contaminada por microrganismos patogênicos.....	27
Tabela 3 - Padrão microbiológico da água para consumo humano para OMS, EPA e Brasil	28
Tabela 4 - Métodos para o tratamento de água potável ao nível doméstico, adaptado (UNICEF, 2009; WHO, 2010).	29
Tabela 5 - Inativação térmica de bactérias, vírus e protozoários.	55
Tabela 6 - Manutenção Periódica no Disco Solar	72
Tabela 7 - Volume e tempo que o fluxo percorre cada zona térmica.....	75
Tabela 8 - Composição química da água utilizada nos testes de desinfecção	77
Tabela 9 - Medidas de Tempo vs Temperatura	85
Tabela 10 - Tabela de amostragem do experimento realizado	90
Tabela 11 - Custo dos materiais e mão de obra utilizados para construir o Reator CPC.....	105
Tabela 12 - Sais inorgânicos utilizados para preparação da água de chuva simulada	107
Tabela 13 - Cátions e ânions presentes na água coletada no assentamento Oziel Alves	135

LISTA DE ABREVIATURAS

ATCC	COLEÇÃO DE CULTURA TIPO AMERICANA
CPC	REATOR CILINDRICO PARABÓLICO COMPOSTO
CPD	DÍMEROS DE CICLOBUTANO PIRIMIDINA
DNA	ÁCIDO DESOXIRRIBONUCLEICO
EPA	AGÊNCIA DE PROTEÇÃO AMBIENTAL DOS ESTADOS UNIDOS
NADH	DINUCLEÓTIDO DE NICOTINAMIDA E ADENINA
OMS	ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE
ONPG	ORTO-NITROFENIL-B-D-GALACTOPIRANOSÍDEO
ONU	ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS
PCR	REAÇÃO EM CADEIA DA POLIMERASE
PDR	REFLETOR SOLAR DE DISCO PARABÓLICO
PET	POLITEREFTALATO DE ETILA
PTC	COLETOR SOLAR DE CALHA PARABÓLICA
qPCR	REAÇÃO EM CADEIA DA POLIMERASE QUANTITATIVA
RNA	ÁCIDO RIBONUCLEICO
ROS	ESPÉCIES REATIVAS DE OXIGÊNIO
SODIS	DISINFECÇÃO SOLAR DE ÁGUA
SOPAS	PASTEURIZAÇÃO SOLAR DE ÁGUA
UFC	UNIDADE FORMADORA DE COLÔNIA

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	22
2. OBJETIVOS.....	24
2.1 OBJETIVO PRINCIPAL	24
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	24
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
3.1 ÁGUA E SAÚDE	25
3.2 DESINFECÇÃO DE ÁGUA.....	29
3.2.1 Desinfecção Química.....	30
3.2.2 Filtração.....	31
3.2.3 Floculação	32
3.2.4 Fervura	32
3.2.5 Radiação Ultravioleta e Solar	32
3.3 O SOL.....	33
3.4 DESINFECÇÃO SOLAR DE ÁGUA (SODIS)	38
3.4.1 Danos Celulares Induzidos pela Radiação Solar.....	40
3.4.2 Espécies Reativas de Oxigênio (ROS)	44
3.4.3 Efeito térmico durante o SODIS.....	49
3.5 PASTEURIZAÇÃO SOLAR DE ÁGUA (SOPAS).....	50
3.5.1 Danos Celulares Induzidos pela Temperatura.....	51
3.5.2 Coletores de Placa Plana Estático.....	56
3.5.3 Coletores solares de tubo de calor a vácuo	59
3.5.4– Coletor de Calha Parabólica (PTC).....	61
3.5.5 Refletor de Disco Parabólico (PDR).....	62
3.5.6 Coletores Fresnel.....	64
4. O DISCO SOLAR	66
4.1 DESCRIÇÃO DO DISCO SOLAR.....	66

4.2 OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO DO DISCO SOLAR	71
4.4 CUSTO DO DISCO SOLAR.....	73
5. METODOLOGIA DISCO SOLAR.....	73
5.1 AVALIAÇÃO DA POTÊNCIA DO DISCO SOLAR.....	73
5.2 METODOLOGIA DA AVALIAÇÃO DO PERFIL DE TEMPO DE RESIDÊNCIA E TEMPERATURA DO DISCO	74
5.3 PERFIL DA TEMPERATURA DE SAÍDA DA ÁGUA DURANTE O DIA APÓS PASSAR PELO DISCO SOLAR	76
5.4 METODOLOGIA DOS ENSAIOS DE DESINFECÇÃO MICROBIOLÓGICA DA ÁGUA NO DISCO SOLAR.....	76
5.4.1 Matrix de água utilizada nos experimentos.....	76
5.4.2 Estoque de Bactéria e preparação do Inóculo	77
5.4.3 Ensaio microbiológicos no Disco Solar	78
5.4.5 Método de Detecção de bactéria por Colilert.....	79
5.4.6 Método de Quantificação de bactéria por Colilert.....	80
5.4.7 Quantificação de Bactérias utilizando método de Diluições Seriadas.....	81
6. RESULTADOS	83
6.1 RESULTADOS DA AVALIAÇÃO DA POTÊNCIA DO DISCO SOLAR.....	83
6.2 RESULTADOS DA AVALIAÇÃO DO PERFIL DE TEMPO DE RESIDÊNCIA E TEMPERATURA DO DISCO DURANTE O DIA	85
6.3 RESULTADOS DE DESINFECÇÃO MICROBIOLÓGICA DA ÁGUA NO DISCO SOLAR.....	89
6.3.1 Avaliação da desinfecção de água no Disco Solar utilizando método Colilert.....	89
6.3.2 Resultados de Desinfecção de água no Disco Solar utilizando método de Diluições Seriadas	92
6.4 PRODUTIVIDADE DO DISCO SOLAR.....	94
7. CONCENTRADOR PARABÓLICO COMPOSTO (CPC)	98
7.1 PROTÓTIPO REATOR CPC LOCALIZADO NA ESPANHA.....	98

7.2	PROTÓTIPO REATOR CPC LOCALIZADO NO BRASIL.....	100
7.3	CUSTO DO REATOR CPC.....	105
8.	EXPERIMENTOS DE DESINFECÇÃO DE ÁGUA EM REATOR CPC.....	106
8.1	MATERIAIS E MÉTODOS DE DESINFECÇÃO REATOR CPC NA ESPANHA	106
8.1.1	Matrix de água utilizada nos experimentos de desinfecção reator CPC ..	107
8.1.2	Estoque de Bactéria e preparação do Inóculo do reator CPC na Espanha	107
8.2	MATERIAIS E MÉTODOS DE DESINFECÇÃO REATOR CPC DO BRASIL	108
9.	RESULTADOS DE DESINFECÇÃO DOS REATORES CPC.....	109
9.1	RESULTADOS DE DESINFECÇÃO DO REATOR CPC DA ESPANHA	109
9.2	RESULTADOS DE DESINFECÇÃO REATOR CPC NO BRASIL.....	112
10.	EFEITO DE ÍONS INORGÂNICOS NA DESINFECÇÃO SOLAR DE ÁGUA.	118
10.1	MATERIAIS E MÉTODOS DA INFLUÊNCIA DOS ÍONS NO PROCESSO SODIS.....	118
10.1.1	Sistemas Solares Utilizados	118
10.1.2	Reagente utilizados nos experimentos	119
10.1.3	Estoque, preparação e quantificação das bactérias	120
10.1.4	Experimentos de Desinfecção	120
10.2	RESULTADOS DA INFLUÊNCIA DOS ÍONS NOS ENSAIOS DE DESINFECÇÃO	121
11.	ENSAIO DE ÁGUA REAL NO DISCO E REATOR CPC.....	129
11.1	ASSENTAMENTO OZIEL ALVES.....	129
11.2	COLETA E CARACTERIZAÇÃO DA ÁGUA	132
11.3	ENSAIOS DE ÁGUA DE POÇO RASO NO DISCO SOLAR.....	133
11.4	ENSAIOS DE ÁGUA DE POÇO RASO NO REATOR CPC.....	133
11.5	ISOLAMENTO E IDENTIFICAÇÃO DAS BACTÉRIAS	134

11.4 RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DA ÁGUA FÍSICO-QUÍMICA DA ÁGUA.....	135
12. COMPARAÇÃO DE EFICIÊNCIA DO SISTEMA DE DESINFECÇÃO SOLAR (SODIS) E PASTEURIZAÇÃO SOLAR (SOPAS).	138
13. CONCLUSÕES	140
REFERENCIAS.....	143

CAPÍTULO 1
INTRODUÇÃO, OBJETIVOS E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1. INTRODUÇÃO

A disponibilidade de água doce é vital para a sobrevivência e saúde humana, afetando o consumo individual, a produção de alimentos, a produção de energia, a atividade industrial, e o funcionamento de toda economia global, bem como a sobrevivência de outros animais, plantas e ecossistemas naturais. Assim, os recursos hídricos estão sob atenção crescente em todo o mundo pois, a quantidade de água doce na terra é limitada (WHO, 2019).

Cerca de 71 % da superfície da Terra é coberta por água, porém apenas 2,5 % é água doce, e desta pequena proporção de água doce, apenas 1 %, menos de 0,007% de toda a água do mundo está acessível, o restante encontra-se indisponível em geleiras ou subsolo. A escassez de água, devido a catástrofes naturais, poluição ou má gestão da água, pode trazer graves consequências (UNICEF, 2009; FELBAB-BROWN, 2017).

A Assembleia Geral da ONU reconhece explicitamente o direito humano à água e ao saneamento básico, ou seja, todos têm direito a água suficientemente segura, aceitável e acessível para uso pessoal e doméstico. Segundo as Nações Unidas, o consumo de água cresceu mais de duas vezes a taxa de crescimento da população no século passado. Estima-se que em 2025, um terço da população mundial viverá em áreas com escassez de água como resultado do mau uso, do crescimento populacional e das mudanças climáticas (WHO/UNICEF, 2015).

A disponibilidade da água também é altamente dependente da sua qualidade. Água de má qualidade pode não servir para diferentes usos, e o custo do tratamento pode tornar sua utilização inviável. Apesar de grandes esforços nas últimas décadas para melhorar os serviços de saneamento básico e acesso à água segura, 663 milhões de pessoas no mundo dependem de fontes de água não tratadas, incluindo 159 milhões de pessoas que usam águas superficiais e utilizam água de poços rasos, que aumentam a probabilidade de contrair doenças transmitidas pela água (UN, 2019; WHO, 2017).

Pelo menos 1,8 bilhão de pessoas no mundo ainda usam uma fonte de água potável contaminada com matéria fecal. A água contaminada e o saneamento deficiente estão ligados à transmissão de doenças como cólera, diarreia, disenteria, hepatite A, febre tifóide e poliomielite. A diarreia é a doença mais conhecida ligada a alimentos e à água contaminados. (WHO, 2017).

No Brasil, as redes coletoras de esgotos alcançam 61,4% da população urbana brasileira, restando 65,1 milhões de pessoas nas cidades do País que não dispõem de sistema coletivo de esgotos sanitários. Nem todo esgoto coletado é conduzido a uma estação de tratamento. A parcela atendida com coleta e tratamento dos esgotos representa 42,6% da população urbana total. Desse modo, 96,7 milhões de pessoas não dispõem de tratamento coletivo de esgotos (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2018).

Os dados citados acima, nos obrigam a dar uma atenção especial em como a qualidade da água utilizada por essas pessoas, que não contam com água potável em seu abastecimento, se tornam suscetíveis a utilizar água com grande número de patógenos de forma comum. A energia solar pode vir a ajudar na redução deste problema. Os valores de irradiação solar global incidente no território brasileiro são em média de 1.500 a 2.500 kWh.m⁻², sendo superiores a maioria dos países da União Europeia (900 a 1.500 kWh.m⁻²), onde existem vários projetos para aproveitamento dos recursos solares, com incentivos governamentais, inclusive no tratamento de água (PEREIRA et al., 2006).

Existem inúmeros sistemas de tratamento de água disponíveis para desativar patógenos. Esses sistemas garantem que a água fornecida atenda aos padrões nacionais e internacionais. No entanto, os custos de infraestrutura, operação, manutenção e fornecimento não chegam a todos.

É de vital importância um sistema que não dependa unicamente de insumos químicos ou elétricos, mas sim de forma passiva, como é o caso da energia coletada do sol. Cada método tem vantagens e desvantagens que precisam ser consideradas ao projetar sistemas de tratamento de água para uma aplicação específica. Esta tese está focada em aplicações de desinfecção de água utilizando energia solar em

comunidades carentes de saneamento básico e água tratada, onde há falta de recursos técnicos e materiais.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO PRINCIPAL

Propor alternativa de desinfecção para águas contaminadas com microrganismos patogênicos em pequenas comunidades, comparando a eficiência e utilidade prática do sistema de pasteurização solar utilizando o Disco Solar com o sistema de desinfecção solar por radiação UVA utilizando um reator CPC.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1 - Avaliar a desinfecção de uma água contaminada artificialmente com *E.coli* utilizando o sistema SOPAS no Disco solar e SODIS no Reator CPC
- 2 - Otimizar os parâmetros de descontaminação, através das variáveis de intensidade luminosa e vazão hidráulica, além da avaliação do tempo de residência da água e temperatura no reator de concentração do Disco Solar.
- 3 – Identificar bactérias cultiváveis presentes em águas subterrâneas contaminadas da região Norte Fluminense para posterior aplicação nos sistemas solares desenvolvidos neste trabalho.
- 4- Comparar a eficiência do sistema CPC e Disco Solar com água mineral artificialmente contaminada com *E.coli* e com água de poços rasos coletada no assentamento Oziel Alves localizado em Campos dos Goytacazes.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 ÁGUA E SAÚDE

O mecanismo de transmissão mais comum de doenças é através da ingestão de água contaminada, em que as infecções são causadas por patógenos de origem animal ou humana. Estes são transmitidos pela via feco-oral, ou seja, são excretados nas fezes dos indivíduos infectados e ingeridos na forma de água contaminada (WHO, 2015).

Esses microrganismos patogênicos são divididos em bactérias, vírus e protozoários (BAIRD E CANN, 2011). Em estudos recentes King *et al.*, (2017), realizaram análises de água em 25 estações de tratamento de água potável nos Estados Unidos. Eles analisaram os protozoários *Giardia* e *Cryptosporidium* (Método EPA 1623); os fungos *Aspergillus fumigatus*, *Aspergillus niger* e *Aspergillus terreus* (quantitativo PCR [qPCR]); e a bactéria *Legionella pneumophila* (qPCR), *Mycobacterium avium*, *Mycobacterium avium* subespécie *paratuberculosis* e *Mycobacterium intracellulare* (qPCR e cultura). Todas as três micobactérias foram encontradas em 36% das amostras de água tratada, os outros microrganismos testados não foram identificados.

Casos de infecção por *Escherichia coli* associada à água contaminada subtratada e especialmente da água de abastecimento público, têm sido relatados (SWERDLOW *et al.*, 1992; CHALMERS *et al.*, 2009). Bovinos infectados em fazendas são suspeitos de causar contaminação da água com *E. coli* (JOHNSON *et al.*, 2007) e água de irrigação tem sido relatada como sendo uma fonte de contaminação (WATCHEL *et al.*, 2002a; 2002b). Um estudo realizado por Kerr *et al.* (1999) determinaram que a *E. coli* O157: H7, foi capaz de sobreviver por longos períodos na água mineral engarrafada comercialmente. *Escherichia coli* O157: H7 é uma bactéria enterohemorrágica e foi reconhecida como um importante patógeno vinculado a doenças alimentares (MITTESLTAEDT, 2006).

A Tabela 1, adaptado do guia de qualidade da água potável (WHO, 2010), fornece uma lista de vários patógenos transmitidos pela água associados a fontes de água potável inseguras. Eles têm diferentes características em relação à

significância para a saúde, infectividade e persistência em água e os efeitos sobre o hospedeiro são diversos em características, comportamento e resistência, dependendo do tipo de microrganismo. A população mais vulnerável a água potável contaminada são pessoas idosas ou crianças.

Tabela 1 - Patógenos transmitidos através da água (adaptada de WHO, 2010).

Microrganismo patógeno	Significância para a saúde^a	Infectividade^b	Persistência em Água^c
Bactérias			
<i>Burkholderia pseudomallei</i>	Alta	Baixa	Pode multiplicar
<i>Campylobacter jejuni</i> , <i>C. coli</i>	Alta	Média	Moderada
<i>Escherichia coli</i> – Patogênica	Alta	Baixa	Moderada
<i>E. coli</i> – Enterohaemorrhagic	Alta	Alta	Moderada
<i>Francisella tularensis</i>	Alta	Alta	Longa
<i>Legionella</i> spp.	Alta	Média	Pode multiplicar
<i>Leptospira</i>	Alta	Alta	Longa
Mycobacteria (nontuberculous)	Baixa	Baixa	Pode multiplicar
<i>Salmonella</i> Typhi	Alta	Baixa	Moderada
Other salmonellae	Alta	Baixa	Pode multiplicar
<i>Shigella</i> spp.	Alta	Alta	Curta
<i>Vibrio cholerae</i>	Alta	Baixa	Curta
Vírus			
<i>Adenoviruses</i>	Média	Alta	Longa
<i>Astroviruses</i>	Média	Alta	Longa
<i>Enteroviruses</i>	Alta	Alta	Longa
<i>Hepatitis A virus</i>	Alta	Alta	Longa
<i>Hepatitis E virus</i>	Alta	Alta	Longa
<i>Noroviruses</i>	Alta	Alta	Longa
<i>Rotaviruses</i>	Alta	Alta	Longa
<i>Sapoviruses</i>	Alta	Alta	Longa
Protozoários			
<i>Acanthamoeba</i> spp.	Alta	Alta	Pode multiplicar
<i>Cryptosporidium hominis/parvum</i>	Alta	Alta	Longa
<i>Cyclospora cayetanensis</i>	Alta	Alta	Longa
<i>Entamoeba histolytica</i>	Alta	Alta	Moderada
<i>Giardia intestinalis</i>	Alta	Alta	Moderada
<i>Naegleria fowleri</i>	Alta	Média	Pode multiplicar

^a Considera a incidência e severidade da doença.

^b Evidências epidemiológicas em relação à quantidade de organismos. Alta $1-10^2$; Média 10^2-10^4 ; Baixa $> 10^4$.

^c Detecção do período para estágio infectivo em água a 20°C: Curto até 1 semana; Moderado de 1 semana a 1 mês; Longa mais de 1 mês.

A Tabela 2 fornece informações sobre as enfermidades e sintomas que esses microrganismos podem causar quando transmitidos pela água.

Tabela 2 - Enfermidades causadas pela ingestão de água contaminada por microrganismos patogênicos.

Doença	Sintomas	Patógeno
Campilobacteriose	Diarreia com perda de sangue	<i>Campylobacter sp.</i>
Gastroenterite	Diarreia, vômitos e dores abdominais	<i>Escherichia coli</i>
Salmonelose	Diarreia, cólica abdominal e febre	<i>Salmonella sp.</i>
Desintéria	Diarreia com perda de sangue frequente	<i>Shigella spp.</i>
Cólera	Diarreia severa	<i>Vibrio cholerae</i>
Yernose	Febre, diarreia e dor abdominal	<i>Yersinia spp.</i>
Hepatite viral	Hepatite	Vírus Hepatite A e E
Poliomielite e outras	Vários	Enterovírus
Criptosporidiose	Diarreia prolongada	<i>Cryptosporidium sp.</i>
Giardíase	Dores abdominais, diarreia e perda de peso	<i>Giardia sp.</i>
Toxoplasmose	Febre e malformação de feto	<i>Toxoplasma gondii</i>

Fonte: Adaptado de HUNTER, 2003.

Existem várias diretrizes sobre o controle e monitoramento microbianos que fornecem informações sobre o alvo mais adequado para garantir água potável. As diretrizes de água mais relevantes são estabelecidas pela OMS (Organização Mundial da Saúde), EPA (Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos) e no

Brasil, pelo Anexo XX da portaria de consolidação nº 5 do Ministério da Saúde de 03 de outubro de 2017 (resumido na Tabela 3).

Tabela 3 - Padrão microbiológico da água para consumo humano para OMS, EPA e Brasil

Patógenos	OMS	EPA	Ministério Saúde
<i>Coliphages</i> (vírus)	Indicador para a efetividade da desinfecção e remoção física	99,99% mortos/ inativos	---- ^a
<i>Escherichia coli</i> ou termotolerantes	Ausência em 100mL	---- ^a	Ausência em 100mL
Coliformes Totais	Indicador de limpeza e integridade dos sistemas de distribuição Indicador de eficácia do processo de desinfecção bacteriana e da limpeza e integridade dos sistemas de distribuição.	Não mais que 5% do total de amostras analisadas em 1 mês	Ausência em 100mL
Contagem de heterotróficos		Não mais que 500 colônias de bactérias por mL	Limite de 500 UFC/ml
<i>Cryptosporidium</i>	---- ^a	99% mortos/ inativos	---- ^b
<i>Giardia lamblia</i>	---- ^a	99% mortos/ inativos	---- ^b

^a – Não apresenta indicação de valores

^b - média geométrica anual maior ou igual a 1.000 *Escherichia coli*/100mL deve-se realizar monitoramento

Fonte: Adaptado (US EPA, 2012; WHO,2010; BRASIL, 2011).

Rosa et al. (2004) realizaram um estudo de qualidade microbiológica de água de poços rasos provenientes de áreas rurais do município de Campos dos Goytacazes. Eles analisaram a água proveniente de 67 poços subterrâneos coletados, e encontraram coliformes totais em 70,15% das amostras, coliformes fecais em 44,78% e *E.coli* em 28,36% das amostras analisadas. Portal et al. (2019) realizaram análise de parâmetros físico-químicos e bacteriológicos e resíduos de pesticidas em amostras de água coletadas em poços rasos no assentamento Zumbi

dos Palmares em Campos dos Goytacazes e encontraram coliformes totais e fecais na maioria das amostras e, em alguns casos, valores muito altos (2.400 UFC.mL⁻¹).

3.2 DESINFECÇÃO DE ÁGUA

Existe um número grande de métodos de tratamento de água comprovados para a remoção ou inativação de agentes patogênicos microbianos em água. O objetivo dos processos de desinfecção é a inativação ou destruição de microrganismos indesejáveis, capazes de produzir doenças, presentes na água. O processo não implica necessariamente na destruição completa de todas as formas vivas presentes (esterilização), embora muitas vezes o processo de desinfecção seja levado até o ponto de esterilização (MEYER, 1994). Os processos de desinfecção de água podem ocorrer através de processos físicos como alteração na temperatura, filtração e utilização de radiação ultravioleta (UV), ou podem ocorrer através de processos químicos como cloração e ozonização.

Alguns dos processos mais comuns utilizados em áreas com escassez de água potável são resumidos na Tabela 4 (UNICEF, 2009; WHO, 2010).

Tabela 4 - Métodos para o tratamento de água potável ao nível doméstico, adaptado (UNICEF, 2009; WHO, 2010).

Método	Disponibilidade e Praticidade	Dificuldade Técnica	Custo^a	Eficiência^b
Cloração	Alta para moderada ^c	Baixa para moderada	Baixo	Alta
Filtração	Variada ^d	Baixa para moderada	Baixo para moderado ^d	Variada ^d
Floculação	Moderada	Moderada	Baixo para moderado ^e	Variada ^e
Fervura	Variada ^f	Baixa para moderada	Moderado para alto ^f	Alta
Ultravioleta	Variada ^g	Baixa para	Alto	Alta

		moderada		
Desinfecção	Alta	Baixa para	Baixo	Alta
Solar		moderada		

^a Classificação por preço unitário (euro/m³): Baixa < 0,5; Moderado 0,5-2; Alto > 2

^b Estimativas de eficácia microbiana em reduções de ordem de magnitude ou log₁₀ de patógenos transmitidos pela água: Baixa <1 log₁₀ (< 90%); Moderado 1-2 log₁₀ (90-99%); Alto > 2 log₁₀ (> 99%).

^c A geração de gás no local é uma dificuldade, mas a produção química por acidificação do cloro ou clorito é simples se forem fornecidos dispositivos e instruções de medição.

^d A praticidade, a disponibilidade, o custo e a eficácia microbiana dependem do meio filtrante e da sua disponibilidade: granulado, cerâmico, tecido, etc. A eficácia microbiana também depende do tamanho dos poros (alguns são altamente eficientes, > 99% ou > 2-log₁₀ de redução).

^e Depende do floculante, dose, mistura, condições de sedimentação e faixa de pH.

^f Depende do método de aquecimento e da disponibilidade e custo dos combustíveis.

^g Depende da disponibilidade e do custo do tipo das lâmpadas, eletricidade, operação e necessidades de manutenção (bombas e métodos de limpeza do sistema).

3.2.1 Desinfecção Química

A desinfecção química da água é amplamente reconhecida como eficaz, uma vez que os desinfetantes químicos alteram os blocos de construção bioquímicos e interrompem as ligações das moléculas de superfície, comprometendo as funções celulares vitais dos microrganismos (ALFEREZ, 2017).

A cloração é o sistema de desinfecção mais utilizado e considerado mais econômico. Geralmente o cloro é utilizado na forma líquida (hipoclorito de sódio) ou na forma sólida (pastilhas de hipoclorito de cálcio). Este método é bastante eficiente na eliminação de bactérias, porém é ineficaz na eliminação de vírus, além dos resíduos da cloração permanecerem na corrente filtrada, com graves inconvenientes ambientais e de saúde pública (RAMÍREZ-QUIRÓS, 2005). A exposição ao cloro destrói efetivamente a parede celular bacteriana, alterando suas propriedades bioquímicas e físicas, impedindo, assim, certas funções celulares essenciais (VENKOBACHAR et al., 1977). A associação do cloro com algumas substâncias orgânicas residuais presentes na água forma os chamados trihalometanos, ou compostos orgânicos clorados. Estes compostos podem afetar o sistema nervoso

central, o fígado e os rins, além de serem conhecidos como compostos cancerígenos (BAIRD e CANN, 2011).

Na presença de amônia e compostos amoniacais na água, a adição de cloro forma compostos clorados ativos, denominados cloraminas. Existem vários relatos da literatura sobre danos à saúde ou morte de pacientes submetidos a concentrações elevadas de cloro e cloramina. Fluck et al., (1999) relatam um aumento da anemia em centros de hemodiálise em pacientes expostos a teores elevados de cloramina, em decorrência do aumento das concentrações de cloro nos respectivos sistemas públicos de abastecimento de água.

A ozonização é também um processo químico utilizado para desinfecção de água. Essa técnica pode ser utilizada contra bactérias, vírus e protozoários. Sua eficiência é devido ao seu alto potencial de oxidação. Quando em solução aquosa, o ozônio pode reagir de forma direta com os microrganismos (POLO-LÓPEZ et al., 2011). A geração de ozônio deve ser feita no local de tratamento sendo difícil aplicá-la em comunidades rurais devido à necessidade de uma fonte energética segura e a dosagem segura em pequenas escalas. Além disso, o custo é relativamente alto e pode ocorrer a geração de compostos indesejáveis como ácidos halogenados, aldeídos e outros, caso haja algum residual desse tipo na água a ser tratada (SUGANYA; SENTHIL KUMAR, 2018).

3.2.2 Filtração

A filtração envolve a remoção física de sólidos suspensos, incluindo microrganismos, da água por uma combinação de exclusão de tamanho e adsorção. As formas mais comuns de filtração incluem tecidos, areia, rochas porosas e cerâmicas. Além disso, membranas avançadas especialmente configuradas para aplicações de pressão gravitacional também são utilizadas, desenvolvendo microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração e osmose reversa (PLAKAS et al., 2016).

A técnica de filtração é eficaz contra bactérias, protozoários e vírus, mas é limitada ao tamanho dos poros. É uma tecnologia simples e tem uma melhoria visual na água tratada. No entanto, requer manutenção e limpeza dos filtros constantemente (LEONG et al., 2017).

3.2.3 Floculação

A floculação é um método que emprega elementos naturais ou químicos para coagular ou precipitar partículas suspensas, incluindo microrganismos, aumentando sua sedimentação. Normalmente, o reagente floculante induz microrganismos suspensos e maiores, como protozoários, para se ligarem uns aos outros e se depositarem no fundo do vaso de água, e o desinfetante para inativar os microrganismos menores, como bactérias e vírus (GHIMICI; NICHIFOR, 2018).

3.2.4 Fervura

A fervura ou aquecimento com combustível é a técnica mais comum e eficiente de desinfecção de água, com uma estimativa de 1,1 bilhão de pessoas relatando que geralmente fervem a água antes de beber (ROSA; MILLER; CLASEN, 2010). Este tipo de desinfecção provou-se ser eficaz contra todos os tipos de patógenos transmitidos pela água, até mesmo os esporos bacterianos e cistos de protozoários que mostraram resistência à desinfecção química ou vírus que são muito pequenos para serem removidos mecanicamente por filtração. A ebulição pode ser usada em águas turvas ou com alto conteúdo de diversos constituintes dissolvidos (THERMAL et al., 2011).

3.2.5 Radiação Ultravioleta e Solar

O processo que é conhecido como "desinfecção por UV" deve ser chamado de "desinfecção por UVC" porque usa o efeito germicida da radiação monocromática a 254 nm de comprimento de onda e outros comprimentos de onda próximos (GIANNAKIS et al., 2018a; KÜHN et al., 2003; WU et al., 2018). Consiste apenas na exposição da água à radiação das lâmpadas UVC (GIANNAKIS et al., 2018a). A luz UVC inativa organismos microbianos alterando seus ácidos nucléicos e proteínas, o que prejudica sua ligação celular e inibe sua capacidade de se replicar. É eficaz contra vírus, bactérias e protozoários e é simples de usar, embora sua eficiência

depende fortemente das propriedades ópticas da água a ser desinfetada e do tempo de exposição.

No entanto, a desinfecção por UV requer uma manutenção profissional e um fornecimento de eletricidade confiável, de modo que sua aplicação nos países em desenvolvimento é limitada e possui maior custo. Água turva precisa de um pré-tratamento como filtração ou floculação e é muito comum a recontaminação após o tratamento, a menos que a água seja armazenada com segurança (NIE et al., 2016).

Dos métodos apresentados na Tabela 4, a desinfecção de água por energia solar apresenta a vantagem de ser um método que não utiliza de insumos químicos em comparação com a cloração e floculação, apresenta uma praticidade maior que a filtração, quando se pensa em saturação e troca de filtro utilizado; não necessita de consumo de combustível quando comparado com a fervura e é de baixo custo quando comparado a utilização de uma fonte como lâmpadas ultravioletas.

A desinfecção de água utilizando energia solar está citada na literatura baseada em dois métodos diferentes: SODIS (*Solar Desinfeccion*), que utiliza a radiação ultravioleta do sol em conjunto com a temperatura para promover a desinfecção (MCGUIGAN et al., 2012); (CASTRO-ALFÉREZ; POLO-LÓPEZ; FERNÁNDEZ-IBÁÑEZ, 2016); (CASTRO-ALFÉREZ et al., 2017);(MALATO et al., 2016); (GIANNAKIS et al., 2016a); (PÉREZ; PULGARÍN, 2015) e SOPAS (*Solar Pasteurization*), que utiliza a energia solar concentrada para elevar a temperatura da água e promover a desinfecção por pasteurização (AMSBERRY et al., 2012); (REYNEKE, 2017); (REYNEKE et al., 2016); (CARIELO et al., 2017); (DOBROWSKY et al., 2015); (DOMINGOS et al., 2019). Os dois métodos serão descritos detalhadamente, após uma breve introdução sobre o sol e sua energia.

3.3 O SOL

Em locais sem acesso a água tratada, o Sol pode ser utilizado como o principal agente letal importante de microrganismos na desinfecção da água, seja

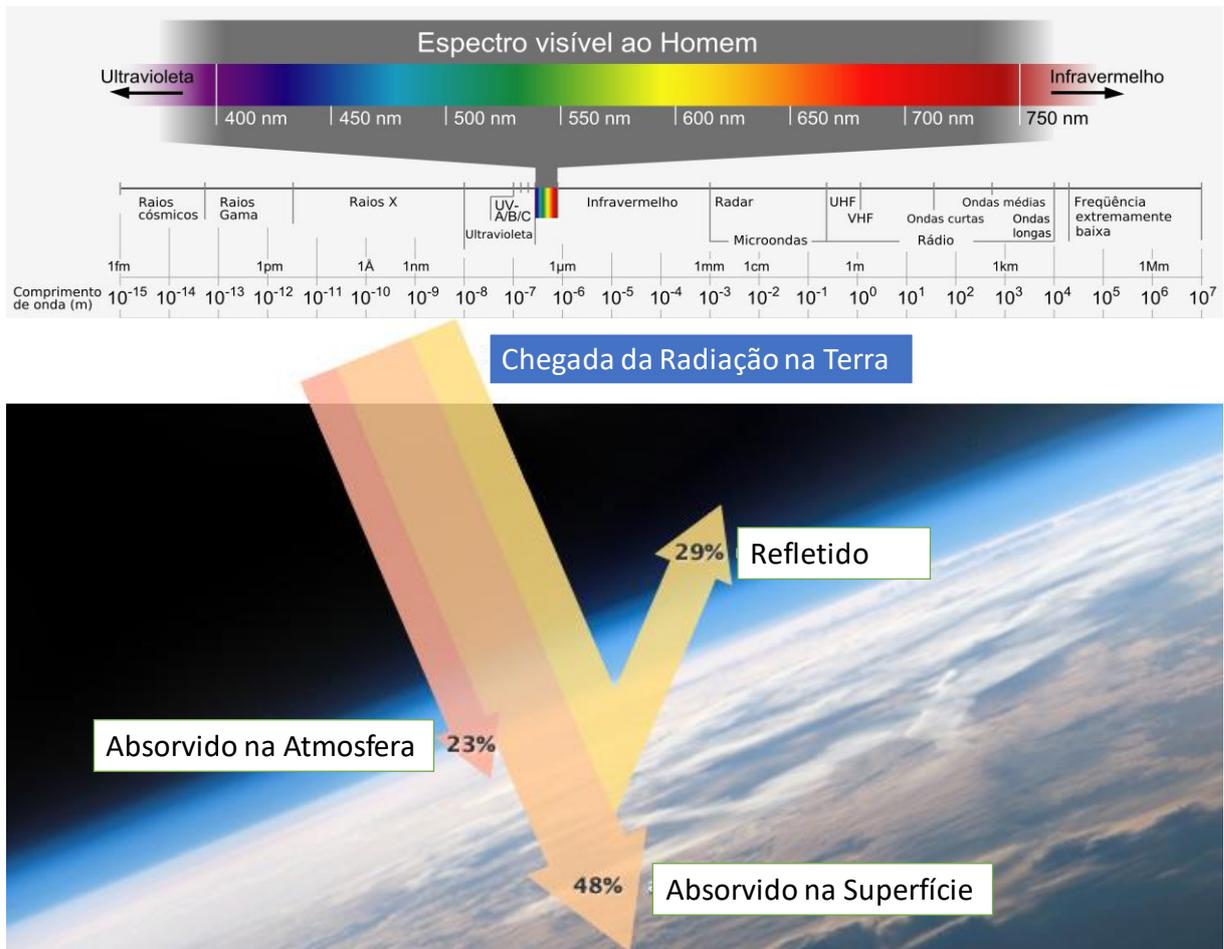
através do aumento de temperatura ou por ação direta da radiação, como uma forma barata, segura e eficiente.

O Sol é uma esfera de matéria gasosa com um diâmetro de $1,39 \times 10^9$ m. Ele está cerca de $1,5 \times 10^8$ km de distância da Terra, o que faz com que a energia solar viaje 8 minutos e 20 segundos para atingir o nosso planeta. O Sol tem uma temperatura efetiva de corpo negro de 5760 K. A produção total de energia do Sol é de $3,8 \times 10^{20}$ MW e, essa energia irradia em todas as direções. A terra recebe apenas uma pequena fração da radiação total emitida, igual a $1,7 \cdot 10^{14}$ kW; no entanto, mesmo com essa pequena fração, estima-se que 84 min da radiação solar seja igual à demanda mundial de energia por um ano (KALOGIROU, 2014).

O Sol emite energia em todos os comprimentos de onda do espectro eletromagnético, permeados pelas diversas linhas de absorção. De toda energia emitida, 44% se concentra entre 400 e 700 nm, denominado espectro visível de energia. O restante é dividido entre radiação ultravioleta (< 400 nm) com 7%, infravermelho próximo (entre 700 e 1500 nm) com 37% e infravermelho (> 1500 nm) com 11%. Menos de 1% da radiação emitida concentra-se acima da região do infravermelho, dando origem às micro-ondas, ondas de rádio, e abaixo da região ultravioleta, como raios-X e raios gama (SANTOS, 2013).

A Figura 1 ilustra os tipos de radiação solar que atingem a superfície da terra. Da irradiância solar total que incide no topo da atmosfera, cerca de 29% é refletida diretamente nesta camada, outros 23% poderão ser absorvidos ou refletidos também na atmosfera. Apenas os 48% restantes que incidem na superfície terrestre são absorvidos (TORRES, 2012).

Figura 1 - Tipos de Radiação solar



Fonte: Adaptada de (TORRES, 2012)

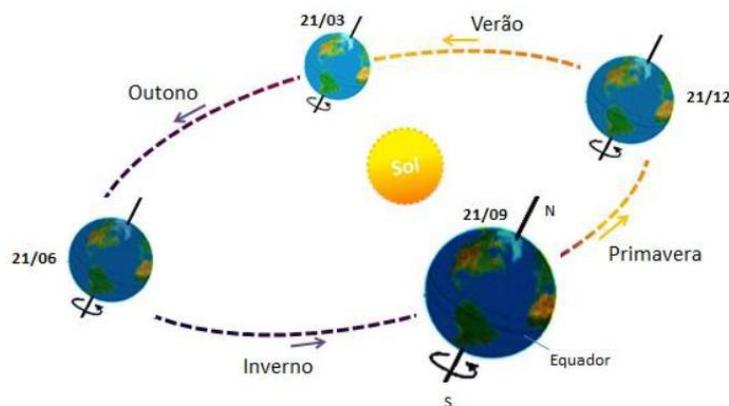
A radiação solar média anual que chega ao topo da atmosfera da Terra é em torno de 1366 W.m^{-2} (assim chamada "constante solar") com uma variação de $\pm 3\%$ devido à forma de elipse da órbita da Terra. A radiação solar média anual recebida globalmente é um quarto da irradiação solar total, ou seja, 342 W.m^{-2} (KIEHL E TRENBERTH, 1997). No entanto, a radiação solar é atenuada à medida que os raios do Sol passam pela atmosfera. Algumas das perdas de energia são devidas ao albedo da Terra, que é a capacidade da superfície de refletir a energia solar. Por fim, apenas 48% (168 W.m^{-2}) atinge a superfície da Terra.

A energia solar pode ser dividida em dois componentes, radiação direta e radiação difusa. A radiação direta é constituída pelos raios que vêm diretamente do sol. A radiação difusa vem de diferentes direções, ou seja, a luz é espalhada por

partículas atmosféricas na superfície da Terra que modificam a direção original da luz solar. A soma dos dois componentes (direta e difusa) é a radiação global que atinge a superfície da Terra. Como a Terra é continuamente exposta à radiação solar, a intensidade desta radiação depende principalmente do ângulo de incidência da luz solar que é determinado pela latitude, a estação e a hora do dia (RAMALINGAM; INDULKAR, 2017).

Com relação ao posicionamento solar, pode ser observado a partir da Terra, que o caminho do Sol no céu varia durante todo o ano. Isso se deve ao movimento de translação da Terra em torno do Sol, que descreve uma trajetória elíptica com uma pequena excentricidade. O eixo terrestre em relação ao plano normal à elipse apresenta uma inclinação de aproximadamente $23^{\circ} 45'$. Essa inclinação, juntamente com o movimento de translação dá origem às estações do ano (RODRÍGUEZ GÓMEZ et al., 2018). A Figura 2 ilustra esse movimento, com a representação das estações do ano para o hemisfério Sul.

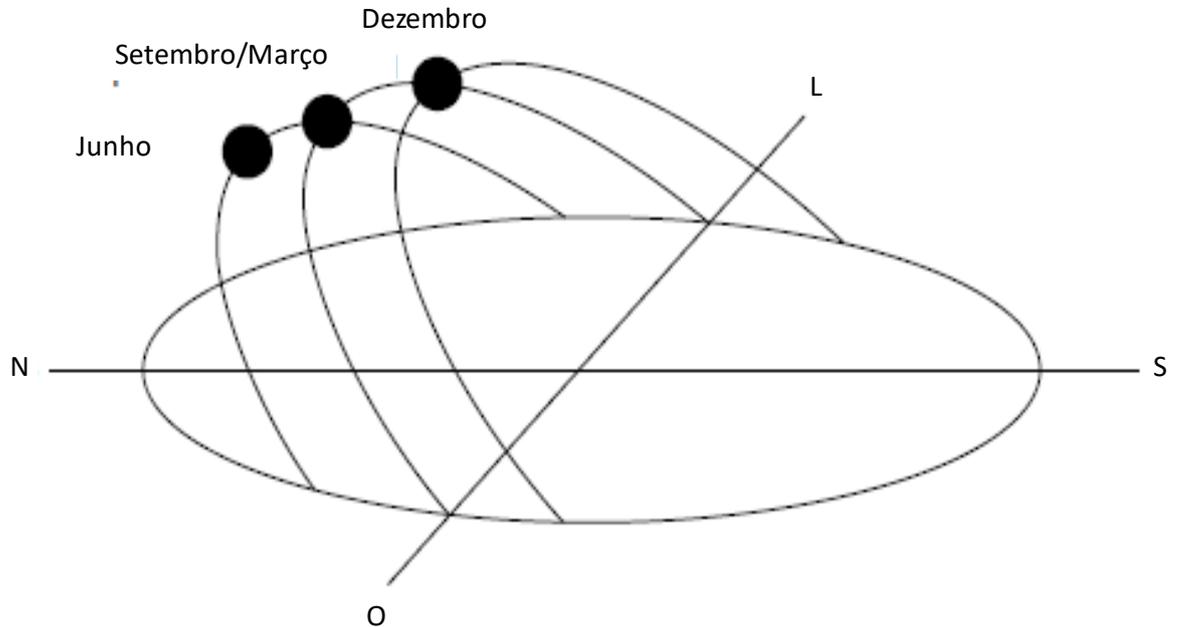
Figura 2 - Movimento da Terra em torno do Sol e as estações no hemisfério Sul.



Fonte:(RODRÍGUEZ GÓMEZ et al., 2018)

O movimento do Sol mais conhecido é o movimento que acontece ao longo de um dia, formando um arco que alcança seu ponto mais alto ao meio-dia. De acordo com as estações do ano, o ponto nascente e ponto poente do Sol mudam, movendo-se gradualmente no sentido setentrional (ao norte), ao longo do horizonte. A Figura 3 mostra este movimento para uma localização no hemisfério sul.

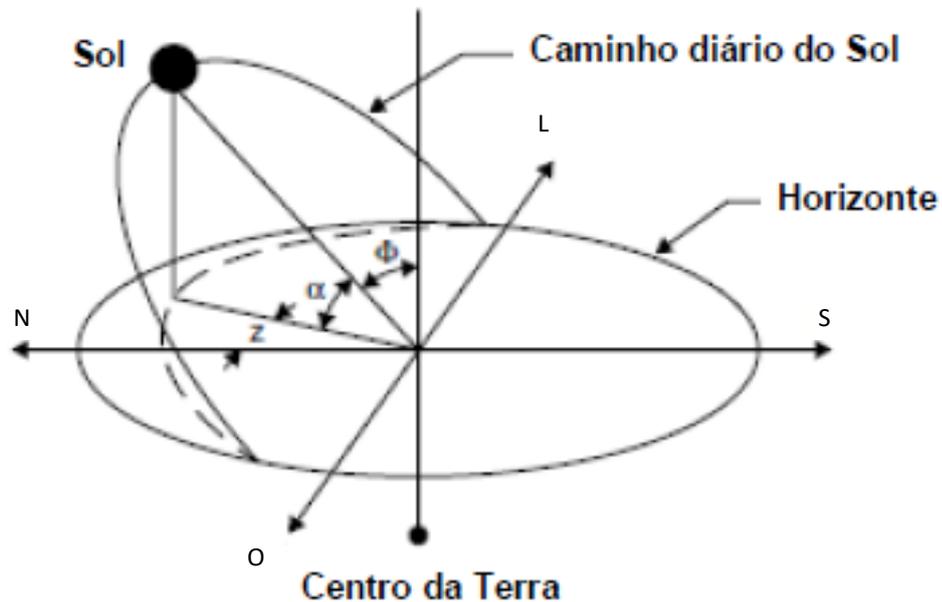
Figura 3 - Mudança anual na posição solar no céu para o hemisfério sul



Fonte: (KALOGIROU, 2014)

Uma questão importante para estimar a radiação solar incidente em uma localidade é o conhecimento da posição do Sol em relação a um ponto na Terra. Quando se trabalha com sistemas de aproveitamento solar é imprescindível o conhecimento do posicionamento solar para o máximo aproveitamento do sistema. Segundo Petit (2008), dois ângulos especificam a localidade do Sol no espaço: o azimute solar (z) e a altura solar (α). O azimute solar é o ângulo formado entre a projeção dos raios solares no plano horizontal e o eixo norte-sul, a partir do sul. Este ângulo pode variar entre $+180^\circ$ e -180° . A altura solar é o ângulo entre o raio solar e a projeção do mesmo sobre o plano horizontal. Segundo Kalogirou (2014), além dos ângulos z e α , há, também o ângulo do zênite solar (φ), que é aquele formado entre os raios do sol e a vertical (Figura 4).

Figura 4 - Caminho aparente do Sol no céu, durante o dia (nascente e poente)



Fonte: (PETIT, 2008)

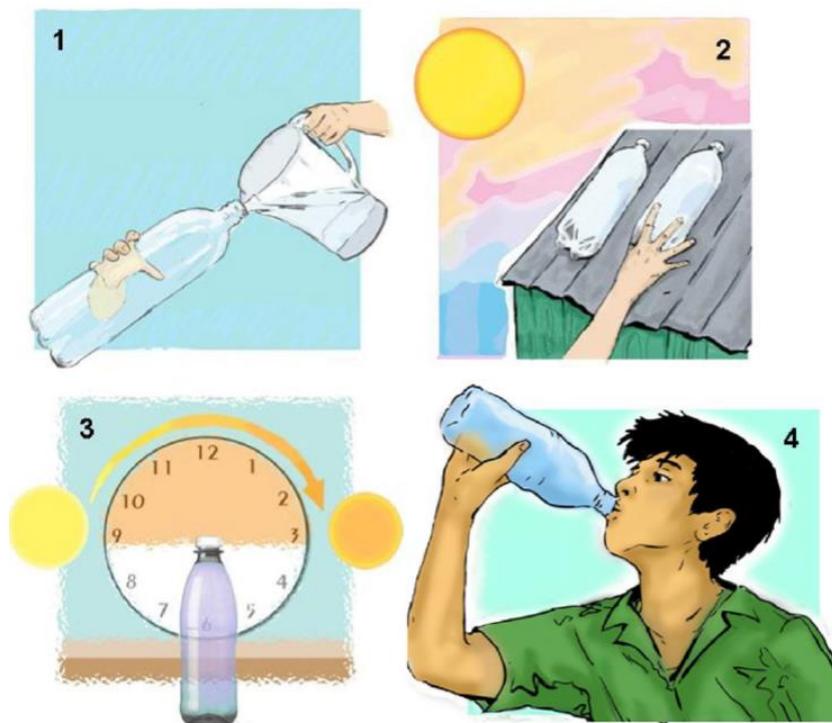
3.4 DESINFECÇÃO SOLAR DE ÁGUA (SODIS)

O efeito bactericida da luz solar foi observado a 142 anos atrás (DOWNES; BLUNT, 1877), porém demorou 100 anos para a primeira aplicação da luz solar como desinfetante de água pelo processo SODIS, onde Acra e colaboradores usaram radiação solar para inativar agentes patogênicos em soluções de reidratação oral (ACRA et al., 1980). O EAWAG (Instituto Federal Suíço de Ciência e Tecnologia Aquática) /SANDEC (Departamento de saneamento e água para países em desenvolvimento) iniciou a divulgação a nível mundial do SODIS visando promover este método em áreas onde a água potável é indisponível. Desde 1999 foram lançadas iniciativas locais e atividades do SODIS em vários países da América Latina, como também na Indonésia, Sri Lanka, Índia, Nepal, Paquistão, Uzbequistão, Quênia, África do Sul e Angola.

Este método consiste simplesmente em colocar a água contaminada em recipientes transparentes de plástico (normalmente garrafas de bebidas de

polietileno de 2 L) que são expostas ao sol. Dependendo da irradiância solar e da sensibilidade dos agentes patogênicos, os tempos de exposição necessários para atingir o nível desejado de desinfecção podem variar de 6 a 48 horas (EAWAG/SANDEC, 2002; MCGUIGAN et al., 2012). Cientistas da EAWAGA reportaram que para que se torne realmente eficiente o processo SODIS, a partir de uma água com temperatura em cerca de 30°C, será exigida uma intensidade de radiação solar de pelo menos 500 W.m⁻² com 5 horas de exposição solar (EAWAG/SANDEC, 2002). A Figura 5 mostra os passos do processo SODIS para desinfecção Solar.

Figura 5 - Descrição gráfica da técnica SODIS



Fonte: (MCGUIGAN et al., 2012)

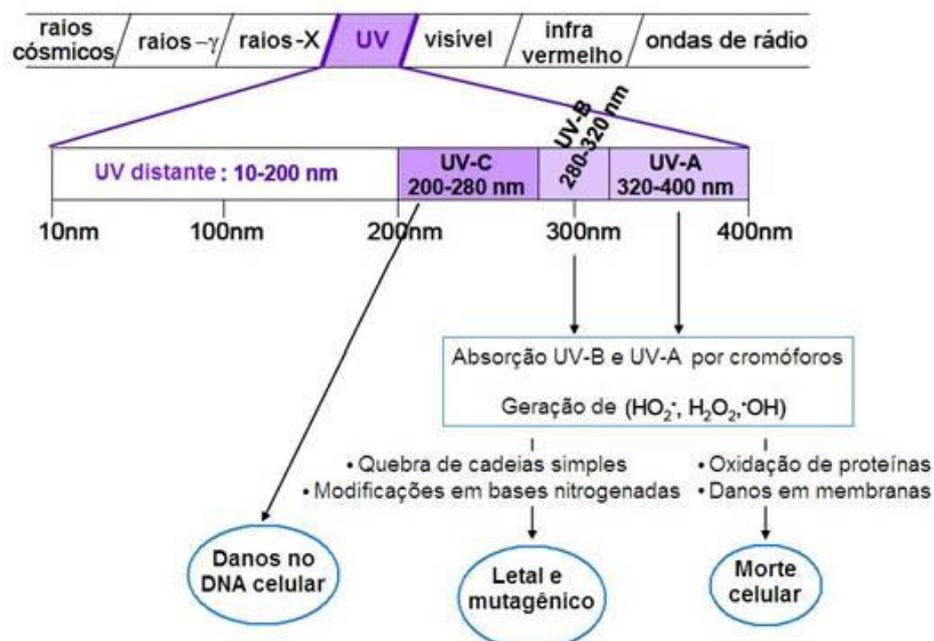
O principal efeito do processo SODIS é a redução da carga de agentes patogênicos na água, alcançada pelo efeito da junção do aquecimento solar térmico e a ação de fótons UV em microrganismos, que é reconhecido como um efeito sinérgico entre ambos os fatores. A técnica é muito simples de usar e de baixo custo com mínima probabilidade de recontaminação. Ela também é eficaz contra vírus, bactérias e protozoários, embora dependa fortemente das condições climáticas e da

natureza do microrganismo.(RAZZOLINI et al., 2016); (PÉREZ; PULGARÍN, 2015); (CASTRO-ALFÉREZ et al., 2017).

3.4.1 Danos Celulares Induzidos pela Radiação Solar

A radiação solar atua como o principal agente letal na desinfecção da água. A radiação ultravioleta pode ser dividida em UVA, UVB e UVC, UV (UVC de 200 a 280 nm, UVB de 280 a 320 nm e UVA de 320 a 400 nm). Cada faixa de UV pode gerar diferentes danos dentro da célula de acordo com seu comprimento de onda e são representados na Figura 6.

Figura 6 - Principais danos biológicos causados pelos diferentes espectros de UV



Fonte: (MALATO et al., 2009)

O UVC é a radiação UV mais energética e letal das células devido à absorção máxima pelo DNA (ácido desoxirribonucleico), aproximadamente 260 nm. As células irradiadas por UVC geram dímeros de pirimidina e de purina que eventualmente levam ao rompimento da fita de DNA e à inativação posterior das células. Além disso, o UVC também gera danos proteicos, pois absorvem a luz principalmente a

200 nm, seguindo até 220 nm, principalmente devido à presença da ligação peptídica [-C(O)-NH-]. No entanto, o UVC não atinge a superfície da Terra porque é principalmente absorvido na estratosfera pela camada de ozônio (KÜHN et al., 2003).

O efeito germicida UVB é 100-1000 vezes mais eficiente contra a inativação microbiana do que o UVA e também pode levar a alterações no DNA (GIANNAKIS et al., 2016b). Os principais foto-produtos gerados de DNA pela absorção de luz UVB são:

- Dímeros de ciclobutano-pirimidina (CPD), formados pela excitação das bases de pirimidina (citosina ou timina).
- Dímeros 6,4-Pirimidina-pirimidona, formado pela excitação de bases de pirimidina para o estado de *singlet* e a reação com outras bases de pirimidina. A absorção adicional da luz UV (A ou B) pode gerar isômeros de valência Dewar que inibem a replicação do DNA.
- Fotoprodutos de pirimidina monomérica (citosina), formado pela excitação de compostos monoméricos de citosina para o estado *singlet* e uma adição nucleofílica de água.
- Fotoprodutos à base de purinas (adenina ou guanina) podem absorver a luz UVB de maneira similar às bases de pirimidina gerando isômeros de valência Dewar

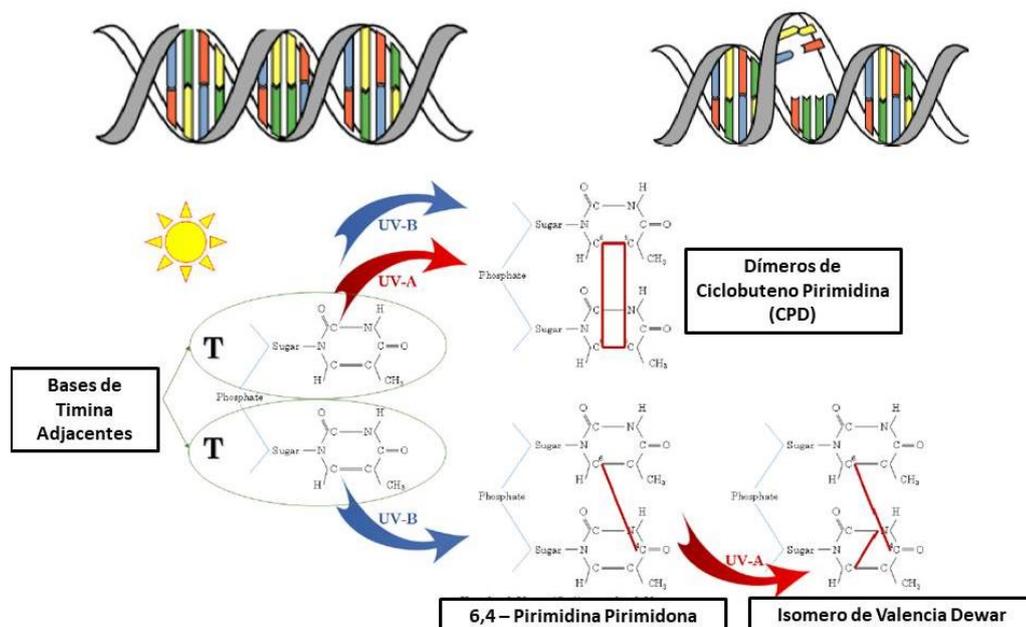
Além disso, algumas proteínas podem absorver a luz UVB, embora sua absorbância máxima pertença à região UVC. Alguns dos aminoácidos que absorvem a luz UVB são os resíduos triptofano (Trp), tirosina (Tyr), fenilalanina (Phe), histidina (His) e cisteína (Cys). Outro alvo importante é a enterobactina. É um poderoso agente quelante de ferro cujo pico de absorção ocorre em 316 nm, o que resulta em um aumento da concentração de ferro sob luz UVB (DAVIES, 2003).

A radiação UVB muitas vezes não é levada em consideração quando se trata de desinfecção solar SODIS, pois os materiais dos quais são feitos os vasos receptores, PET (Politereftalato de Etila) ou vidro borossilicato, filtram este tipo de radiação (GIANNAKIS et al., 2018b).

A radiação UVA é o principal comprimento de onda que causa a inativação bacteriana durante a exposição solar da água para a técnica SODIS. Embora possam ocorrer diferenças nos comprimentos de onda UVA absorvidos entre os materiais que transportam a água tratada, a maior fração desses comprimentos de onda será transmitida. No geral, os efeitos diretos do UVA podem ser caracterizados como menos prejudiciais, em comparação com o resto dos comprimentos de onda da luz UV, mas a absorção direta pelo DNA, proteínas e outras estruturas é notável e será discutida em seguida (GIANNAKIS et al., 2016b; NAHIM-GRANADOS; SÁNCHEZ PÉREZ; POLO-LOPEZ, 2017; ORTEGA-GÓMEZ et al., 2014).

A radiação UVA também está envolvida na formação de isômeros de valência de dímeros de ciclobutano-pirimidina (CPD) e isômero Dewar. Besaratinia et al., (2005) provaram que a radiação UVA pode induzir a formação da CPD até 365 nm com formação simultânea de foto-produtos de 6,4-Pirimidona-pirimidina. No caso da formação de isômeros de Valência de Dewar, o pico de absorção para a sua formação é de cerca de 320 nm como indicado na Figura 7 (GIANNAKIS et al., 2016b).

Figura 7 - Modificações estruturais químicas do DNA durante a exposição à luz solar. Formação de CPDs, 6,4- Pirimidina Pirimidona e isômeros de valência de Dewar.

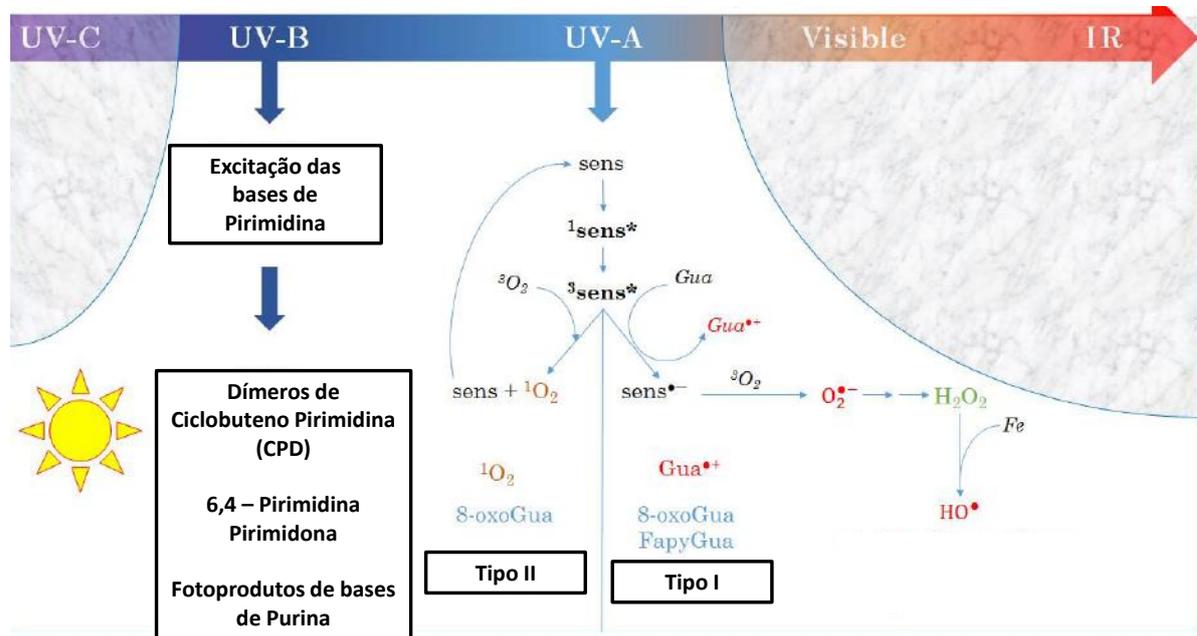


Fonte: Adaptado (GIANNAKIS et al., 2016b)

Embora os CPDs sejam formados em uma proporção mais alta do que os outros produtos, a luz UVA é responsável por uma série de outras reações, ou seja, reações de foto-oxidação Tipo I e Tipo II. As reações do Tipo I são processos de oxidação de um elétron em que as bases de DNA são os doadores de elétrons, principalmente, a guanina. Esta reação induz a formação de espécies de oxigênio reativo (ROS) pela geração de radicais superóxido que é o promotor de peróxido de hidrogênio e radicais hidroxila. As reações de Tipo II envolvem a formação de oxigênio *singlet* e a transformação de bases de DNA em estereoisômeros instáveis. Os danos acumulados induzidos por ROS são considerados como um agente principal de dano produzido pela radiação solar. Essas espécies foram comprovadas por induzir peroxidação de lipídios, oxidação de proteínas, danos de DNA pela formação de dímeros de pirimidina, ou geração de quebras de uma única linha (GOODSELL, 2001).

As reações tipo II devem ser separadas em duas categorias, reações secundárias (ânion radical superóxido) e reações principais (relacionadas ao oxigênio *singlet*), dependendo das propriedades químicas do facilitador. Na Figura 8, pode-se ver que o dano nessa categoria de reações é resultado da absorção de luz pelos fotossensibilizadores e da excitação ao estado de *singlet* (1sens^*). Através do cruzamento intersistema, a geração de estados tripleto é induzida (3sens^*), então a transferência de energia para o oxigênio molecular é maior e, portanto, a produção subsequente de ROS (Espécies Reativas de Oxigênio). O principal facilitador da transferência de elétrons é a guanina, que tem alta reatividade com oxigênio *singlet*. As habilidades de fotossensibilização da guanina também não devem ser excluídas; a foto-oxidação do DNA aparece com mais frequência como 8-oxo-7,8-dihidroguanina (8-oxoGua) (GIANNAKIS et al., 2018c).

Figura 8 - Diferentes vias iniciadas a partir da radiação UVB e UVA do Tipo I e II.

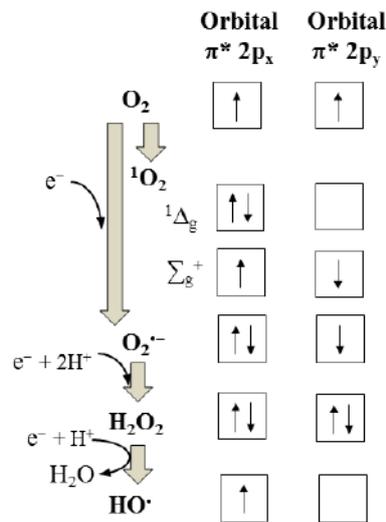


Fonte: Adaptado (GIANNAKIS et al., 2016b)

A fim de elucidar os mecanismos de inativação iniciados pela luz, as diferentes ROS produzidas e sua relação com as frações funcionais da célula, bem como, os alvos de danos em vias indiretas serão analisados nos próximos itens.

3.4.2 Espécies Reativas de Oxigênio (ROS)

Oxigênio (O_2) intracelular pode sofrer processos de redução de elétrons (Figura 9) gerando espécies de oxigênio parcialmente reduzidas que são mais reativas do que o próprio oxigênio molecular e são conhecidas como Espécies Reativas de Oxigênio (ROS) (CASTRO-ALFÉREZ; POLO-LÓPEZ; FERNÁNDEZ-IBÁÑEZ, 2016).

Figura 9 - Estados de Oxidação do Oxigênio

Fonte:(MALATO et al., 2016)

As ROS são uma parte natural do ciclo respiratório das bactérias, quando crescem em condições aeróbicas. As ROS predominantes formados de forma trivial são o ânion superóxido ($O_2^{\bullet-}$) e o peróxido de hidrogênio (H_2O_2) (CASTRO-ALFÉREZ; POLO-LÓPEZ; FERNÁNDEZ-IBÁÑEZ, 2016).

A cadeia respiratória provou ser a principal fonte de $O_2^{\bullet-}$ formada no citoplasma e depois liberada no periplasma (KORSHUNOV E IMLAY, 2006). O radical superóxido pode ser considerado como um fator ativador, já que é o precursor de outros radicais reativos. Os radicais superóxido são um oxidante muito potente que pode causar vários danos nas células bacterianas por diferentes vias. Em primeiro lugar, o $O_2^{\bullet-}$ é capaz de inativar diretamente uma família de desidratases. Isto pode afetar a eficiência das vias nas quais essas enzimas estão envolvidas, isto é, a via biossintética de cadeia ramificada (desidratases de di-hidroxiácido e i-propilmalato desidratases) e o ciclo de Krebs (aconitase B e fumarases A e B) (SMYK-RANDALL et al., 1993).

O mecanismo de formação do H_2O_2 intracelular tem sido amplamente estudado (NAHIM-GRANADOS; SÁNCHEZ PÉREZ; POLO-LOPEZ, 2017; ORTEGA-GÓMEZ et al., 2014; SPUHLER; ANDRÉS RENGIFO-HERRERA; PULGARIN, 2010). Em *E.coli*, as fontes predominantes de H_2O_2 citoplasmático estão fora da cadeia respiratória. Ele é formado a partir da dismutação de radicais superóxido e da

redução direta de oxigênio pela ação das enzimas fumarato redutase e aspartato oxidase (MESSNER; IMLAY, 1999).

H₂O₂ celular externo pode difundir livremente através das membranas devido ao pequeno tamanho, atingindo níveis tóxicos no interior das células. Embora o H₂O₂ tenha um alto potencial de redução, seu real poder de oxidação para diversas moléculas biológicas é baixo devido à alta energia de ativação dessas reações. O potencial efeito tóxico do H₂O₂ é explicado porque ele é o precursor de várias espécies de radicais, que são mais reativas, como radical hidroxila (HO•) e dióxido de nitrogênio (NO₂⁻) (ABELEDO-LAMEIRO et al., 2017).

Outros ROS formados dentro das células são o radical hidroxila (HO•), geralmente na presença de íons de metais de transição. Este radical possui o mais forte potencial oxidante produzido em sistemas biológicos e ganha importância porque reage muito rapidamente com a maioria dos alvos biológicos. As biomoléculas que são suscetíveis de serem oxidadas por HO• incluem lipídios, proteínas, carboidratos, DNA e RNA. As células não possuem nenhum sistema de eliminação contra os danos causados pelos radicais hidroxila (CASTRO-ALFÉREZ et al., 2018).

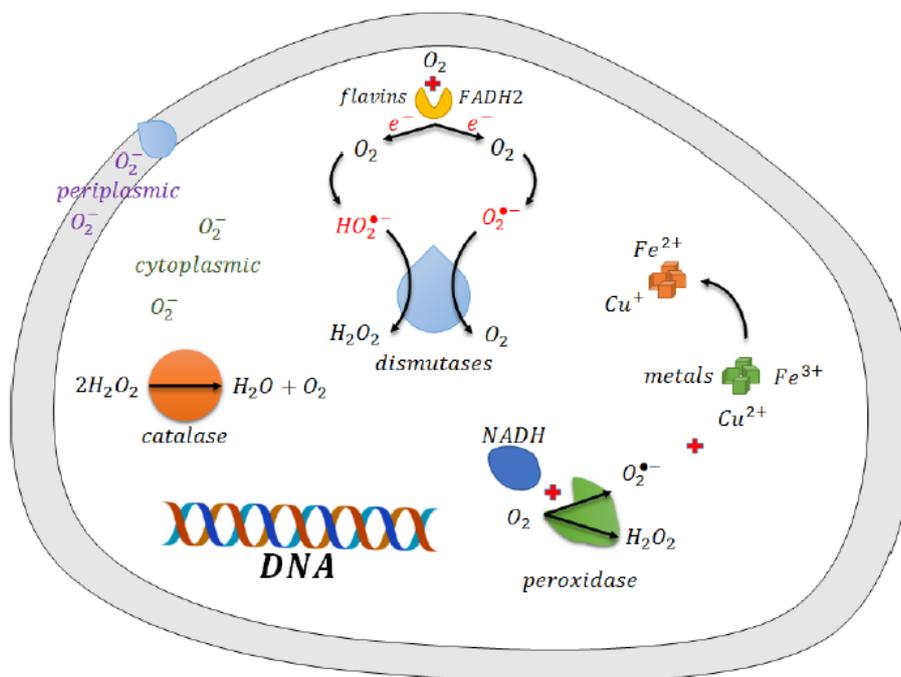
A formação do peroxinitrito acontece entre O₂⁻ e NO•. O peroxinitrito é um potente agente oxidativo com reatividade semelhante ao do ácido hipocloroso. É capaz de reagir com alguns aminoácidos tais como cisteína, metionina ou triptofano. Além disso, a protonação do peroxinitrito gera radicais hidroxila e ácido peroxinitrito por clivagem homolítica (BARTESAGHI; RADI, 2018; RADI, 2013).

O oxigênio *singlet* (¹O₂) é uma das ROS mais prejudiciais nas células bacterianas. É um derivado do oxigênio molecular no qual todos os elétrons de valência são spin oposto enquanto no oxigênio molecular os elétrons estão na mesma direção (Figura 9)(MALATO et al., 2016). A principal via de formação de oxigênio *singlet* é a foto-excitação pelas reações Tipo II que requerem a exposição à luz UVA. O fotossensibilizador endógeno no estado fundamental, como flavinas, porfirinas e quinonas, absorvem luz para atingir um estado excitado *singlet*, que pode assumir espontaneamente um estado *triplet* excitado (³sens*) por inversão de spin eletrônico. O oxigênio *singlet* é capaz de reagir com moléculas orgânicas,

incluindo ácidos nucleicos, proteínas e lipídios, gerando danos em biomoléculas (DAVIES, 2003; FERNÁNDEZ-IBÁÑEZ et al., 2015).

Normalmente, as bactérias contêm reguladores de ROS para combater potenciais desequilíbrios gerados dentro das células ou resistir à produção de ROS por auto-oxidação enzimática. As linhas de defesa mais conhecidas são a catalase, Ahp hidroperoxi-redutase, superóxido dismutases (FeSOD, MnSOD), hidroperoxidasas (HPI, HP11) e glutatona redutase (GR) (SMYK-RANDALL et al., 1993). A Figura 10 mostra o ciclo interno de ROS sem adição da radiação UV.

Figura 10 - Ciclo interno de ROS, antes da adição de luz.



Fonte: Adaptado(GIANNAKIS et al., 2016b)

A catalase é a principal enzima responsável pela decomposição de H_2O_2 em água e oxigênio. Além disso, a hidroperoxido redutase elimina o H_2O_2 normalmente produzido em *E. coli* (SMYK-RANDALL et al., 1993). As Superóxido dismutases (Mn, Fe- ou CuZn-SOD) são as enzimas que convertem $O_2^{\bullet-}$ para O_2 e H_2O_2 (MCCORD; FRIDOVICH, 1969). Finalmente, as peroxidases, desidrogenam por H_2O_2 os compostos fenólicos e também são responsáveis pela redução de O_2 para $O_2^{\bullet-}$ e H_2O_2 , usando NADH (BARTESAGHI; RADI, 2018).

Quando a luz solar é fornecida às células bacterianas, a reação em cadeia dos eventos segue um mecanismo complexo, iniciado por duas frentes simultâneas: ação da luz e ação das ROS. Assumindo que uma célula esteja preservando seu ciclo normal de ROS, a adição de luz cria uma cadeia de eventos oxidativos (BARREIROS; DAVID; DAVID, 2006).

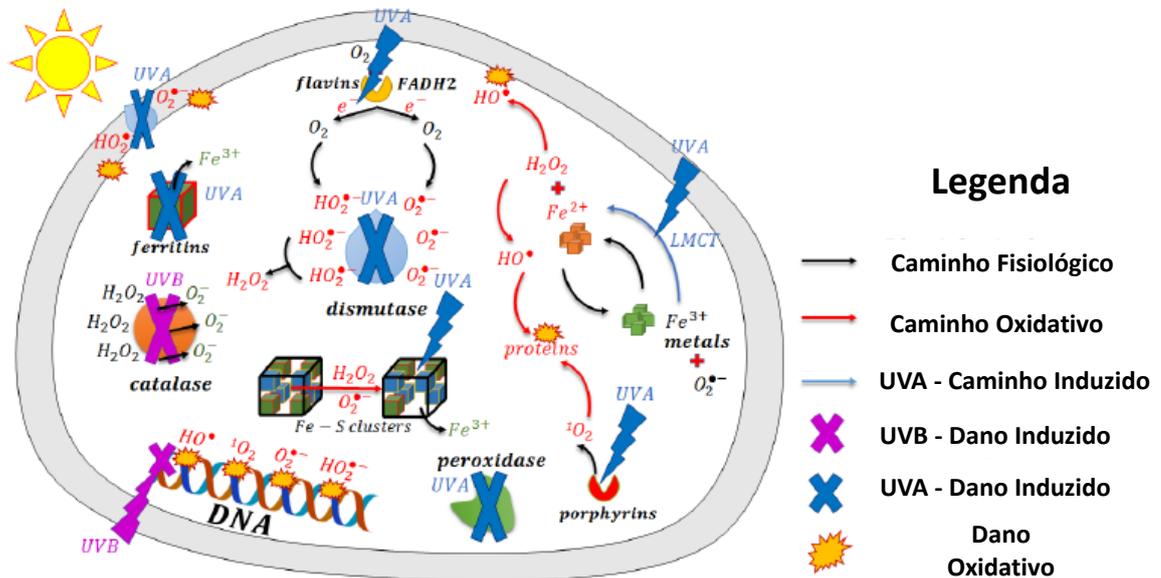
A radiação UVB afeta as funções da catalase e, portanto, aumenta o acúmulo de H_2O_2 intracelular. Também induz excesso de produção de O_2^- em *E. coli*. A radiação UVA e UVB ainda reduzem significativamente a atividade da CAT e SOD, enzimas importantes no controle de ROS, gerando um excesso de acumulação de ROS dentro da célula (ZHANG et al., 2018).

Sabe-se também que o UVA afeta a cadeia respiratória da *E. coli*, com alguns dos mecanismos sugeridos por Bosshard et al. (2010). Uma cadeia de transporte de elétrons com “defeito” forneceria elétrons, com muitos redutores, que se convertem em intermediários reativos. Além disso, o acúmulo de agentes oxidantes leva a produção de ROS por reações internas induzidas por metais e NADH (ROSE, 2005).

O UV próximo é conhecido por degradar as estruturas da membrana dentro da célula (KELLAND; MOSS; DAVIES, 1983). Mais especificamente, os feixes de Fe/S absorvem na região UVA. O UVA degrada a ferritina e outras substâncias semelhantes à ferritina, levando à liberação imediata de ferro no citoplasma através da destruição do seu ligante (POURZAND et al., 1999). Mais importante ainda, na presença destes ligantes, quelantes e ROS, a reação de Fenton ocorre, produzindo $HO\cdot$. Levando em conta a luz incidente nesses comprimentos de onda, a reação de Fenton encontrará seu catalisador regenerado de volta a Fe^{2+} com a produção simultânea de outro radical hidroxila.

O DNA não apresenta resistência a danos de ROS por reações internas de Fenton iniciadas por luz, por duas razões principais: ele pode se ligar ao Fe^{3+} solto catalisando a reação de Fenton e sofrendo dano oxidativo no local da reação. Os danos oxidativos ao DNA causados por $HO\cdot$ podem induzir efeitos diferentes, tais como oxidação de bases, perda de base, ligações cruzadas DNA-proteína e, por fim, quebras na cadeia de DNA (MALATO et al., 2007). A Figura 11 mostra os principais efeitos do estresse oxidativo causado pela radiação ultravioleta em uma bactéria.

Figura 11 - Danos induzidos pela luz UV ao microrganismo



Fonte: Adaptado(GIANNAKIS et al., 2016b)

3.4.3 Efeito térmico durante o SODIS

O efeito da temperatura na desinfecção solar (SODIS) tem sido estudado em detalhes em diversos trabalhos, demonstrando que as temperaturas da água acima de 45 °C mostram um efeito sinérgico com a radiação UV, acelerando o processo de desinfecção. Wegelin et al. (1994) indicaram que a sinergia foi observada com uma temperatura de 50 °C, temperatura que foi suportada pelos estudos de Joyce et al. (1996), que observaram sinergias a 55 °C como a temperatura máxima da água.

Em 1998, Mcguigan et al. (1998) demonstraram que essa interação poderia ser ainda menor, até 45 °C. Esta equipe realizou um conjunto de experiências que separam os efeitos térmicos e ópticos durante o SODIS, por meio de simulações com lâmpadas artificiais e usando uma cepa selvagem de *E. coli* em água estéril como indicador de microrganismos. De um lado, eles realizaram experimentos térmicos, sujeitando a população microbiana a temperaturas fixas: 40, 45, 50, 55 e 60 °C, descobrindo que a variação foi apenas importante a temperaturas acima de 45 °C. Por outro lado, eles também realizaram experimentos que só foram submetidos à inativação óptica, mantendo a temperatura da água a 22 °C,

estudando o efeito da turbidez no processo e descobrindo que a inativação óptica dependia completamente da turbidez, como esperado.

Giannakis et al. (2014) realizaram uma série de experimentos que demonstraram o potencial efeito antagonista da temperatura no SODIS. Embora tenha sido assumido por um longo tempo que a temperatura da água não tinha nenhum efeito abaixo de 45 °C, eles demonstraram, usando irradiação simulada e temperatura com um efluente secundário sintético e *E. coli*. (isto é, com nutrientes na água), que temperaturas entre 30 e 40 °C tem baixa eficiência na desinfecção de água, porque a temperatura ideal de crescimento das bactérias é 37°C. Esses resultados foram suportados por Vivar et al., (2017) que conduziram experimentos separando a ação de UV e temperatura. Os resultados microbiológicos mostraram forte sinergia de UV e temperatura quando o último está acima de 45 °C, como esperado, porém abaixo de 40 °C, os experimentos ópticos (somente UV) e SODIS seguiram a mesma cinética de desinfecção. Mas na faixa de 40-45°C, sob condições UV não tão fortes ou não contínuas, o processo SODIS diminuiu em comparação com o processo óptico (somente UV) e o reator térmico experimentou crescimento microbiano. Isso pode ser essencial para entender os diferentes resultados do SODIS quando se usa água natural em condições reais de operação, já que alguns estudos mostram desinfecção completa *versus* outros que não atingem a inativação total, apesar de condições climáticas fortes e níveis similares de qualidade da água.

3.5 PASTEURIZAÇÃO SOLAR DE ÁGUA (SOPAS)

O termo pasteurização provém do nome de Louis Pasteur(1822-1895), cuja técnica é o aquecimento de água a uma temperatura suficientemente alta, sem atingir a ebulição, por um determinado tempo para destruir patógenos presentes (DOBROWSKY et al., 2015). É um equívoco comum pensar que a pasteurização da água requer fervura e resfriamento logo em seguida. A água fervente requer cerca de duas vezes a energia necessária do que a temperatura necessária para a pasteurização, além de consumir algum tipo de combustível que tem um custo elevado na maior parte do planeta.

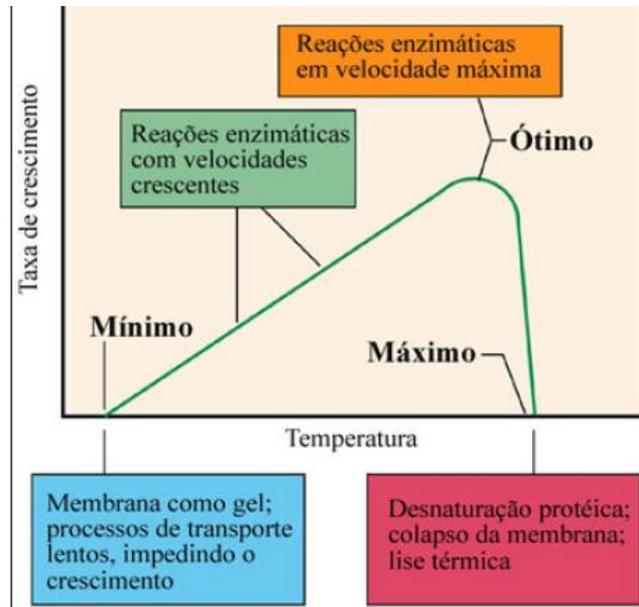
A pasteurização solar é um dos métodos mais fáceis e baratos para produzir água desinfetada em áreas remotas. Baseia-se na utilização da energia do sol para aquecer a água até à temperatura de pasteurização e promover a desinfecção da água por temperatura (CARIELO DA SILVA; TIBA; CALAZANS, 2016).

Ao contrário do SODIS, onde as temperaturas podem ser insuficientes para inativar microrganismos, o uso de SOPAS cria temperaturas altas o suficiente para tratar com sucesso a água contaminada e o tempo necessário para tratar a água também é reduzido. Além disso, SOPAS tem sido considerado um sistema de tratamento confiável e barato (HELMREICH;HORN, 2009), pois a remoção de todos os principais patógenos é independente da turbidez, pH e parâmetros adicionais que podem influenciar outros sistemas de tratamento propostos (STRAUSS et al., 2016).

3.5.1 Danos Celulares Induzidos pela Temperatura

O uso do calor é um dos métodos mais empregados e simples para eliminar microrganismos. Os microrganismos morrem pela desnaturação de proteínas na presença de calor úmido, ou por oxidação, quando se trata de calor seco (TRABULSI; ALTERTHUM, 2004). À medida que a temperatura aumenta, as reações químicas e enzimáticas passam a ocorrer com maior velocidade, o que leva ao aumento do crescimento e das atividades metabólicas, mas até certos limites. Acima desses limites, as funções celulares caem rapidamente para zero devido a danos irreversíveis em determinadas proteínas, conforme mostra a Figura 12 (MADIGAN; MARTINKO; BENDER, 2016).

Figura 12 - Efeito da temperatura na taxa de crescimento e as consequências moleculares para a célula. As três temperaturas cardiais variam nos diferentes organismos.



Fonte: Adaptado (MADIGAN; MARTINKO; BENDER, 2016)

Esse processo pode ser usado em bactérias, vírus e protozoários, garantindo sua morte pelo calor, independentemente da turbidez e do pH, levando em consideração que quanto maior a temperatura, menor o tempo necessário para garantir a pasteurização (CARIELO et al., 2017).

Em geral, as estruturas celulares ou alvos que são mais afetados pela inativação celular através do calor são a membrana externa e interna, a parede celular, o núcleo, o RNA da célula, os ribossomos e diversas enzimas (CEBRI; CONDÓN; MAÑAS, 2017). A membrana externa das bactérias Gram-negativas é uma das estruturas afetadas pelo calor. Danos infligidos a essa estrutura foram evidenciados através da sensibilização de células por calor e a liberação de moléculas de lipopolissacarídeos também foi relatada (TSUCHIDO et al., 1985).

A parede do peptidoglicano também é afetada pelo calor. Tem sido relatado que as células de *S. aureus* perdem alanina dos ácidos teicóicos, o que leva à quelação de íons Mg na parede, impedindo seu uso em certos processos metabólicos essenciais dentro da célula (LEE; KALETUNÇ, 2002). Teixeira et al., (1997) demonstraram que a parede celular de *Lactobacillus bulgaricus* foi lesionada após aquecimento a 64°C.

A temperatura afeta a membrana plasmática dos microrganismos, fazendo com que ocorra a perda de material citoplasmático. O dano na membrana plasmática está relacionado à inativação celular, já que sua perda parcial de funcionalidade traz consequente perda de homeostase interna, alterações na entrada e saída de vários componentes, perda de atividade respiratória e perda da homeostase osmótica além de alteração no pH (MACKEY et al., 1991).

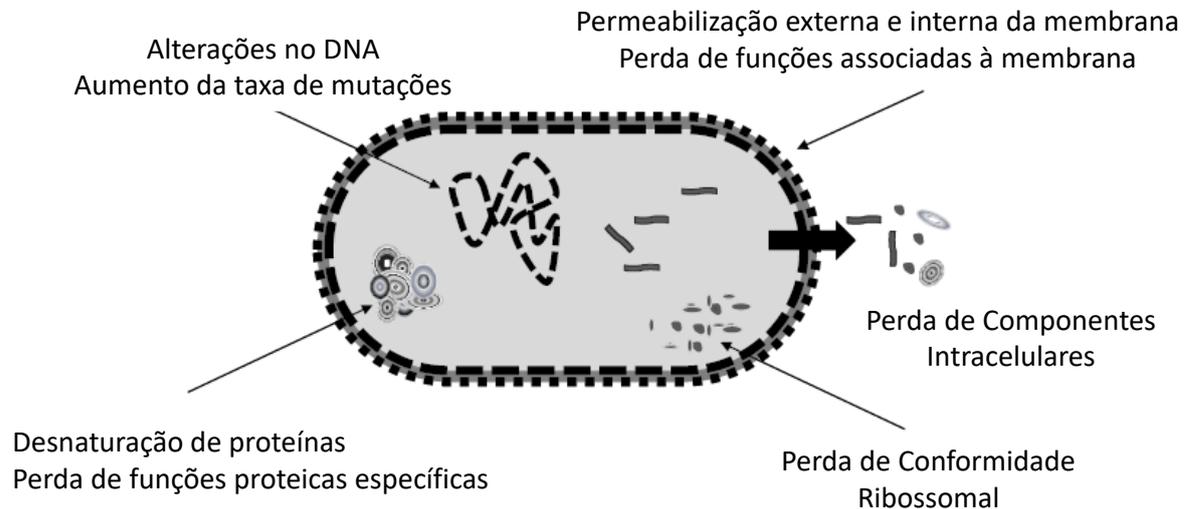
Embora a ocorrência de alterações de membrana em células aquecidas esteja bem estabelecida, assume-se que a membrana citoplasmática não é a única estrutura envolvida na inativação celular pelo calor. O DNA é um dos constituintes celulares com a mais alta termoestabilidade, sua desnaturação ocorre apenas nas temperaturas de esterilização, no entanto, tratamentos menos intensos são capazes de danificar o DNA de uma maneira mais sutil (REYNEKE et al., 2016). Pellon et al., (1980) evidenciaram alterações no DNA através do aumento da frequência de mutação em populações sobreviventes após exposição ao calor. Esses danos tornam o DNA mais exposto à ação de endonucleases, levando a potenciais desnaturações posteriores.

A desnaturação do RNA foi inicialmente apontada como uma das consequências mais evidentes da exposição das células bacterianas ao calor. Danos aos ribossomos também foram relatados. A desnaturação irreversível dos ribossomos ocorre em temperaturas entre 55°C e 60°C, próximas àquelas em que as bactérias são inativadas. Algumas proteínas essenciais, incluindo as subunidades α e β da RNA polimerase, também desnaturam em temperaturas similares (TOLKER-NIELSEN; MOLIN, 1996).

Em 1949, Heden e Wyckoff observaram, por meio de microscopia eletrônica, que o citoplasma das células tratadas com calor apresentava uma aparência granular. Mais recentemente, outros autores demonstraram que os tratamentos térmicos induzem desnaturação e agregação de proteínas em células bacterianas. A desnaturação da proteína pode levar a uma perda de funcionalidade de enzimas desintoxicantes como catalase e superóxido dismutase, que desempenham um papel importante no acúmulo de ROS intracelular que levam a morte da célula

(CEBRI; CONDÓN; MAÑAS, 2017). A Figura 13 resume os danos causados pelo calor em uma célula.

Figura 13 - Danos Induzidos pela Temperatura em Microorganismo



Fonte: Adaptado(CEBRI; CONDÓN; MAÑAS, 2017)

A Tabela 5 mostra alguns resultados da literatura para a inativação de bactérias, vírus e protozoários e as respectivas temperaturas para inativação, assim como o tempo necessário para que o processo ocorra.

Uma forma de aquecer a água utilizando o Sol, para inativar esses microrganismos atingindo essas temperaturas, é utilizando coletores de energia. Os coletores de energia solar são permutadores de calor que transformam energia da radiação solar em energia interna na forma de calor. Sua função é aquecer um fluido, geralmente água, que passa através do coletor. Existem basicamente dois tipos de coletores solares: não concentradores ou estacionários e concentradores. Um coletor não concentrador tem a mesma área para interceptar e absorver a radiação solar, enquanto que um coletor solar concentrador, geralmente possui superfícies refletoras para interceptar e focar a radiação do feixe do sol para uma área de recepção menor, aumentando assim a radiação de fluxo (ZHANG et al., 2013).

Tabela 5 - Inativação térmica de bactérias, vírus e protozoários.

Organismo	Temperatura (°C)	Tempo de inativação (segundos)	Referência
Bactéria			
<i>Campylobacter spp.</i>	60	300	D'Aoust et al. (1988)
	63	300	D'Aoust et al. (1988)
	60	8,2	Sörqvist (2003)
<i>Coxiella burnetii</i>	62	15	Juffs & Deeth (2007)
	79.4	25	Juffs & Deeth (2007)
<i>Escherichia coli</i>	60	1 800	Moce-Llivina et al. (2003)
	65	< 2	Spinks et al. (2006)
	72	0.4	Sörqvist et al. (2003)
<i>Escherichia coli</i> O157	60	300	D'Aoust et al. (1988)
	64.5	300	D'Aoust et al. (1988)
	65	3	Spinks et al. (2006)
	62	15	Juffs & Deeth (2007)
<i>Enterococcus faecalis</i>	65	7–19	Spinks et al. (2006)
<i>Klebsiella pneumoniae</i>	72	23	Sörqvist (2003)
	65	< 2	Spinks et al. (2006)
<i>Legionella pneumophila</i>	58	360	Dennis, Green & Jones (1984)
<i>Legionella spp</i>	80	18–42	Stout, Best & Yu (1986)
<i>Mycobacterium paratuberculosis</i>	72	15	Juffs & Deeth (2007)
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	65	5	Spinks et al. (2006)
<i>Salmonella typhimurium</i>	65	< 2	Spinks et al. (2006)
<i>Salmonella choleraesuis</i>	60	300	Moce-Llivina et al. (2003)
<i>Salmonella spp. except Salmonella seftenberg</i>	72	0.1	Sörqvist (2003)
<i>Salmonella seftenberg</i>	60	340	Sörqvist (2003)
<i>Serratia marcescens</i>	65	< 2	Spinks et al. (2006)
<i>Shigella sonnei</i>	65	3	Spinks et al. (2006)
<i>Vibrio cholerae</i>	55	22.5	Johnston & Brown (2002)
	70	120	Johnston & Brown (2002)
<i>Yersinia enterocolitica</i>	64.5	300	D'Aoust et al. (1988)
	72	0.5	Sörqvist (2003)
Vírus			
<i>Adenovirus 5</i>	70	1 260	Maheshwari et al. (2004)
<i>Coxsackievirus B4</i>	60	1 800	Moce-Llivina et al. (2003)

<i>Coxsackievirus B5</i>	60	1 800	Moce-Llivina et al. (2003)
<i>Echovirus 6</i>	60	1 800	Moce-Llivina et al. (2003)
<i>Enteroviruses</i>	60	1 800	Moce-Llivina et al. (2003)
	65	120	Parry & Mortimer (1984)
	65	1320	Bidawid et al. (2000)
<i>Hepatitis A</i>	75	30	Parry & Mortimer (1984)
	80	5	Parry & Mortimer (1984)
	85	<30	Bidawid et al. (2000)
	85	<1	Parry & Mortimer (1984)
	60	1 800	Moce-Llivina et al. (2003)
	62	1 800	Strazynski, Kramer & Becker (2002)
<i>Poliovirus 1</i>	72	30	Strazynski, Kramer & Becker (2002)
	95	15	Strazynski, Kramer & Becker (2002)

Protozoário

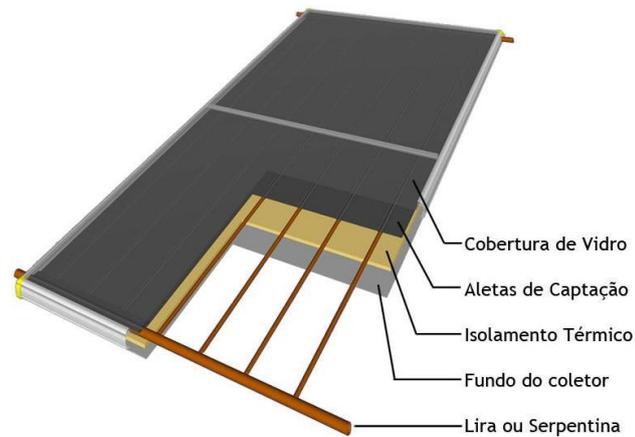
<i>Cryptosporidium</i>	60	300	Fayer (1994)
<i>parvum</i>	72	60	Fayer (1994)
	72	5–15	Harp et al. (1996)
<i>Giardia</i>	56	600	Sauch et al. (1991)
	70	600	Ongerth et al. (1989)

Fonte: Adaptado (WHO/UNICEF, 2015).

3.5.2 Coletores de Placa Plana Estático

Um coletor solar típico de placa plana é mostrado na Figura 14. A radiação solar passa por uma cobertura transparente de vidro e vai para uma superfície enegrecida de alta absorção, é transferida para o meio de transporte nos tubos de fluido, para ser transportados para armazenamento ou uso. A parte inferior da placa absorvente e os dois lados estão bem isolados para reduzir as perdas por condução. Os tubos de líquido podem ser soldados na placa de absorção ou podem ser parte integrante da placa (KALOGIROU, 2014).

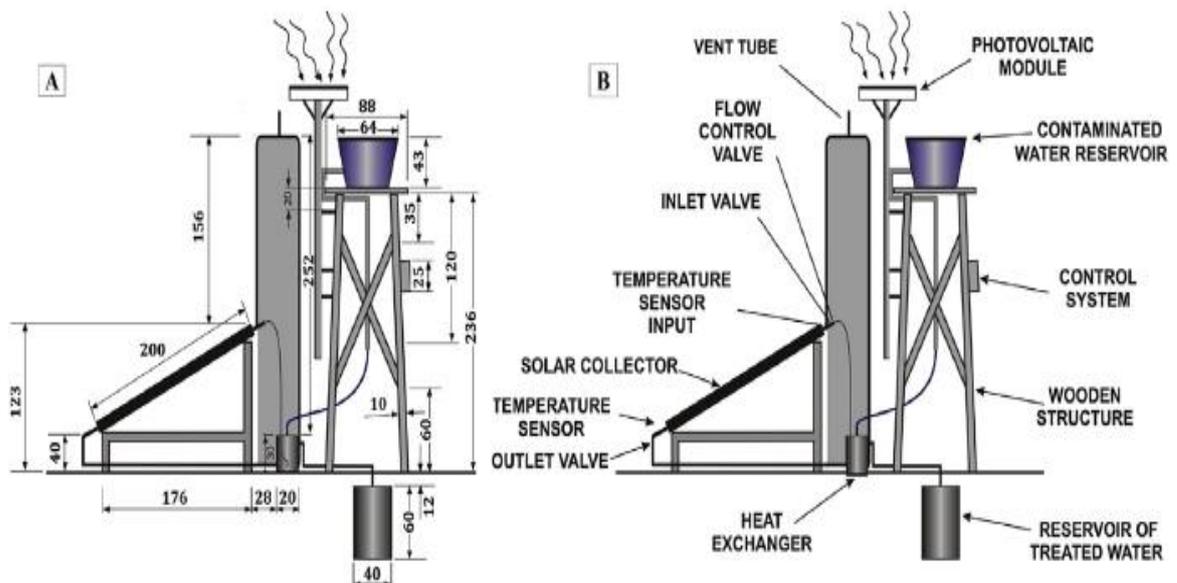
Figura 14 - Coletor de placa plana



Fonte: (TORRES, 2012)

Carielo da Silva et al.,(2016) utilizaram um sistema de coletor de placa plana estático, porém, mais elaborado para garantir a pasteurização da água, (Figura 15). A média diária de produtividade de água tratada para um dia com irradiância em torno de 20 MJ/m^2 , foi de 80 litros de água tratada por dia.

Figura 15 - Pasteurizador solar para tratamento de água. (a) Dimensões; (b) Esquema do protótipo.

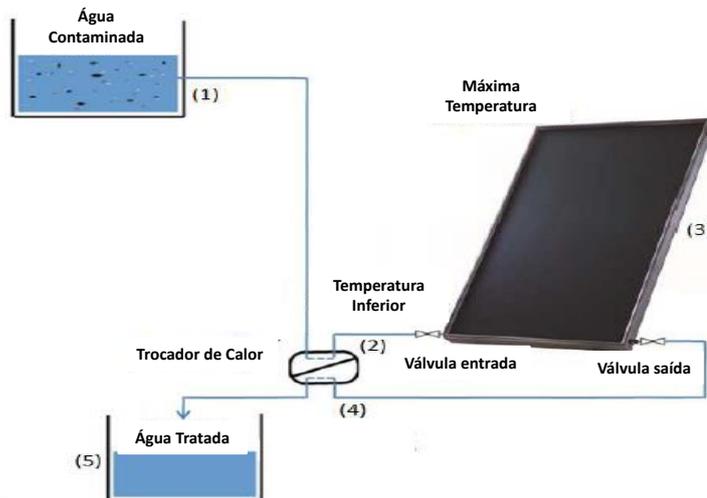


Fonte:(CARIELO et al., 2017)

A Figura 16 mostra uma visão geral esquemática do sistema de operação. A água flui do reservatório de água contaminada (1), passando pela tubulação interna

para o permutador (2) até chegar ao coletor solar, onde será pasteurizada (3). Quando atinge a temperatura, a água tratada (quente) retorna ao permutador de calor (4), e então chega ao reservatório de água tratada (5).

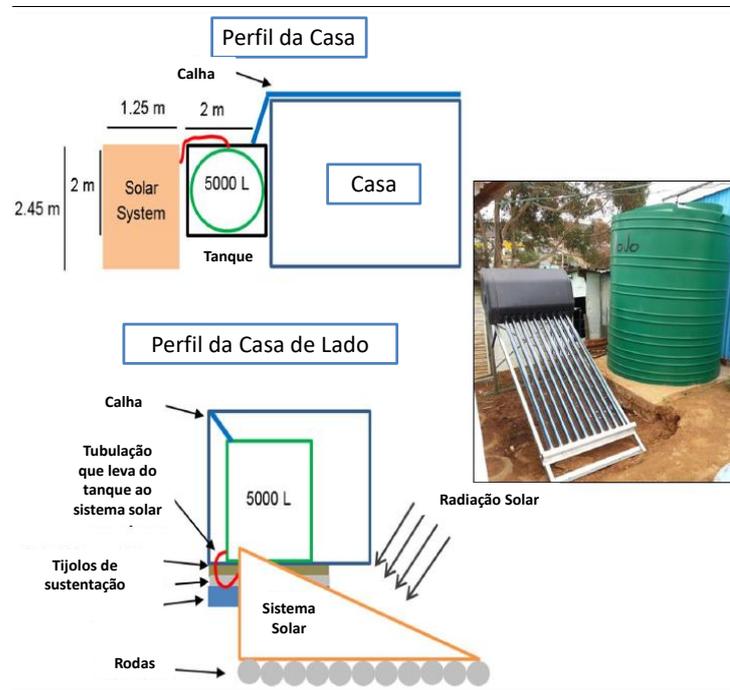
Figura 16 - Diagrama esquemático do ciclo operacional do sistema de pasteurização solar



Fonte:(CARIELO et al., 2017)

Reyneke et al., (2018) desenvolveram um sistema de pasteurização de água de chuva em uma comunidade na África do Sul demonstrado na Figura 17. Os autores deste trabalho conseguiram uma produtividade de 12,8L/h de água pasteurizada a 66°C com radiação local de 1000W/m².

Figura 17 - Um diagrama esquemático do perfil superior e lateral do sistema de tratamento de pasteurização solar de captação de águas pluviais



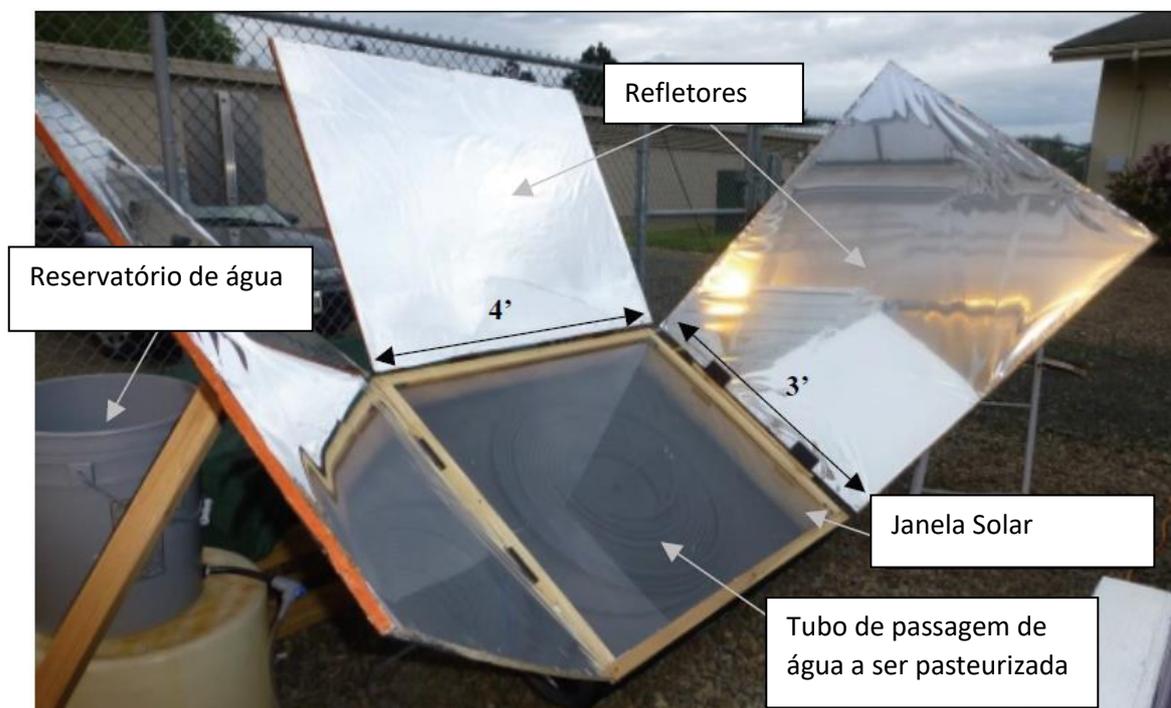
Fonte: (REYNEKE et al., 2018)

3.5.3 Coletores solares de tubo de calor a vácuo

Os coletores solares convencionais de chapa plana simples foram desenvolvidos para uso em climas quentes e ensolarados. Seus benefícios, no entanto, são muito reduzidos quando as condições se tornam desfavoráveis durante o frio, dias nublados e ventosos. Além disso, as influências meteorológicas, como condensação e umidade, podem causar deterioração precoce de materiais internos, resultando em desempenho reduzido e falha no sistema. Os coletores solares de tubos de calor a vácuo operam de forma diferente dos outros coletores disponíveis no mercado. Estes coletores solares consistem em um tubo de calor dentro de um lugar selado a vácuo. Os coletores de tubos a vácuo mostram que a combinação de uma superfície seletiva e um supressor de convecção pode resultar em bom desempenho a altas temperaturas. O envelope de vácuo reduz as perdas por convecção e condução, de modo que os coletores podem operar a temperaturas mais elevadas do que os coletores de placa (KALOGIROU, 2014).

Amsberry et al., (2012), propuseram um sistema de pasteurização solar de água que foi construído com dimensões de (1x1,3) metros de coletor solar e tem três refletores para maximizar luz solar que irradia na caixa. A água flui através de um tubo de 33,3 metros montado sobre uma chapa de aço, e é selado com uma janela de energia solar para evitar a perda de calor. A Figura 18 mostra o protótipo construído neste trabalho.

Figura 18 - Protótipo do coletor solar.

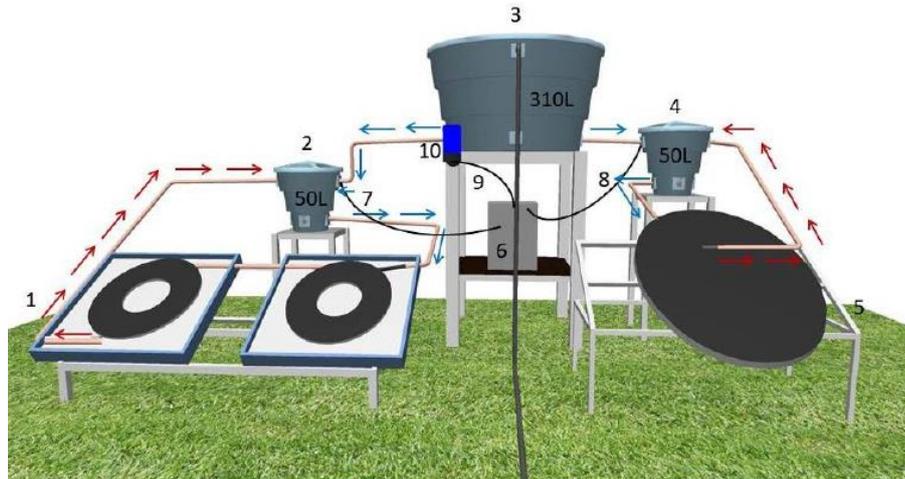


Fonte:(AMSBERRY et al., 2012)

Os autores relataram que a vazão ótima para alcançar a pasteurização com este sistema foi de $150 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ e que a taxa de pasteurização foi de 55L/dia para uma média de intensidade de $700 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

Rodrigues (2018) construiu um sistema semelhante para desinfecção de água por pasteurização solar em pequenas comunidades de Campinas. O sistema é demonstrado na Figura 19.

Figura 19 - Sistema de Pasteurização Solar da Água: (1) Pasteurizador Solar com coletor de alumínio e vidro; (2) Reservatório de água de 50L; (3) Caixa de abastecimento de 310L; (4) Reservatório de água de 50L; (5) Pasteurizador Solar sem coletor e sem vidro; (6) Sistema de aquisição de dados; (7) Sensor de temperatura equipamento 1; (8) Sensor de temperatura equipamento 2; (9) Medidor de radiação; (10) Lâmpada UV.



Fonte: (RODRIGUES, 2018)

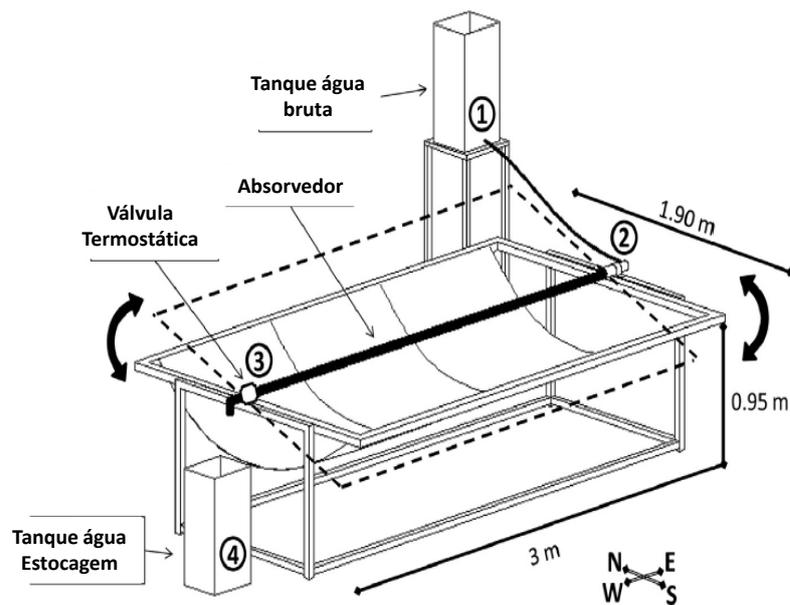
Neste experimento, ambos os equipamentos possuíam tubulação de mangueira de alta pressão, sendo uma composta com estufa (equipamento 1) e outra sem estufa (equipamento 2), com 100 m de mangueira cada. Os melhores resultados obtidos foram em janeiro no verão de 2015, após 470 minutos de experimento, no qual o equipamento 1 atingiu temperaturas acima de 60°C por 30 minutos. O equipamento 2 sem a estufa de proteção não alcançou a temperatura de pasteurização (RODRIGUES, 2018).

3.5.4– Coletor de Calha Parabólica (PTC)

Os coletores de calha parabólica são feitos dobrando uma folha de material reflexivo em uma forma parabólica. Um tubo de metal preto, coberto com um tubo de vidro para reduzir as perdas de calor, deve ser colocado ao longo da linha focal do receptor. Quando a parábola é apontada para o sol, os raios incidentes são refletidos no tubo receptor. A radiação concentrada atinge o tubo e aquece o fluido que circula através dele, transformando a radiação solar em calor útil. Basta usar apenas um rastreamento único do eixo do sol (ZHANG et al., 2013).

Bigoni et al. (2014) construíram um pasteurizador solar de água, baseado em um sistema de coletor de calha parabólica, para aquecer diretamente a água. Os raios são refletidos por espelhos de alumínio em um tubo de aço preto situado na linha focal óptica do coletor segundo Figura 20.

Figura 20 - Sistema PTC (*Parabolic Trough Concentrator*) utilizado para a pasteurização de água



Fonte: (BIGONI et al., 2014).

O pasteurizador atingiu uma produção máxima de água diária de 66 L em um dia ensolarado e ficou estável na sua taxa de redução de *E. coli*. Os resultados deste estudo ocorreram a uma temperatura de pasteurização de 87° C.

3.5.5 Refletor de Disco Parabólico (PDR)

O refletor de disco parabólico (PDR), mostrado esquematicamente na Figura 21, é um coletor que rastreia o sol em dois eixos, concentrando a energia solar em um receptor localizado no ponto focal do disco. A estrutura do disco deve rastrear completamente o sol para refletir o feixe no receptor térmico. O receptor absorve a energia solar radiante, convertendo-a em energia térmica em uma circulação de fluido. O fluido então pode ser transportado através de tubos para um sistema de armazenagem. Os coletores de disco parabólico possuem várias vantagens

importantes, porque eles estão sempre apontando para o sol, então são os mais eficientes de todos os sistemas coletores. Estes, tipicamente, têm relações de concentração na faixa de 600-2000 e, portanto, são altamente eficientes na absorção de energia térmica e sistemas de conversão de energia (KALOGIROU, 2014).

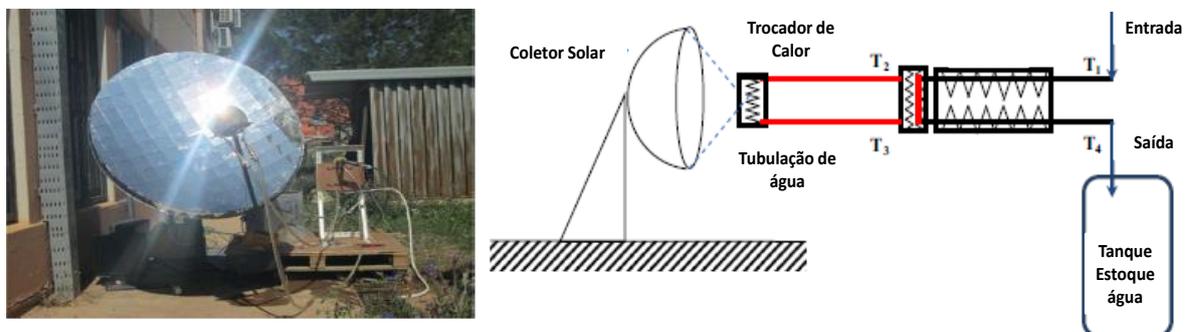
Figura 21 - Coletor de Disco Parabólico



Fonte: (KALOGIROU, 2014)

AMARA et al., (2017) utilizaram um sistema de disco parabólico (Figura 22), para desinfetar água com *Legionella sp.* O sistema atingiu temperaturas acima de 60°C com uma vazão de 40 litros por hora, conseguindo em 10 horas de trabalho, 400 litros de água segura. O sistema atuou em uma radiação de 200 W/m².

Figura 22 - Coletor de Disco Parabólico usado para desinfecção de água

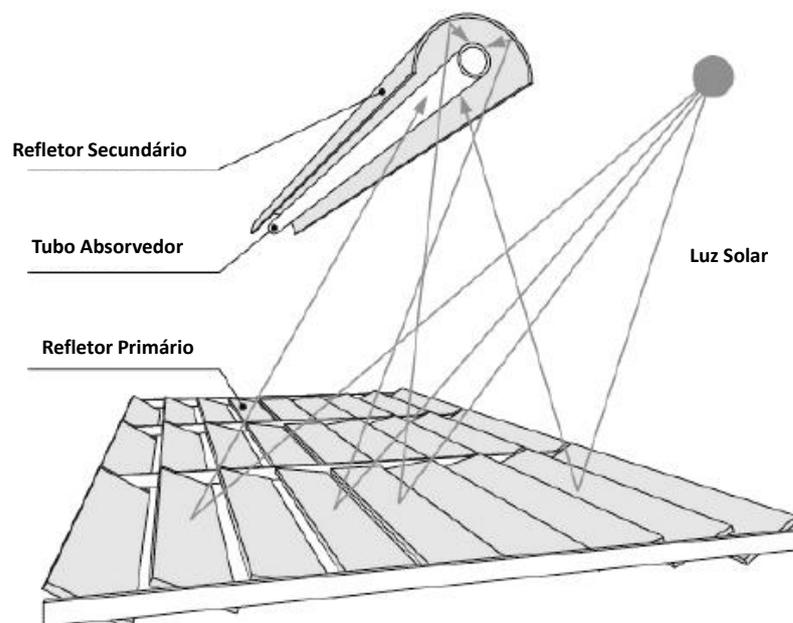


Fonte : (AMARA et al., 2017).

3.5.6 Coletores Fresnel

Os coletores de Fresnel concentram a luz em um receptor linear e direcionam para um refletor secundário que direciona a energia concentrada a um tubo absorvedor (Figura 23). O coletor pode ser imaginado como um refletor da calha parabólica quebrada, mas ao contrário das calhas parabólicas, as tiras individuais não precisam ser de forma parabólica. A maior vantagem deste tipo de sistema é que ele usa refletores planos ou elasticamente curvos, que são mais baratos do que os refletores de vidro parabólico. O nome Fresnel linear é utilizado para denominar esse coletor em função da lente de Fresnel, desenvolvida pelo físico francês Augustin-Jean Fresnel no século 18 para uso em faróis costeiros, em substituição às lentes tradicionalmente utilizadas. O primeiro a aplicar este princípio foi o grande pioneiro solar Giorgio Francia (1968), que desenvolveu Sistemas de refletores de Fresnel. Os sistemas mostraram que temperaturas elevadas poderiam ser alcançadas usando esses sistemas, mudando para rastreamento em dois eixos (ABBAS et al., 2012).

Figura 23 - Esquema de reflexão de um coletor Fresnel



Fonte:(POULLIKKAS; HADJIPASCHALIS; KOURTIS, 2013)

CAPÍTULO 2
DESINFECÇÃO DE ÁGUA NO DISCO SOLAR

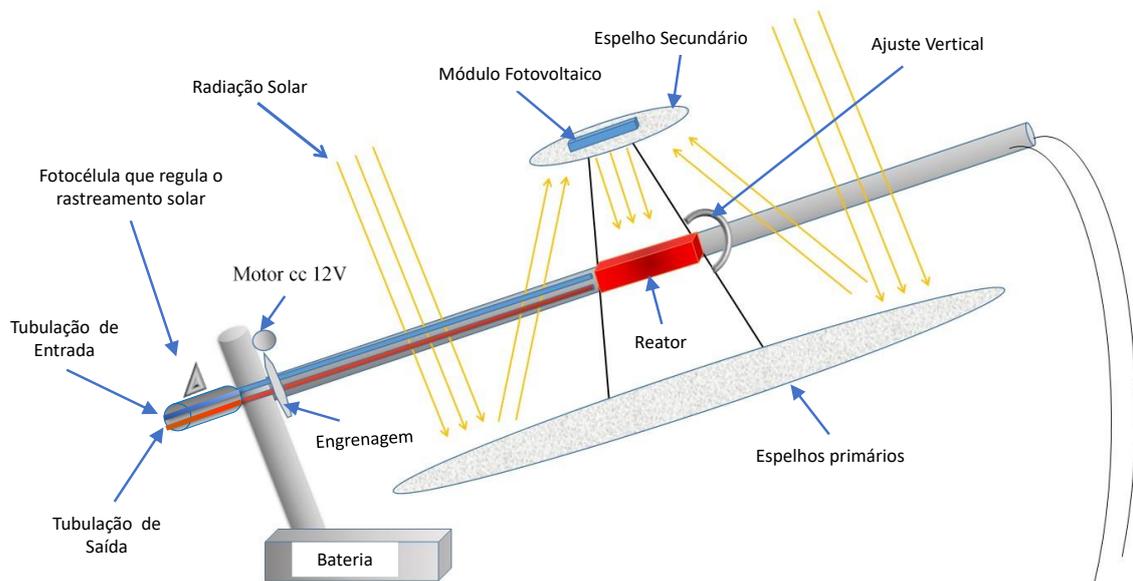
4. O DISCO SOLAR

O protótipo do Disco Solar desenvolvido por Cruz e Bomant S.L., foi instalado e testado na Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF) no estado do Rio de Janeiro, para desinfecção em água. Um primeiro protótipo do Disco Solar com dimensões 40% menores do que o instalado no Brasil foi projetado e construído por Emilio Cruz em colaboração com o Dr. Sánchez na Espanha em 2011 e foi patenteado (CRUZ Y BOMANT, 2013). No entanto, ao ser montado no Brasil, devido às condições climáticas do local de instalação, o Disco sofreu várias alterações do protótipo original para maior estabilidade dos materiais e suporte da base. A descrição do sistema é demonstrada a seguir:

4.1 DESCRIÇÃO DO DISCO SOLAR

O Disco Solar consiste em um concentrador de reflexão dupla, tipo Fresnel, que concentra a radiação em um reator através do qual a água flui e é aquecida para desinfecção (Figura 24). O refletor primário de 3,8 metros de diâmetro, contém 900 espelhos de 100 × 100 mm, com 10 m² de área de recepção e direciona a radiação solar para um refletor secundário que é um espelho de 1,3 metros de diâmetro. Este espelho por sua vez concentra a radiação na superfície do reator através do qual a água circula. Ambos os sistemas refletores possuem um peso balanceado que permite o rastreamento solar azimutal através de um pequeno motor elétrico. O conjunto inteiro é suportado em dois pontos com uma roda de rolamento que permite a rotação facilmente.

Figura 24 - Desenho do Disco Solar utilizado para desinfecção de água



Fonte: Próprio Autor

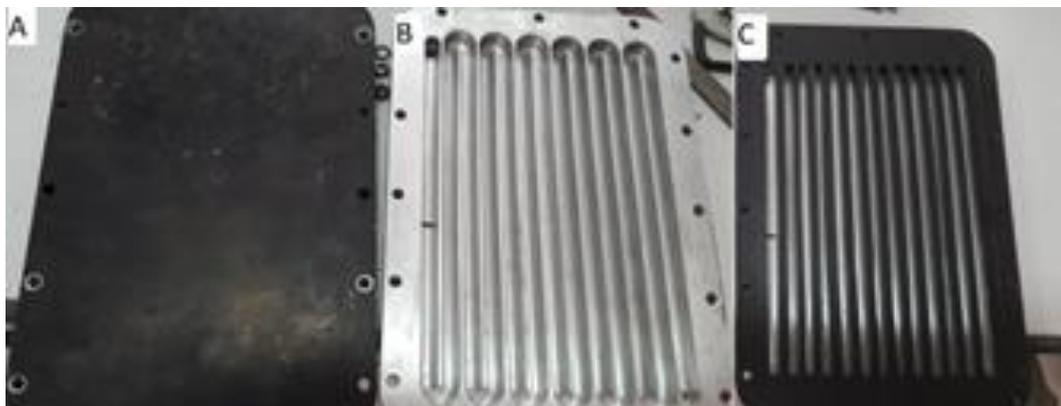
O rastreamento solar é feito por uma fotocélula simples, orientada para o sol e alinhada com o receptor primário. Ela fica dentro de uma caixa projetada para dar sombra quando o foco sofre uma modificação. Enquanto recebe a radiação solar, a fotocélula mantém o motor desligado, quando o sol se movimenta e gera sombra, o circuito é fechado e ativa o motor de 2,5 Watts, levando o sistema a focalização e acompanhamento do sol. Esta interação se repete ao longo do dia. A fotocélula está fixa no eixo de rotação do disco. Quando o disco atinge o pôr-do-sol, um simples interruptor de fim de curso atua e o disco retorna à posição inicial, aguardando o novo nascer do sol. O disco começa a se mover no dia seguinte, devido a um temporizador de desligamento no primeiro dia de operação.

O motor de 2,5 Watts é alimentado por uma bateria de 12 Volts (90 amperes) conectada a um painel fotovoltaico (Yingli YL095P-17b 2/3 de 95Wp) posicionado no refletor secundário perpendicular ao sol. Esse arranjo torna o disco automatizado e, portanto, livre de qualquer conexão com a rede elétrica. A estrutura que suporta o disco é orientada na direção Norte-Sul no mesmo ângulo de inclinação da latitude do local ($21^{\circ} 45'$ para UENF em Campos dos Goytacazes).

A água flui para o reator através do tubo de entrada em contato com o tubo de saída (tubos de aço inoxidável), produzindo uma troca de calor que aumenta sua temperatura até atingir o reator. O reator está dentro de um invólucro protegido com um isolante térmico com uma janela de vidro resistente a altas temperaturas (250 x 250 mm) através da qual passa a radiação e evita a perda de calor por convecção.

O reator é feito de aço inoxidável e possui uma serpentina interna na placa para aumentar o tempo de permanência da água dentro dela e otimizar a troca de calor. O reator foi pintado com uma tinta preta especial (HI-SORB-II - SolkotebySolec) para absorver o máximo de radiação concentrada na forma de calor (Figura 25). Depois de deixar o reator, o fluxo de água segue para o tubo de saída, troca calor com o tubo de entrada e é armazenado.

Figura 25 - A) topo superior do reator exposto à radiação solar concentrada e pintado de preto para máximo de absorção; B) Serpentina interna no reator; C) Junta de vedação de Vitón



Fonte: Próprio Autor

A estrutura onde os espelhos primários são colocados é feita de barras de alumínio para tornar o disco mais leve e de fácil manuseio. Os espelhos primários foram pintados na sua parte posterior não reflexiva com uma tinta spray com características acrílicas (spray BASF S.A.) para protegê-los contra a corrosão causada pela alta umidade e temperatura da região onde o disco foi instalado. Atrás de cada espelho, um suporte de polietileno e um cilindro de alumínio de 20 mm por 5 mm de diâmetro foram fixados com cola de silicone neutro (Tytan-Selena) nos

espelhos como demonstrado na Figura 26. Após 24 horas de cura, os espelhos foram fixados nas hastes de alumínio do Disco Solar. Ao fixar, o suporte pode ser movido em todas direções para focar cada espelho.

Figura 26 - Preparação e colocação dos espelhos primários no suporte



Fonte: Próprio Autor

Os espelhos do refletor primário são focados no reator através do secundário com o auxílio de uma placa posicionada no reator. O foco é realizado com o disco na posição de rastreamento solar (Figura 27).

Figura 27 - Focalização dos espelhos primários.



Fonte: Próprio Autor

A estrutura que suporta o Disco Solar foi montada com barras de ferro, que foram parafusadas em uma estrutura de concreto no chão para resistir à ação dos ventos na região, conforme demonstrado na Figura 28. A porção destacada da Figura 28 mostra a engrenagem responsável pela rotação necessária para realizar o movimento de seguimento do sol.

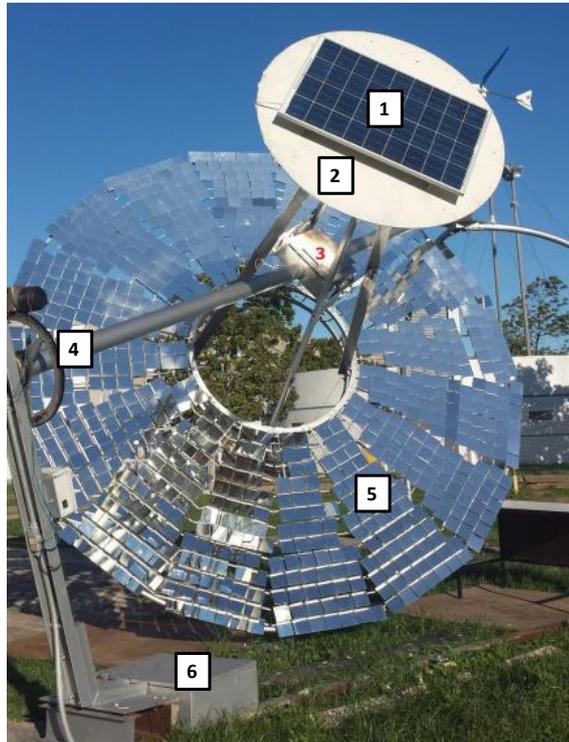
Figura 28 - Estrutura de sustentação do Disco Solar



Fonte: Próprio Autor

No centro da estrutura de suporte foram colocadas quatro hastes de ferro para suportar o espelho secundário e a estrutura que mantém os espelhos primários. A Figura 29 mostra uma foto do Disco Solar completo focalizado, junto com a localização dos itens citados na descrição.

Figura 29 - Disco solar montado na UENF. 1 – Placa fotovoltaica para geração de energia para a bateria que alimenta o sistema de rotação do disco. 2 – Espelho secundário que direciona o foco para a parte central do sistema. 3 – Parte central onde fica o reator. 4- Roda dentada responsável pela rotação do disco através de um motor. 5 – Espelhos primários nos quais há incidência direta do sol e que são focalizados no espelho secundário. 6 – Compartimento de armazenamento da bateria que alimenta o sistema.



Fonte: Próprio Autor

4.2 OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO DO DISCO SOLAR

O Disco Solar foi desenvolvido para que qualquer pessoa possa operá-lo, sem necessitar de muitos conhecimentos técnicos, pois o principal objetivo é desinfetar água em comunidades rurais e carentes que não tem acesso a água tratada. De fato, por ser um equipamento autônomo, com seguimento solar e reposicionamento noturno, é um equipamento que permite uma fácil operação. O sistema de balanceamento de peso entre os espelhos primários e secundário, mesmo sendo um equipamento de grande porte, permite um fácil ajuste manual do equipamento por qualquer motivo que seja necessário. Porém, no caso deste primeiro protótipo, após a sua aquisição muitos ajustes tiveram que ser realizados,

pois sua fixação, processos de corrosão, manutenção não estavam previstos pelo fabricante.

Com relação a manutenção do equipamento, a Tabela 6 mostra os principais cuidados a serem tomados com cada equipamento e qual a frequência deve ser realizada.

Tabela 6 - Manutenção Periódica no Disco Solar

Equipamento	O que fazer	Motivo	Frequência
Espelhos primários	Visualizar espelhos desfocalizados e realizar focalização	Eventuais pássaros e vento forte fazem com que alguns espelhos se movam	1 vez por semana
Espelho Secundário e Primário	Limpar com água	Poeira excessiva diminui a reflexibilidade dos espelhos	1 vez por semana
Reator	Revisar fugas	Evitar perdas de água tratada	1 vez ao mês
Engrenagens	Passar graxa nas Engrenagens	A engrenagem começa a ficar seca e tem dificuldade de girar	1 vez por mês
Ajuste Vertical	Ajustar quanto ao posicionamento do ângulo zênite solar	O movimento de translação da Terra faz com que o ângulo vertical do Disco Solar tenha que mudar	1 vez por mês
Espelhos Primários	Trocar os espelhos	Os espelhos primários começam a sofrer um processo de degradação em função das condições climáticas	1 vez por ano

Fonte: Próprio Autor

4.4 CUSTO DO DISCO SOLAR

O primeiro protótipo foi comprado da Cruz y Bomant S.L. por um valor de R\$ 15.000,00 na alfândega no Brasil e depois foram gastos outros R\$ 5.000,00 para fazer as adaptações necessárias. Todo o material usado para construir o disco foi baseado em produtos de baixo custo que estão no mercado. Portanto o valor total gasto para a construção e utilização do Disco Solar foi de R\$ 20.000,00.

5. METODOLOGIA DISCO SOLAR

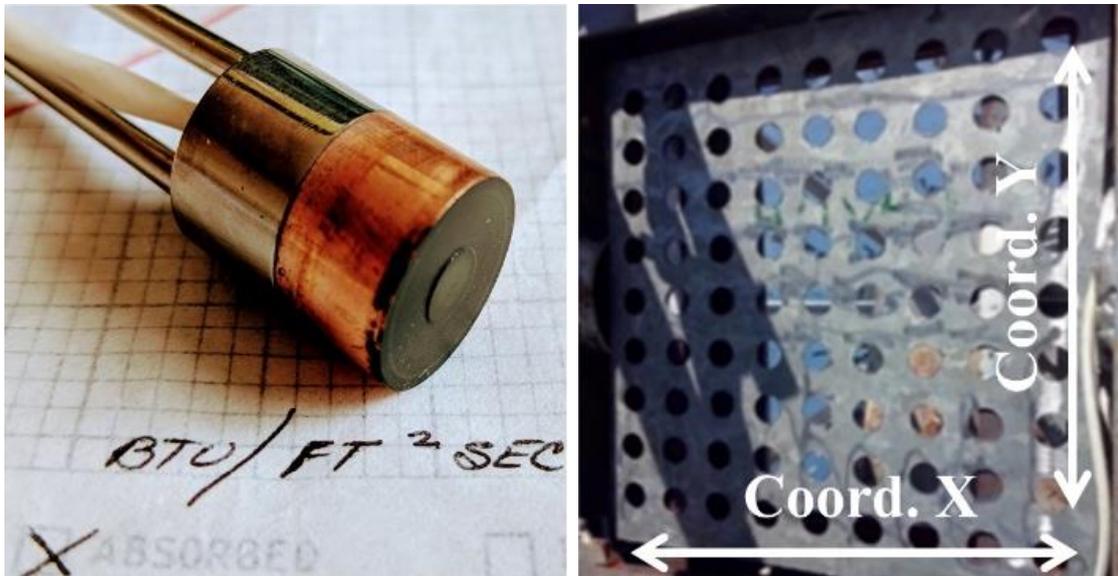
Para realização dos testes de desinfecção no Disco Solar, primeiro foram feitos experimentos de caracterização e avaliação da capacidade do Disco Solar para concentração da radiação, assim como tempo de residência da água a ser tratada, o perfil de temperatura, experimentos microbiológicos e experimentos de produtividade.

5.1 AVALIAÇÃO DA POTÊNCIA DO DISCO SOLAR

A capacidade de concentração do Disco Solar foi avaliada utilizando um calorímetro da Hy-cal Engineering (modelo C-1301-A-30-72). Este calorímetro foi colocado nos orifícios X-Y distribuídos em uma placa de metal fixada no mesmo local e posição onde o reator está localizado (Figura 30). Em cada ponto, o calorímetro foi mantido por 5 segundos e a tensão medida através de um multímetro Minnipa modelo Et-2082.

Os dados de tensão estão correlacionados com os valores em kW.m^{-2} , de acordo com o certificado de calibração fornecido pelo fabricante do Hy-cal Engineering. A tabela de conversão encontra-se no ANEXO 1. Todas estas medidas são feitas com o Disco na posição de rastreamento solar e com os espelhos focalizados no centro do reator.

Figura 30 - Calorímetro Hy-cal usado em testes de potência e a placa usada para medir as coordenadas.

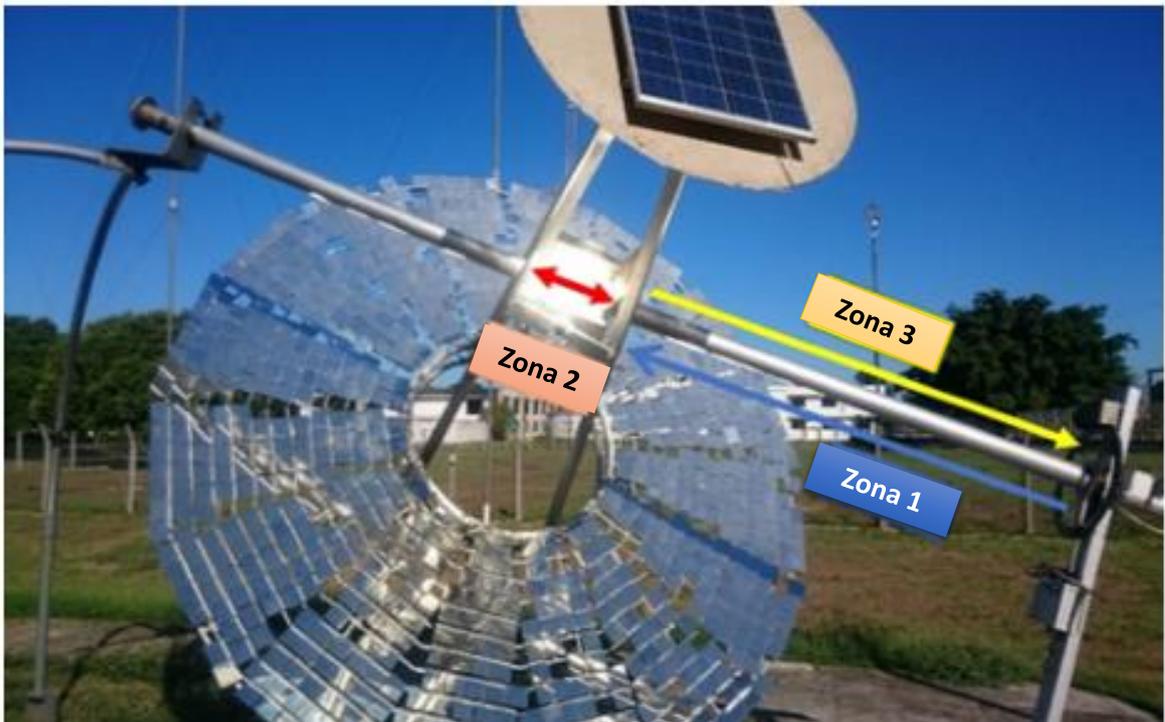


Fonte: Próprio Autor

5.2 METODOLOGIA DA AVALIAÇÃO DO PERFIL DE TEMPO DE RESIDÊNCIA E TEMPERATURA DO DISCO

Para determinar o perfil de temperatura, o Disco Solar foi dividido em três partes diferentes da zona de troca térmica e o tempo de residência da água em cada ponto utilizando vazão de 1 L.min^{-1} foi calculado. A primeira zona de troca térmica (Zona 1) é considerada desde a entrada do Disco até o começo do reator. Esta entrada consiste em um tubo duplo com 0,06 metros de diâmetro externo e 2,6 metros de comprimento, com um volume total de 6,53 litros. A segunda zona de troca térmica, (Zona 2), é a zona do reator, que tem um volume de 0,12 litros. Dentro do tubo de entrada há um tubo menor, que fica concêntrico a ele (0,02 m de diâmetro e 2,6 m de comprimento) para a saída da água do reator após o aquecimento (Zona 3), sendo feita uma troca térmica útil entre a zona 3 e a zona 1 (Figura 31).

Figura 31 - Uma visão geral do Disco Solar e zonas térmicas



Fonte: Próprio Autor

A temperatura em cada zona térmica (Figura 31) foi medida continuamente com um termopar digital Impac-TM 6902D na entrada e saída de cada zona térmica, assim como, o tempo de permanência em cada uma delas (Tabela 7).

Tabela 7 - Volume e tempo que o fluxo percorre cada zona térmica

	Volume (litros)	Tempo Acumulado (segundos)	Tempo Residência (segundos)
Zona 1	6,53	391,8	391,8
Zona 2	0,12	399	7,2
Zona 3	0,82	448,2	49,2

5.3 PERFIL DA TEMPERATURA DE SAÍDA DA ÁGUA DURANTE O DIA APÓS PASSAR PELO DISCO SOLAR

Para determinar o perfil da temperatura de saída da água no Disco Solar ao longo do dia, primeiro colocou-se o Disco em movimento de rastreamento. Em seguida, ligou-se o fluxo de água e foram anotadas as temperaturas da água no momento em que ela passava pelo reator ao longo do tempo com um termopar digital Impac-TM 6902D. A cada anotação da temperatura também foi anotado a radiação solar que incidia no momento usando um piranômetro (400–700 nm, Model PMA 22100, Solar Light Co) e calculado a vazão da água naquele momento com o auxílio de uma proveta graduada de 1 L e um cronômetro.

5.4 METODOLOGIA DOS ENSAIOS DE DESINFECÇÃO MICROBIOLÓGICA DA ÁGUA NO DISCO SOLAR

Os ensaios de desinfecção de água no Disco Solar, foram realizados para determinar quais as condições de tempo/temperatura devem ser utilizadas para garantir a efetividade da descontaminação microbiológica da água que passa pelo Disco.

5.4.1 Matrix de água utilizada nos experimentos

A matriz de água selecionada nestes experimentos foi a água mineral em pH 5,5. A composição química é mostrada na Tabela 8. Anteriormente a cada experimento, a água era autoclavada a 121 °C por 15 min para garantir esterilidade nos experimentos microbiológicos.

Tabela 8 - Composição química da água utilizada nos testes de desinfecção

Composição Química	Concentração (mg.mL⁻¹)
NaHCO ₃	21,62
SO ₄ ²⁻	4,35
Ca	3,426
Na	3,344
Mg	2,095
Cl ⁻	1,78
NO ₃ ⁻	1,44
K	1,223
F	0,06
Ba	0,030
Sr	0,025
Br ⁻	0,01

Fonte: (RAPOSO, 2019)

5.4.2 Estoque de Bactéria e preparação do Inóculo

A *Escherichia coli* ATCC 25922 foi utilizada como um organismo de teste nestes experimentos devido a seu amplo uso como indicador fecal (GIANNAKIS et al., 2018c; HELALI et al., 2013). Ela foi obtida a partir de um estoque fornecido pelo Laboratório de Sanidade Animal, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro-UENF, Campos dos Goytacazes, Brasil. Para recuperar o estoque, o frasco foi descongelado lentamente até atingir a temperatura ambiente (25°C). Então a cepa de *E.coli* foi transferida para placa de Petri de Luria Bertani ágar (Sigma) e incubada por 20 horas a 37°C para obtenção de colônias de bactérias isoladas.

Para preparação do inóculo, a *E. coli* foi transferida para um Erlenmeyer contendo 40 mL de caldo de Luria Bertani esterilizado e foram incubadas a 37°C com agitação constante sob condições aeróbicas, utilizando um agitador rotativo a 100 rpm durante 18 h. A concentração final da fase bacteriana foi 10⁹ UFC mL⁻¹. A carga microbiana foi obtida com o uso de um densitômetro (Densimat, bioMeviens,

França) (D.O. 550 nm). As suspensões bacterianas foram coletadas por centrifugação a 900g por 10 min e o sedimento foi ressuspenso em solução salina tamponada com fosfato salino e diluído diretamente na matriz aquosa selecionada. 40 mL de *E. coli*. foi inoculado com concentração de 10^9 UFC mL⁻¹ em 40 L de água mineral pré-autoclavada resultando em uma concentração final de 10^6 UFC mL⁻¹.

5.4.3 Ensaio microbiológicos no Disco Solar

A água contaminada artificialmente foi colocada em um galão de 50 L e bombeada para o Disco Solar como mostrado na Figura 32. Durante o experimento, foram coletadas 100 mL de água antes (controle positivo) e depois de passar no reator a fim de verificar a eficiência da desinfecção através da detecção de microrganismo. A esterilidade dos frascos de coleta foi garantida por autoclavagem dos mesmos, e anteriormente a passagem de água, foi utilizado álcool 70% INPM em volta da mangueira de coleta da amostra.

Figura 32 - Configuração de experimento microbiológico realizado no Disco Solar



Fonte: Próprio Autor

A temperatura do sistema foi monitorada através do termopar digital Impac-TM 6902D instalado na saída da água do reator que recebe a concentração solar. Os ensaios foram realizados entre 10:00 h e 16:00 h, horário de maior incidência solar. As amostras de água que mostraram ausência de *E.coli* coletadas nestes experimentos, após qualificação/quantificação foram guardadas longe da luz a temperatura ambiente por 24 e 48 horas para verificar se há reaparecimento de microrganismos.

5.4.5 Método de Detecção de bactéria por Colilert

Para quantificação da *E. coli* durante os experimentos de desinfecção foi utilizado o método Colilert, também usado por concessionárias de águas para avaliação deste parâmetro. A técnica do substrato cromogênico enzimático Colilert se baseia na identificação dos microrganismos pela análise de suas enzimas constituintes. Ele contém os substratos cromogênico orto-nitrofenil- β -D-galactopiranosídeo (ONPG) e o fluorogênico 4-metilumbeliferil- β -D-glucuronídeo (MUG), que detectam simultaneamente as bactérias do grupo coliforme total e *E. coli* em amostras de água (FRICKER; ILLINGWORTH; FRICKER, 1997).

O substrato cromogênico ONPG é usado na detecção da enzima típica do grupo coliformes totais, a β -galactosidase, que hidrolisa o ONPG a orto-nitrofenol resultando na alteração da cor do meio para amarelo (GREGHI, 2005), conforme mostra a Figura 33.

Figura 33 - Mecanismo de detecção de coliformes totais

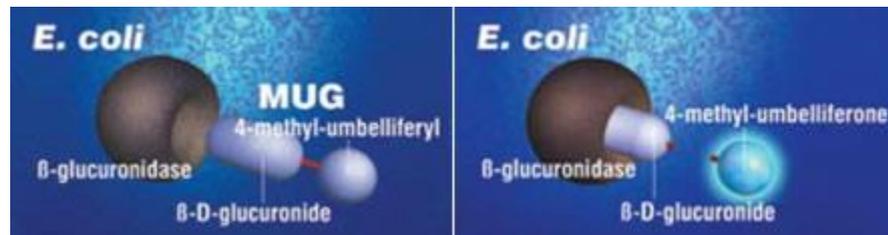


Fonte: (SILVA et al, 2005)

Para a detecção de *E. coli*, o substrato MUG sofre a ação da enzima β -glucuronidase, que é característica desta bactéria. Ao ser degradado, o MUG libera

a 4-metilumbeliferona que, quando submetida à luz ultravioleta, apresenta fluorescência (SILVA *et al.*, 2005), conforme a Figura 34.

Figura 34 - Método de detecção de *E.coli*



Fonte: (SILVA *et al.*, 2005)

A enzima β -glucuronidase está presente em 94 a 96% das cepas de *E. coli* (SILVA *et al.*, 2005). Como resultado pode-se concluir que, se o meio permanecer incolor, indica a ausência de bactérias do grupo coliforme e de *E. coli* na amostra. Se o meio tiver sua cor alterada para amarelo e não apresentar fluorescência sob luz UV, indica presença de bactérias do grupo coliforme e ausência de *E. coli* na amostra. Caso a cor do meio é alterada para amarela e este apresenta fluorescência sob luz UV, significa que bactérias do grupo coliforme e *E. coli* estão presentes na amostra analisada.

5.4.6 Método de Quantificação de bactéria por Colilert

O método de quantificação de coliformes totais e coliformes fecais por Colilert, consiste em coletar 100 ml de amostra de água e adicionar uma cartela do reagente Colilert em cada amostra agitando-o até dissolução completa. Após isso deve-se transferir os 100 ml para uma cartela Colilert estéril e colocar sobre o suporte da seladora para promover a selagem, conforme demonstrado na Figura 35. Em seguida mantém-se a cartela em uma incubadora termo-regulável a 35 °C por 24h e se faz a leitura dos valores positivos nos quadrados grandes (49 espaços) e pequenos (48 espaços).

Os valores positivos são aqueles nos quais uma coloração amarela forte se desenvolveu, o mesmo procedimento deve ser realizado observando-se as cartelas em uma câmara escura equipada de luz UV, de modo que, para este caso, os

quadrados grandes e pequenos a serem anotados são aqueles que desenvolverem uma fluorescência azul característica. Os valores em amarelo são referentes aos coliformes totais e os quadrados com fluorescência são os resultados de coliformes fecais.

Figura 35 - Técnica de Quantificação de Coliformes Totais e coliformes Fecais por Colilert



Fonte: (FRICKER; ILLINGWORTH; FRICKER, 1997)

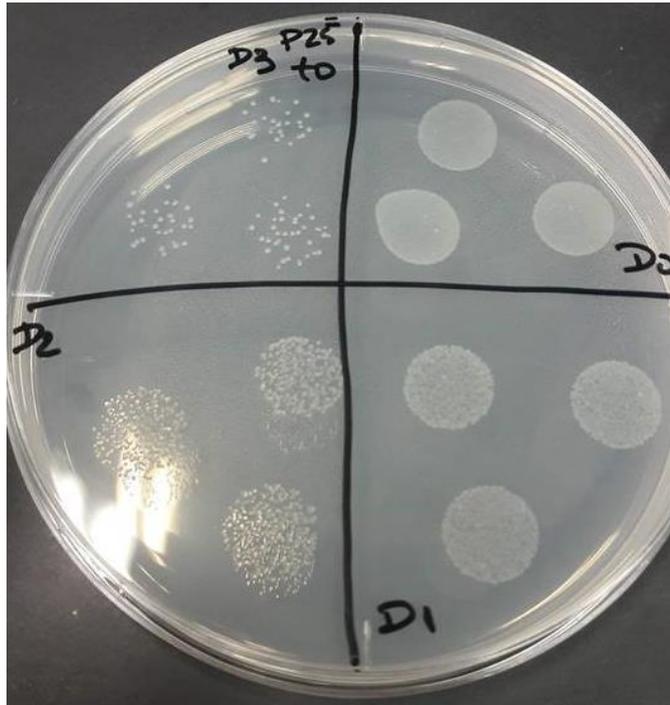
Os resultados são obtidos a partir da cartela padrão do método que correlaciona os valores observados nos quadrados grandes com aqueles observados nos quadrados pequenos, de acordo com IDEXX Quanti-Tray®/2000 (Anexo 2).

5.4.7 Quantificação de Bactérias utilizando método de Diluições Seriadas

Para quantificação de bactérias usando o método padrão de contagem em placa de Petri (POLO-LÓPEZ et al., 2011), foram realizadas três séries de diluições de 10 vezes em tubo de 1,5 mL contendo 450 µL de tampão salino em cada e, em seguida, três gotas de 20 µL de cada diluição foram colocadas na placa de Petri

contendo meio ENDO (Sigma) específico para *E.coli*, atingindo um limite de detecção de 20 UFC.mL⁻¹. As colônias foram contadas após incubação por 20 horas a 37°C, (Figura 36) (CASTRO-ALFÉREZ et al., 2016).

Figura 36 - Fotografia de colônias de *E. coli* cultivadas em placa de Petri de LB Agar colocando gotas de diluições de 10 vezes (D0, D1, D2 e D3) de uma amostra de 10⁶ UFC.mL⁻¹.



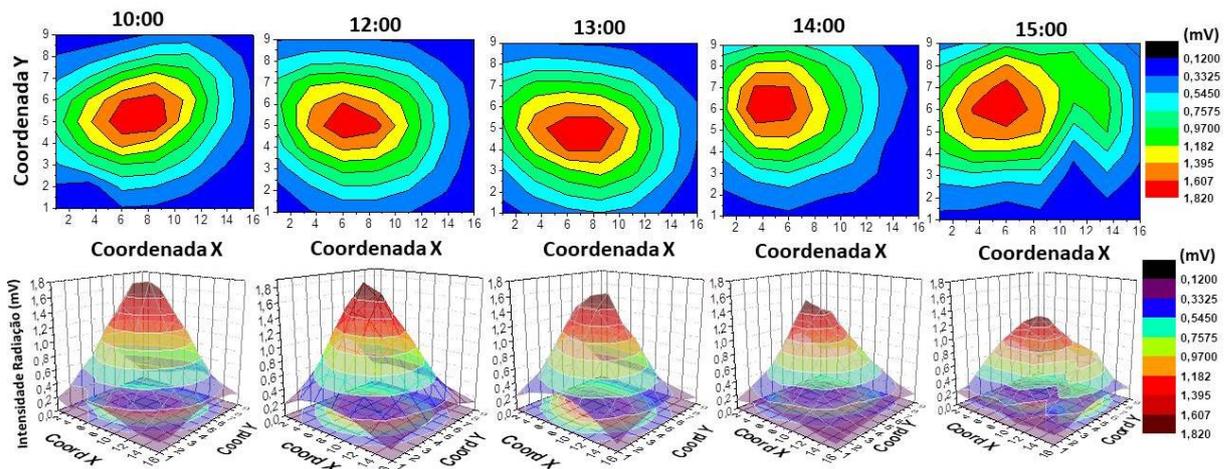
Fonte: Próprio Autor

6. RESULTADOS

6.1 RESULTADOS DA AVALIAÇÃO DA POTÊNCIA DO DISCO SOLAR

Os testes de potência foram realizados ao longo do dia para verificar a eficiência de concentração da radiação no Disco Solar. Os valores de tensão em milivolts foram registrados para cada posição X-Y e isso foi convertido em um gráfico (Figura 37). Neste gráfico, o centro é a parte de maior incidência solar, local onde os espelhos foram focalizados e portanto, onde os maiores valores de concentração de calor são obtidos.

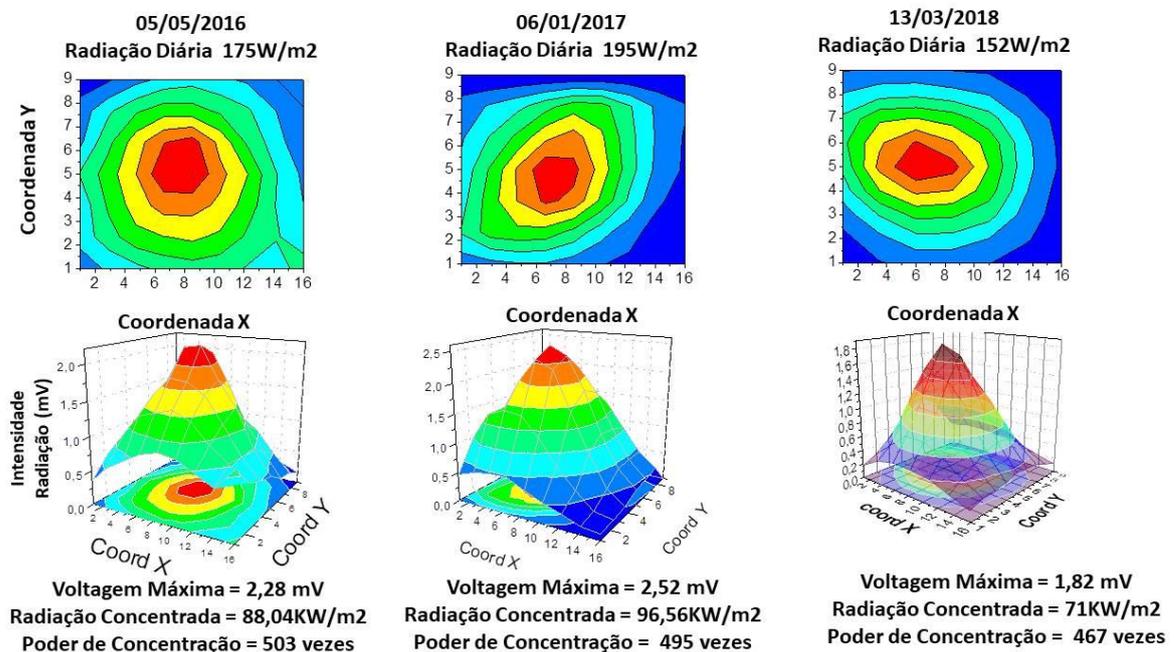
Figura 37 - Medições de concentração da radiação em um calorímetro de modelo Hy-Cal C-1301-A-30-72, Padrão de Referência 149331 ao longo do dia no reator.



Fonte: Próprio Autor

Os gráficos mostram (Figura 37) que a concentração é mantida no centro ao longo do dia, havendo pouca variação, demonstrando que o Disco Solar pode operar por mais de 5 horas sob as condições estabelecidas. A concentração máxima representada na Figura 37 foi de 1,82 mV, o que corresponde a 71 KW.m^{-2} . Este experimento foi realizado em 13 de março de 2018 e neste dia a radiação solar as 12:00 horas foi de 152 W.m^{-2} . O mesmo experimento foi realizado em outros momentos e outros resultados são mostrados na Figura 38.

Figura 38 - Medições de concentração de radiação ao longo dos anos no Disco Solar



Fonte: Próprio Autor

A Figura 38 mostra que nos ensaios realizados em 2016, o Disco Solar pôde concentrar em até 503 vezes a radiação solar recebida que foi de 175 W.m^{-2} , ou seja com uma intensidade máxima da radiação medida pelo Hy-cal de 2,28 mV, que convertido para W.m^{-2} pela tabela mostrada no Anexo 1 corresponde a $88,04 \text{ KW.m}^{-2}$.

Apesar das medidas em 2017 serem no verão e ter uma intensidade de radiação maior (195 W.m^{-2}), a concentração foi aproximadamente igual a de 2016 (495x) devido à perda de capacidade de concentração proveniente da falta de espelhos que não foram repostos ao Disco, por motivo dos fortes ventos de mais de 100 Km/h na região. Em 2018, final do verão e uma intensidade menor do que em 2016, houve uma concentração de 467 vezes. Os coletores de energia solar são basicamente distinguidos pelo movimento estacionário, rastreamento de eixo único, rastreamento de dois eixos e temperatura de operação. Segundo Kalogirou (2014), os coletores solares com rastreamento de dois eixos, podem concentrar de 300 a 1.500 vezes a radiação solar. Neste trabalho e para a proposta de utilização, o disco solar esteve dentro do esperado para um coletor solar.

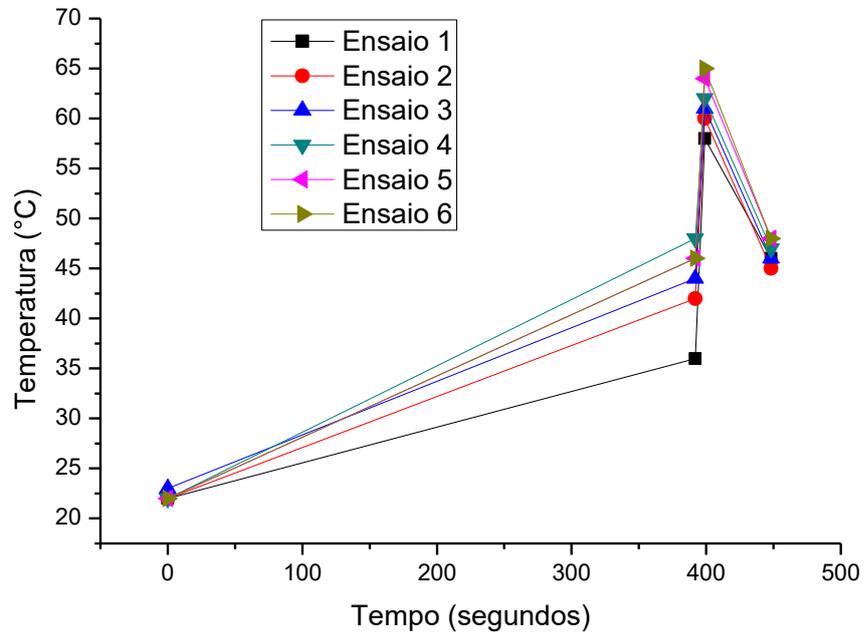
6.2 RESULTADOS DA AVALIAÇÃO DO PERFIL DE TEMPO DE RESIDÊNCIA E TEMPERATURA DO DISCO DURANTE O DIA

Os resultados das temperaturas registradas em seis momentos diferentes em cada uma das zonas térmicas são mostrados na Tabela 9. A temperatura inicial da água, antes de entrar no sistema, foi denominada “Início”. A água, no início, permaneceu em um recipiente na sombra, não havendo mudança de temperatura, e foi bombeada para o Disco Solar. Este experimento foi realizado em 17 de junho de 2016, e a radiação média medida neste dia foi de 96 W.m^{-2} .

Tabela 9 - Medidas de Tempo vs Temperatura

	Ensaio 1 11:15	Ensaio 2 12:30	Ensaio 3 13:00	Ensaio 4 13:15	Ensaio 5 13:30	Ensaio 6 13:40
Início	22°C	22°C	23°C	22°C	22°C	22°C
Zona 1	36°C	42°C	44°C	48°C	46°C	46°C
Zona 2	58°C	60°C	61°C	62°C	64°C	65°C
Zona 3	46°C	45°C	46°C	47°C	48°C	48°C

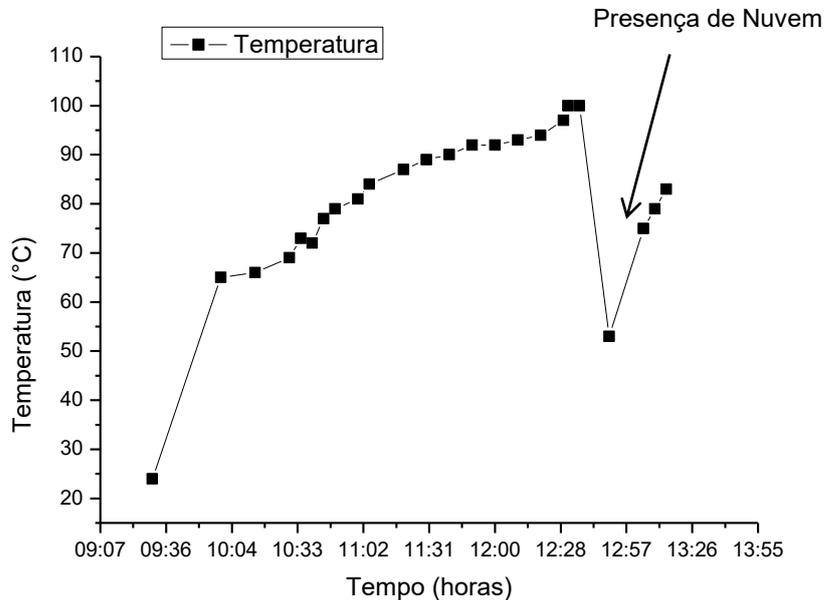
A Figura 39 mostra a rampa de temperatura nas determinadas zonas de troca térmica no Disco Solar. Neste ensaio percebe-se como é importante a zona térmica 1 para alcançar o pico de temperatura na saída do reator, pois o maior tempo de residência se dá na parte 1 do sistema. O aumento de temperatura na zona térmica 1 está extremamente ligado a intensidade solar do dia, que vai aquecer o tubo externamente por radiação e condução, aumentando a temperatura da água que chega no final da zona térmica 2, pois há troca de calor com a zona térmica 1 quando a água está saindo.

Figura 39 - Rampa de temperatura do Disco Solar

Fonte: Próprio Autor

Foi realizado um experimento para verificar a variação de temperatura ao longo do dia foi realizado em 23 de maio de 2016 e os resultados são demonstrados na Figura 40. Este experimento foi realizado entre as 9:30 h e 13:15 h, sendo que a temperatura da água sobe continuamente até 100°C às 12:37 h e no ponto de 12:50 h, a temperatura cai a 52°C devido a presença de nuvens neste horário. Após a passagem da nuvem, a temperatura volta a subir. Neste experimento inicial não foram medidos a intensidade da radiação e a vazão da água.

Figura 40 - Comportamento da Temperatura de saída da água no reator do Disco Solar em 23 de maio de 2016

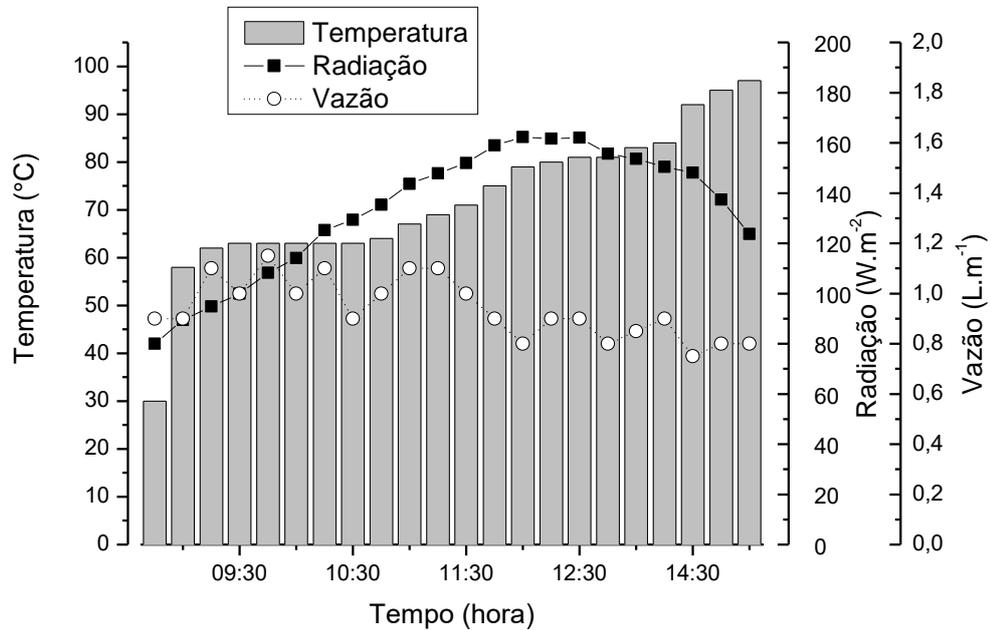


Fonte: Próprio Autor

Em 10 de janeiro de 2017 foi realizado o mesmo experimento, porém monitorando a intensidade da radiação e a vazão em cada ponto (Figura 41). A temperatura inicial foi de 30°C. A temperatura máxima alcançada foi de 97°C, a vazão foi inicialmente colocada em 1 L.min⁻¹, porém percebeu-se que houve variação ao longo do tempo, devido ao aumento de temperatura. Isto pode acontecer devido a um aumento de pressão no reator devido a geração de pressão de vapor criada com o aumento de temperatura.

A Figura 41 mostra que a intensidade solar aumenta até às 12:30 h, e depois diminui em função do posicionamento do Sol. No entanto, a temperatura de saída da água não diminui, ao contrário, continua aumentando. Isto mostra um perfil de conservação da temperatura do Disco Solar, quando não há presença de nuvens, permitindo que a pasteurização da água possa ocorrer ao longo do dia. Este resultado mostra que a época do ano pode influenciar a manutenção da temperatura, mesmo quando ocorre nebulosidade durante o dia.

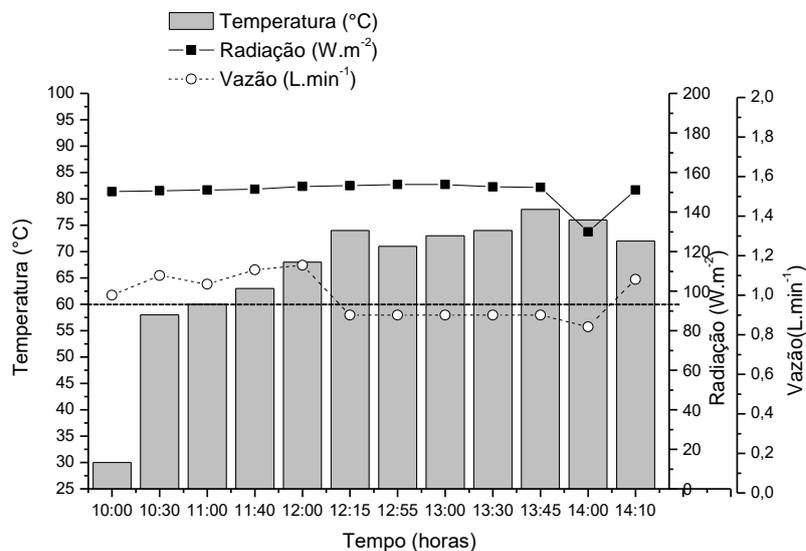
Figura 41 - Variação da temperatura de saída da água no disco solar e intensidade solar ao longo do período de 8:30h até as 15:30h em 10 de janeiro de 2017



Fonte: Próprio Autor

Este mesmo comportamento foi observado em experimentos realizados em 16 de março de 2018 e são mostrados na Figura 42.

Figura 42 - Variação da Temperatura de saída do Disco em 16 de março de 2018



Fonte: Próprio Autor

Os resultados mostram que a temperatura mínima no reator no início do experimento, foi de 30 °C. Após 60 minutos, a temperatura no reator atingiu 60 °C. A temperatura máxima atingida pela água neste experimento foi de 78 °C às 13:45 h. Às 14:00 h, uma nuvem que está passando acima do Disco Solar fez com que a radiação caísse, diminuindo a temperatura. Às 14:10 h, a radiação aumentou novamente, porém a temperatura na saída do reator diminuiu ainda mais, e o fluxo de água aumentou. O aumento no fluxo ocorreu porque a temperatura no interior do reator diminuiu, reduzindo a resistência à pressão criada pelas altas temperaturas. O fluxo é a variável que mais afeta a variação de temperatura dentro do reator, além de longos períodos de nuvens.

A troca de calor entre as zonas 3 e 1 após passar pelo reator, sob as mesmas condições de radiação e fluxo, causa um aumento progressivo da temperatura. A inércia térmica é produzida embora a radiação tenha diminuído por um curto período e a temperatura foi mantida, mantendo assim a eficiência do sistema de pasteurização.

6.3 RESULTADOS DE DESINFECÇÃO MICROBIOLÓGICA DA ÁGUA NO DISCO SOLAR

6.3.1 Avaliação da desinfecção de água no Disco Solar utilizando método Colilert

A Tabela 10 mostra a temperatura alcançada pela água no momento da coleta de cada amostra no teste de desinfecção de água mineral no Disco Solar contaminada com bactéria *Escherichia coli* ATCC 25922. Esta água foi bombeada de um galão a uma vazão de 0,7 L.min⁻¹ e o experimento foi realizado no dia 15 de junho de 2016 a uma temperatura inicial da água de 22°C.

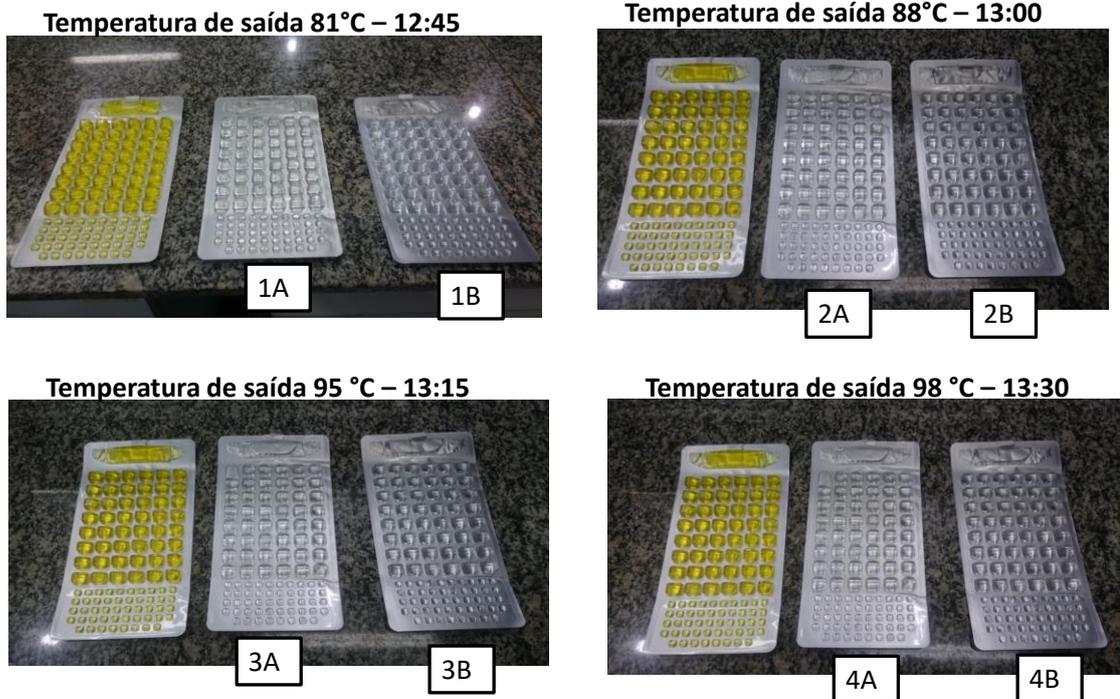
Tabela 10 - Tabela de amostragem do experimento realizado

Temperatura de saída	Amostras	Amostras
81 °C	1A	1B
88 °C	2A	2B
95 °C	3A	3B
98 °C	4A	4B

Fonte: Próprio Autor

A temperatura de saída significa a temperatura na saída do reator. Para cada temperatura de saída foram feitas as coletas de uma amostra de água no galão de entrada, no mesmo momento. Os resultados obtidos estão demonstrados na Figura 43. As primeiras amostras da esquerda em cada foto representam as amostras retiradas no galão a temperatura de 22°C, e as seguintes, posicionadas à direita, representam as duplicatas após passagem pelo Disco.

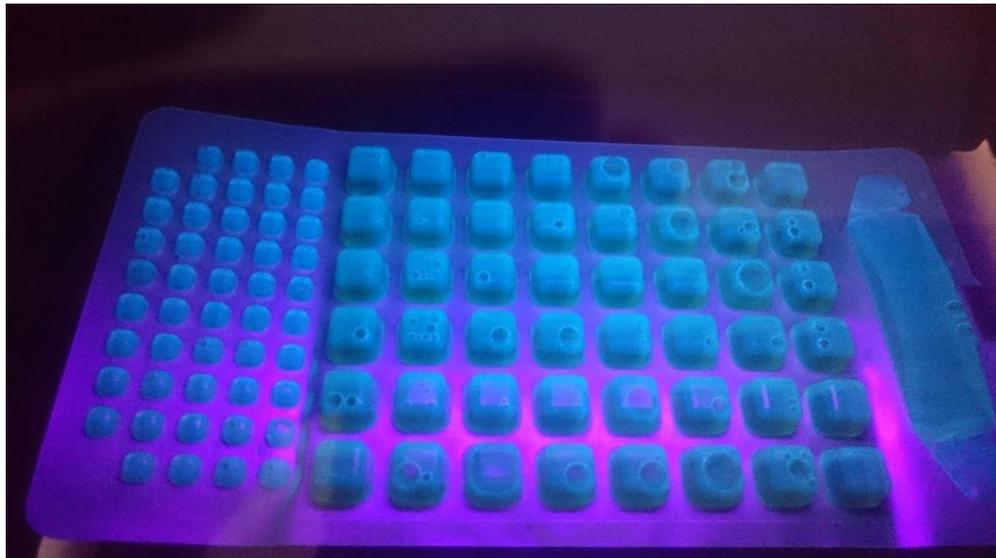
Figura 43 - Resultado das análises microbiológicas pelo método Colilert



Fonte: Próprio Autor

Foi realizado ainda o teste de fluorescência em uma câmara escura equipada de luz UV e observou-se que a amostra antes de entrar no Disco Solar apresentava resultado positivo para *E.coli* como mostrado na Figura 44.

Figura 44 - Resultado das análises microbiológicas pelo método Colilert após incidência de UV

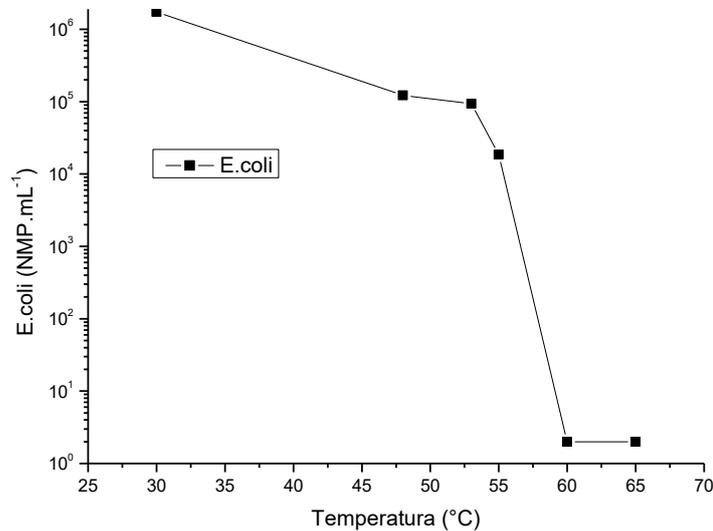


Fonte: Próprio Autor

Os resultados mostraram que com temperatura da água atingindo valores de 81°C, 88°C, 95°C e 98°C no reator do Disco Solar, pode-se dizer pelo método Colilert de qualificação, que houve desinfecção de água com *E.coli* em todas as amostras apresentadas. Rodrigues (2011), realizando testes de desinfecção de *E.coli* pelo método SOPAS em comunidades rurais de Campinas utilizando método de detecção Colilert conseguiu resultados de desinfecção de água a temperaturas de 65°C e 70°C.

De modo a otimizar a quantidade de água que o Disco Solar pode gerar como água segura, realizou-se 2 testes microbiológicos em 2 dias seguidos com temperaturas mais baixas de saída para determinar a temperatura mínima no qual o Disco pode produzir água segura microbiologicamente. Os experimentos foram realizados coletando amostra controle (início), e amostras com 48°C, 53°C, 55°C, 60°C e 65°C. As médias dos resultados estão demonstrados na Figura 45.

Figura 45 - Resultados quantitativos da água contaminada passada pelo Disco Solar método Collilert



Fonte: Próprio Autor

Os resultados mostram que com 60 °C de temperatura de saída do reator, a água está ausente de *E.coli*. As amostras de 60°C e 65°C foram analisadas novamente após 24 e 48 horas e não houve novo crescimento dos microrganismos, indicando efetividade na desinfecção para *E.coli*.

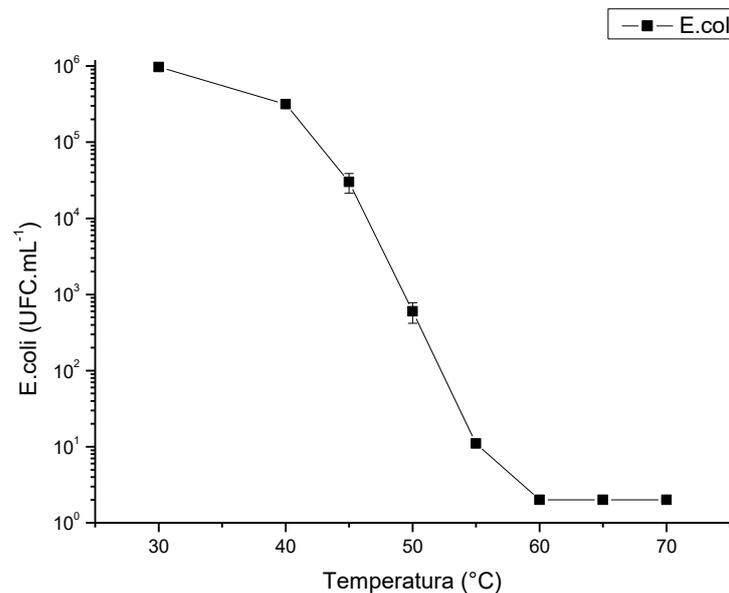
6.3.2 Resultados de Desinfecção de água no Disco Solar utilizando método de Diluições Seriadas

Embora o método de quantificação e qualificação Collilert seja usado por concessionárias de águas para avaliação da contaminação de *E. coli* e coliformes totais, a maioria da literatura sobre desinfecção de água utilizando energia solar, quantifica a *E.coli* por meio de métodos cultiváveis em placa em meio de cultura específico para o crescimento desta bactéria. Portanto, neste trabalho, também foram realizados experimentos de desinfecção usando esta metodologia.

Para avaliação deste método foi utilizado *E.coli* ATCC 25922 e foi realizada a quantificação da bactéria pelo método de diluições seriadas em placa de petri com

meio ENDO (Sigma) específico para *E.coli*. Foram realizados 3 experimentos em 3 dias seguidos e foram coletadas amostras com 40°C, 45°C, 50°C, 55°C, 60°C, 65°C e 70°C, além da amostra inicial antes de passar pelo disco a 30°C. As médias dos resultados e os desvios padrões são mostrados na Figura 46.

Figura 46 - Resultados quantitativos da água contaminada passada pelo Disco Solar método de diluições seriadas



Fonte: Próprio Autor

Os resultados mostram que a água com concentração inicial de 10⁶ UFC.mL⁻¹, após atingir 60°C no reator de saída, não apresenta unidades formadoras de colônias (UFC) de *E. coli*.

Na literatura, vários estudos sugerem que a temperatura da água deve atingir entre 55 e 65°C, a fim de eliminar as bactérias patogênicas entéricas, ou seja, temperaturas abaixo do ponto de fervura reduzem significativamente o número de bactérias das amostras de água, resultando em melhor qualidade da água (SPINKS et al., 2006) (ABRAHAM; PLOURDE; MINKOWYCZ, 2015). Dobrowsky et. al (2015), usando um sistema de pasteurização para águas pluviais, chegaram a temperatura de desinfecção de 72°C para seu sistema. Carielo et al. (2017), concluíram que em seu sistema Pasteurização Solar com fluxo de água por variação da densidade da água, a temperatura de desinfecção foi de 82 °C. O Disco Solar apresentado neste

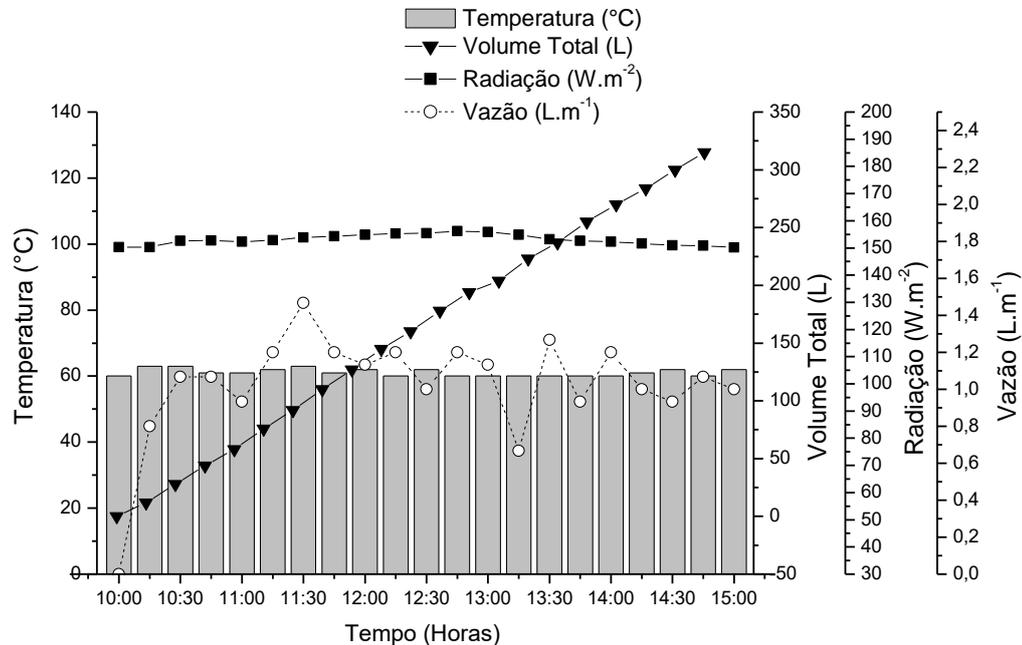
trabalho alcança eficiência de desinfecção a temperaturas de 60 °C na saída do reator para *E.coli* em água mineral. Esta temperatura está em concordância com alguns resultados mostrados na tabela 5 do Capítulo 1, mostrando que o tempo de inativação a esta temperatura foi suficiente para a remoção destas bactérias da água.

6.4 PRODUTIVIDADE DO DISCO SOLAR

Como a temperatura de 60 °C demonstrou ser eficiente para desinfecção de *E.coli* no Disco Solar, foi realizado um experimento mantendo a temperatura no reator a 60°C para determinar o volume total de água gerado pelo sistema.

O resultado deste experimento é mostrado na Figura 47, na qual o Disco Solar produz 315 litros de água em 5 horas de trabalho entre 10:00 e 15:00 horas no dia 19 de março de 2018, mantendo uma média de 63 litros de água por hora. Quando o Disco Solar ganha mais calor, o fluxo é aumentado para produção de mais água. Quando a intensidade da luz diminui devido a presença de alguma nuvem, há uma diminuição do fluxo e garantia da temperatura a 60 °C, produzindo menos água.

Figura 47 - Experimento realizado no Disco Solar mantendo a temperatura a 60 °C, avaliando o volume total



Fonte: Próprio Autor

Segundo a Figura 47, em lugares onde o período de intensidade de radiação é maior, o volume tratado pode ser ainda maior, ou seja, em locais mais próximos da linha do Equador com altas intensidades de radiação, como a região nordeste brasileira ou em alguns países da África, o Disco poderia operar por 8 horas em um dia, produzindo 504 litros de água desinfectada por dia.

Diversos sistemas que utilizam SOPAS para desinfecção da água são apresentados na literatura, com diversas configurações e utilizando diferentes dispositivos. Estes sistemas operam com fluxo contínuo ou lotes e com temperaturas variando de 60°C a 90°C (BIGONI et al., 2014; MANFRIDA; PETELA; ROSSI, 2017; STRAUSS et al., 2016).

Carielo et al.(2016) utilizaram um sistema coletor de placa plana e a produtividade máxima diária alcançada foi de 80 L com 450 W.m⁻². Sizirici (2018) usando um pasteurizador solar de água acoplado a um filtro produziu uma média de 4,5 L de água pasteurizada por dia.

Dobrowsky et al. (2015) demonstraram um sistema de pasteurização para o tratamento da água da chuva em valores de irradiação de 1000 W.m⁻², com uma

média de 6 horas por dia de sol. A quantidade média de água do tanque pasteurizado produzido para as faixas de temperaturas de 55-57°C, 64-66°C, 72-74°C, 78-81°C e 90-91°C, foi calculada a 13,6 L.h⁻¹, 12,0 L.h⁻¹, 9,90 L.h⁻¹, 8,94 L.h⁻¹ e 7,38 L.h⁻¹, respectivamente.

Reyneke et. al. (2018), estimaram uma taxa de produção de 16,25 L.h⁻¹ de água pasteurizada produzida para temperaturas entre 53°C e 58°C, e 12,81 L.h⁻¹ de água pasteurizada para temperaturas alcançadas de 66°C. Amsberry et al. (2012) produziram 55 litros de água desinfetada em um dia de sol com pico de radiação de 700 W.m⁻².

Diante do exposto, é seguro dizer que o sistema de pasteurização do Disco Solar testado na presente pesquisa apresenta vantagens em relação a produtividade quando comparado aos demais sistemas citados acima, em relação ao volume diário de água desinfetada.

CAPÍTULO 3
DESINFECÇÃO DE ÁGUA EM REATOR CPC

7. CONCENTRADOR PARABÓLICO COMPOSTO (CPC)

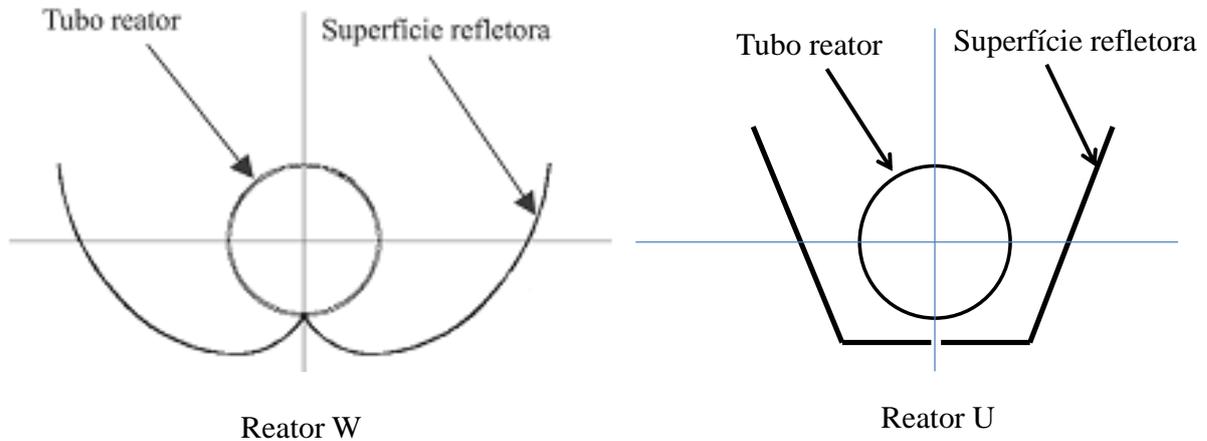
Para os resultados apresentados nesta tese foram usados 2 reatores CPCs: Reator 1 - um protótipo construído pela *Ecosystem Enviromental Services S.A.* e testado na Plataforma Solar de Almeria (PSA), localizada na Espanha, durante o período de abril a outubro de 2017, no qual foi realizado o doutorado sanduíche com bolsa PDSE-Capes; e o Reator 2 - CPC construído no Brasil em Campos dos Goytacazes e testado na Universidade Estadual Norte Fluminense.

7.1 PROTÓTIPO REATOR CPC LOCALIZADO NA ESPANHA

Durante o doutorado sanduíche na PSA, a supervisão do trabalho se deu através das doutoras Pilar Fernandez-Ibañez e Inmaculada Polo-Lopez. O reator desenvolvido durante este período teve financiamento do projeto EU H2020-WATERSPOUTT que visa o desenvolvimento de tecnologias baseadas na Desinfecção Solar (SODIS) para produzir água potável usando a radiação solar e reatores de engenharia solar para as comunidades africanas subsaarianas

O protótipo apresenta dois módulos interligados, um dos módulos com superfície refletora em W, por essa razão chamaremos ele de reator W, e o outro módulo com formato da superfície refletora em U, que será denominado como reator U (Figura 48).

Figura 48 - Módulos dos reatores utilizados na Espanha - Reator em W (tipo CPC) e Reator em U



Fonte: Próprio Autor

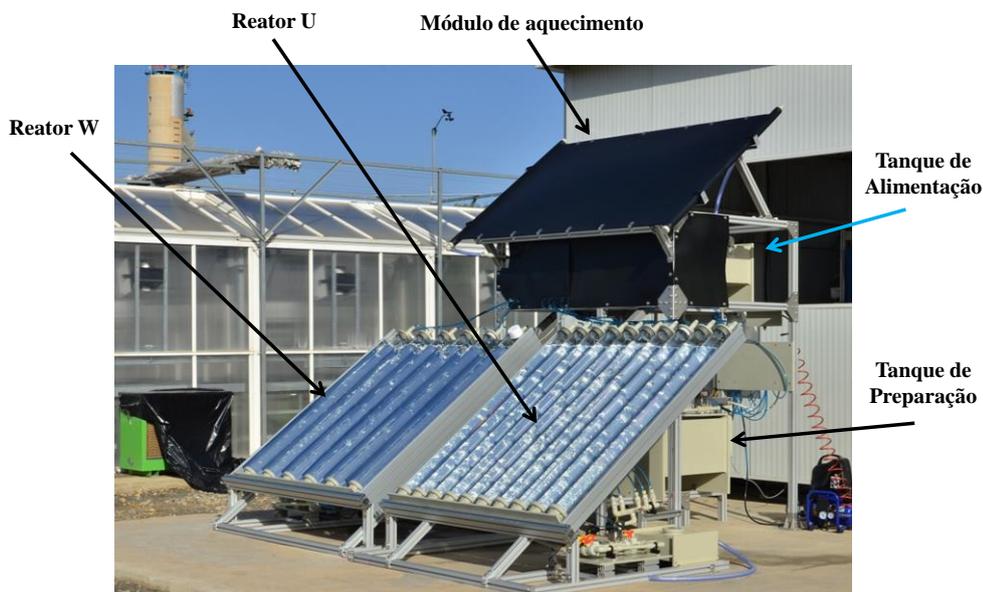
O Reator W apresenta $2,03 \text{ m}^2$ de superfície de captação para 6 tubos de borossilicato de 1,4 m de comprimento com diâmetro de 75 mm e 2,4 mm de espessura. O volume de água do reator é de 32 L e cada tubo dispõe de um sistema de borbulhamento de ar de 15 mm de diâmetro. Também foi utilizada uma bomba de circulação PanWorld NH5PX-Z, e uma sonda para medida de temperatura.

O Reator U apresenta $1,98 \text{ m}^2$ de superfície de captação para 1,4 m de comprimento de tubo de vidro borossilicato, 10 tubos de 75 mm de diâmetro e 2,4 mm de espessura. O volume de tratamento de água é de 54 L e o sistema de borbulhamento e bomba de circulação são os mesmos do reator anterior.

O protótipo contém um tanque de alimentação de polipropileno retangular de 192 L, com fundo inclinado, levando a água para outro tanque através de uma bomba de elevação (Panworld NH5OPX). O tanque de preparação também é feito de polipropileno e tem capacidade de 91,5 L com fundo inclinado. Este tanque ainda possui uma bomba de circulação Jabsco 59510-0012 (12 V) que alimenta, por gravidade, os reatores solares.

O protótipo ainda apresenta uma unidade de aquecimento da água por meio solar que é feita de polipropileno negro, com microtubos e apresenta $2,4 \text{ m}^2$ de área e volume de 6 L. Uma foto do protótipo é apresentada na Figura 49.

Figura 49 - Protótipo do Reator CPC localizado na PSA



Fonte: Próprio Autor

7.2 PROTÓTIPO REATOR CPC LOCALIZADO NO BRASIL

O reator CPC construído no Brasil, teve sua estrutura feita de aço carbono comum, com tubos de vidro Borossilicato por onde flui a água, conexões de PVC e superfície refletora de aço inox reflexivo (Figura 50).

Figura 50 - Reator CPC construído no Brasil

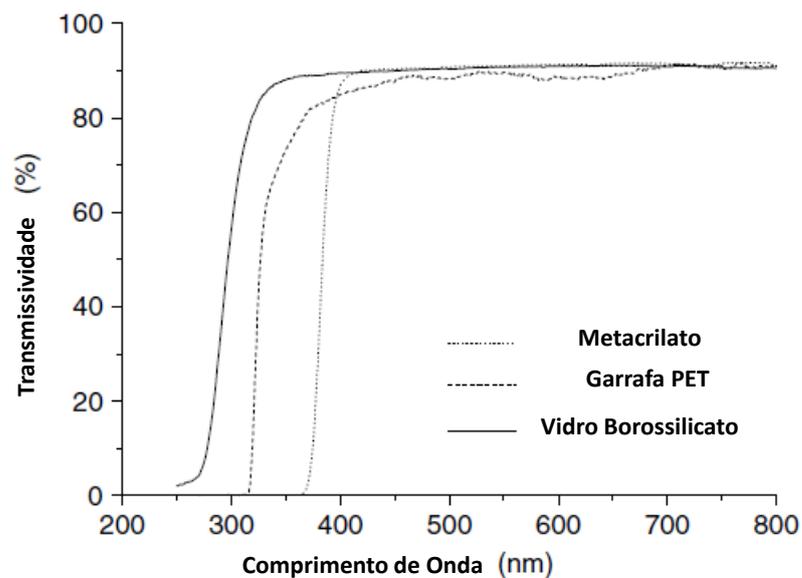


Fonte: Próprio Autor

O tudo de vidro Borossilicato foi escolhido devido a sua boa transmissão no comprimento de onda da radiação UVA (Figura 51). Os tubos possuem 1,4 metros de comprimento, 75 mm de diâmetro e 2,2 mm de espessura.

Uma grande vantagem dos sistemas CPC é que o fator de concentração permanece constante para todos os valores do ângulo zenital do sol dentro do limite do ângulo de aceitação, enquanto as parábolas convencionais ou espelhos planos exigem rastreamento solar para manter o fator de concentração. Por outro lado, os reatores CPC exigem de 2 a 4 vezes a área reflexiva de uma parábola convencional (POLO-LÓPEZ et al., 2011).

Figura 51 - Comparação dos espectros de Transmitância dos diferentes materiais



Fonte: Adaptado (UBOMBA-JASWA; FERN, 2010)

De acordo com Malato et al. (2009) o ângulo da superfície refletora para um reator CPC deve ser construído de modo a iluminar por completo o perímetro do receptor, em vez de apenas a frente deles. Esses dispositivos de concentração possuem uma ótica ideal, mantendo assim a vantagem do sistema estático. O fator de concentração (R_c) de um coletor CPC é dado pela equação 1:

$$R_c = \frac{1}{\text{sen}\theta} = \frac{A}{2\pi r} \quad (1)$$

Onde:

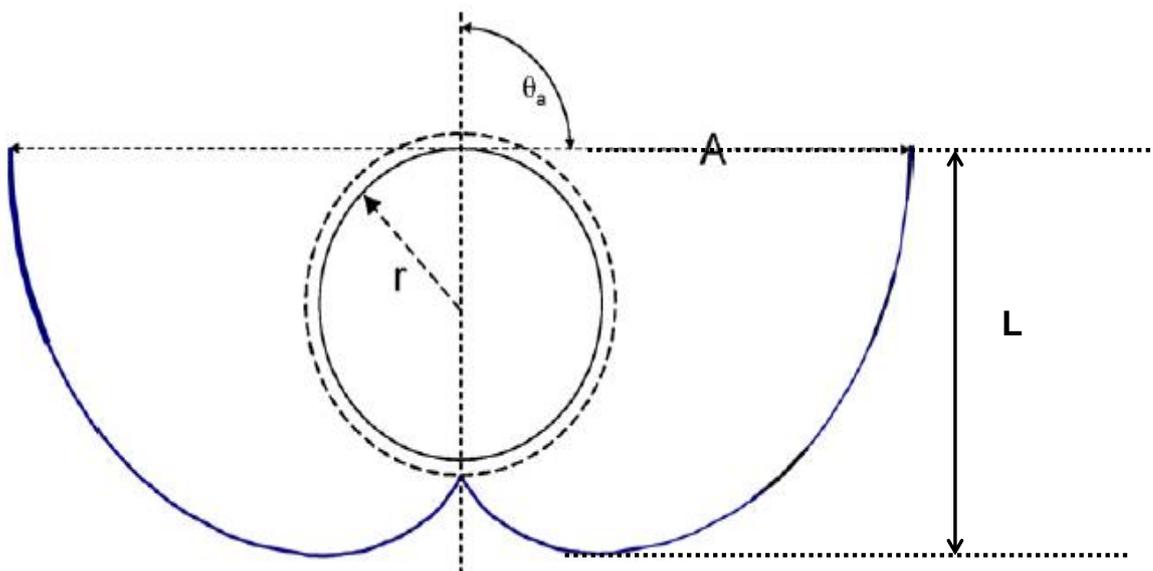
A = Abertura do concentrador CPC

Θ = Ângulo de aceitação

r = Raio do tubo

O ângulo de aceitação correto permite que o receptor colete tanto uma parte direta quanto uma grande parte da luz difusa, com a vantagem adicional de diminuir os erros da superfície refletiva e do alinhamento do tubo receptor. Um caso especial é aquele em que $\theta = 90^\circ$, e $RC = 1$. Quando isso ocorre, toda a radiação UV que atinge a área de abertura do CPC (direta e difusa) pode ser coletada e redirecionada para o reator. Se o CPC for projetado para um ângulo de aceitação de $+90^\circ$ a -90° , toda a radiação difusa solar incidente pode ser coletada em sua superfície (Figura 52). A luz refletida pelo CPC é distribuída ao redor do receptor tubular de modo que quase toda a circunferência do tubo receptor é iluminado (MALATO et al., 2016).

Figura 52 - Desenho esquemático de CPC com um ângulo de aceitação de 90°



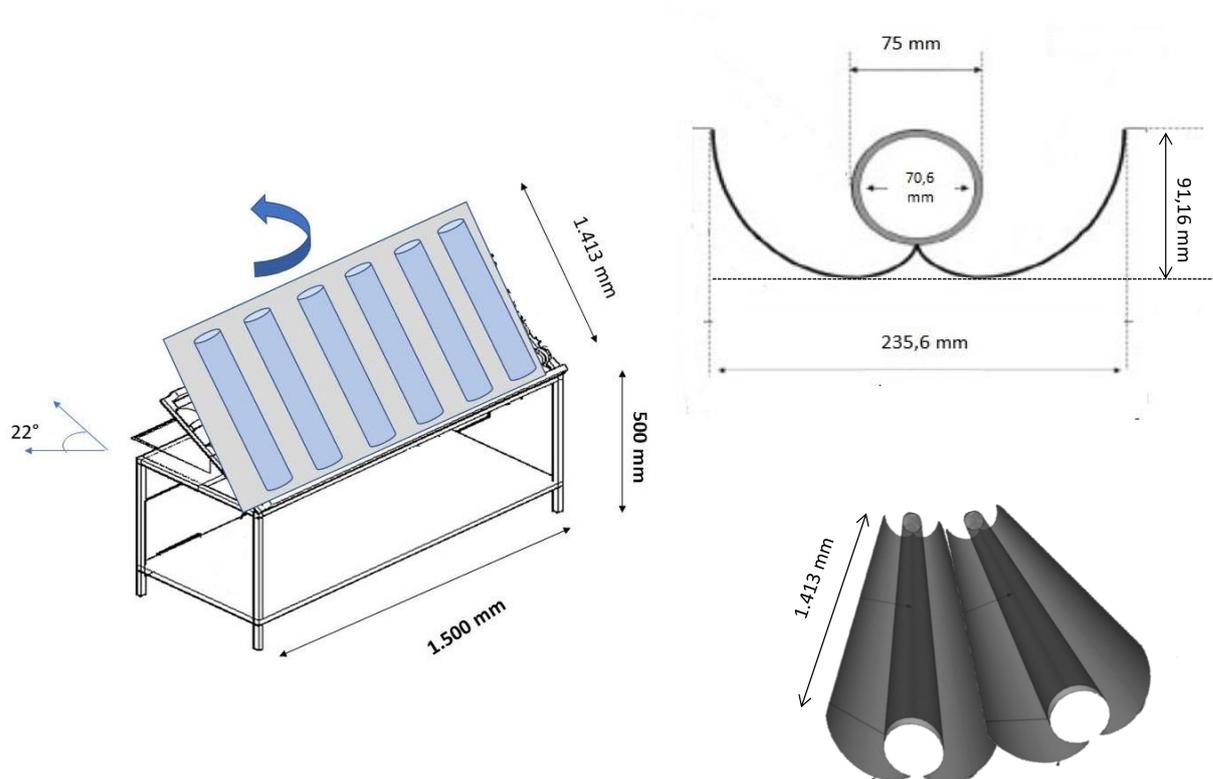
Fonte: Adaptado (MALATO et al., 2009)

A Equação 1 permite relacionar o diâmetro do tubo de vidro borossilicato utilizado com a abertura do concentrador CPC para um ângulo de aceitação determinado pelo construtor. Para determinar o comprimento da altura da parábola L deve-se seguir a Equação 2 a seguir (BLANCO GÁLVEZ, 2002):

$$L = \frac{2\pi r}{2} \left[\frac{1}{\text{sen}\theta \tan\theta} + \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi \text{sen}\theta} \right] \quad (2)$$

Para ter um fator de concentração igual a 1 e ângulo de aceitação $\theta = 90^\circ$ no reator CPC no Brasil, foram utilizadas as dimensões mostradas na Figura 53.

Figura 53 - Dimensões e cotas do Reator CPC construído no Brasil



Fonte: Próprio Autor

O ângulo de inclinação vertical da superfície que recebe a radiação deve ser igual à latitude do local de instalação, de forma que a radiação incida segundo o ângulo de 90°, proporcionando o máximo de aproveitamento da radiação. Desta forma, foi adotado o valor de 22°, correspondente à latitude da cidade de Campos dos Goytacazes e o reator foi instalado no sentido Norte-Sul na UENF.

O reator CPC construído no Brasil possui um sistema que faz com que ele possa trabalhar tanto na vertical quanto na horizontal, invertendo a sua configuração dos tubos, possibilitando que ele trabalhe de forma estática ou com fluxo de circulação com o auxílio de uma bomba. A configuração utilizada neste trabalho foi na vertical com os tubos interligados por vasos comunicantes

As conexões de PVC são removíveis para adaptar as diferentes formas de utilizar o reator CPC. O reator geralmente é usado na forma horizontal para experimentos de descontaminação química de água que envolvem fotocatalise (FERNÁNDEZ-IBÁÑEZ et al., 2015; RINCÓN; PULGARIN, 2003; SATTTLER et al., 2018). A Figura 54 mostra diferentes visões do Reator CPC construído neste trabalho.

Figura 54 - Diferentes vistas do reator CPC - (A) Vista Frontal, (B) Vista de trás superior, (C) Vista lateral



Fonte: Próprio Autor

7.3 CUSTO DO REATOR CPC

O reator CPC foi feito com materiais de baixo custo para atender o objetivo de ser implementado em uma pequena comunidade rural. Os materiais utilizados para construção e montagem, bem como os custos são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 - Custo dos materiais e mão de obra utilizados para construir o Reator CPC

Materiais	Preços
Tubos de Borossilicato	R\$ 2.733,00
Metalon (Aço Carbono)	R\$ 600,00
Chapa inox	R\$ 950,00
Conexões PVC	R\$ 150,00

Colas PVC	R\$ 40,00
Discos de corte e acabamento	R\$ 250,00
Eletrodo	R\$ 345,00
<i>Orings</i> de vedação	R\$ 50,00
Rodízios	R\$ 150,00
Abraçadeiras	R\$ 100,00
Borracha	R\$ 50,00
Tinta fundo	R\$ 45,00
Tinta para acabamento	R\$ 70,00
Mão de Obra	R\$ 4.200,00
TOTAL	R\$ 9.733,00

Fonte: Próprio Autor

8. EXPERIMENTOS DE DESINFECÇÃO DE ÁGUA EM REATOR CPC

Os experimentos de desinfecção em reator CPC, foram divididos em testes realizados em Almeria na Espanha, no reator CPC do projeto Waterspoutt e em testes no reator construído em Campos dos Goytacazes no Brasil.

8.1 MATERIAIS E MÉTODOS DE DESINFECÇÃO REATOR CPC NA ESPANHA

Os experimentos realizados no protótipo do reator CPC localizado na Espanha é do projeto Europeu chamado WATERSPOUTT (<http://www.waterspoutt.eu>). Este projeto tem como objetivo fornecer água potável para as comunidades que dependem de fontes inseguras. O consórcio está realizando um programa de desenvolvimento tecnológico para avançar em aplicações com base na Desinfecção Solar (SODIS), testando reatores na Espanha e depois enviando-os para trabalhar em comunidades sem acesso a água potável, de modo a tornar a água segura para beber depois de ter sido coletada.

8.1.1 Matrix de água utilizada nos experimentos de desinfecção reator CPC

A matriz de água selecionada nestes experimentos foi água de chuva simulada, pois em lugares de alta aridez e carentes de água, a única forma de captação é a água de chuva. A água de chuva simulada tem a composição segundo a Tabela 12.

Tabela 12 - Sais inorgânicos utilizados para preparação da água de chuva simulada

Compostos Químicos	Concentração (g/L)
NaCl	5,61
K ₂ SO ₄	1,74
CaCl ₂	1,32
MgCl ₂	1,22
NH ₄ NO ₃	1,20
KH ₂ PO ₄	0,0136

Fonte: Próprio Autor

8.1.2 Estoque de Bactéria e preparação do Inóculo do reator CPC na Espanha

Os microrganismos utilizados nestes experimentos foram *E. coli* k-12 e *E. faecalis*, devido ao seu uso generalizado como indicador fecal e agente patogênico em água (CASTRO-ALFÉREZ et al., 2018; NAHIM-GRANADOS; SÁNCHEZ PÉREZ; POLO-LOPEZ, 2017; SPINKS et al., 2006). Estes microrganismos são definidos pela Organização Mundial da Saúde como organismos indicadores chave de preocupação significativa para a saúde. A estirpe K-12 de *E. coli* foi obtida da Coleção de Cultura Espanhola (CECT 4624) como uma cultura liofilizada e *E. faecalis* foi obtida da Coleção (CECT 5154).

As colônias foram inoculadas em duas alíquotas de 14 mL de caldo Luria Bertani, estéril para cada espécie de bactéria, e foram incubadas a 37 °C com agitação constante sob condições aeróbicas num agitador rotativo a 100 rpm

durante 18 h para obter a concentração de fase estacionária bacteriana (10^9 UFC mL⁻¹).

As suspensões bacterianas foram colhidas por centrifugação a 900g durante 10 min. Em seguida, o sedimento foi novamente suspenso em solução salina tamponada com fosfato, e diluído diretamente na matriz de água selecionada para cada experimento, até atingir a concentração inicial requerida (10^6 UFC mL⁻¹).

8.2 MATERIAIS E MÉTODOS DE DESINFECÇÃO REATOR CPC DO BRASIL

Os experimentos realizados no CPC construído no Brasil, inicialmente foram realizados com a matriz de água mineral pH 5,5 e composição citada anteriormente na Tabela 8. A bactéria utilizada foi a *Escherichia coli* ATCC 25922 obtida a partir do estoque do Laboratório de Sanidade Animal, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro-UENF. O processo de obtenção do inóculo para realização do experimento em água foi o mesmo utilizado nos experimentos para o Disco Solar já descrito anteriormente, obtendo uma concentração final de *E.coli* de 10^6 UFC mL⁻¹.

Os experimentos foram conduzidos na Universidade Estadual Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), em Campos dos Goytacazes no estado do Rio de Janeiro cuja latitude é 21°45', de janeiro a março de 2019, das 10:00 h às 15:00 h, horário local e com duração de 300 minutos sob condições naturais de radiação solar.

A radiação solar UVA foi continuamente monitorada com um radiômetro UVA (300-400 nm, Modelo PMA 22100, Solar Light Co), localizado horizontalmente, que fornece dados em termos de irradiação incidente ($W.m^{-2}$).

Os ensaios de desinfecção solar foram realizados em reator CPC apresentado na Figura 50 de forma estática. O volume total e irradiado foi de 40 L e a superfície iluminada foi de 2,1195 m². A temperatura da água foi monitorada ao longo da exposição solar usando um sensor digital Impac-TM 6902D.

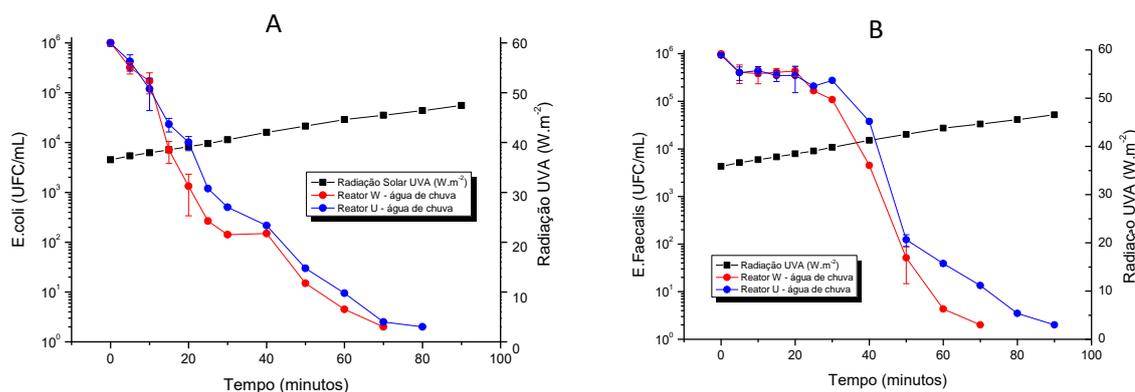
9. RESULTADOS DE DESINFECÇÃO DOS REATORES CPC

9.1 RESULTADOS DE DESINFECÇÃO DO REATOR CPC DA ESPANHA

Os experimentos de desinfecção no protótipo do reator CPC da Espanha foram realizados testando as condições em cultivo estático, e com variação de temperatura. Os testes foram realizados nas duas configurações propostas pelo protótipo que são Reator em W e Reator em U.

A Figura 55 mostra os resultados para cultivo estático sem utilização do módulo de aquecimento para *E.coli* e *E.faecalis*.

Figura 55 - SODIS em reator piloto com água de chuva simulada. (A) Experimentos SODIS em Reator W e Reator U para *E.coli*, (B) Experimentos SODIS em Reator W e Reator U para *E.faecalis*



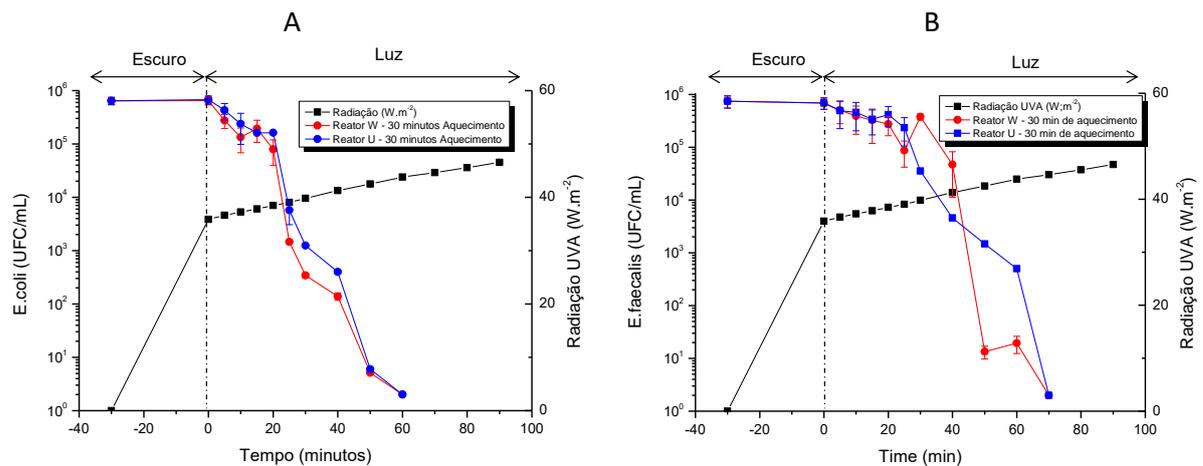
Fonte: Próprio Autor

Os resultados mostram que os testes no reator protótipo CPC, com uma média de 40 W.m⁻² de radiação UVA e temperatura da água a 30°C, levam 70 minutos para desinfecção de *E.coli* em água simulada de chuva para o Reator W e 80 minutos para o Reator U, e para *E.faecalis* se leva 70 minutos no Reator W e 90 minutos no Reator U.

Após esses resultados, para avaliar a influencia do módulo de aquecimento da planta piloto, a água foi previamente aquecida por 30 minutos, em uma região escura, sem ação da radiação ultravioleta. A temperatura teve um salto de 29°C para 32 °C nesse periodo de aquecimento, e a partir deste aquecimento, a água foi

para os reatores W e U para serem desinfectadas pelo processo SODIS. Os resultados para *E.coli* e *E.faecalis* são mostrados na Figura 56.

Figura 56 - SODIS em reator piloto com água de chuva simulada com aquecimento prévio. (A) Experimentos SODIS em Reator W e Reator U para *E.coli* com aquecimento de 30 min 29°C a 32°C (B) Experimentos SODIS em Reator W e Reator U para *E.faecalis* com aquecimento

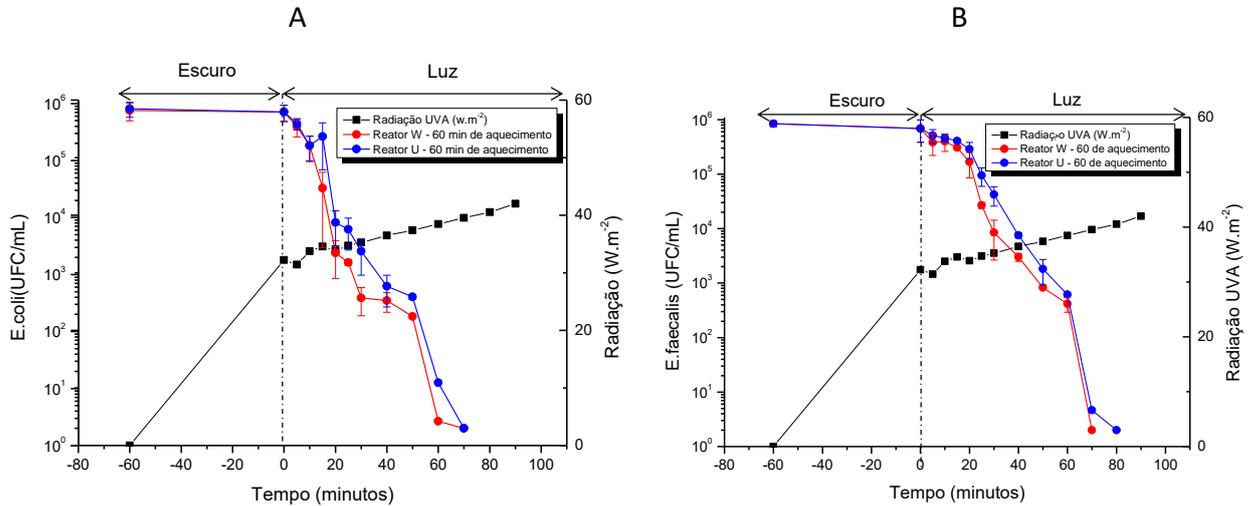


Fonte: Próprio Autor

Os resultados mostram uma queda no tempo de desinfecção com o aquecimento prévio para *E.coli*. O tempo para o Reator W reduziu de 70 min para 60 min, e para o Reator U, o tempo reduziu de 80 min para 60 min. Para o microrganismo *E.faecalis*, o reator W manteve o tempo de morte com 70 minutos, e para o Reator U, houve uma diminuição de 90 min para 70 min.

Em outro experimento, a água foi deixada circulando no módulo de aquecimento por 60 minutos, e a temperatura da água foi de 32°C para 37°C. Após esse período a água foi direcionada para os reatores. Os resultados são mostrados na Figura 57.

Figura 57 – SODIS em reator piloto com água de chuva simulada com aquecimento prévio. (A) Experimentos SODIS em Reator W e Reator U para *E.coli* com aquecimento de 60 min 32°C a 37°C (B) Experimentos SODIS em Reator W e Reator U para *E.faecalis*

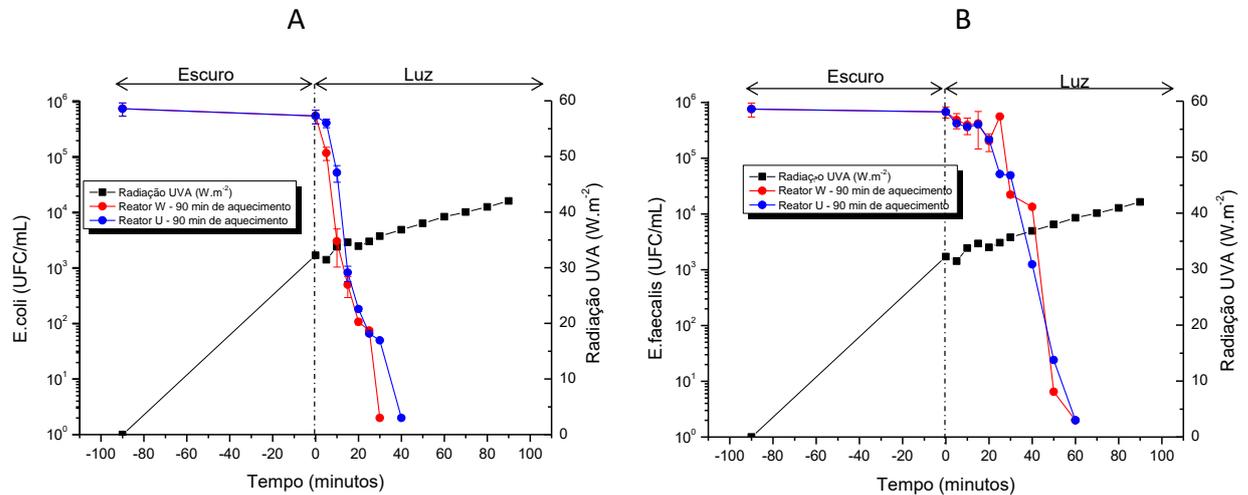


Fonte: Próprio Autor

Os resultados mostram que para *E.coli* e *E. faecalis*, o tempo de morte foi de 70 min no Reator W e 80 min para o Reator U. Com 60 minutos de aquecimento, os resultados não mostraram melhoria no tempo de desinfecção. Esta melhora pode ter acontecido porque a temperatura em torno de 37°C, é muito próxima da temperatura ótima de crescimento das bactérias. Esse efeito antagônico corrobora com os dados apresentados por Giannakis et al., (2014) e Vivar et al., (2017).

O módulo de aquecimento foi avaliado com 90 minutos de circulação e aquecimento, atingindo um valor final de 39°C. Os resultados na Figura 58, mostram que houve desinfecção para *E.coli* no Reator W com 30 minutos e 40 minutos para o Reator U. Para o microrganismo *E.faecalis*, ambos os reatores obtiveram desinfecção com 60 minutos. Estes resultados mostram que a temperatura da água a 39°C pode influenciar positivamente no processo de desinfecção.

Figura 58 - SODIS em reator piloto com água de chuva simulada com aquecimento prévio. (A) Experimentos SODIS em Reator CPC e Reator U para *E.coli* com aquecimento de 90 min 31°C a 39°C (B) Experimentos SODIS em Reator CPC e Reator U para *E.faecalis* com aquecimento



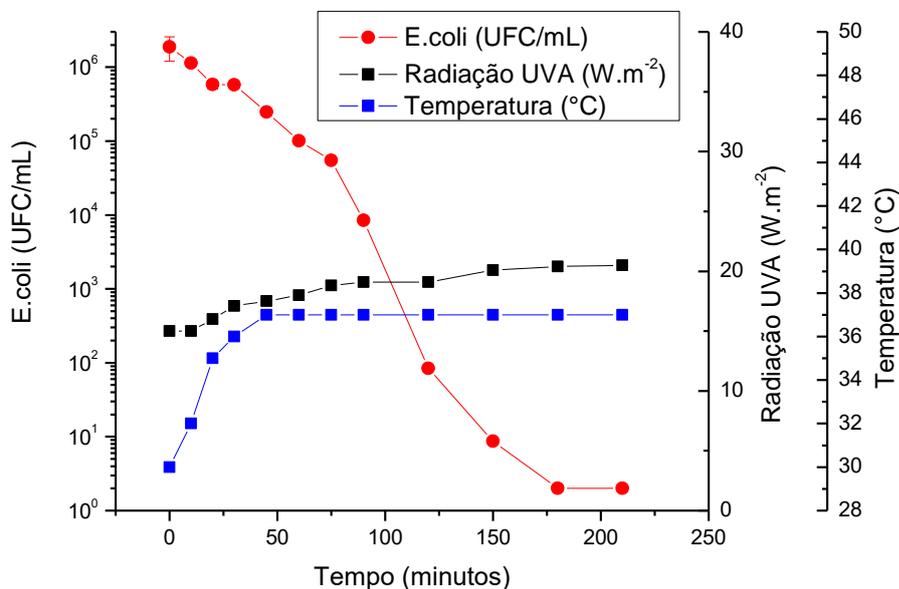
Fonte: Próprio Autor

Os resultados mostram que a diferença entre a forma dos reatores praticamente não apresenta influência significativa nos resultados de desinfecção para os dois microrganismos e que houve sinergia significativa entre temperatura e radiação para desinfecção de *E.coli*, quando o processo operou a temperatura de 39°C.

9.2 RESULTADOS DE DESINFECÇÃO REATOR CPC NO BRASIL

Foram realizados 3 experimentos de desinfecção em dias consecutivos e a média dos resultados para o reator CPC construído no Brasil estão demonstrados na Figura 59. Os resultados mostram que o teste no reator CPC, construído no Brasil levou um tempo de 180 minutos para promover a desinfecção da *E.coli* na água. Estes experimentos foram realizados em janeiro de 2019 e o máximo de radiação UVA alcançado foi de 20 $W.m^{-2}$ e a temperatura da água atingiu 37°C, durante o experimento.

Figura 59 - SODIS em reator CPC construído no Brasil com *E.coli* ATCC 25922



Fonte: Próprio Autor

Comparando este resultado com o resultado de desinfecção de *E.coli* no reator CPC do protótipo da Espanha (Figura 55), nota-se que o tempo de desinfecção para o reator construído no Brasil foi de 110 minutos a mais do que o obtido naquele experimento. Levando-se em conta que os reatores são similares, ambos com 2 m² de área iluminada, mesmo volume e dimensões (diâmetro e comprimento) dos tubos de Borossilicato e mesmo microrganismo de desinfecção *E.coli*, os fatores que se diferenciam são a quantidade de radiação UVA que atinge o local e a temperatura na qual a água se encontrava.

De fato, as condições de radiação UVA em que os experimentos da Espanha foram realizados, foram o dobro da radiação que o experimento no Brasil recebeu, porém a variável da radiação é uma variável que não se pode alterar nestas condições. Então a variável que pode ser otimizada é a temperatura.

O experimento aconteceu a temperatura de 37°C, que como visto anteriormente é uma temperatura que desfavorece a desinfecção de bactérias na água por se aproximar muito da temperatura ótima de crescimento das bactérias (VIVAR et al., 2017). Com isso propôs-se fazer uma modificação no Reator CPC

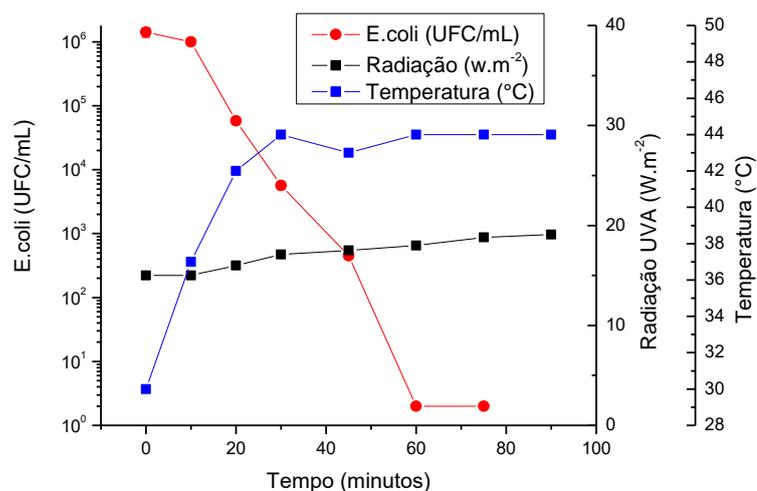
para aumentar a temperatura da água promovendo o aumento da taxa de desinfecção.

Do ponto de vista térmico, garrafas ou tubos pintados com tinta preta convencional estão entre os sistemas menos eficientes para converter a luz solar em calor. Os coletores solares mais econômicos têm uma eficiência média de conversão de cerca de 30%. Garrafas ou tubos pintados têm uma eficiência menor que estes. No inverno, dependendo da temperatura ambiente, o sistema não alcançaria a temperatura desejada, principalmente devido a perdas de calor para o meio ambiente (MCGUIGAN et al., 2012).

Propôs-se então acrescentar uma tampa transparente acima do tubo de vidro, de modo a evitar a perda de calor, e permitir a passagem da radiação UVA, e fechar as laterais com lã de vidro, isolamento térmico eficiente para conter o calor dentro do reator.

Após essas modificações foram realizados novos testes para determinar o tempo de desinfecção da *E.coli* nestas condições e os resultados são demonstrados na Figura 60.

Figura 60 - Experimento SODIS no reator CPC construído no Brasil com aumento de Temperatura



Fonte: Próprio Autor

Neste experimento, o tempo de desinfecção da *E.coli* foi de 60 minutos, com média de radiação UVA de 17 W.m^{-2} . O fator determinante para a redução do tempo foi a interação entre a radiação e a temperatura que chegou a 44°C .

O efeito sinérgico entre temperatura e radiação foi confirmado em estudos anteriores por Wegelin et al. (1994), Joyce et al. (1996) e McGuigan et al. (1998), mostrando este efeito acima de 45°C na temperatura da água. Estes estudos usaram linhagens selvagens de bactérias isoladas de fontes naturais, em água estéril, sem nutrientes presentes na água.

Em busca de se aproveitar este efeito sinérgico entre radiação UVA e temperatura, foram utilizados diferentes métodos para aquecimento da água. O aumento térmico foi alcançado pintando seções das garrafas com tinta preta (MARTÍN-DOMÍNGUEZ et al., 2005), circulação de água sobre uma superfície preta em um invólucro fechado, transparente para a luz UVA (UBOMBA-JASWA; FERN, 2010), e usando um coletor solar preso a um recipiente de vidro duplo (SAITOH; ELGHETANY, 2002). Porém nenhum desses pesquisadores anteriores tentou aumentar a temperatura em um reator CPC, diminuindo a perda de calor por convecção, juntamente com radiação UV.

Este fato pode ter sido determinante para alcançar a sinergia entre UVA e temperatura, fazendo com que a temperatura de 44°C fosse suficiente para aumentar a taxa de desinfecção da *E.coli*, em comparação com o experimento mostrado na Figura 59.

Vivar et al. (2017) em seu trabalho comprovaram o efeito sinérgico do UV a temperaturas que chegaram a $48,9^\circ\text{C}$ e o efeito antagônico abaixo de 40°C ao separar a temperatura da radiação UV em SODIS, utilizando água real com 4,6 NTU de Turbidez e trabalhando com *E.coli*.

Mesmo que a grande parte da literatura que envolve esta discussão seja categórica com relação aos efeitos positivos de sinergia entre temperatura e radiação UV na desinfecção, somente a temperaturas acima de 45°C é possível observar este efeito. Sciacca et al., (2010) trataram coliformes selvagens de uma barragem urbana com população inicial de 10^2 UFC/ml, $28,6 \text{ W.m}^{-2}$ de irradiância UV média e temperatura da água variando de 31°C a 45°C durante 3 horas de

exposição e obtiveram inativação total, atingindo o limite de detecção e corroborando com os dados encontrados no experimento realizado na Figura 60.

Do ponto de vista bioquímico, a catalase é uma enzima intracelular que desempenha um papel muito importante na ação defensiva contra o estresse oxidativo celular. Devido à natureza biológica desta proteína, ela é um dos principais alvos que são suscetíveis a serem afetados tanto pela temperatura quanto pela radiação solar. Cantemir et al., (2013) demonstraram termoinativação das atividades da catalase em substrato com NaCl a temperaturas de 43°C. Este fator pode ser determinante para aumento das espécies reativas de oxigênio (ROS) formadas e consequente otimização da taxa de inativação da bactéria.

CAPITULO 4
INFLUÊNCIA DOS ÍONS NA DESINFECÇÃO SOLAR E
RESULTADOS DE DESINFECÇÃO COM ÁGUA REAL

10. EFEITO DE ÍONS INORGÂNICOS NA DESINFECÇÃO SOLAR DE ÁGUA

Um dos objetivos deste trabalho foi avaliar a desinfecção de água naturalmente contaminada (água real) em ambos os reatores CPC e Disco Solar e comparar a eficiência entre eles. Quando se trata de água real é importante conhecer o máximo de variáveis que diferenciam este tipo de água da água sintética, para que os resultados sejam realmente consistentes. Diante disso foram realizados experimentos para determinar a influência dos íons inorgânicos na desinfecção solar de água que serão demonstrados a seguir.

10.1 MATERIAIS E MÉTODOS DA INFLUÊNCIA DOS ÍONS NO PROCESSO SODIS

Os experimentos foram conduzidos na Plataforma Solar de Almería (PSA), no sudeste da Espanha (37 ° 84 N e 2 ° 34 W), de junho a agosto de 2017, das 10:00 h às 11:00 h, horário local e com duração de 120 minutos sob condições naturais de radiação solar.

10.1.1 Sistemas Solares Utilizados

Os ensaios de desinfecção solar foram realizados em foto-reatores de vaso de 250 mL de vidro borossilicato (Schott, Alemanha), que permite 90% da transmissão UVA. Cada vaso foi agitado magneticamente a 150 rpm durante a exposição solar para garantir a homogeneização correta. Uma cobertura de vidro foi usada para evitar contaminação e/ou evaporação da água e permitir a iluminação completa da amostra. O volume total e irradiado foi de 200 mL e a superfície iluminada foi de 0,0095 m² (Figura 61).

Figura 61 - Configuração dos experimentos para determinação da influencia dos íons no SODIS



Fonte: Próprio Autor

10.1.2 Reagente utilizados nos experimentos

Cada íon investigado neste experimento foi obtido a partir de diferentes soluções salinas usadas como recebidas do fabricante. Os íons sulfato foram obtidos utilizando o sal K_2SO_4 (Panreac), os íons nitrato do sal $NaNO_3$ (Panreac), os íons amônio do sal NH_4Cl (Sigma - Aldrich) e os íons cloreto do $NaCl$ (Sigma - Aldrich).

A faixa de concentração de íons testada foi selecionada de acordo com os valores comumente detectados em águas superficiais e águas pluviais (AMIN; HAN, 2009; CAMPISANO et al., 2017). As concentrações de sulfato testadas foram 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1500, 3000 e 5000 $mg L^{-1}$; 5, 10, 20, 50, 100, 200, 400, 600 e 800 $mg L^{-1}$ de nitrato; 1, 5, 10, 20, 50, 100, 200 e 300 $mg L^{-1}$ de amônio e 10, 20, 200, 400, 600, 800, 2000 e 4000 $mg L^{-1}$ de cloreto em água deionizada obtida de uma planta de osmose localizada nas instalações da PSA e esterilizada a 121°C por 15 min.

10.1.3 Estoque, preparação e quantificação das bactérias

Os microrganismos utilizados nestes experimentos foram *E. coli* K-12 (CECT 4624) e *E. faecalis* (CECT 5154) obtidos da Coleção de Cultura Espanhola. A concentração inicial de bactéria para cada teste foi de 10^6 UFC.mL⁻¹. Colônias individuais foram então inoculadas em duas alíquotas de 14 mL de caldo Luria Bertani estéril (Sigma-Aldrich, EUA) para cada espécie de bactéria e incubadas a 37 °C com agitação constante sob condições aeróbicas em um agitador rotativo a 100 rpm por 18 h para obter a concentração de fase estacionária bacteriana correspondente a 10^9 UFC. mL⁻¹. As suspensões bacterianas foram colhidas por centrifugação a 900 x g durante 10 min. Em seguida, o sedimento foi ressuspenso em solução salina tamponada com fosfato (PBS, Sigma-Aldrich, EUA) e diluído diretamente na matriz aquosa para atingir a concentração inicial desejada de 10^6 UFC.mL⁻¹.

As amostras recolhidas durante os experimentos foram enumeradas utilizando o método de contagem *Standart* em placas através de diluições em série de 10 vezes em PBS. Volumes de 20 µl de cada diluição foram inoculadas em placas de Petri Endo ágar (Sigma-Aldrich, EUA) e ágar Slanetz e Bartley (SB, Scharlau, Espanha) para enumeração de *E.coli* e *E.faecalis*, respectivamente. As inoculações foram realizadas em triplicatas. Quando a concentração bacteriana era menor que 50 UFC.mL⁻¹, 500 µL das amostras não diluídas foram espalhadas no meio ágar específico para atingir um limite de detecção de 2 UFC mL⁻¹. As colônias foram contadas após incubação de 24 h e 48 h a 37 °C.

10.1.4 Experimentos de Desinfecção

Todos os experimentos foram realizados primeiramente através da dissolução dos respectivos íons em água mantido sob agitação constante para atingir uma homogeneização completa. Em seguida, ambas as soluções bacterianas foram simultaneamente adicionadas à amostra para atingir a concentração inicial de 10^6 UFC mL⁻¹. Antes da exposição solar, uma amostra de tempo zero foi retirada para determinar a concentração bacteriana inicial, e os reatores foram expostos à luz

solar natural por 120 minutos sob agitação constante, e as amostragens foram realizadas em intervalos regulares ao longo do tempo de exposição.

A primeira amostra (tempo zero) é mantida no escuro até o final do teste solar e inoculada novamente para avaliar a influência dos íons sobre o microrganismo sem a ação do sol como amostra de “controle”. Todos os testes foram realizados em triplicata para cada concentração de íons, e os resultados mostraram alta reprodutibilidade.

A temperatura da água foi monitorada ao longo da exposição solar usando um sensor Checktemp (instrumentos Hanna, Espanha). O pH da água foi determinado no início e no final do teste solar usando um sensor CRISON (Espanha).

A radiação solar UVA foi continuamente monitorada com um piranômetro global UVA (300-400 nm, Modelo CUV5, Kipp & Zonen), localizado horizontalmente, que fornece dados em termos de irradiação incidente ($W.m^{-2}$). Observou-se um perfil de irradiância semelhante ao longo dos experimentos, com médias variando de 28 $W.m^{-2}$ até 45 $W.m^{-2}$.

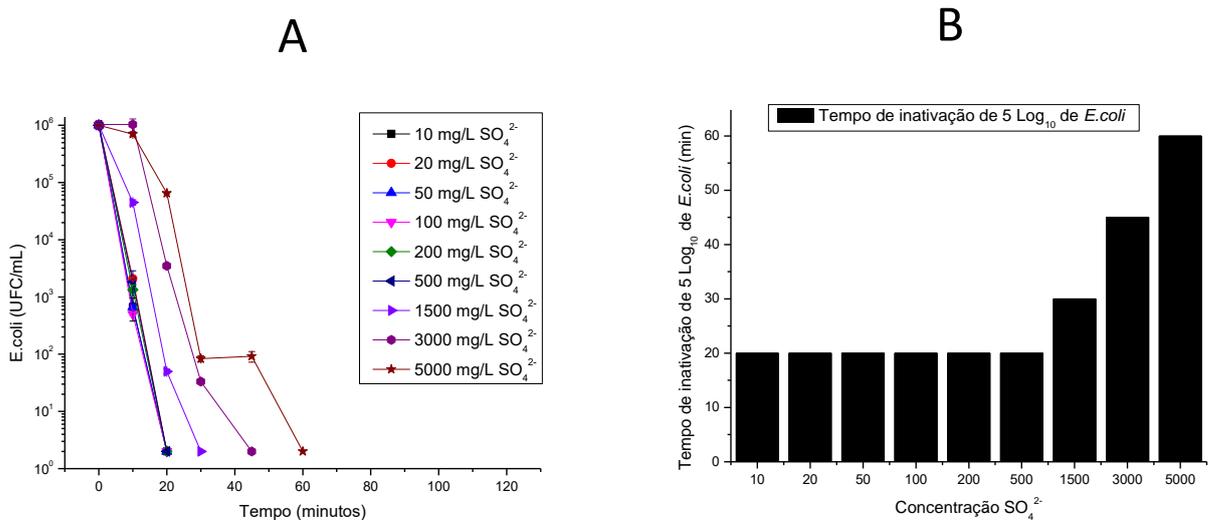
10.2 RESULTADOS DA INFLUÊNCIA DOS ÍONS NOS ENSAIOS DE DESINFECÇÃO

Os resultados de inativação de *E.coli* e *E.faecalis* na presença de várias concentrações de íons sulfato são mostrados na Figura 62 e Figura 63. O limite de detecção (2 UFC mL^{-1}) foi atingido em todos os casos reduzindo a concentração inicial em mais de 5-log. No entanto, uma influência clara do efeito da concentração de sulfato foi observada. Uma tendência geral foi obtida para ambas as bactérias, pois quanto maior a concentração de sulfato, menor a taxa de inativação.

Os resultados da desinfecção de *E. coli* na presença de íons sulfato mostraram que a maior concentração de sulfato testada (5000 $mg.L^{-1}$) apresentou o mais baixo tempo para desinfecção, levando 60 minutos para alcançar o limite de detecção (Figura 62 A). A 3000 $mg.L^{-1}$ de sulfato, a desinfecção foi obtida em 45 minutos e 1500 $mg.L^{-1}$ com 30 minutos. Em concentrações iguais ou inferiores a 500

mg.L⁻¹, o tempo foi de 20 minutos para inativação destas bactérias (Figura 62 B). Estes resultados podem estar relacionados ao limite do fator osmótico, ou seja, a falta de íons na água aumenta a pressão osmótica dentro da bactéria que enfraquece a membrana celular (ROPERIS; MÉTRIS, 2016).

Figura 62 - SODIS para *E.coli* variando a concentração do íon Sulfato (A) Experimentos SODIS sobre luz natural com céu limpo em água com frascos de 250 ml de borossilicato, (B) Tempo para inativação de 5 Log₁₀ em diferentes concentrações de sulfato com *E.coli*



Fonte: Próprio Autor

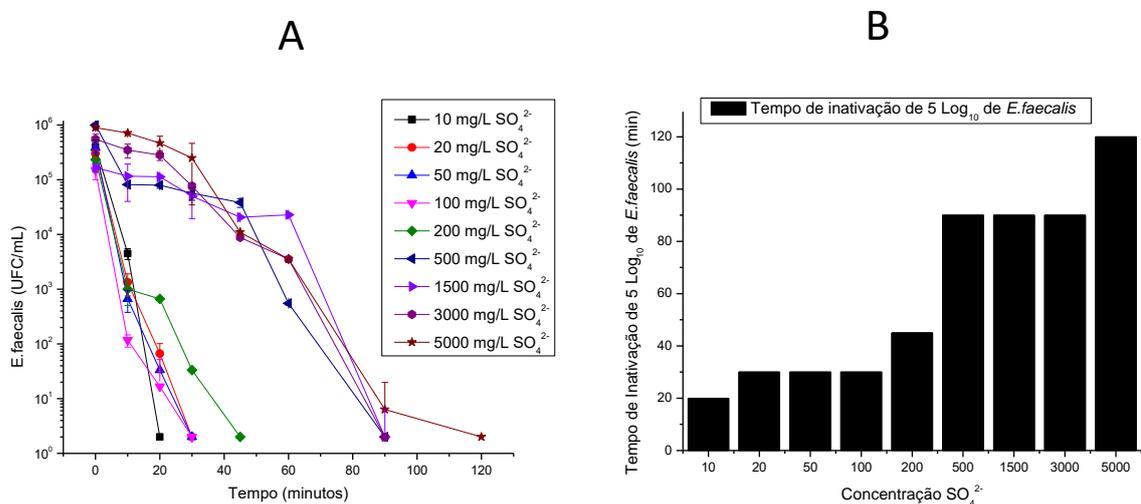
De acordo com Mcguigan *et al.* (2012), a presença de íons inorgânicos na água durante a desinfecção tem um efeito importante na cinética e no resultado final da desinfecção. A presença de íons pode ajudar a manter a integridade bacteriana de modo a evitar o processo de osmose, porém se os íons estiverem presentes em altas concentrações, eles poderiam ter um efeito limitante no processo SODIS, podendo ser prejudicial.

A falta de íons ou baixa concentração causa enfraquecimento mecânico da membrana celular, fazendo com que a bicamada de fosfolípidios se enfraqueça, resultando em mudanças conformacionais nas proteínas da membrana (WOOD, 1999). Esse fato poderia tornar as bactérias mais sensíveis à ação solar. Sichel *et al.*, (2007) realizaram experiências que demonstram um possível efeito do estresse osmótico em células bacterianas. Os experimentos foram realizados na escuridão com água destilada e uma solução salina (0,9% em peso de NaCl). Enquanto a bactéria em água destilada diminuiu 4 logs para o limite de detecção, a

concentração na solução salina diminuiu menos de um log (0,7 log). A osmolaridade de *E. coli* é regulada através de canais mecanossensíveis que permitem que as bactérias mantenham a pressão de turgor mesmo sob mudanças severas na osmolaridade (CALAMITA et al., 1998)(WASE; RATWATTE, 1985).

Para *E. faecali*, utilizando a concentração de sulfato de 10 mg.L^{-1} , a bactéria atingiu o limite de detecção, reduzindo 5 logs em 20 minutos de ensaio. Por outro lado, 20, 50 e 100 mg.L^{-1} de concentração de sulfato, atingiu o limite de detecção com tempo de 30 minutos e 200 mg.L^{-1} atingiu o limite de detecção com 45 minutos. Concentrações mais elevadas de íons de sulfato, 500, 1.500 e 3.000 mg.L^{-1} atingiram o limite de detecção com 90 minutos e em 5000 mg.L^{-1} foi de 120 minutos (Figura 63 A e B). Portanto, foi observado uma maior resistência de *E. faecalis* do que *E. coli* para este tipo de desinfecção (KEANE et al., 2014).

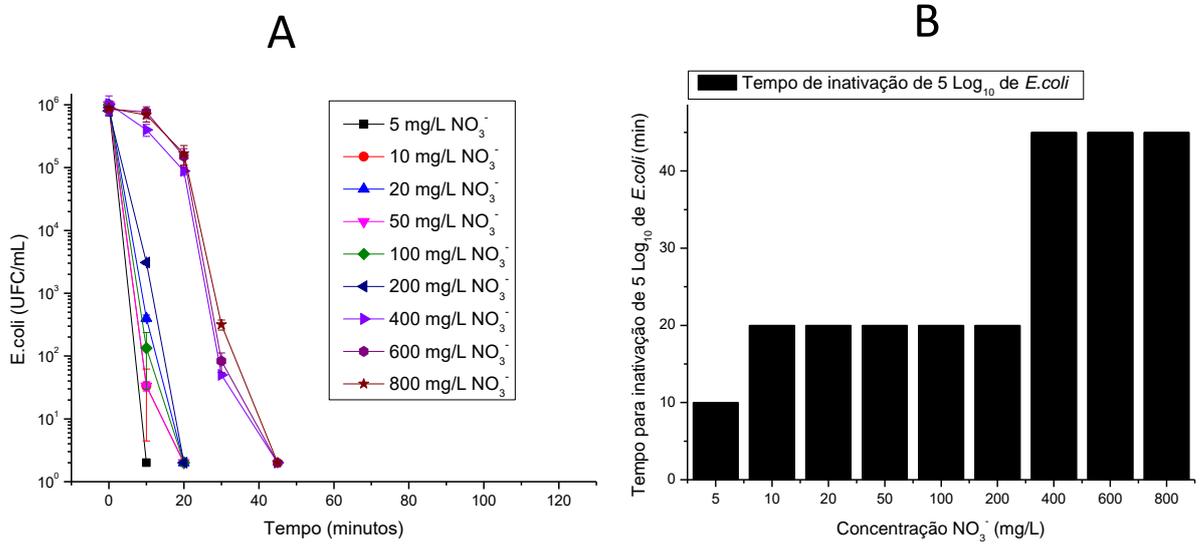
Figura 63 - SODIS para *E. faecalis* variando a concentração do íon Sulfato (A) Experimentos SODIS sobre luz natural com céu limpo em água com frascos de 250 ml de borossilicato, (B) Tempo para inativação de 5 Log_{10} em diferentes concentrações de sulfato com *E. faecalis*



Fonte: Próprio Autor

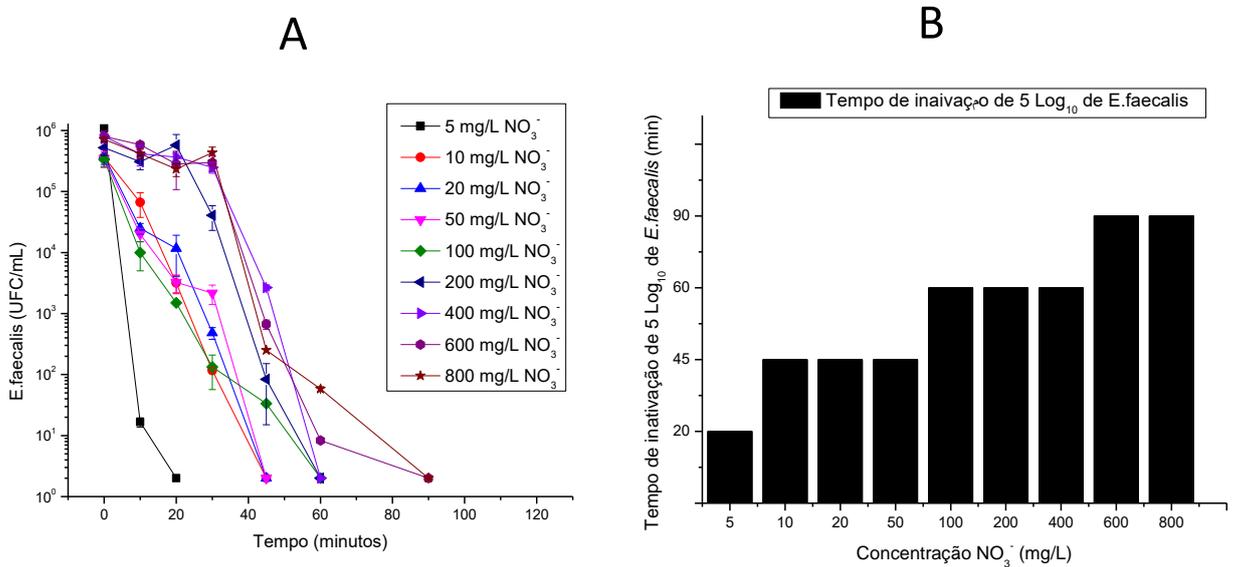
Os íons nitrato também foram testados para os microrganismos *E. coli* e *E. faecalis* em diferentes concentrações. A Figura 64 e 65, mostram os resultados de desinfecção. Para ambos microrganismos, a maior concentração de íons nitrato influenciou negativamente a desinfecção, assim como os íons sulfato.

Figura 64 - SODIS para *E.coli* variando a concentração do íon Nitrato (A) Experimentos SODIS sobre luz natural com céu limpo em água com frascos de 250 ml de borossilicato, (B) Tempo para inativação de 5 Log₁₀ em diferentes concentrações de nitrato com *E.coli*



Fonte: Próprio Autor

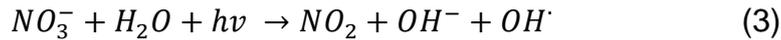
Figura 65 - SODIS para *E.faecalis* variando a concentração do íon Nitrato (A) Experimentos SODIS sobre luz natural com céu limpo em água com frascos de 250 mL de borossilicato, (B) Tempo para inativação de 5 Log₁₀ em diferentes concentrações de nitrato com *E.faecalis*



Fonte: Próprio Autor

A variação da concentração de nitrato nos testes SODIS para ambas as bactérias mostrou que elas se beneficiam da maior concentração desses íons

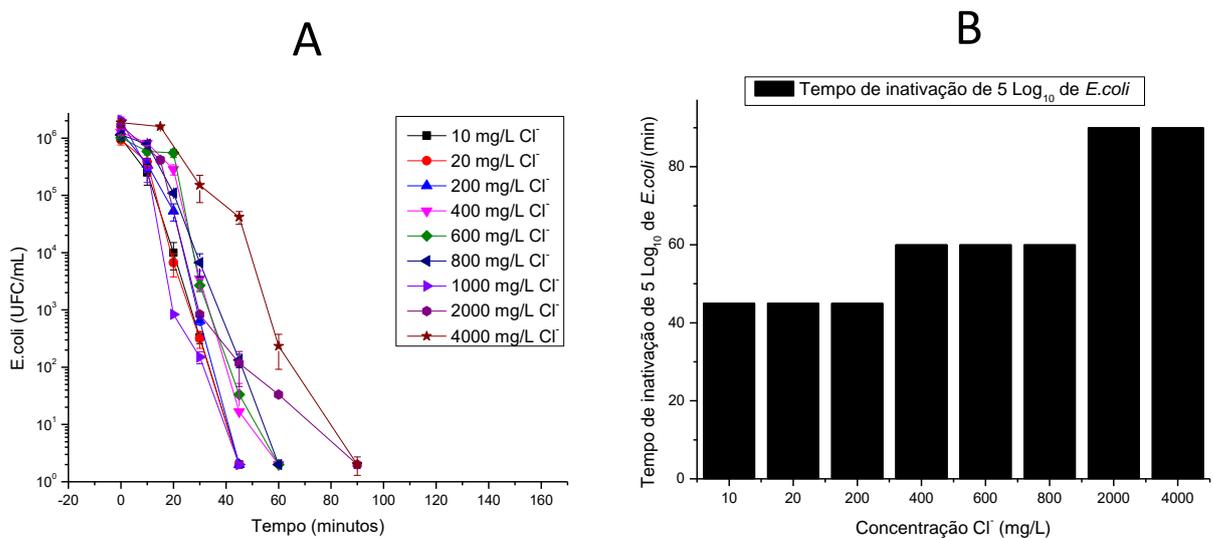
presentes na água, fazendo com que o tempo de desinfecção seja mais lento. Fanning, (2000), relatou estudos conduzidos sobre o uso da luz na ativação direta do íon nitrato ou através de um catalisador. Nitrato ativado ou sais de nitrito na água podem atacar e converter compostos orgânicos. A seguinte reação para nitrato fotolisado entre 290 e 400 nm é proposta (Equação 3):



Entretanto, esse tipo de reação não é observado nesses resultados, pois não há maior desinfecção com a maior concentração de nitrato.

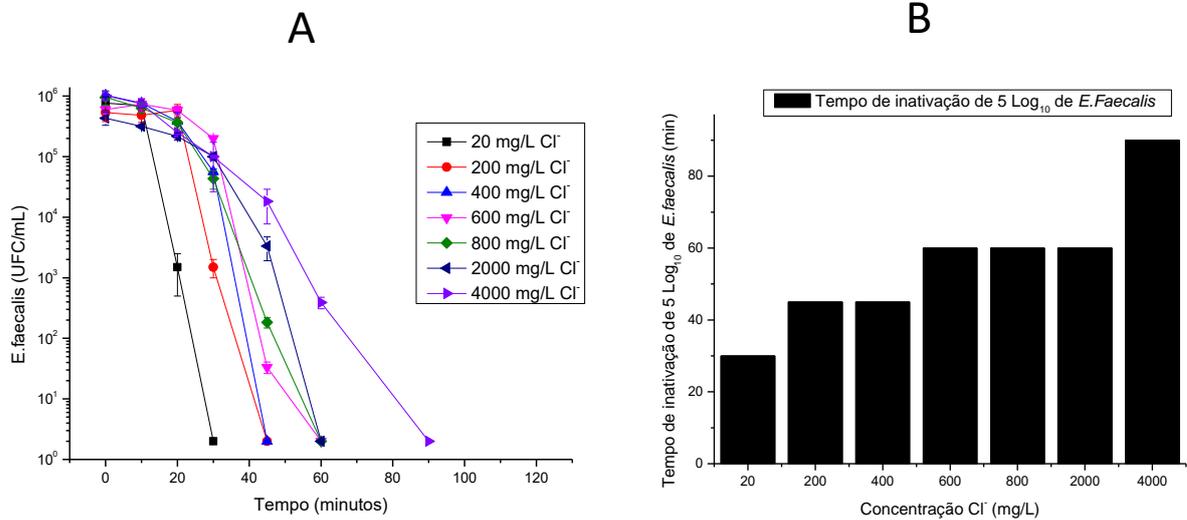
Para os íons de cloreto, tanto *E. coli* quanto *E. faecalis*, a maior concentração deste íon promoveu um tempo de desinfecção maior (Figura 66 e Figura 67). Os principais fatores que modificam a água analisada são a turbidez e a presença de íons orgânicos e inorgânicos. A influência da Turbidez na desinfecção solar de água vem sendo amplamente estudada pelos pesquisadores (CASTRO-ALFÉREZ et al., 2018; GÓMEZ-COUSO et al., 2012; SHERCHAN et al., 2018), porém a influência de íons inorgânicos não está tão bem elucidada.

Figura 66 - SODIS para *E.coli* variando a concentração do íon cloreto (A) Experimentos SODIS sobre luz natural com céu limpo em água com frascos de 250 ml de borossilicato, (B) Tempo para inativação de 5 Log₁₀ em diferentes concentrações de cloreto com *E.coli*



Fonte: Próprio Autor

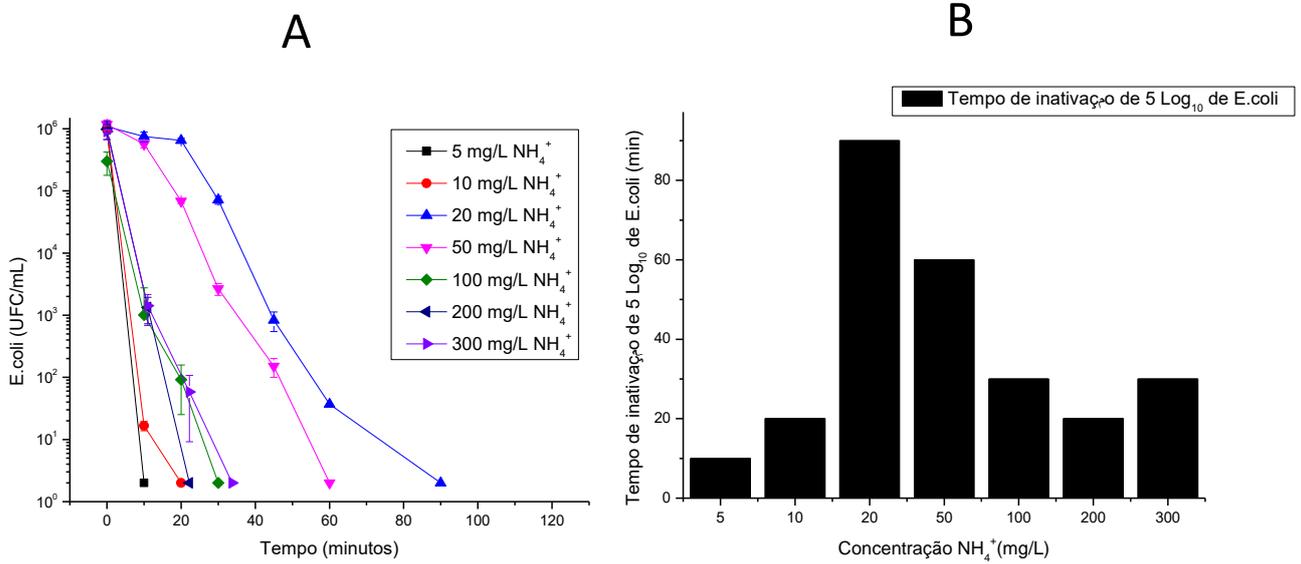
Figura 67 - SODIS para *E. faecalis* variando a concentração do íon cloreto (A) Experimentos SODIS sobre luz natural com céu limpo em água com frascos de 250 ml de borossilicato, (B) Tempo para inativação de 5 Log₁₀ em diferentes concentrações de cloreto com *E. faecalis*



Fonte: Próprio Autor

Um comportamento diferente foi observado para os testes com íons amônio em comparação com os outros íons testados. Concentrações mais baixas, como 5 e 10 mg.L⁻¹, apresentaram curtos tempos de desinfecção e podem estabelecer o estresse osmótico na amostra. Os ensaios com concentrações de 20 e 50 mg.L⁻¹ de NH₄⁺ levaram 90 e 60 minutos, respectivamente, para atingir o limite de detecção e as concentrações mais altas de 100, 200 e 300 mg.L⁻¹ atingiram o limite de detecção com 30 minutos. Este resultado mostra que a presença de amônia contribui com o processo de desinfecção com SODIS (Figura 68)

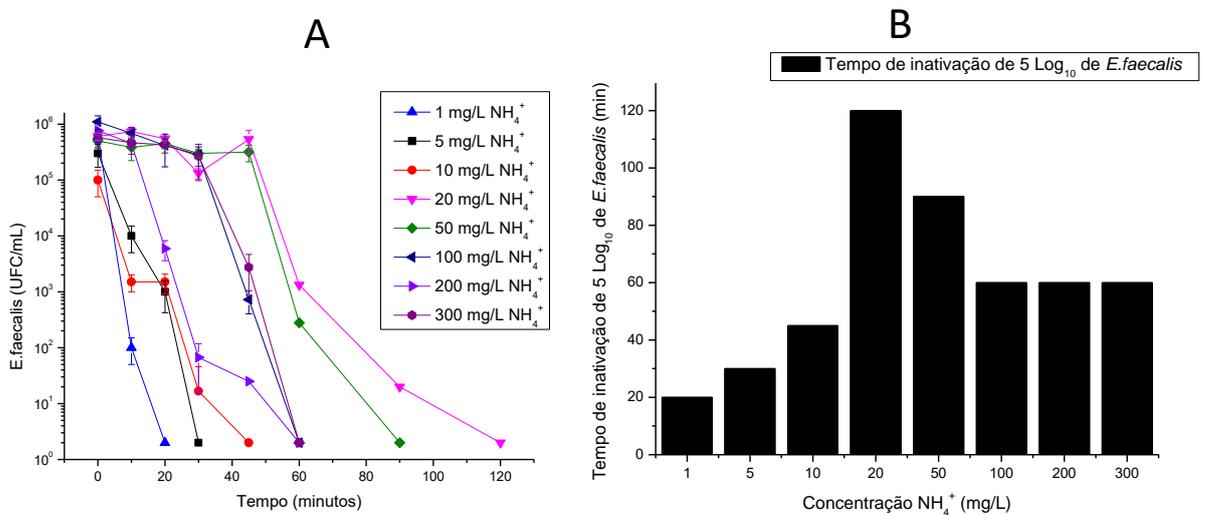
Figura 68 - SODIS para *E.coli* variando a concentração do íon amônio (A) Experimentos SODIS sobre luz natural com céu limpo em água com frascos de 250 ml de borossilicato, (B) Tempo para inativação de 5 Log₁₀ em diferentes concentrações de amônio com *E.coli*



Fonte: Próprio Autor

A bactéria *E. faecalis* comporta-se de forma semelhante a *E. coli*, com a variação da concentração de amônia na água, durante os ensaios SODIS, como se observa na Figura 69.

Figura 69 - SODIS para *E.faecalis* variando a concentração do íon amônio (A) Experimentos SODIS sobre luz natural com céu limpo em água com frascos de 250 ml de borossilicato, (B) Tempo para inativação de 5 Log₁₀ em diferentes concentrações de amônio com *E.faecalis*



Fonte: Próprio Autor

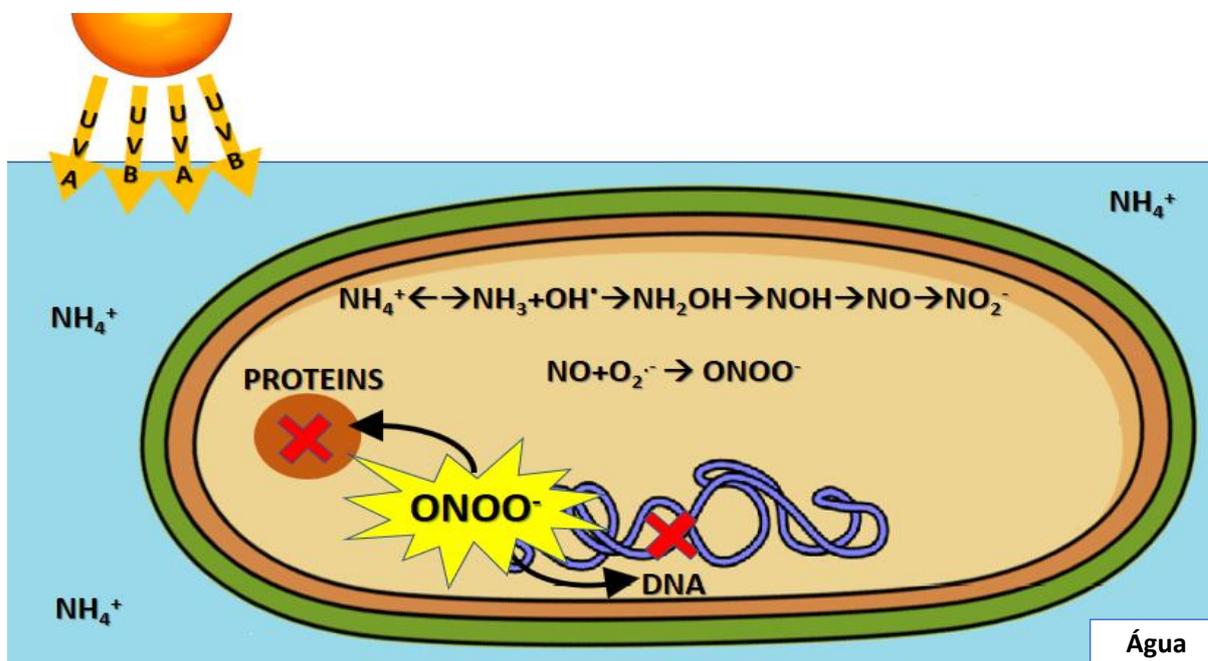
Muito pouco se sabe sobre o íon NH_4^+ no processo de desinfecção por fotólise em água potável. A concentração de componentes de nitrogênio foi determinada durante o tratamento de foto-desinfecção por Ndounla et al., (2014), e observou-se que a concentração de nitrito e nitrato aumentou durante os processos de foto-desinfecção, enquanto a depleção foi registrada para concentração de amônia aquosa. Embora este trabalho não tenha analisado a decomposição da amônia, por não ser o objetivo, o aumento desses íons não deve influenciar a inativação, como mostrado nos resultados para os íons nitrato.

A decomposição da amônia pode ocorrer através da oxidação direta com o radical hidroxila, formando vários compostos de nitrogênio entre eles, o nitrogênio gasoso, óxidos de nitrogênio (NOX) e compostos iônicos, como nitrito e nitrato (HUANG et al., 2008). Ndounla et al. (2014) propuseram uma via de foto-oxidação de amônia por $\bullet\text{OH}$ levando à geração de NO_2^- e NO_3^- (Equação (4)).



O óxido nítrico não é reativo o suficiente para atacar o DNA diretamente, mas pode reagir com o radical ânion superóxido ($\text{O}_2^{\bullet-}$), produzido pela tensão gerada pela radiação UVA na célula, gerando peroxinitrito, que pode sofrer reações secundárias, formando agentes capazes de decompor aminoácidos aromáticos de nitração (BARREIROS, 2006). Em particular, a reação rápida do NO com $\text{O}_2^{\bullet-}$ leva à formação de peroxinitrito (ONOO^-), que por sua vez promoverá reações de oxidação e nitração, afetando diferentes biomoléculas (Figura 70) (BARTESAGHI; RADI, 2018).

Figura 70 - Mecanismos de inativação proposto pela formação de peroxinitrito devido à concentração de amônia.



Fonte: Próprio Autor

O peroxinitrito é um poderoso oxidante formado in vivo, que pode reagir diretamente com diferentes biomoléculas por meio de oxidações de um ou dois elétrons (BARTESAGHI; RADI, 2018). Além disso, pode decompor-se de ácido peroxinitrito (ONOOH), para radicais NO_2 e $\bullet\text{OH}$ (em 30% de rendimento), espécies que podem participar ainda mais em reações de nitração/oxidação (RADI, 2013). A formação de peroxinitrito é uma justificativa para a amônia presente na água aumentar o processo de desinfecção como demonstrado no mecanismo proposto por este trabalho na Figura 70.

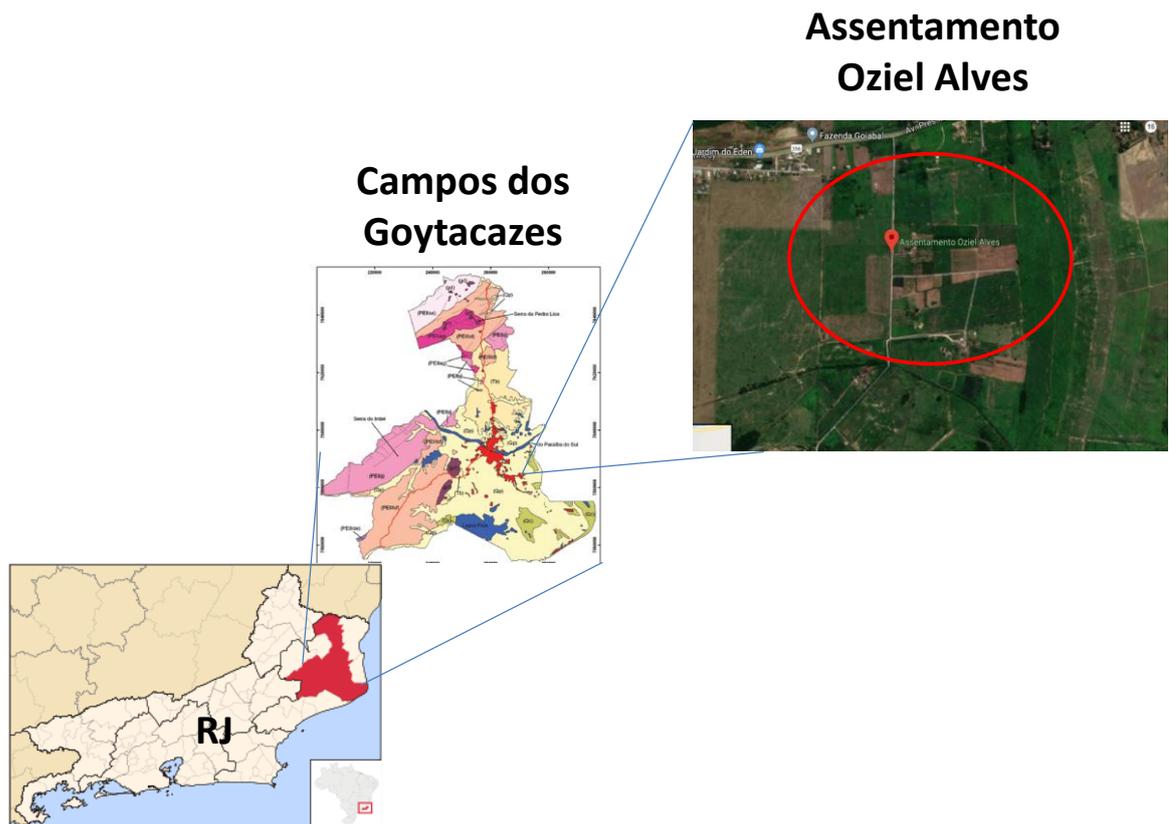
11. ENSAIO DE ÁGUA REAL NO DISCO E REATOR CPC

11.1 ASSENTAMENTO OZIEL ALVES

Os experimentos de desinfecção utilizaram a água coletadas em residências do assentamento Oziel Alves, que está localizado no Município de Campos dos

Goytacazes – RJ, situado na região da Baixada Campista. O assentamento apresenta uma área medida de 410,7336 hectares (Figura 71). Localiza-se a margem da Rodovia BR 356, sentido Campos dos Goytacazes – São João da Barra.

Figura 71 - Localização do Assentamento Oziel Alves



Fonte: Google Mapas (2018)

O Assentamento possui 34 famílias totalizando 151 pessoas, entre crianças, jovens e adultos. A população apresenta um baixo nível socioeconômico e de condições de saneamento precárias. A região não apresenta rede de coleta de lixo e esgoto. As casas são distribuídas em ambiente tipicamente rural e algumas delas foram construídas utilizando-se madeiras reaproveitadas, e outras, de alvenaria inacabada, todas sem condições adequadas de saneamento (Figura 72) (BARBOSA, 2008).

Figura 72 - Imagem do Assentamento Oziel Alves



Fonte: Próprio Autor

Barbosa (2008) realizando trabalhos sobre saneamento no local, observou que os principais problemas de saúde relatados por pessoas da comunidade estavam relacionados a sintomas como diarreia, dor de barriga, problema de pele e febre.

O assentamento é uma área rural que não tem acesso a água tratada pela concessionária Águas do Paraíba, portanto os moradores do assentamento realizam perfurações no solo de 3 a 7 metros de profundidade, e encontram água, os chamados “poços rasos” (Figura 73), e utilizam essa água para alimentação, higiene e limpeza. Verificou-se em todas as residências visitadas que a fonte de água utilizada são poços rasos.

Grande parte das residências tem criação de animais, que com suas fezes podem estar contaminando a água desses poços rasos. Além disso, se utilizam de sistemas de fossas (sumidouro) e valas para a eliminação do esgoto, que em muitos casos ficam próximos aos poços, podendo ser fonte contaminação.

Figura 73 - Fotos dos poços rasos localizados nas residências onde foram coletadas as amostras de água para análise



Fonte: Próprio Autor

11.2 COLETA E CARACTERIZAÇÃO DA ÁGUA

Foram coletados 10 litros de água em 8 residências diferentes, obtendo um total de 80 L de água para realização dos testes. A água foi coletada em frascos estéreis da torneira das residências visitadas. Uma amostra de 100 mL da água total foi coletada em um recipiente de 500 mL e foram realizados os testes de pH utilizando pHmetro Digimed modelo DM-23-DC e Turbidez medida no Turbidímetro MS Tecnopon modelo TB-1000P. A análise dos componentes químicos da água foi realizada no Laboratório de Análise e monitoramento de águas no Polo de Inovação

Campos dos Goytacazes do Instituto Federal Fluminense pelo Cromatógrafo de íons (Metrohm - Modelo: 883 Basic IC plus)

11.3 ENSAIOS DE ÁGUA DE POÇO RASO NO DISCO SOLAR

Um experimento de desinfecção de água foi realizado utilizando o Disco Solar com 40 Litros da água coletada no assentamento Oziel Alves no dia 13 de fevereiro de 2019. Os experimentos foram realizados entre as 10:30h e 13:30h do horário local. A radiação foi medida continuamente por um radiômetro (400–700 nm, Model PMA 22100, Solar Light Co) e a temperatura do reator foi anotada por um termopar digital Impac-TM 6902D.

A água foi bombeada para o Disco Solar e foram coletadas 100 mL de água antes (controle positivo) e 100 mL depois de passar pelo Disco quando a temperatura do reator era 40°C, 50°C, 60°C e 70°C. As amostras foram coletadas em frascos previamente autoclavados e encaminhadas ao laboratório LSA, Laboratório de Sanidade Animal para isolamento e identificação das bactérias

11.4 ENSAIOS DE ÁGUA DE POÇO RASO NO REATOR CPC

O experimento de desinfecção de água utilizando o reator CPC foi realizado com 40 Litros da água coletada no assentamento Oziel Alves no dia 14 de fevereiro de 2019. Os experimentos foram realizados entre as 10:00h e 14:00h do horário local. A radiação foi medida continuamente por um radiômetro UVA (300–400 nm, Model PMA 22100, Solar Light Co) localizado horizontalmente, que fornece dados em termos de irradiação incidente ($W.m^{-2}$) e a temperatura da água no reator foi monitorada por um termopar digital Impac-TM 6902D.

Foram coletadas 100 mL de amostra com 0, 60, 90, 120 e 180 minutos. As amostras foram coletadas em frascos previamente autoclavados e encaminhadas ao laboratório LSA, Laboratório de Sanidade Animal para isolamento e identificação das bactérias

11.5 ISOLAMENTO E IDENTIFICAÇÃO DAS BACTÉRIAS

Um volume de 10 mL da amostra de água foi colocado em 50 mL de meio *Lúria Bertani* (Caldo Nutritivo) e foi incubado a 37°C durante 18 horas em um *shaker* com agitação. Em seguida, a suspensão de bactéria foi então centrifugada em Tubo Falcon de 15 mL a 900 g por 10 minutos. O sobrenadante foi dispensado, o pellet foi ressuspenso com solução salina de tampão fosfato e o conteúdo foi transferido para placas de Petri com meio Ágar Sangue MBIolog, que é um meio de cultura de base rica. O meio de Ágar sangue fornece condições de crescimento para a maioria dos microrganismos. A conservação dos eritrócitos íntegros favorece a percepção da hemólise, úteis para a diferenciação de bactérias como os *Streptococcus spp.* Também foi transferido o conteúdo das bactérias para o meio Ágar MacConkey MBIolog, que é um meio seletivo para enterobactérias destinado à detecção, isolamento, contagem de coliformes e patógenos intestinais da água.

As placas foram incubadas por 24 horas a 37°C e após o crescimento foi realizado teste de coloração de Gram, para identificar se as bactérias eram Gram negativas ou Gram positivas. Todas as bactérias crescidas nas placas foram identificadas como Gram negativas.

As colônias diferentes foram separadas e colocadas para crescer em meio Ágar Müeller Hinton MBIolog, que é um meio de cultura recomendado para a realização de antibiograma (teste de sensibilidade). O meio Ágar Müeller Hinton possui uma substancial fonte de proteínas e carboidratos que proporcionam o desenvolvimento e crescimento de cepas bacterianas. Além disso, a baixa concentração de timina e timidina e níveis adequados de cálcio e magnésio, evitam falsos resultados de sensibilidade ou resistência.

As bactérias foram incubadas a 37°C por 24 horas em meio Ágar Müeller Hinton e após o período de incubação foram transferidas para identificação dos microrganismos no equipamento Vitek 2 (BAZZI et al., 2017; ROMERO-GÓMEZ et al., 2012). Diversos sistemas de identificação fenotípica automatizados estão disponíveis no mercado, como por exemplo, o sistema Vitek 2 (BioMérieux, São Paulo, Brasil). Com base no perfil bioquímico e atividade metabólica, esses sistemas

permitem identificar espécies de bactérias a partir de colônias puras com rapidez e acurácia. Esses equipamentos possuem um banco de dados de diferentes bactérias nos quais se baseiam para a identificação das colônias. O sistema Vitek 2 realiza 43 testes bioquímicos e um teste de controle negativo em um cartão, e a identificação de cada amostra demora em torno de oito (08) horas. O valor qualitativo, ou seja, o valor que se refere a probabilidade do resultado da identificação e que deve ser igual ao dos organismos padrões daquela espécie bacteriana, é calculado e reportado junto com o resultado final. Como foi verificado que as bactérias eram Gram negativas, foi utilizado o cartão tipo GN (Gram-negativa) 15F290E9.

11.4 RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DA ÁGUA FÍSICO-QUÍMICA DA ÁGUA

A água coletada apresentou pH 6,7 e turbidez de 3,6 NTU. A análise dos componentes químicos da água está demonstrada na Tabela 13.

Tabela 13 - Cátions e ânions presentes na água coletada no assentamento Oziel Alves

Componentes Químicos	Concentração mg. L⁻¹
Na ⁺	58,747
NH ₄ ⁺	4,291
K ⁺	9,002
Mg ²⁺	13,557
Ca ²⁺	27,525
F ⁻	0,532
Cl ⁻	57,157
NO ₂ ⁻	0,413
NO ₃ ⁻	1,662
SO ₄ ²⁻	20,546

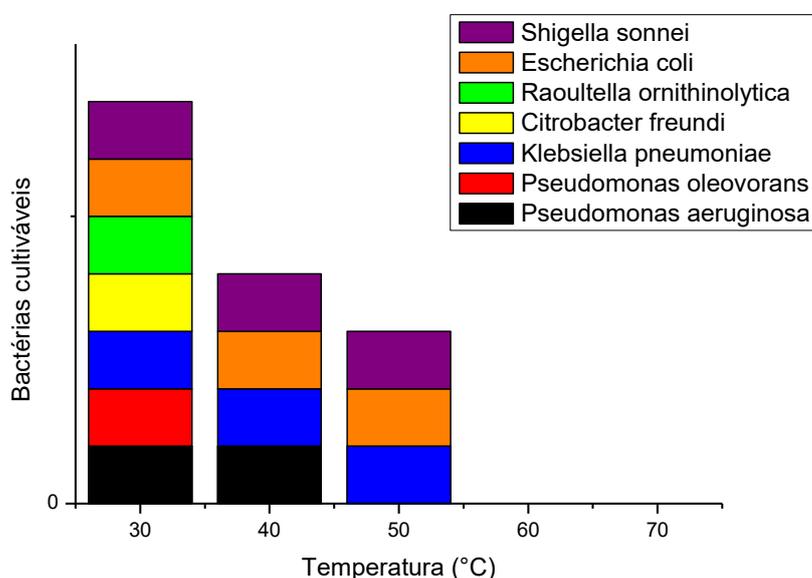
Fonte: Próprio Autor

11.5 RESULTADOS DE DESINFECÇÃO SOLAR UTILIZANDO ÁGUA REAL

A amostra inicial da água coletada no assentamento Oziel Alves revelou 6 bactérias distintas cultiváveis. Os resultados obtidos foram de 94% de probabilidade para *Raoultella ornithinolytica*, 93% para *Escherichia.coli*, 99% para *Shigella sonnei*, 98% de probabilidade para *Klebsiella pneumoniae*, 89% para *Citrobacter freundii*, 94% para *Pseudomonas aeruginosa* e 97% para *Pseudomonas oleovorans* .

Os resultados de desinfecção dos microrganismos encontrados ao passar a água pelo Disco Solar com radiação média de 130 W.m^{-2} e amostras coletadas a 40°C , 50°C , 60°C e 70°C são demonstrados na Figura 74.

Figura 74 - Resultados de desinfecção solar no Disco Solar com água coletada no assentamento Oziel Alvez no dia 13 de fevereiro de 2019

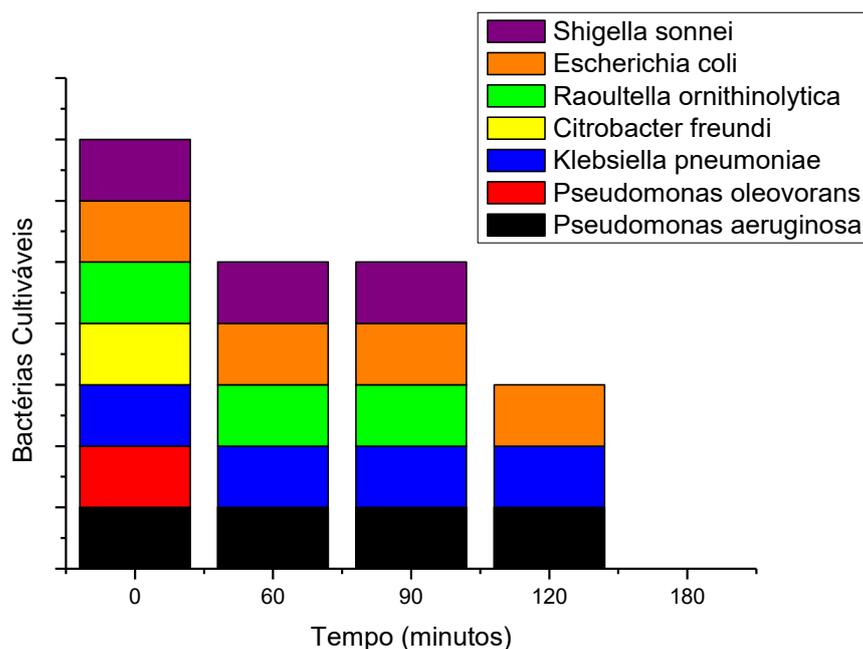


Fonte: Próprio Autor

Os resultados demonstraram que a temperatura de 60°C e 70°C não houve crescimento de nenhuma unidade formadora de colônia nas placas de cultivo. A amostra de 60°C e 70°C foram inoculadas também com 24 e 48 horas após o tratamento e não houve constatação de crescimento de nenhuma bactéria, comprovando que o tratamento foi efetivo para estas temperaturas no Disco Solar.

O teste de desinfecção desta água natural foi testada no Reator CPC, utilizando como principal fator de desinfecção a ação da radiação UVA com média de 18 W.m^{-2} . Os resultados qualitativos das bactérias encontradas em função do tempo de exposição são demonstrados na Figura 75.

Figura 75 - Resultados de desinfecção solar no Reator CPC com água coletada no assentamento Oziel Alvez no dia 14 de fevereiro de 2019



Fonte: Próprio Autor

Os resultados mostram que com 120 minutos de tratamento no Reator CPC, ainda restavam 50% das espécies de bactérias encontradas no início do tratamento, e apenas com 180 minutos, a temperatura de $37 \text{ }^\circ\text{C}$, a água foi desinfetada em um nível que não foi mais possível detectar por meios cultiváveis.

Também foi feito o teste de cultivo com a amostra de 180 minutos com 24 e 48 horas após o tratamento e não houve constatação de crescimento de nenhuma bactéria. Com esses experimentos pode-se dizer que o Disco Solar é capaz de promover a desinfecção da água do assentamento Oziel Alvez a um fluxo contínuo com uma temperatura de 60°C de forma segura. No caso do Reator CPC, 40 litros de água em 3 horas de exposição ao sol com a média de radiação UVA local de 20 W.m^{-2} podem ser gerados em um sistema estático.

12. COMPARAÇÃO DE EFICIÊNCIA DO SISTEMA DE DESINFECÇÃO SOLAR (SODIS) E PASTEURIZAÇÃO SOLAR (SOPAS).

Os sistemas de desinfecção solar (SODIS) e de pasteurização solar (SOPAS) são considerados métodos de tratamento eficientes e econômicos. A turbidez da água é um fator que pode diferenciar a escolha entre os dois tipos de tratamento, já que a turbidez alta da água pode diminuir a eficiência do sistema SODIS significativamente, devido à dependência dos sistemas de penetração direta de radiação UVA (CASTRO-ALFÉREZ et al., 2017). A água coletada no assentamento Oziel Alves apresentou uma turbidez baixa de 3,6 NTU, que não é suficiente para prejudicar a eficiência do sistema de desinfecção, portanto este parâmetro não pode ser considerado um fator de comparação de eficiência neste caso.

Pode-se dizer que o sistema SODIS apresentado neste trabalho é mais fácil de implementar do que o sistema SOPAS, já que é um sistema simples que necessita de menos capacidade técnica e menor manutenção inicial. Por outro lado, a produtividade de água suficientemente segura pode ser menor para SODIS, do que para SOPAS, já que o sistema SOPAS considerado neste caso é um sistema de fluxo contínuo.

A eficiência de ambas as técnicas estão totalmente condicionadas as condições climáticas do local onde irão ser implementadas. Ambos os sistemas diminuem a eficiência com condições climáticas nebulosas. Segundo o INMET em Campos dos Goytacazes, a estação quente permanece de 2 a 7 meses no ano com temperatura máxima média diária acima de 31 °C. A época menos encoberta por nuvens do ano em Campos dos Goytacazes começa por volta de 5 de abril e dura em torno de 7 meses, terminando por volta de novembro. A estação de seca dura também em torno de 7 meses começando em 2 de abril. A duração do dia em Campos dos Goytacazes varia ao longo do ano. Estima-se que em 2019, o dia mais curto será 21 de junho, com 10 horas e 48 minutos de luz solar. O dia mais longo será 22 de dezembro, com 13 horas e 28 minutos de luz solar. Todas essas

variáveis são extremamente favoráveis a implementação do sistema de desinfecção solar nesta região.

O custo dos sistemas está ligado ao custo do material de construção dos equipamentos de desinfecção, que devem ser materiais baratos e robustos, a mão de obra de montagem e instalação e a quantidade de água segura gerada pelo sistema, já que para comparar os sistemas dever-se-ia comparar o preço gasto pelo sistema pela quantidade de água segura gerada pelo sistema (R\$/L). Considerando o custo do Disco Solar (R\$ 20.000,00) e o Custo do Reator CPC (R\$ 9.733,00) e como o Reator CPC leva 3 horas para realizar a desinfecção de 40 litros da água coletada no assentamento, e neste tempo o Disco Solar que produz 180 litros a um fluxo de $1 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, o custo do Disco Solar em (R\$/L) seria de R\$ 111,11 por litro e o custo do reator CPC seria de R\$ 243,32 por litro. Esses números mostram que embora o custo total do Disco Solar seja maior, o custo em função da sua produção é menor com relação ao CPC. Estes cálculos não consideram redução de preço devido a ampliação de escala e manutenção.

De acordo com a Organização Mundial da Saúde a quantidade mínima de água por pessoa, por dia, para beber em áreas remotas é de 2 litros, ou seja, uma pequena comunidade de 151 pessoas, como a contemplada neste trabalho no assentamento Oziel Alves, necessita de 302 litros de água por dia. Nos resultados apresentados neste trabalho, o Disco Solar produziu 315 litros de água em 5 horas de trabalho, acima dos 60°C , conseguindo atender a necessidade da comunidade. Para o sistema SODIS, seriam necessários 8 reatores com o mesmo volume, totalizando 320 litros de água em 3 horas de desinfecção, ou 2 bateladas de 3 horas com 4 reatores operando por vez para atingir a necessidade da comunidade.

Embora o Disco Solar parece ser a melhor escolha, ele é muito menos robusto, necessitando de uma instalação mais complexa, fixação e manutenção. As condições climáticas em Campos dos Goytacazes também contribuem negativamente para o disco solar, pois ventos fortes de agosto a outubro (podem chegar a 100 km/h) e umidade relativa associada ao calor já provocaram duas quedas do disco, assim como corrosões nos espelhos. Estes fatores não foram observados em um disco similar instalado por dois anos em Madrid (Espanha), onde

os espelhos primários sem nenhuma proteção estiveram expostos a intempérie e permaneceram inalterados. Os espelhos do disco solar instalado no Brasil, após proteção podem aguentar no máximo 18 meses.

A utilização dos dois sistemas em conjunto pode ser viável e aumentar a produtividade, temperaturas mais altas na água fazem com que o sistema SODIS aumente sua eficiência como demonstrado neste trabalho. Poderia ser usado um sistema SOPAS mais simplificado para aquecimento da água inicialmente a temperaturas maiores que 50°C e depois em sequência o sistema SODIS. Como observado neste trabalho, processos de isolamento e efeito estufa nos reatores SODIS também podem contribuir para aumentar a produtividade de água segura. Ainda não há resultados na literatura que apontam se isso é ou não viável e quais resultados poderiam ser obtidos deste sistema híbrido e quais seriam as eficiências de produtividade diária de água potável. Sendo assim, perspectivas futuras utilizando sistemas híbridos em diferentes estações do ano poderiam auxiliar na instalação destes sistemas em comunidades sem acesso a água tratada.

13. CONCLUSÕES

Neste trabalho, a busca por sistemas de desinfecção de águas não tratadas mostrou que os sistemas de concentração de calor (SOPAS) e radiação (SODIS) através da radiação solar podem ser muito eficientes para solucionar problemas de escassez de água potável em pequenas comunidades. O protótipo final do disco solar se mostrou capaz de atuar no processo de desinfecção de água de maneira eficiente, sendo capaz de promover a desinfecção de água com *E.coli* a concentrações iniciais de 10^6 UFC.mL⁻¹ em fluxo contínuo, alcançando uma temperatura de 60°C. Na condições testadas em Campos dos Goytacazes, com média de radiação de 160 W.m⁻² pode-se trabalhar por 5 horas gerando água com temperaturas acima da 60°C, produzindo 315 litros por dia. Os resultados também mostraram que a produção é dependente da radiação e vazão da água. Porém, neste trabalho observou-se que eram necessários muitos ajustes para que o disco funcionasse bem, partindo do primeiro protótipo. Portanto, a grande desvantagem do

disco solar está em sua falta de robustez para as condições climáticas oferecidas em zonas com muito vento e/ou com muita umidade. A questão do vento se resolve com uma fixação mais forte para que não ocorra quedas, porém os pequenos espelhos primários podem ter seu foco mudado e a umidade também os prejudica, necessitando de maior manutenção. Para chegar ao sistema final, o disco levou 3 anos de trabalho com a ajuda do Dr. Benigno Sanchez que com uma bolsa de pesquisador visitante especial da CAPES, pode sanar os problemas de fixação, intempéries e de isolamento do reator.

Com relação ao CPC construído no Brasil, usando 6 tubos de Borossilicato, com volume final de 40 litros e $2,12 \text{ m}^2$ de área receptiva, foi possível tratar *E.coli* em 3 horas com radiação UVA média de 20 W.m^{-2} e temperatura de 37°C . Utilizando um sistema adaptado para aumentar a temperatura da água, com tampa transparente e isolante térmico, a temperatura da água alcançou 44°C e o tempo de desinfecção diminuiu para 1 hora, otimizando o sistema de desinfecção do reator. Observou-se que este sistema, embora tenha menor produtividade diária de água, pode ser otimizado com um maior isolamento e, portanto, efeito sinérgico de temperatura e radiação.

Para provar a necessidade de desinfecção da água consumida em ambientes rurais e a eficiência real dos sistemas propostos neste trabalho, uma água natural contaminada proveniente de poços rasos do assentamento Oziel Alves foi avaliada. Nesta água foram detectadas 7 espécies de bactérias diferentes. As 7 espécies são coliformes Gran negativos encontrados no trato intestinal de animais que promovem doenças graves para os adultos e crianças. A água com estas bactérias foi testada nos dois sistemas de desinfecção e comparadas. Conclui-se que o Disco Solar pode atender as necessidades de suprimento de água segura destas comunidades, desde que o dia tenha condições ambientais favoráveis, com 5 horas de funcionamento. Com os reatores CPC são necessárias duas bateladas por dia de 3 horas para atender a mesma demanda, se são usados 4 reatores.

Nos estudos realizados na Espanha pode-se observar que os testes com amostras reais podem ser mais complexos se consideramos que íons presentes nestas águas podem influenciar a resistência bacteriana ao aquecimento e portanto,

testes com composição natural da água e diferentes microrganismos que podem estar presentes nestas águas é a garantia de que um sistema é eficiente ou não para fornecer uma água segura a população.

Finalmente, este trabalho conseguiu propor alternativas sustentáveis de desinfecção de águas contaminadas com microrganismos patogênicos utilizados em pequenas comunidades. A adaptação destes sistemas nestas comunidades podem ser feitos para melhorar a saúde pública destes ambientes, principalmente quando as amostras de água de poços rasos tenham como fator principal de poluição a contaminação microbiológica.

REFERENCIAS

ABBAS, R. et al. Solar radiation concentration features in Linear Fresnel Reflector arrays. **Energy Conversion and Management**, v. 54, n. 1, p. 133–144, 2012.

ABELEDOLAMEIRO, M. J. et al. Photocatalytic inactivation of the waterborne protozoan parasite *Cryptosporidium parvum* using TiO₂/H₂O₂ under simulated and natural solar conditions. **Catalysis Today**, v. 280, p. 132–138, 2017.

ABRAHAM, J. P.; PLOURDE, B. D.; MINKOWYCZ, W. J. Continuous flow solar thermal pasteurization of drinking water: Methods, devices, microbiology, and analysis. **Renewable Energy**, v. 81, p. 795–803, 2015.

ACRA, A. et al. Disinfection of Oral Rehydration Solutions By Sunlight. **The Lancet**, v. 316, n. 8206, p. 1257–1258, 1980.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Atlas de Esgotos: Despoluição de Bacias Hidrográficas**, 2018.

ALFÉREZ, María Castro. **Modelado cinético de la inactivación de escherichia coli en agua mediante radiación solar y aplicaciones de sodis. (kinetic modelling of the escherichia coli inactivation in water by solar radiation: applications to sodis)**. 2017. Tese de Doutorado. Universidad de Almería.

AMARA, S. et al. Legionella disinfection by solar concentrator system. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 70, n. February 2015, p. 786–792, 2017.

AMIN, M. T.; HAN, M. Y. Roof-harvested rainwater for potable purposes: Application of solar collector disinfection (SOCO-DIS). **Water Research**, v. 43, n. 20, p. 5225–5235, 2009.

AMSBERRY, A. et al. Simple continuous- flow device for combined solar thermal pasteurisation and solar disinfection for water sterilisation. p. 1–7, 2012.

BAIRD, C. E CANN, M. **Química Ambiental**. 4^a ed. Porto Alegre: Bookman, 2011.

BARBOSA, L. D. C. L. **Avaliação dos conceitos e percepções sobre o problema água na comunidade do assentamento Oziel Alves – Campos dos Goytacazes – RIO DE JANEIRO**. UENF, 2008.

BARREIROS, A. L. B. S.; DAVID, J. M.; DAVID, J. P. Estresse oxidativo: Relação entre geração de espécies reativas e defesa do organismo. **Química Nova**, v. 29, n. 1, p. 113–123, 2006.

BARTESAGHI, S.; RADI, R. Fundamentals on the biochemistry of peroxyxynitrite and protein tyrosine nitration. **Redox Biology**, v. 14, n. August 2017, p. 618–625, 2018.

BAZZI, A. M. et al. Direct identification and susceptibility testing of positive blood cultures using high speed cold centrifugation and Vitek II system. **Journal of Infection and Public Health**, v. 10, n. 3, p. 299–307, 2017.

BESARATINIA, A. et al. DNA lesions induced by UV A1 and B radiation in human cells : Comparative analyses in the overall genome and in the p53 tumor suppressor gene. 2005.

BIGONI, R. et al. Solar water disinfection by a Parabolic Trough Concentrator (PTC): Flow-cytometric analysis of bacterial inactivation. **Journal of Cleaner Production**, v. 67, p. 62–71, 2014.

BLANCO GÁLVEZ, J. **Desarrollo de colectores solares sin concentración para aplicaciones fotoquímicas de degradación de contaminantes persistentes en agua**. Universidad de Almeria, 2002.

BOSSHARD, Franziska et al. The respiratory chain is the cell's Achilles' heel during UVA inactivation in Escherichia coli. **Microbiology**, v. 156, n. 7, p. 2006-2015, 2010.

BRASIL. Diagnóstico dos serviços de água e esgotos - 2014. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento -SNIS**, v. 20, p. 212, 2016.

CALAMITA, G. et al. Regulation of the Escherichia coli water channel gene aqpZ. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 95, n. March, p. 3627–3631, 1998.

CAMPISANO, A. et al. Urban rainwater harvesting systems: research, implementation and future perspectives. **Water Research**, 2017.

CANTEMIR, A. R. et al. **Kinetics of thermal inactivation of catalase in the presence of additives**. Elsevier Ltd, 2013. v. 48

CARIELO DA SILVA, G.; TIBA, C.; CALAZANS, G. M. T. Solar pasteurizer for the microbiological decontamination of water. **Renewable Energy**, v. 87, p. 711–719, 2016.

CARIELO, G. et al. Solar water pasteurizer: Productivity and treatment efficiency in microbial decontamination. **Renewable Energy**, v. 105, p. 257–269, 2017.

CASTRO-ALFÉREZ, M. et al. Mechanistic model of the Escherichia coli inactivation by solar disinfection based on the photo-generation of internal ROS and the photo-inactivation of enzymes: CAT and SOD. **Chemical Engineering Journal**, 2016.

CASTRO-ALFÉREZ, M. et al. Mechanistic modeling of UV and mild-heat synergistic effect on solar water disinfection. **Chemical Engineering Journal**, 2017.

CASTRO-ALFÉREZ, M. et al. Validation of a solar-thermal water disinfection model for Escherichia coli inactivation in pilot scale solar reactors and real conditions. **Chemical Engineering Journal**, v. 331, n. July 2017, p. 831–840, 2018.

CASTRO-ALFÉREZ, M.; POLO-LÓPEZ, M. I.; FERNÁNDEZ-IBÁÑEZ, P. Intracellular mechanisms of solar water disinfection. **Scientific Reports**, v. 6, n. 1, p. 38145, 2016.

CEBRI, G.; CONDÓN, S.; MAÑAS, P. Physiology of the Inactivation of Vegetative Bacteria by Thermal Treatments: Mode of Action, Influence of Environmental Factors and Inactivation Kinetics. **Foods**, v. 6, n. 107, p. 1–21, 2017.

CHALMERS, R. M. et al. Long-term Cryptosporidium typing reveals the aetiology and species-specific epidemiology of human cryptosporidiosis in England and Wales, 2000 to 2003. **Eurosurveillance**, v. 14, n. 2, p. 19086, 2009.

CRUZ Y BOMANT, S. L. **Disco colector de radiación solar, concentrador de múltiples haces independientes de rayos reflejados especularmente sobre un plano receptor fijo**, 2013. Disponível em: <<http://www.google.st/patents/WO2011076963A1?cl=es&hl=pt-BR>>. Acesso em: 6 fev. 2018

DAVIES, M. J. Singlet oxygen-mediated damage to proteins and its consequences. v. 305, p. 761–770, 2003.

DOBROWSKY, P. H. et al. Efficiency of a closed-coupled solar pasteurization system in treating roof harvested rainwater. **Science of the Total Environment**, v. 536, p. 206–214, 2015.

DOMINGOS, M. et al. A new automated solar disc for water disinfection by pasteurization. **Photochemical and Photobiological Sciences**, v. 18, n. 4, p. 905–911, 2019.

DOWNES, A.; BLUNT, T. P. Researches on the Effect of Light upon Bacteria and other Organisms. **Proceedings of the Royal Society of London**, v. 26, n. 179–184, p. 488–500, 1877.

EAWAG/SANDEC. **Desinfecção solar da água: guia de aplicação do SODIS**, 2002.

FANNING, J. C. The chemical reduction of nitrate in aqueous solution. v. 199, p. 159–179, 2000.

FELBAB-BROWN, V. WATER THEFT AND WATER SMUGGLING: GROWING PROBLEM OR TEMPEST IN A TEAPOT? n. March, 2017.

FERNÁNDEZ-IBÁÑEZ, P. et al. Solar photocatalytic disinfection of water using titanium dioxide graphene composites. **Chemical Engineering Journal**, v. 261, p. 36–44, 2015.

FRICKER, E. J.; ILLINGWORTH, K. S.; FRICKER, C. R. Use of two formulations of Colilert and QuantiTrayTM for assessment of the bacteriological quality of water. **Water Research**, v. 31, n. 10, p. 2495–2499, 1 out. 1997.

GHIMICI, L.; NICHIFOR, M. Flocculation characteristics of a biodegradable polymer based on dextran. **Separation and Purification Technology**, v. 194, n. November, p. 48–55, 2018.

GIANNAKIS, S. et al. The antagonistic and synergistic effects of temperature during solar disinfection of synthetic secondary effluent. **Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry**, v. 280, p. 14–26, 2014.

GIANNAKIS, S. et al. Solar disinfection is an augmentable, in situ-generated photo-Fenton reaction-Part 2: A review of the applications for drinking water and wastewater disinfection. **Applied Catalysis B: Environmental**, v. 198, p. 431–446, 2016a.

GIANNAKIS, S. et al. Solar disinfection is an augmentable, in situ-generated photo-Fenton reaction—Part 1: A review of the mechanisms and the fundamental aspects of the process. **Applied Catalysis B: Environmental**, v. 199, p. 199–223, 2016b.

GIANNAKIS, S. et al. Wastewater and urine treatment by UVC-based advanced oxidation processes: Implications from the interactions of bacteria, viruses, and chemical contaminants. **Chemical Engineering Journal**, v. 343, n. October 2017, p. 270–282, 2018a.

GIANNAKIS, S. et al. Solar light and the photo-Fenton process against antibiotic resistant bacteria in wastewater: A kinetic study with a Streptomycin-resistant strain. **Catalysis Today**, v. 313, n. July, p. 86–93, 2018b.

GIANNAKIS, S. et al. Bacterial disinfection by the photo-Fenton process: Extracellular oxidation or intracellular photo-catalysis? **Applied Catalysis B: Environmental**, v. 227, n. January, p. 285–295, 2018c.

GÓMEZ-COUSO, H. et al. Comparison of different solar reactors for household disinfection of drinking water in developing countries: Evaluation of their efficacy in relation to the waterborne enteropathogen *Cryptosporidium parvum*. **Transactions of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene**, v. 106, n. 11, p. 645–652, 2012.

GOODSELL, David S. The molecular perspective: ultraviolet light and pyrimidine dimers. **The oncologist**, v. 6, n. 3, p. 298-299, 2001.

GRAHAM, N. Guidelines for Drinking-Water Quality, 2nd edition, Addendum to Volume 1 – Recommendations, World Health Organisation, Geneva, 1998, 36 pages. **Urban Water**, v. 1, n. 2, p. 183, 1999.

GREGHI, Simone de Queiróz. **Avaliação da eficiência de métodos rápidos usados para detecção de coliforme totais e coliforme fecais em amostras de água, em comparação com a técnica de fermentação em tubos múltiplos.**p.104. Unesp, 2005.

HEDÉN, Carl-Göran; WYCKOFF, Ralph WG. The electron microscopy of heated bacteria. **Journal of bacteriology**, v. 58, n. 2, p. 153, 1949.

HELALI, S. et al. Solar photocatalysis: A green technology for E. coli contaminated water disinfection. Effect of concentration and different types of suspended catalyst. **Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry**, v. 276, p. 31–40, 2013.

HELMREICH, B.; HORN, H. Opportunities in rainwater harvesting. **Desalination**, v. 248, n. 1-3, p. 118-124, 2009.

HUANG, L. et al. Removal of ammonia by OH radical in aqueous phase. **Environmental Science and Technology**, v. 42, n. 21, p. 8070–8075, 2008.

HUNTER, P. R. Drinking water and diarrhoeal disease due to Escherichia coli. **Journal of Water and Health**, v. 1, n. 2, p. 65–72, 2003.

JOHNSON, Timothy J. et al. The genome sequence of avian pathogenic Escherichia coli strain O1: K1: H7 shares strong similarities with human extraintestinal pathogenic E. coli genomes. **Journal of bacteriology**, v. 189, n. 8, p. 3228-3236, 2007.

JOYCE, T. M. et al. Inactivation of fecal bacteria in drinking water by solar heating . These include : Inactivation of Fecal Bacteria in Drinking Water by Solar Heating. **Applied And Enviromental Microbiology**, v. 62, n. 2, p. 399–402, 1996.

KALOGIROU, S. A.; KALOGIROU, S. A. Solar Energy Collectors. **Solar Energy Engineering**, p. 125–220, 1 jan. 2014.

KEANE, D. A. et al. Catalysis Science & Technology Solar photocatalysis for water disinfection : 2014.

KELLAND, L. R.; MOSS, S. H.; DAVIES, D. J. G. RECOVERY OF Escherichia coli K-12 FROM NEAR-ULTRAVIOLET RADIATION-INDUCED MEMBRANE DAMAGE. **Photochemistry and Photobiology**, v. 37, n. 6, p. 617–622, 1983.

KERR, M. et al. Survival of Escherichia coli O157: H7 in bottled natural mineral water. **Journal of applied microbiology**, v. 87, n. 6, p. 833-841, 1999.

KIEHL, Jeffrey T.; TRENBERTH, Kevin E. Earth's annual global mean energy budget. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 78, n. 2, p. 197-208, 1997.

KING BJ, MONIS PT. Critical processes affecting Cryptosporidium oocyst survival in the environment. **Parasitology** p.134, 2017.

KORSHUNOV, Sergei; IMLAY, James A. Detection and quantification of superoxide formed within the periplasm of Escherichia coli. **Journal of Bacteriology**, v. 188, n. 17, p. 6326-6334, 2006.

KÜHN, K. P. et al. Disinfection of surfaces by photocatalytic oxidation with titanium dioxide and UVA light. **Chemosphere**, v. 53, n. 1, p. 71–77, 2003.

LEE, J.; KALETUNÇ, G. Evaluation of the Heat Inactivation of Escherichia coli and

Lactobacillus plantarum by Differential Scanning Calorimetry. **Applied And Enviromental Microbiology**, v. 68, n. 11, p. 5379–5386, 2002.

LEONG, J. Y. C. et al. Prospects of hybrid rainwater-greywater decentralised system for water recycling and reuse: A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 142, p. 3014–3027, 2017.

LIGHT, U.; DIMERS, P. Oncologist The Molecular Perspective : Ultraviolet Light and Pyrimidine Dimers. p. 298–299, 2001.

MACKEY, B. M. et al. Thermal denaturation of whole cells and cell components of Escherichia coli examined by differential scanning calorimetry. **Journal of General Microbiology**, v. 137, n. 10, p. 2361–2374, 1 out. 1991.

MADIGAN, M.; MARTINKO, J.; BENDER, K. **Microbiologia de Brock**. 2016.

MALATO, S. et al. Photocatalytic decontamination and disinfection of water with solar collectors. **Catalysis Today**, v. 122, n. 1–2, p. 137–149, 2007.

MALATO, S. et al. Decontamination and disinfection of water by solar photocatalysis: Recent overview and trends. **Catalysis Today**, v. 147, n. 1, p. 1–59, 2009.

MALATO, S. et al. Decontamination and disinfection of water by solar photocatalysis: The pilot plants of the Plataforma Solar de Almeria. **Materials Science in Semiconductor Processing**, v. 42, p. 15–23, 2016.

MANFRIDA, G.; PETELA, K.; ROSSI, F. Natural circulation solar thermal system for water disinfection. **Energy**, v. 141, p. 1204–1214, 2017.

MARTÍN-DOMÍNGUEZ, A. et al. Efficiency in the disinfection of water for human consumption in rural communities using solar radiation. **Solar Energy**, v. 78, n. 1, p. 31–40, 2005.

MCCORD, J. M.; FRIDOVICH, I. Superoxide Dismutase An Enzymic Function For Erythrocuprein. **The Journal of Biological Chemistry**, v. 244, n. 22, p. 49–55, 1969.

MCGUIGAN, K. G. et al. Solar disinfection of drinking water contained in transparent plastic bottles : characterizing the bacterial inactivation process. p. 1138–1148, 1998.

MCGUIGAN, K. G. et al. **Solar water disinfection (SODIS): A review from bench-top to roof-top** **Journal of Hazardous Materials**, 2012.

MESSNER, K. R.; IMLAY, J. A. The Identification of Primary Sites of Superoxide and Hydrogen Peroxide Formation in the Aerobic Respiratory Chain and Sulfite Reductase Complex of Escherichia coli *. v. 274, n. 15, p. 10119–10128, 1999.

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

MITTELSTAEDT, Simone; CARVALHO, Vania Maria de. *Escherichia coli*

enterohemorrágica (EHEC) O157: H7-revisão. *J. Health Sci. Inst.*, v. 24, n. 3, 2006.

NAHIM-GRANADOS, S.; SÁNCHEZ PÉREZ, J. A.; POLO-LOPEZ, M. I. Effective solar processes in fresh-cut wastewater disinfection: Inactivation of pathogenic *E. coli* O157:H7 and *Salmonella enteritidis*. **Catalysis Today**, n. October, p. 0–1, 2017.

NDOUNLA, J. et al. Applied Catalysis B: Environmental Relevant impact of irradiance (vs . dose) and evolution of pH and mineral nitrogen compounds during natural water disinfection by photo-Fenton in a solar CPC reactor &. v. 149, p. 144–153, 2014.

NIE, X. et al. Genotoxicity of drinking water treated with different disinfectants and effects of disinfection conditions detected by umu-test. **JES**, p. 1–9, 2016.

OLIVEIRA, G.; SCAZUFCA, P.; AROUCA, L. F. A. F. Ranking do Saneamento - Instituto Trata Brasil. p. 86, 2012.

ORTEGA-GÓMEZ, E. et al. Inactivation of natural enteric bacteria in real municipal wastewater by solar photo-Fenton at neutral pH. **Water Research**, v. 63, p. 316–324, 2014.

PELLON, J. R.; ULMER, K. M.; GOMEZ, R. F. **Heat Damage to the Folded Chromosome of Escherichia coli K-12** **APPLIED AND ENVIRONMENTAL MICROBIOLOGY**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<http://aem.asm.org/>>. Acesso em: 25 fev. 2019.

PEREIRA, E. B. et al. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. São José dos Campos: INPE, 2006. Disponível em: <http://ftp.cptec.inpe.br/labren/publ/livros/brazil_solar_atlas_R1.pdf%5Cnhttp://sonda.ccst.inpe.br/publicacoes/atlas_solar.html>.

PÉREZ, J. A. S.; PULGARÍN, C. Applied Catalysis B: Environmental Principal parameters affecting virus inactivation by the solar photo-Fenton process at neutral pH and M concentrations of H₂O₂. v. 175, p. 395–402, 2015.

PETIT, P. et al. Toroidal versus poloidal magnetic fields in Sun-like stars: a rotation threshold. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 388, n. 1, p. 80–88, 2008.

PLAKAS, K. V. et al. Removal of organic micropollutants from drinking water by a novel electro-Fenton filter: Pilot-scale studies. **Water Research**, v. 91, p. 183–194, 2016.

POLO-LÓPEZ, M. I. et al. Elimination of water pathogens with solar radiation using an automated sequential batch CPC reactor. **Journal of Hazardous Materials**, v. 196, p. 16–21, 2011.

PORTAL, T. P. et al. An integrated assessment of water quality in a land reform settlement in northern Rio de Janeiro state, Brazil. **Heliyon**, v. 5, n. 3, p. e01295, 2019.

POULLIKKAS, A.; HADJIPASCHALIS, I.; KOURTIS, G. A comparative overview of wet and dry cooling systems for Rankine cycle A comparative overview of wet and dry cooling systems for Rankine cycle based CSP plants. **Trends in Heat & Mass Transfer**, v. 13, n. May, p. 27–50, 2013.

POURZAND, C. et al. Ultraviolet A radiation induces immediate release of iron in human primary skin fibroblasts : The role of ferritin. **Cell Biology**, v. 96, n. June, p. 6751–6756, 1999.

RADI, R. Peroxynitrite, a stealthy biological oxidant. **Journal of Biological Chemistry**, v. 288, n. 37, p. 26464–26472, 2013.

RAMALINGAM, K.; INDULKAR, C. **Solar Energy and Photovoltaic Technology**. [s.l.] Elsevier Inc., 2017.

RAMÍREZ-QUIRÓS, F. Desinfección del agua con cloro y cloraminas. **Tecnica Industrial**, p. 55–63, 2005.

RAPOSO. **Produtos | Água Mineral Raposo**. Disponível em: <<http://aguaraposo.com.br/produtos/>>. Acesso em: 16 abr. 2019.

RAZZOLINI, M. T. P. et al. Giardia and Cryptosporidium infection risk by simultaneous exposure to drinking water. **Microbial Risk Analysis**, v. 4, p. 1–6, 2016.

REYNEKE, B. et al. EMA-qPCR to monitor the efficiency of a closed-coupled solar pasteurization system in reducing Legionella contamination of roof-harvested rainwater. **Science of the Total Environment**, v. 553, p. 662–670, 2016.

REYNEKE, B. Application of Solar Pasteurization for the Treatment of Harvested Rainwater. n. March, p. 1–219, 2017.

REYNEKE, B. et al. Rainwater harvesting solar pasteurization treatment systems for the provision of an alternative water source in peri-urban informal settlements. **Environmental Science: Water Research & Technology**, v. 4, n. 2, p. 291–302, 2018.

RINCÓN, A. G.; PULGARIN, C. Photocatalytical inactivation of E. coli: Effect of (continuous-intermittent) light intensity and of (suspended-fixed) TiO₂ concentration. **Applied Catalysis B: Environmental**, v. 44, n. 3, p. 263–284, 2003.

RODRIGUES, Danielle Gonçalves. **Desinfecção da água por pasteurização solar (SOPAS) em comunidades rurais**. 100p. Unicamp, 2011.

RODRIGUES, Danielle Gonçalves et al. **Sistema alternativo para desinfecção da água por pasteurização solar para pequenas comunidades**. Unicamp, 2018.

RODRÍGUEZ GÓMEZ, J. et al. A irradiância solar: conceitos básicos Solar Irradiance: basic concepts. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 40, p. 3312, 2018.

ROMERO-GÓMEZ, M. P. et al. Identification and susceptibility testing of microorganism by direct inoculation from positive blood culture bottles by combining MALDI-TOF and Vitek-2 Compact is rapid and effective. **Journal of Infection**, v. 65, n. 6, p. 513–520, 2012.

ROBERS, D.; MÉTRIS, A. Data for the qualitative modeling of the osmotic stress response to NaCl in *Escherichia coli*. **Data in brief**, v. 9, p. 606–612, 2016.

ROSA et al., Qualidade microbiológica de água de poços provenientes de áreas urbanas e rurais de Campos dos Goytacazes. **XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas**. 11p, 2004.

ROSA, G.; MILLER, L.; CLASEN, T. Microbiological Effectiveness of Disinfecting Water by Boiling in Rural Guatemala. v. 82, n. 3, p. 473–477, 2010.

ROSE, A. Solar disinfection of water for diarrhoeal prevention in southern India. **Archives of Disease in Childhood**, v. 91, n. 2, p. 139–141, 2005.

SAITOH, T. S.; EL-GHETANY, H. H. A pilot solar water disinfecting system: Performance analysis and testing. **Solar Energy**, v. 72, n. 3, p. 261–269, 2002.

SANTOS, Ana L. et al. Wavelength dependence of biological damage induced by UV radiation on bacteria. **Archives of microbiology**, v. 195, n. 1, p. 63-74, 2013.

SATTLER, C. et al. A comparison of prototype compound parabolic collector – reactors (CPC) on the road to SOLARDETOX technology. n. November, p. 271–278, 2018.

SCIACCA, F. et al. Dramatic enhancement of solar disinfection (SODIS) of wild *Salmonella* sp. in PET bottles by H₂O₂ addition on natural water of Burkina Faso containing dissolved iron. **Chemosphere**, v. 78, n. 9, p. 1186–1191, 2010.

SHERCHAN, S. et al. Near Real-Time Detection of *E. coli* in Reclaimed Water. **Sensors**, v. 18, n. 7, p. 2303, 2018.

SICHEL, C. et al. Effects of experimental conditions on *E. coli* survival during solar photocatalytic water disinfection. **Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry**, v. 189, n. 2–3, p. 239–246, 2007.

SILVA, N.; CATANÚSIO NETO, R.; JUNQUEIRA, V.C.A.; SILVEIRA, N.F.A. **Manual de métodos de análise microbiológica da água**. São Paulo: Varela, p.164. 2005

SIZIRICI, B. Modified biosand filter coupled with a solar water pasteurizer: Decontamination study. **Journal of Water Process Engineering**, v. 23, n. October 2017, p. 277–284, 2018.

SMYK-RANDALL, E. et al. Near ultraviolet light inactivation of dihydroxyacid dehydratase in *Escherichia coli*. **Free Radical Biology and Medicine**, v. 14, n. 6, p. 609–613, 1993.

SPINKS, A. T. et al. Thermal inactivation of water-borne pathogenic and indicator bacteria at sub-boiling temperatures. **Water Research**, v. 40, n. 6, p. 1326–1332, 2006.

SPUHLER, D.; ANDRÉS RENGIFO-HERRERA, J.; PULGARIN, C. The effect of Fe²⁺, Fe³⁺, H₂O₂ and the photo-Fenton reagent at near neutral pH on the solar disinfection (SODIS) at low temperatures of water containing Escherichia coli K12. **Applied Catalysis B: Environmental**, 2010.

STRAUSS, A. et al. Comparative analysis of solar pasteurization versus solar disinfection for the treatment of harvested rainwater. **BMC Microbiology**, v. 16, n. 1, p. 289, 2016.

SWERDLOW, David L. et al. A waterborne outbreak in Missouri of Escherichia coli O157: H7 associated with bloody diarrhea and death. **Annals of internal medicine**, v. 117, n. 10, p. 812-819, 1992.

SUGANYA, S.; SENTHIL KUMAR, P. Evaluation of environmental aspects of brew waste-based carbon production and its disposal scenario. **Journal of Cleaner Production**, v. 202, p. 244–252, 20 nov. 2018.

TEIXEIRA, P. et al. Identification of sites of injury in Lactobacillus bulgaricus during heat stress. **Journal of Appl**, v. 83, n. 1991, p. 219–226, 1997.

THERMAL, C. et al. Boil water. **World Health Organization**, p. 0–1, 2011.

TOLKER-NIELSEN, T.; MOLIN, S. **Role of ribosome degradation in the death of heat-stressed Salmonella typhimurium** MICROBIOLOGY LETTERS FEMS **Microbiology Letters**. Disponível em: <<https://academic.oup.com/femsle/article-abstract/142/2-3/155/580622>>. Acesso em: 25 fev. 2019.

TORRES, R. C. Energia solar fotovoltaica como fonte alternativa de geração de energia elétrica em edificações residenciais. **Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo-SP**, p. 164, 2012.

TRABULSI, L.; ALTERTHUM, F. Microbiologia. 2004.

TSUCHIDO, T. et al. Destruction of the Outer Membrane Permeability Barrier of Escherichia coli by Heat Treatment. **Applied And Environmental Microbiology**, v. 50, n. 2, p. 298–303, 1985.

UBOMBA-JASWA, E.; FERN, P. Investigating the microbial inactivation efficiency of a 25 L batch solar disinfection (SODIS) reactor enhanced with a compound parabolic collector (CPC) for household use † ~ b Christian Navntoft , c a. n. October 2009, p. 1028–1037, 2010.

UHLENBROOK, S. WWAP Presentation: Launch of the UN World Water Development Report 2016. n. March, p. 139, 2016.

UNICEF. Going to Scale with Household Water Treatment and Safe Storage (HWTS

). 2009.

UNITED NATIONS. **The United Nations World Water Development Report 2019: Leaving No One Behind.** Paris: Disponible em: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000367306>.

US EPA. 2012 Edition of the Drinking Water Standards and Health Advisories 2012 Edition of the Drinking Water Standards and Health Advisories. 2012.

VAN ELSAS, J. D. et al. Survival of *Escherichia coli* in the environment: fundamental and public health aspects. **The ISME Journal**, v. 5, n. 2, p. 173–183, 2011.

VENKOBACHAR, C.; IYENGAR, Leela; RAO, AVS Prabhakara. Mechanism of disinfection: effect of chlorine on cell membrane functions. **Water Research**, v. 11, n. 8, p. 727-729, 1977.

VIVAR, M. et al. Separating the UV and thermal components during real-time solar disinfection experiments : The effect of temperature. **Solar Energy**, v. 146, p. 334–341, 2017.

VIVAR, M.; PICHEL, N.; FUENTES, M. Solar disinfection of natural river water with low microbiological content ($10 - 10^3$ CFU / 100 ml) and evaluation of the thermal contribution to water purification. **Solar Energy**, v. 141, p. 1–10, 2017.

WASE, D. A. J.; RATWATTE, H. A. M. Variation of intracellular sodium and potassium concentration with changes in agitation rate for chemostat-cultivated *Escherichia coli*. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 22, n. 5, p. 325–328, 1985.

WACHTEL, Marian R.; WHITEHAND, Linda C.; MANDRELL, Robert E. Association of *Escherichia coli* O157: H7 with preharvest leaf lettuce upon exposure to contaminated irrigation water. *Journal of Food Protection*®, v. 65, n. 1, p. 18-25, 2002a.

WACHTEL, Marian R.; WHITEHAND, Linda C.; MANDRELL, Robert E. Prevalence of *Escherichia coli* associated with a cabbage crop inadvertently irrigated with partially treated sewage wastewater. *Journal of Food Protection*®, v. 65, n. 3, p. 471-475, 2002b.

WEGELIN, Martin et al. Solar water disinfection: scope of the process and analysis of radiation experiments. **Aqua**, v. 43, n. 4, p. 154-169, 1994.

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

WHO. Household Water Treatment and Safe Storage Following Emergencies and Disasters. 2010.

WHO. UN-Water Global Analysis and Assessment of Sanitation and Drinking-Water

(GLAAS) 2019 report. **National systems to support drinking-water, sanitation and hygiene - Global status report**, p 144, 2019

WOOD, J. M. Osmosensing by Bacteria : Signals and Membrane-Based Sensors. v. 63, n. 1, p. 230–262, 1999.

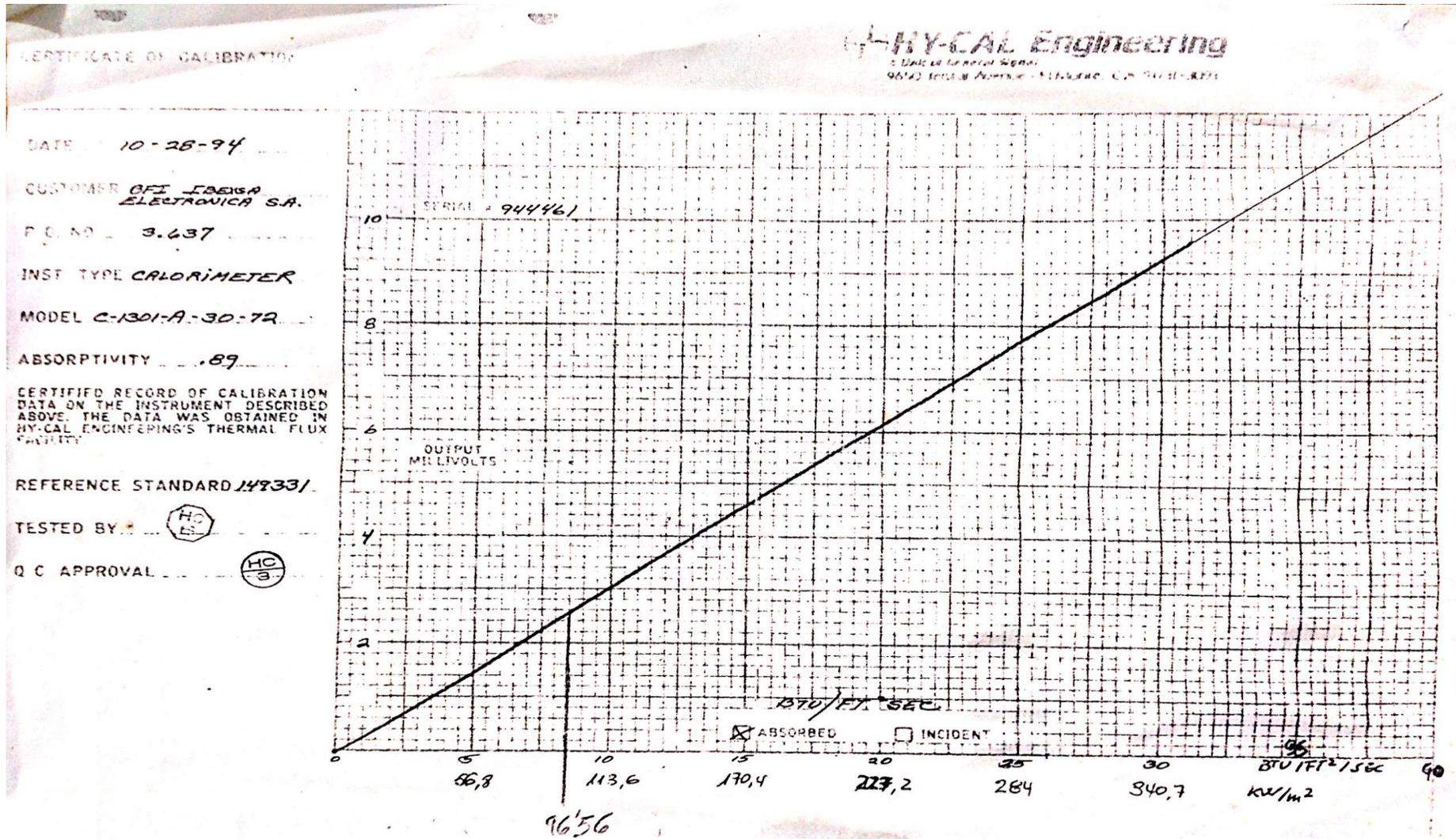
WORLD HEALTH ORGANIZATION. Safely managed drinking water - thematic report on drinking water 2017. p. 1–52, 2017.

WU, X. et al. Effects of solution chemistry on the sunlight inactivation of particles-associated viruses MS2. **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces**, v. 162, p. 179–185, 2018.

ZHANG, H. L. et al. Concentrated solar power plants: Review and design methodology. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 22, p. 466–481, 2013.

ZHANG, Y. et al. Application of solar energy in water treatment processes : A review. **Desalination**, v. 428, n. November 2017, p. 116–145, 2018.

ANEXO 1 Tabela de conversão de mV, que convertido para $W.m^{-2}$ I



ANEXO 2 – Tabela quantitativa Colilert

# Large Wells Positive	IDEXX Quanti-Tray®/2000 MPN Table (per 100ml)																								
	# Small Wells Positive																								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
0	<1	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	11.0	12.0	13.0	14.1	15.1	16.1	17.1	18.1	19.1	20.2	21.2	22.2	23.3	24.3
1	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.1	8.1	9.1	10.1	11.1	12.1	13.2	14.2	15.2	16.2	17.3	18.3	19.3	20.4	21.4	22.4	23.5	24.5	25.6
2	2.0	3.0	4.1	5.1	6.1	7.1	8.1	9.2	10.2	11.2	12.2	13.3	14.3	15.4	16.4	17.4	18.5	19.5	20.6	21.6	22.7	23.7	24.8	25.8	26.9
3	3.1	4.1	5.1	6.1	7.2	8.2	9.2	10.3	11.3	12.4	13.4	14.5	15.5	16.5	17.6	18.6	19.7	20.8	21.8	22.9	23.9	25.0	26.1	27.1	28.2
4	4.1	5.2	6.2	7.2	8.3	9.3	10.4	11.4	12.5	13.5	14.5	15.6	16.7	17.8	18.9	19.9	21.0	22.0	23.1	24.2	25.3	26.3	27.4	28.5	29.6
5	5.2	6.3	7.3	8.4	9.4	10.5	11.5	12.6	13.7	14.7	15.8	16.9	17.9	19.0	20.1	21.2	22.2	23.3	24.4	25.5	26.6	27.7	28.8	29.9	31.0
6	6.3	7.4	8.4	9.5	10.6	11.6	12.7	13.8	14.9	16.0	17.0	18.1	19.2	20.3	21.4	22.5	23.6	24.7	25.8	26.9	28.0	29.1	30.2	31.3	32.4
7	7.5	8.5	9.6	10.7	11.8	12.8	13.9	15.0	16.1	17.2	18.3	19.4	20.5	21.6	22.7	23.8	24.9	26.0	27.1	28.3	29.4	30.5	31.6	32.8	33.9
8	8.6	9.7	10.8	11.9	13.0	14.1	15.2	16.3	17.4	18.5	19.6	20.7	21.8	22.9	24.1	25.2	26.3	27.4	28.6	29.7	30.8	32.0	33.1	34.3	35.4
9	9.8	10.9	12.0	13.1	14.2	15.3	16.4	17.6	18.7	19.8	20.9	22.0	23.2	24.3	25.4	26.6	27.7	28.9	30.0	31.2	32.3	33.5	34.6	35.8	37.0
10	11.0	12.1	13.2	14.4	15.5	16.6	17.7	18.9	20.0	21.1	22.3	23.4	24.6	25.7	26.9	28.0	29.2	30.3	31.5	32.7	33.8	35.0	36.2	37.4	38.6
11	12.2	13.4	14.5	15.6	16.8	17.9	19.1	20.2	21.4	22.5	23.7	24.8	26.0	27.2	28.3	29.5	30.7	31.9	33.0	34.2	35.4	36.6	37.8	39.0	40.2
12	13.5	14.6	15.8	16.9	18.1	19.3	20.4	21.6	22.8	23.9	25.1	26.3	27.5	28.6	29.8	31.0	32.2	33.4	34.6	35.8	37.0	38.2	39.5	40.7	41.9
13	14.8	16.0	17.1	18.3	19.5	20.6	21.8	23.0	24.2	25.4	26.6	27.8	29.0	30.2	31.4	32.6	33.8	35.0	36.2	37.5	38.7	39.9	41.2	42.4	43.6
14	16.1	17.3	18.5	19.7	20.9	22.1	23.3	24.5	25.7	26.9	28.1	29.3	30.5	31.7	33.0	34.2	35.4	36.7	37.9	39.1	40.4	41.6	42.9	44.2	45.4
15	17.5	18.7	19.9	21.1	22.3	23.5	24.7	25.9	27.2	28.4	29.6	30.9	32.1	33.3	34.6	35.8	37.1	38.4	39.6	40.9	42.2	43.4	44.7	46.0	47.3
16	18.9	20.1	21.3	22.6	23.8	25.0	26.2	27.5	28.7	30.0	31.2	32.5	33.7	35.0	36.3	37.5	38.8	40.1	41.4	42.7	44.0	45.3	46.6	47.9	49.2
17	20.3	21.6	22.8	24.1	25.3	26.6	27.8	29.1	30.3	31.6	32.9	34.1	35.4	36.7	38.0	39.3	40.6	41.9	43.2	44.5	45.9	47.2	48.5	49.8	51.2
18	21.8	23.1	24.3	25.6	26.9	28.1	29.4	30.7	32.0	33.3	34.6	35.9	37.2	38.5	39.8	41.1	42.4	43.8	45.1	46.5	47.8	49.2	50.5	51.9	53.2
19	23.3	24.6	25.9	27.2	28.5	29.8	31.1	32.4	33.7	35.0	36.3	37.6	39.0	40.3	41.6	43.0	44.3	45.7	47.1	48.4	49.8	51.2	52.6	54.0	55.4
20	24.9	26.2	27.5	28.8	30.1	31.5	32.8	34.1	35.4	36.8	38.1	39.5	40.8	42.2	43.6	44.9	46.3	47.7	49.1	50.5	51.9	53.3	54.7	56.1	57.6
21	26.5	27.9	29.2	30.5	31.8	33.2	34.5	35.9	37.3	38.6	40.0	41.4	42.8	44.1	45.5	46.9	48.4	49.8	51.2	52.6	54.1	55.5	56.9	58.4	59.9
22	28.2	29.5	30.9	32.3	33.6	35.0	36.4	37.7	39.1	40.5	41.9	43.3	44.8	46.2	47.6	49.0	50.5	51.9	53.4	54.8	56.3	57.8	59.3	60.8	62.3
23	29.9	31.3	32.7	34.1	35.5	36.9	38.3	39.7	41.1	42.5	43.9	45.4	46.8	48.3	49.7	51.2	52.7	54.2	55.6	57.1	58.6	60.2	61.7	63.2	64.7
24	31.7	33.1	34.5	35.9	37.3	38.8	40.2	41.7	43.1	44.6	46.0	47.5	49.0	50.5	52.0	53.5	55.0	56.5	58.0	59.5	61.1	62.6	64.2	65.8	67.3
25	33.6	35.0	36.4	37.9	39.3	40.8	42.2	43.7	45.2	46.7	48.2	49.7	51.2	52.7	54.3	55.8	57.3	58.9	60.5	62.0	63.6	65.2	66.8	68.4	70.0
26	35.5	36.9	38.4	39.9	41.4	42.8	44.3	45.9	47.4	48.9	50.4	52.0	53.5	55.1	56.7	58.2	59.8	61.4	63.0	64.7	66.3	67.9	69.6	71.2	72.9
27	37.4	38.9	40.4	42.0	43.5	45.0	46.5	48.1	49.6	51.2	52.8	54.4	56.0	57.6	59.2	60.8	62.4	64.1	65.7	67.4	69.1	70.8	72.5	74.2	75.9
28	39.5	41.0	42.6	44.1	45.7	47.3	48.8	50.4	52.0	53.6	55.2	56.9	58.5	60.2	61.8	63.5	65.2	66.9	68.6	70.3	72.0	73.7	75.5	77.3	79.0
29	41.7	43.2	44.8	46.4	48.0	49.6	51.2	52.8	54.5	56.1	57.8	59.5	61.2	62.9	64.6	66.3	68.0	69.8	71.5	73.3	75.1	76.9	78.7	80.5	82.4
30	43.9	45.5	47.1	48.7	50.4	52.0	53.7	55.4	57.1	58.8	60.5	62.2	64.0	65.7	67.5	69.3	71.0	72.9	74.7	76.5	78.3	80.2	82.1	84.0	85.9
31	46.2	47.9	49.5	51.2	52.9	54.6	56.3	58.1	59.8	61.6	63.3	65.1	66.9	68.7	70.5	72.4	74.2	76.1	78.0	79.9	81.8	83.7	85.7	87.6	89.6
32	48.7	50.4	52.1	53.8	55.6	57.3	59.1	60.9	62.7	64.5	66.3	68.2	70.0	71.9	73.8	75.7	77.6	79.5	81.5	83.5	85.4	87.5	89.5	91.5	93.6
33	51.2	53.0	54.8	56.5	58.3	60.2	62.0	63.8	65.7	67.6	69.5	71.4	73.3	75.2	77.2	79.2	81.2	83.2	85.2	87.3	89.3	91.4	93.6	95.7	97.8
34	53.9	55.7	57.6	59.4	61.3	63.1	65.0	67.0	68.9	70.8	72.8	74.8	76.8	78.8	80.8	82.9	85.0	87.1	89.2	91.4	93.5	95.7	97.9	100.2	102.4
35	56.8	58.6	60.5	62.4	64.4	66.3	68.3	70.3	72.3	74.3	76.3	78.4	80.5	82.6	84.7	86.9	89.1	91.3	93.5	95.7	98.0	100.3	102.6	105.0	107.3
36	59.8	61.7	63.7	65.7	67.7	69.7	71.7	73.8	75.9	78.0	80.1	82.3	84.5	86.7	88.9	91.2	93.5	95.8	98.1	100.5	102.9	105.3	107.7	110.2	112.7
37	62.9	65.0	67.0	69.1	71.2	73.3	75.4	77.6	79.8	82.0	84.2	86.5	88.8	91.1	93.4	95.8	98.2	100.6	103.1	105.6	108.1	110.7	113.3	115.9	118.6
38	66.3	68.4	70.6	72.7	74.9	77.1	79.4	81.6	83.9	86.2	88.6	91.0	93.4	95.8	98.3	100.8	103.4	105.9	108.6	111.2	113.9	116.6	119.4	122.2	125.0
39	70.0	72.2	74.4	76.7	78.9	81.3	83.6	86.0	88.4	90.9	93.4	95.9	98.4	101.0	103.6	106.3	109.0	111.8	114.6	117.4	120.3	123.2	126.1	129.2	132.2
40	73.8	76.2	78.5	80.9	83.3	85.7	88.2	90.8	93.3	95.9	98.5	101.2	103.9	106.7	109.5	112.4	115.3	118.2	121.2	124.3	127.4	130.5	133.7	137.0	140.3
41	78.0	80.5	83.0	85.5	88.0	90.6	93.3	95.9	98.7	101.4	104.3	107.1	110.0	113.0	116.0	119.1	122.2	125.4	128.7	132.0	135.4	138.8	142.3	145.9	149.5
42	82.6	85.2	87.8	90.5	93.2	96.0	98.8	101.7	104.6	107.6	110.6	113.7	116.9	120.1	123.4	126.7	130.1	133.6	137.2	140.8	144.5	148.3	152.2	156.1	160.2
43	87.6	90.4	93.2	96.0	99.0	101.9	105.0	108.1	111.2	114.5	117.8	121.1	124.6	128.1	131.7	135.4	139.1	143.0	147.0	151.0	155.2	159.4	163.8	168.2	172.8
44	93.1	96.1	99.1	102.2	105.4	108.6	111.9	115.3	118.7	122.3	125.9	129.6	133.4	137.4	141.4	145.5	149.7	154.1	158.5	163.1	167.9	172.7	177.7	182.9	188.2
45	99.3	102.5	105.8	109.2	112.6	116.2	119.8	123.6	127.4	131.4	135.4	139.6	143.9	148.3	152.9	157.6	162.4	167.4	172.6	178.0	183.5	189.2	195.1	201.2	207.5
46	106.3	109.6	113.4	117.2	121.0	125.0	129.1	133.3	137.6	142.1	146.7	151.5	156.5	161.6	167.0	172.5	178.2	184.2	190.4	196.8	203.5	210.5	217.8	225.4	233.3
47	114.3	118.3	122.4	126.6	130.9	135.4	140.1	145.0	150.0	155.3	160.7	166.4	172.3	178.5	185.0	191.8	198.9	206.4	214.2	222.4	231.0	240.0	249.5	259.5	270.0
48	123.9	128.4	133.1	137.9	143.0	148.3	153.9	159.7	165.8	172.2	178.9	186.0	193.5	201.4	209.8	218.7	228.2	238.2	248.9	260.3	272.3	285.1	298.7	313.0	328.2
49	135.5	140.8	146.4	152.3	158.5	165.0	172.0	179.3	187.2	195.6	204.6	214.3	224.7	235.9	248.1	261.3	275.5	290.9	307.6	325.5	344.8	365.			

# Large Wells Positive	IDEXX Quanti-Tray®/2000 MPN Table (per 100ml)																							
	# Small Wells Positive																							
	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
0	25.3	26.4	27.4	28.4	29.5	30.5	31.5	32.6	33.6	34.7	35.7	36.8	37.8	38.9	40.0	41.0	42.1	43.1	44.2	45.3	46.3	47.4	48.5	49.5
1	26.6	27.7	28.7	29.8	30.8	31.9	32.9	34.0	35.0	36.1	37.2	38.2	39.3	40.4	41.4	42.5	43.6	44.7	45.7	46.8	47.9	49.0	50.1	51.2
2	27.9	29.0	30.0	31.1	32.2	33.2	34.3	35.4	36.5	37.5	38.6	39.7	40.8	41.9	43.0	44.0	45.1	46.2	47.3	48.4	49.5	50.6	51.7	52.8
3	29.3	30.4	31.4	32.5	33.6	34.7	35.8	36.8	37.9	39.0	40.1	41.2	42.3	43.4	44.5	45.6	46.7	47.8	48.9	50.0	51.2	52.3	53.4	54.5
4	30.7	31.8	32.8	33.9	35.0	36.1	37.2	38.3	39.4	40.5	41.6	42.8	43.9	45.0	46.1	47.2	48.3	49.5	50.6	51.7	52.9	54.0	55.1	56.3
5	32.1	33.2	34.3	35.4	36.5	37.6	38.7	39.9	41.0	42.1	43.2	44.4	45.5	46.6	47.7	48.9	50.0	51.2	52.3	53.5	54.6	55.8	56.9	58.1
6	33.5	34.7	35.8	36.9	38.0	39.2	40.3	41.4	42.6	43.7	44.8	46.0	47.1	48.3	49.4	50.6	51.7	52.9	54.1	55.2	56.4	57.6	58.7	59.9
7	35.0	36.2	37.3	38.4	39.6	40.7	41.9	43.0	44.2	45.3	46.5	47.7	48.8	50.0	51.2	52.3	53.5	54.7	55.9	57.1	58.3	59.4	60.6	61.8
8	36.6	37.7	38.9	40.0	41.2	42.3	43.5	44.7	45.9	47.0	48.2	49.4	50.6	51.8	53.0	54.1	55.3	56.5	57.7	59.0	60.2	61.4	62.6	63.8
9	38.1	39.3	40.5	41.6	42.8	44.0	45.2	46.4	47.6	48.8	50.0	51.2	52.4	53.6	54.8	56.0	57.2	58.4	59.7	60.9	62.1	63.4	64.6	65.8
10	39.7	40.9	42.1	43.3	44.5	45.7	46.9	48.1	49.3	50.6	51.8	53.0	54.2	55.5	56.7	57.9	59.2	60.4	61.7	62.9	64.2	65.4	66.7	67.9
11	41.4	42.6	43.8	45.0	46.3	47.5	48.7	49.9	51.2	52.4	53.7	54.9	56.1	57.4	58.6	59.9	61.2	62.4	63.7	65.0	66.3	67.5	68.8	70.1
12	43.1	44.3	45.6	46.8	48.1	49.3	50.6	51.8	53.1	54.3	55.6	56.8	58.1	59.4	60.7	62.0	63.2	64.5	65.8	67.1	68.4	69.7	71.0	72.4
13	44.9	46.1	47.4	48.6	49.9	51.2	52.5	53.7	55.0	56.3	57.6	58.9	60.2	61.5	62.8	64.1	65.4	66.7	68.0	69.3	70.7	72.0	73.3	74.7
14	46.7	48.0	49.3	50.5	51.8	53.1	54.4	55.7	57.0	58.3	59.6	60.9	62.3	63.6	64.9	66.3	67.6	68.9	70.3	71.6	73.0	74.4	75.7	77.1
15	48.6	49.9	51.2	52.5	53.8	55.1	56.4	57.8	59.1	60.4	61.8	63.1	64.5	65.8	67.2	68.5	69.9	71.3	72.6	74.0	75.4	76.8	78.2	79.6
16	50.5	51.8	53.2	54.5	55.8	57.2	58.5	59.9	61.2	62.6	64.0	65.3	66.7	68.1	69.5	70.9	72.3	73.7	75.1	76.5	77.9	79.3	80.8	82.2
17	52.5	53.9	55.2	56.6	58.0	59.3	60.7	62.1	63.5	64.9	66.3	67.7	69.1	70.5	71.9	73.3	74.8	76.2	77.6	79.1	80.5	82.0	83.5	84.9
18	54.6	56.0	57.4	58.8	60.2	61.6	63.0	64.4	65.8	67.2	68.6	70.1	71.5	73.0	74.4	75.9	77.3	78.8	80.3	81.8	83.3	84.8	86.3	87.8
19	56.8	58.2	59.6	61.0	62.4	63.9	65.3	66.8	68.2	69.7	71.1	72.6	74.1	75.5	77.0	78.5	80.0	81.5	83.1	84.6	86.1	87.6	89.2	90.7
20	59.0	60.4	61.9	63.3	64.8	66.3	67.7	69.2	70.7	72.2	73.7	75.2	76.7	78.2	79.8	81.3	82.8	84.4	85.9	87.5	89.1	90.7	92.2	93.8
21	61.3	62.8	64.3	65.8	67.3	68.8	70.3	71.8	73.3	74.9	76.4	77.9	79.5	81.1	82.6	84.2	85.8	87.4	89.0	90.6	92.2	93.8	95.4	97.1
22	63.8	65.3	66.8	68.3	69.8	71.4	72.9	74.5	76.1	77.6	79.2	80.8	82.4	84.0	85.6	87.2	88.9	90.5	92.1	93.8	95.5	97.1	98.8	100.5
23	66.3	67.8	69.4	71.0	72.5	74.1	75.7	77.3	78.9	80.5	82.2	83.8	85.4	87.1	88.7	90.4	92.1	93.8	95.5	97.2	98.9	100.6	102.4	104.1
24	68.9	70.5	72.1	73.7	75.3	77.0	78.6	80.3	81.9	83.6	85.2	86.9	88.6	90.3	92.0	93.8	95.5	97.2	99.0	100.7	102.5	104.3	106.1	107.9
25	71.7	73.3	75.0	76.6	78.3	80.0	81.7	83.3	85.1	86.8	88.5	90.2	92.0	93.7	95.5	97.3	99.1	100.9	102.7	104.5	106.3	108.2	110.0	111.9
26	74.6	76.3	78.0	79.7	81.4	83.1	84.8	86.6	88.4	90.1	91.9	93.7	95.5	97.3	99.2	101.0	102.9	104.7	106.6	108.5	110.4	112.3	114.2	116.2
27	77.6	79.4	81.1	82.9	84.6	86.4	88.2	90.0	91.9	93.7	95.5	97.4	99.3	101.2	103.1	105.0	106.9	108.8	110.8	112.7	114.7	116.7	118.7	120.7
28	80.8	82.6	84.4	86.3	88.1	89.9	91.8	93.7	95.6	97.5	99.4	101.3	103.3	105.2	107.2	109.2	111.2	113.2	115.2	117.3	119.3	121.4	123.5	125.6
29	84.2	86.1	87.9	89.8	91.7	93.7	95.6	97.5	99.5	101.5	103.5	105.5	107.5	109.5	111.6	113.7	115.7	117.8	120.0	122.1	124.2	126.4	128.6	130.8
30	87.8	89.7	91.7	93.6	95.6	97.6	99.6	101.6	103.7	105.7	107.8	109.9	112.0	114.2	116.3	118.5	120.6	122.8	125.1	127.3	129.5	131.8	134.1	136.4
31	91.6	93.6	95.6	97.7	99.7	101.8	103.9	106.0	108.2	110.3	112.5	114.7	116.9	119.1	121.4	123.6	125.9	128.2	130.5	132.9	135.3	137.7	140.1	142.5
32	95.7	97.8	99.9	102.0	104.2	106.3	108.5	110.7	113.0	115.2	117.5	119.8	122.1	124.5	126.8	129.2	131.6	134.0	136.5	139.0	141.5	144.0	146.5	149.1
33	100.0	102.2	104.4	106.6	108.9	111.2	113.5	115.8	118.2	120.5	122.9	125.4	127.8	130.3	132.8	135.3	137.8	140.4	143.0	145.6	148.3	150.9	153.7	156.4
34	104.7	107.0	109.3	111.7	114.0	116.4	118.9	121.3	123.8	126.3	128.8	131.4	134.0	136.6	139.2	141.9	144.6	147.4	150.1	152.9	155.7	158.6	161.5	164.4
35	109.7	112.2	114.6	117.1	119.6	122.2	124.7	127.3	129.9	132.6	135.3	138.0	140.8	143.6	146.4	149.2	152.1	155.0	158.0	161.0	164.0	167.1	170.2	173.3
36	115.2	117.8	120.4	123.0	125.7	128.4	131.1	133.9	136.7	139.5	142.4	145.3	148.3	151.3	154.3	157.3	160.5	163.6	166.8	170.0	173.3	176.6	179.9	183.3
37	121.3	124.0	126.8	129.6	132.4	135.3	138.2	141.2	144.2	147.3	150.3	153.5	156.7	159.9	163.1	166.5	169.8	173.2	176.7	180.2	183.7	187.3	191.0	194.7
38	127.9	130.8	133.8	136.8	139.9	143.0	146.2	149.4	152.6	155.9	159.2	162.6	166.1	169.6	173.2	176.8	180.4	184.2	188.0	191.8	195.7	199.7	203.7	207.7
39	135.3	138.5	141.7	145.0	148.3	151.7	155.1	158.6	162.1	165.7	169.4	173.1	176.9	180.7	184.7	188.7	192.7	196.8	201.0	205.3	209.6	214.0	218.5	223.0
40	143.7	147.1	150.6	154.2	157.8	161.5	165.3	169.1	173.0	177.0	181.1	185.2	189.4	193.7	198.1	202.5	207.1	211.7	216.4	221.1	226.0	231.0	236.0	241.1
41	153.2	157.0	160.9	164.8	168.9	173.0	177.2	181.5	185.8	190.3	194.8	199.5	204.2	209.1	214.0	219.1	224.2	229.4	234.8	240.2	245.8	251.5	257.2	263.1
42	164.3	168.6	172.9	177.3	181.9	186.5	191.3	196.1	201.1	206.2	211.4	216.7	222.2	227.7	233.4	239.2	245.2	251.3	257.5	263.8	270.3	276.9	283.6	290.5
43	177.5	182.3	187.3	192.4	197.6	202.9	208.4	214.0	219.8	225.8	231.8	238.1	244.5	251.0	257.7	264.6	271.7	278.9	286.3	293.8	301.5	309.4	317.4	325.7
44	193.6	199.3	205.1	211.0	217.2	223.5	230.0	236.7	243.6	250.8	258.1	265.6	273.3	281.2	289.4	297.8	306.3	315.1	324.1	333.3	342.8	352.4	362.3	372.4
45	214.1	220.9	227.9	235.2	242.7	250.4	258.4	266.7	275.3	284.1	293.3	302.6	312.3	322.3	332.5	343.0	353.8	364.9	376.2	387.9	399.8	412.0	424.5	437.4
46	241.5	250.0	258.9	268.2	277.8	287.8	298.1	308.8	319.9	331.4	343.3	355.5	368.1	381.1	394.5	408.3	422.5	437.1	452.0	467.4	483.3	499.6	516.3	533.5
47	280.9	292.4	304.4	316.9	330.0	343.6	357.8	372.5	387.7	403.4	419.8	436.6	454.1	472.1	490.7	509.9	529.8	550.4	571.7	593.8	616.7	640.5	665.3	691.0
48	344.1	360.9	378.4	396.8	416.0	436.0	456.9	478.6	501.2	524.7	549.3	574.8	601.5	629.4	658.6	689.3	721.5	755.6	791.5	829.7	870.4	913.9	960.6	1011.2
49	461.1	488.4	517.2	547.5	579.4	613.1	648.8	686.7	727.0	770.1	816.4	866.4	920.8	980.4	1046.2	1119.9	1203.3	1299.7	1413.6	1553.1	1732.9	1966.3	2419.6	>2419.6