http://dx.doi.org/10.18623/rvd.v23.5825

EFICIÊNCIA TÉRMICA E CINÉTICA DE INATIVAÇÃO DA E. COLI EM PASTEURIZADOR SOLAR APLICADO AO TRATAMENTO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

THERMAL AND KINETIC EFFICIENCY OF E. COLI INACTIVATION IN A SOLAR PASTEURIZER USED FOR GROUNDWATER TREATMENT

Artigo recebido em: 11/12/2025
Artigo aceito em: 12/3/2026

Angelina Francisca Kuliakita José*
***Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Recife, Pernambuco, Brasil
Lattes: http://lattes.cnpq.br/4771588226509167
Orcid: https://orcid.org/0009-0008-0488-0531
angelinakuliakita@gmail.com

Marilda Nascimento Carvalho*
***Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Recife, Pernambuco, Brasil
Lattes: http://lattes.cnpq.br/7280351763016108
Orcid: https://orcid.org/0000-0001-7872-6432
marildacarv@gmail.com

Sara Horácio de Oliveira Maciel*
***Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Recife, Pernambuco, Brasil
Lattes: http://lattes.cnpq.br/1639271932432686
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-5373-3860
sara.holiveira@ufpe.br

The authors declare that there is no conflict of interest

Resumo

A escassez de água potável e a contaminação microbiológica de águas subterrâneas representam desafios significativos à saúde pública, especialmente em regiões com infraestrutura limitada de saneamento. Este estudo teve como objetivo avaliar a eficiência térmica e a cinética de inativação microbiológica de um pasteurizador solar aplicado ao tratamento de águas subterrâneas. Os experimentos foram realizados no campus Recife da Universidade Federal de Pernambuco, entre abril e julho de 2025, sob irradiância solar variando entre 5,2 e 5,6 kWh/m². O sistema operou por escoamento gravitacional, promovendo aquecimento progressivo da água por meio de coletor solar térmico. A temperatura foi monitorada por 300 minutos, atingindo valores entre 65 °C e 68 °C após 180–240 minutos de exposição. A análise microbiológica, realizada pelo método do Número Mais Provável (NMP), indicou redução logarítmica média de 2,15 log e completa inativação de coliformes termotolerantes, incluindo Escherichia coli, quando a temperatura ultrapassou 65 °C. A cinética de inativação foi avaliada por meio dos modelos log-linear, Weibull e bifásico, sendo este último o que

Abstract

The scarcity of safe drinking water and the microbiological contamination of groundwater represent significant public health challenges, particularly in regions with limited sanitation infrastructure. This study aimed to evaluate the thermal efficiency and microbial inactivation kinetics of a solar water pasteurizer applied to groundwater treatment. Experiments were conducted at the Recife campus of the Universidade Federal de Pernambuco between April and July 2025 under solar irradiance ranging from 5.2 to 5.6 kWh/m². Water temperature reached 65–68 °C after 180–240 minutes. Microbiological analysis (Most Probable Number method) indicated an average 2.15 log reduction and complete inactivation of thermotolerant coliforms when temperatures exceeded 65 °C. Among the evaluated kinetic models (log-linear, Weibull, and biphasic), the biphasic model showed the best fit (lowest RMSE). Thermal efficiency ranged from 7.9% to 8.9%. The findings confirm that solar pasteurization is a technically feasible alternative for decentralized water treatment in tropical regions with high solar radiation availability.

Este trabalho está licenciado sob uma licença Creative Commons

apresentou melhor ajuste aos dados experimentais (menor RMSE). A eficiência térmica variou entre 7,9% e 8,9%. Os resultados demonstram que a pasteurização solar constitui alternativa tecnicamente viável para o tratamento descentralizado de água em regiões com elevada disponibilidade de radiação solar.

Palavras-chave: Pasteurização Solar. Águas Subterrâneas. Inativação Microbiana. Modelos Cinéticos. Saneamento Descentralizado.

Keywords: *Solar Pasteurization. Groundwater. Microbial Inactivation. Kinetic Modeling. Decentralized Sanitation.*

1 INTRODUÇÃO

A água constitui um recurso essencial à manutenção da vida e ao desenvolvimento das atividades humanas, exercendo papel central nos aspectos sociais, econômicos e ambientais. O acesso à água potável segura é reconhecido como um dos principais indicadores de qualidade de vida, estando diretamente relacionado à saúde pública e à redução da incidência de doenças de veiculação hídrica (Sizirici, 2018; Rajkhowa, 2020).

Apesar dos avanços observados nas últimas décadas, a escassez de água potável ainda representa um desafio global. Segundo a Organização Mundial da Saúde (WHO, 2019), aproximadamente 2,2 bilhões de pessoas não dispõem de acesso a serviços seguros de abastecimento de água, enquanto cerca de 4,2 bilhões carecem de sistemas adequados de saneamento. Como consequência, doenças associadas à ingestão de água contaminada continuam responsáveis por elevados índices de morbidade e mortalidade, especialmente em países em desenvolvimento.

Diante desse cenário, a Organização das Nações Unidas (ONU, 2023), por meio do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 6 (ODS 6), estabeleceu como meta assegurar a disponibilidade e a gestão sustentável da água e do saneamento para todos até 2030, destacando a necessidade de tecnologias acessíveis, eficientes e ambientalmente sustentáveis.

1.1 Águas subterrâneas e abastecimento humano

As águas subterrâneas correspondem à parcela da água localizada abaixo da superfície terrestre, ocupando poros, fissuras e fraturas das formações geológicas.

Segundo a Associação Brasileira de Águas Subterrâneas (ABAS, 2024), esse recurso representa aproximadamente 99% da água doce líquida disponível no planeta.

No Brasil, desempenham papel estratégico no abastecimento, com disponibilidade estimada em 13.205 m³/s (ANA, 2021) e mais de 2,6 milhões de poços em operação (ANA, 2023). Entretanto, sua qualidade pode ser comprometida por fatores naturais e antrópicos.

1.2 Fontes de contaminação das águas subterrâneas

A contaminação pode ocorrer em função de:

Lançamento inadequado de esgotos domésticos e industriais;

Uso intensivo de fertilizantes e pesticidas;

Infiltração de chorume de resíduos sólidos;

Vazamentos em tanques de combustíveis;

Atividades de mineração;

Cemitérios (Zoby, 2008).

Esses fatores comprometem a potabilidade da água e elevam o risco de doenças de veiculação hídrica.

1.3 Patógenos transmitidos pela água

Microrganismos como bactérias, vírus e protozoários são responsáveis por doenças como diarreia, cólera e hepatite (WHO, 2017). Os coliformes termotolerantes, especialmente Escherichia coli, são utilizados como indicadores de contaminação fecal (Meierhofer et al., 2002).

1.4 Tecnologias de desinfecção da água

Os métodos de desinfecção podem ser classificados em:

Químicos (cloração, ozonização);

Físicos (filtração, radiação UV);

Térmicos (aquecimento e pasteurização) (Rajkhowa, 2020).

Entre as alternativas de baixo custo destacam-se:

1.4.1 Desinfecção solar da água (SODIS)

A técnica SODIS utiliza radiação ultravioleta e aquecimento solar para inativar microrganismos (Meierhofer et al., 2002). Apesar de simples, apresenta limitações relacionadas ao volume tratado e à turbidez da água (Chaúque; Rott, 2021).

1.4.2 Pasteurização solar da água (SOPAS)

A pasteurização solar consiste no aquecimento da água a temperaturas superiores a 60 °C, promovendo a inativação microbiológica. Estudos indicam que temperaturas entre 60 °C e 70 °C, mantidas por tempo adequado, são eficazes na eliminação de patógenos (Zaman et al., 2019).

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

O estudo foi realizado no campus Recife da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), nas dependências do Departamento de Engenharia Química, localizado na Cidade Universitária, Recife–PE (8°03′14″ S; 34°57′00″ O).

O clima é tropical úmido, com temperatura média anual de aproximadamente 26 °C.

2.2 Descrição do pasteurizador solar

O equipamento foi desenvolvido conforme modelo proposto por Pequeno (2024), consistindo em:

Reservatório superior (5 L); Coletor solar térmico em alumínio; Tubulações de PVC (25–50 mm) pintadas com tinta preta fosca; Válvulas de controle; Reservatório inferior (2 L); Termômetro químico.

O sistema opera por escoamento gravitacional.

2.3 Procedimento experimental

2.3.1 Monitoramento da temperatura

Medições realizadas nos tempos:

0, 60, 120, 180, 240 e 300 minutos.

2.3.2 Medição da Irradiância Solar

A irradiância foi registrada por meio do aplicativo iSolergo, variando entre 5,2 e 5,6 kWh/m².

2.4 Coleta e análises

As amostras de água subterrânea foram coletadas em um poço localizado na Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), com o objetivo de avaliar a eficiência de um sistema de pasteurização solar na remoção de microrganismos indicadores de contaminação.

A coleta foi realizada em recipientes estéreis previamente higienizados, garantindo a integridade microbiológica das amostras

Após a coleta, as amostras foram devidamente identificadas, acondicionadas em caixas térmicas com gelo e transportadas ao laboratório para análise imediata.

No laboratório, as amostras foram submetidas ao processo de pasteurização solar, sendo posteriormente analisadas quanto aos parâmetros microbiológicos e físico-químicos, com o objetivo de avaliar a eficiência do sistema na descontaminação da água.

Foram avaliados:

Temperatura; Irradiância; coliformes totais; coliformes termotolerantes (E. coli); pH

Turbidez

2.5 Análises microbiológicas

Realizadas pelo método do Número Mais Provável (NMP), conforme APHA (2017).

Teste presuntivo: Caldo LST (35 ± 0,5 °C)

Teste confirmativo: Caldo EC (44,5 ± 0,2 °C)

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Resultados

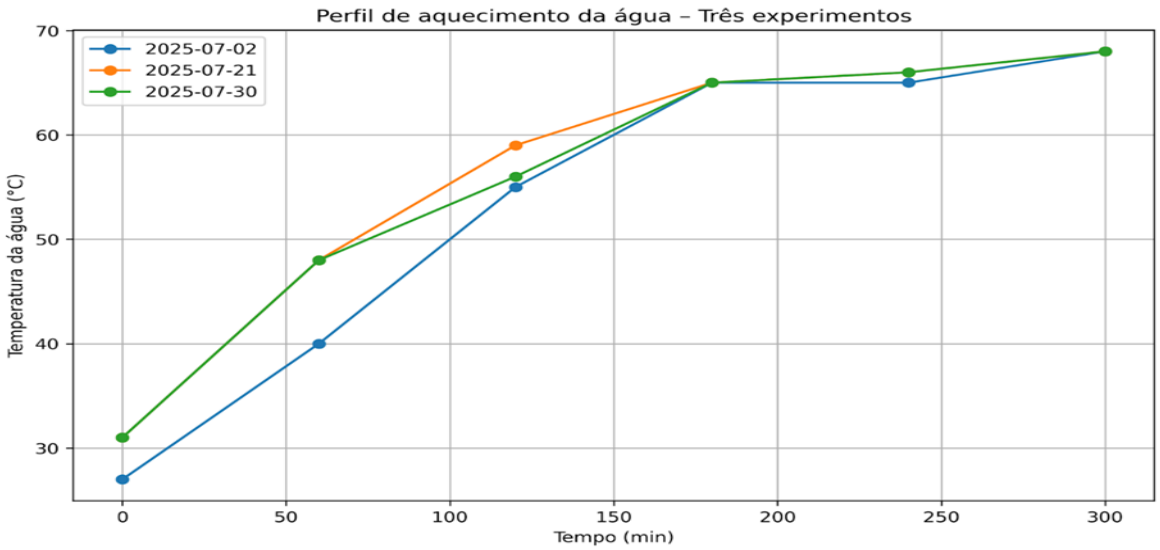
A temperatura inicial variou entre 27 °C e 31 °C, atingindo valores finais entre 65 °C e 68 °C, adequados para o processo de pasteurização.

Os valores de irradiância solar indicaram condições favoráveis à operação do sistema, compatíveis com níveis necessários para funcionamento eficiente.

3.1.1 Perfil termico do pasteurizador solar

O comportamento térmico da água durante o processo de pasteurização solar foi avaliado por meio do monitoramento da variação da temperatura ao longo do tempo, em três experimentos realizados em dias distintos. O perfil de aquecimento apresentado evidencia a evolução da temperatura da água em função do tempo de exposição à radiação solar, permitindo analisar a eficiência do sistema em atingir e manter faixas de temperatura adequadas à inativação microbiana.

Figura 1: perfil de aquecimento da água ao longo do tempo durante três experimentos de pasteurização solar.



Fonte: Elaboração própria

A Figura 1: apresenta o perfil de temperatura da água ao longo do tempo para os três experimentos realizados nos dias 02/07/2025, 21/07/2025 e 30/07/2025.

Observa-se que, em todos os ensaios, a temperatura inicial da água situou-se entre 27 e 31 °C, elevando-se progressivamente até atingir valores superiores a 65 °C após aproximadamente 180 minutos de exposição solar. A partir desse ponto, a temperatura manteve-se estável ou apresentou leve incremento, alcançando valores entre 66 e 68 °C ao final do experimento.

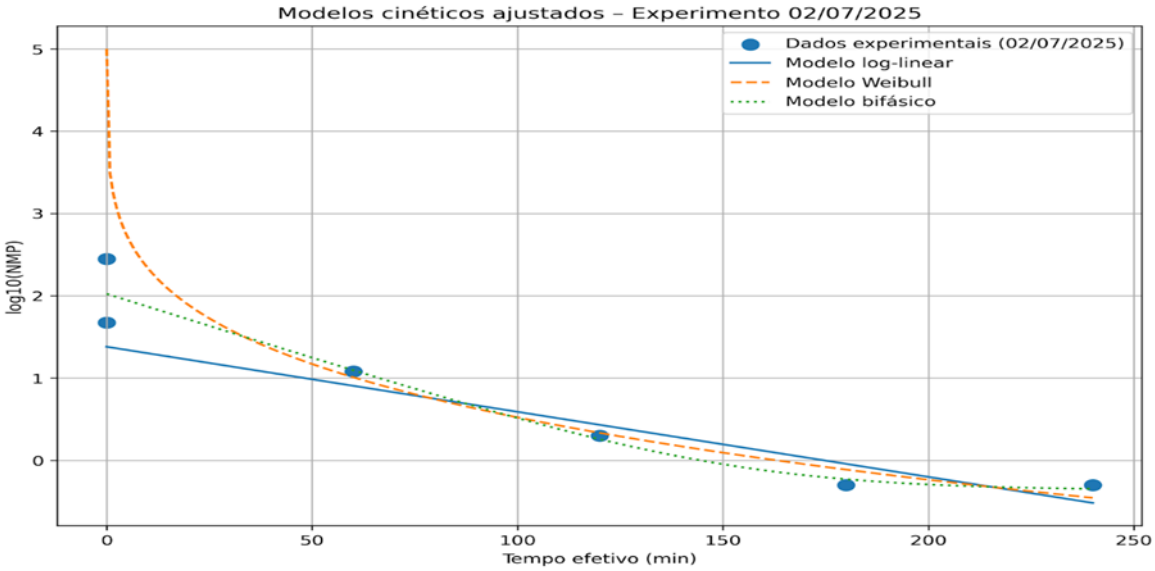
O experimento realizado em 21/07/2025 apresentou aquecimento ligeiramente mais rápido nas etapas iniciais, atingindo 48 °C em 60 minutos, enquanto nos demais ensaios essa temperatura foi alcançada de forma mais gradual. Apesar disso, os três perfis térmicos convergiram a partir de 180 minutos, indicando boa reprodutibilidade do sistema térmico, mesmo sob pequenas variações de irradiância solar.

Esses resultados demonstram que o pasteurizador solar apresentou desempenho térmico adequado para processos de desinfecção, atingindo e mantendo temperaturas compatíveis com a inativação de microrganismos patogênicos, conforme descrito na literatura para processos de pasteurização térmica.

3.1.2 Cinética de inativação microbiana

A cinética de inativação microbiana durante o processo de pasteurização solar foi avaliada por meio do ajuste de diferentes modelos matemáticos aos dados experimentais obtidos no experimento realizado em 02/07/2025. A aplicação de modelos cinéticos permite descrever quantitativamente a redução da concentração microbiana ao longo do tempo e avaliar a adequação de diferentes abordagens matemáticas na representação do comportamento observado experimentalmente.

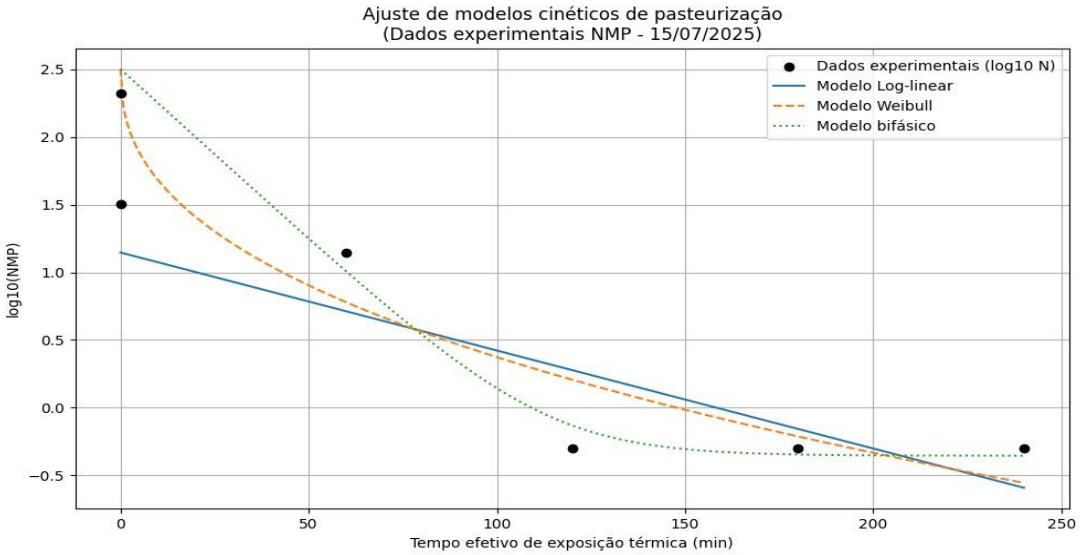
Figura 2: Comparação entre os modelos cinéticos log-linear, Weibull e bifásico aplicados aos dados experimentais de inativação microbiana.



Fonte: Elaboração própria

A Figura 2 apresenta os ajustes dos modelos log-linear, Weibull e bifásico aos dados experimentais do ensaio realizado em 02/07/2025. Observa-se redução progressiva do NMP ao longo do tempo, com queda acentuada após 120 minutos, acompanhando a elevação térmica do sistema, e atingindo valores próximos ao limite de detecção após 240 minutos. O modelo log-linear apresentou ajuste mais limitado, enquanto os modelos não lineares representaram melhor a curvatura da cinética. O modelo bifásico apresentou o menor erro (RMSE), indicando possível heterogeneidade de resistência térmica na população microbiana, com uma fração mais resistente e uma fase de inativação rápida associada ao alcance de temperaturas ≥ 65 °C.

Figura 3: Ajuste dos Modelos Cinéticos – Experimento de 15/07/2025



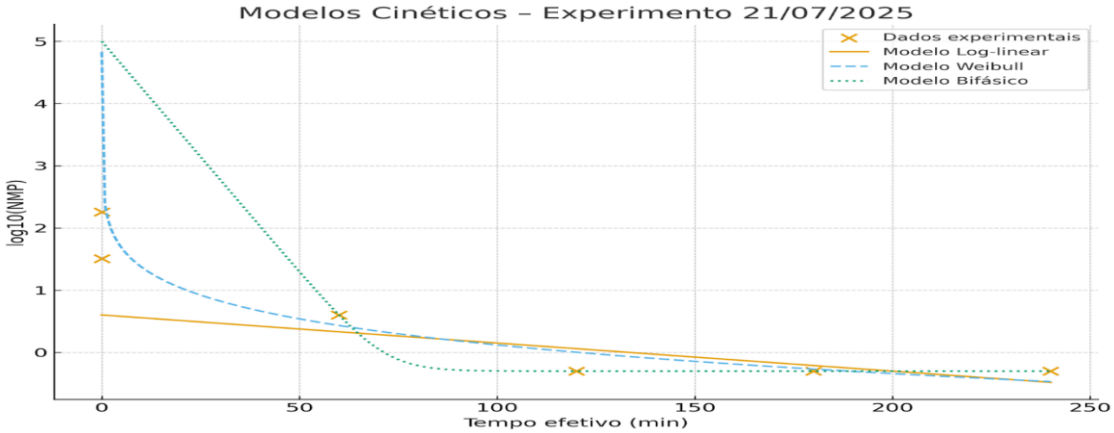
Fonte: Elaboração própria

A Figura 3 apresenta o ajuste dos modelos log-linear, Weibull e bifásico aos dados experimentais de NMP obtidos no ensaio de pasteurização solar realizado em 15/07/2025.

Observa-se inicialmente uma redução acentuada da concentração microbiana nos primeiros 120 minutos de exposição térmica efetiva, seguida de estabilização próxima ao limite de detecção do método analítico. Comportamento Experimental

Os dados experimentais indicam: Redução superior a 2 ciclos logarítmicos ao longo do experimento; Fase inicial de queda relativamente rápida; Tendência à estabilização após 180 minutos, associada ao limite de detecção (0,5 NMP); Possível presença de heterogeneidade populacional.

Figura 4: Comparação entre os modelos cinéticos log-linear, Weibull e bifásico aplicados aos dados experimentais de inativação microbiana



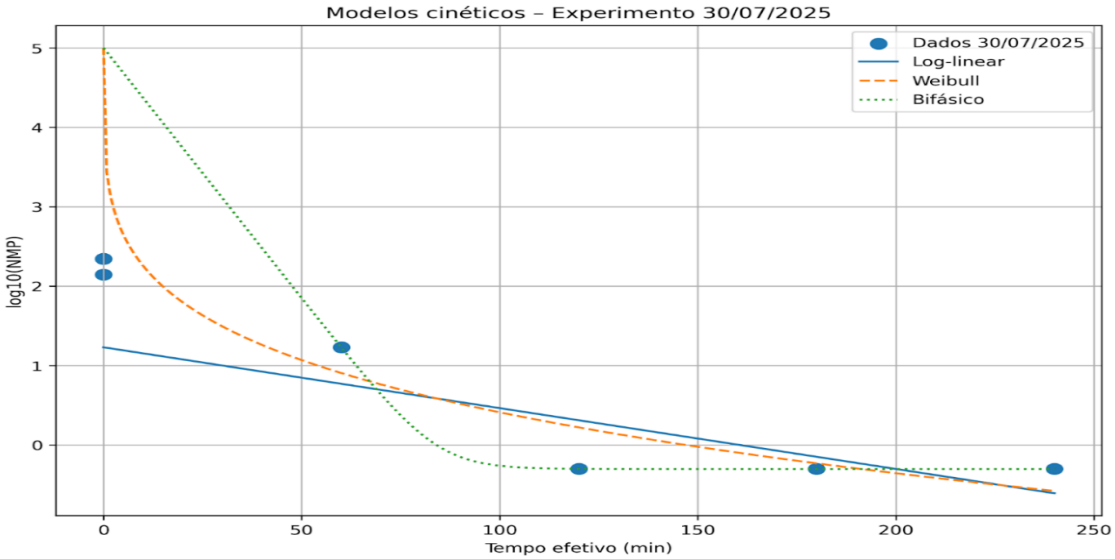
Fonte: Elaboração própria

A Figura 4. Trata do experimento realizado em 21/07/2025 apresentou comportamento cinético característico de um processo de pasteurização térmica eficiente, com rápida elevação da temperatura e consequente inativação microbiana.

Observou-se que a temperatura da água atingiu 48 °C em 60 minutos, valor superior ao observado nos demais dias experimentais no mesmo intervalo de tempo, indicando maior eficiência inicial do processo de aquecimento. Esse comportamento pode estar associado à maior estabilidade da irradiância solar ao longo do experimento, conforme registrado (≈ 5,2–5,5 kWh·m^{-2}).

A redução microbiana ocorreu de forma progressiva, com queda acentuada do NMP entre 60 e 120 minutos, coincidindo com temperaturas superiores a 55 °C. A partir de 180 minutos, quando a temperatura atingiu aproximadamente 65 °C, observou-se inativação completa dos microrganismos, mantendo-se valores abaixo do limite de detecção até o final do ensaio.

Figura 5: Ajuste dos modelos cinéticos log-linear, Weibull e bifásico aos dados experimentais do ensaio realizado em 30/07/2025.



Fonte: Elaboração própria

A análise dos resultados evidencia que:

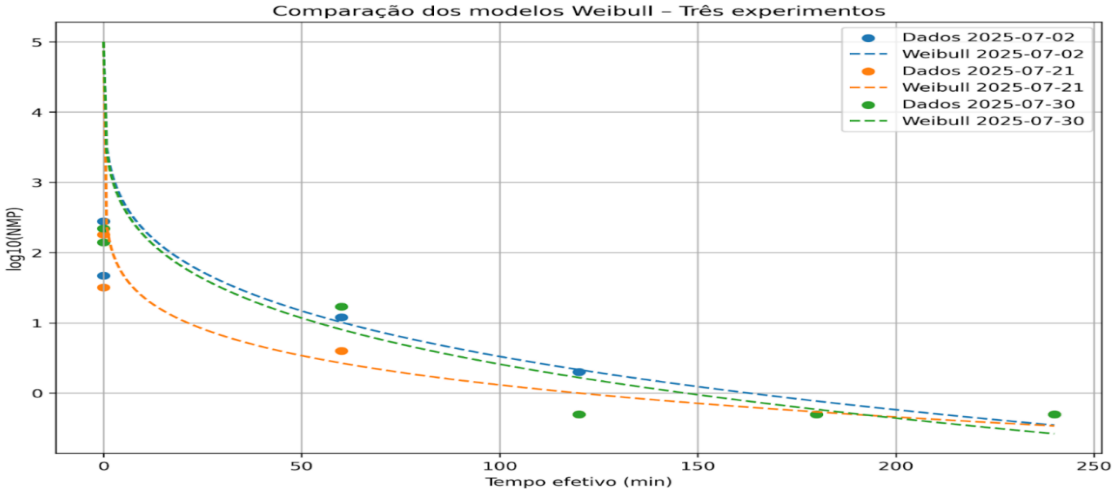
- A redução microbiana iniciou-se de forma gradual até aproximadamente 120 minutos;
- A partir de 180 minutos, quando a temperatura atingiu 65 °C, observou-se eliminação completa dos microrganismos detectáveis;

- O modelo log-linear apresentou menor capacidade de ajuste, especialmente nas fases inicial e final da curva;
- O modelo Weibull representou adequadamente a curvatura da cinética, indicando comportamento não linear;
- O modelo bifásico apresentou o melhor ajuste global, sugerindo a existência de uma fração microbiana mais resistente seguida de rápida inativação.

A superioridade do modelo bifásico indica que a população microbiana não apresenta comportamento homogêneo frente ao aquecimento, o que é comum em sistemas reais de água, onde coexistem microrganismos com diferentes resistências térmicas.

A Figura 5 apresenta a comparação dos ajustes do modelo cinético de Weibull aos dados experimentais de inativação de coliformes obtidos em três ensaios realizados em diferentes dias. Os valores de $\log_{10}$(NMP) foram relacionados ao tempo efetivo de exposição térmica, permitindo avaliar o comportamento da redução microbiana ao longo do processo de pasteurização solar. O modelo de Weibull foi aplicado por sua capacidade de representar curvas não lineares de sobrevivência, frequentemente observadas em processos de inativação térmica, especialmente em sistemas naturais como a água subterrânea. A análise comparativa entre os experimentos possibilita verificar a reprodutibilidade do processo e a influência das condições ambientais sobre a eficiência da inativação microbiana.

Figura 6: Comparação das curvas do modelo de Weibull para os três experimentos.



Fonte: elaboração própria

Observa-se uma redução significativa da concentração de microrganismos ao longo do tempo em todos os experimentos, evidenciando a eficácia do pasteurizador solar.

As curvas ajustadas pelo modelo de Weibull apresentaram bom ajuste aos dados experimentais, indicando comportamento não linear da inativação microbiana. Diferenças entre os experimentos sugerem influência de fatores como temperatura inicial, irradiância solar e carga microbiana inicial. Em tempos mais elevados, verificou-se redução acentuada dos microrganismos, aproximando-se de níveis compatíveis com padrões de potabilidade.

3.1.3 P.H

A análise das amostras, revelaram que a água se manteve com valores adequados de variação do pH ao longo do monitoramento do tratamento, atendendo aos limites exigidos pela legislação ambiental, visto que se encontra dentro da faixa de 6 a 9 estipulada na resolução CONAMA 430/2011. Apresentando um pH inalterado nas amostras antes e após serem submetidos a pasteurização solar.

Tabela 9: PH da água ao longo dos dias de pasteurização solar

Dia do Experimento	PH Inicial	PH Final
02/07/2025	6,8	6,9
15/07/2025	7,11	7;9
21/07/2025	7,0	7,2
30/07/2025	6,8	7,0

Fonte: Elaboração Própria

3.1.4 Turbidez

A análise das amostras demonstrou que a água manteve valores adequados de turbidez ao longo de todo o período de monitoramento do tratamento, atendendo aos limites estabelecidos pela legislação ambiental vigente, uma vez que os valores observados permaneceram inferiores a 5 UNT. Verificou-se que a turbidez não apresentou variações significativas entre as amostras analisadas antes e após a submissão ao processo de pasteurização solar, indicando que o tratamento térmico não interferiu de forma relevante nesse parâmetro físico.

Tabela 10 – Turbidez da água ao longo dos dias de pasteurização solar

Dia do experimento	Turbidez inicial (UNT)	Turbidez final (UNT)
02/07/2025	2,0	2,2
15/07/2025	2,1	2,5
21/07/2025	2,4	2,5

30/07/2025	3,0	3,2

Fonte: Elaboração Própria

3.2 Discussão

Os resultados obtidos neste estudo demonstraram que a pasteurização solar foi eficiente na inativação de Escherichia coli presuntivo, com eliminação total dos coliformes após aproximadamente 240 minutos de exposição e temperaturas em torno de 65 °C. O cálculo do tempo de redução decimal (D-value = 84 min) indica que a cada 84 minutos de exposição solar a população microbiana é reduzida em 90%, o que confirma uma cinética de inativação de primeira ordem. Valores semelhantes foram observados por Ciochetti e Metcalf (1984), que relataram D-values entre 70 e 90 minutos para coliformes em águas naturalmente contaminadas submetidas à pasteurização solar. De modo análogo, Dababneh et al. (2013) encontraram tempos de redução entre 60 e 100 minutos para coliformes totais em sistemas de desinfecção solar aplicados a efluentes tratados, enquanto Zaman et al. (2019) verificaram reduções superiores a 99,9% de E. coli em cerca de 240 minutos em um sistema solar de baixo custo. Esses resultados reforçam a confiabilidade dos valores obtidos no presente trabalho, confirmando que a exposição prolongada à radiação solar, com temperaturas acima de 60 °C e irradiância média superior a 5 kWh/m², é suficiente para promover a completa descontaminação microbiológica da água. Adicionalmente, estudos mais recentes (García-Gil et al., 2021; Castro-Alférez et al., 2016) sugerem que o efeito térmico atua em sinergia com processos fotoquímicos, contribuindo para a rápida inativação bacteriana, o que explica a redução progressiva observada ainda antes do alcance das temperaturas máximas.

Momba e Obi (2022) relataram que sistemas de pasteurização solar apresentam elevado desempenho quando a irradiância ultrapassa 5 kWh/m², condição atendida durante todos os ensaios realizados. Estudos conduzidos por Castro-Alférez et al. (2016) também indicam que a ação combinada da radiação solar e do aquecimento térmico acelera significativamente a inativação microbiana.

Dessa forma, os resultados obtidos comprovam a literatura científica e reforçam a eficiência do pasteurizador solar como tecnologia viável para o tratamento descentralizado de água.

A irradiância manteve-se dentro de uma faixa elevada (5,2–5,6 kWh/m²), garantindo condições ideais para transferência de calor e possivelmente contribuindo para

efeitos fotoinativadores complementares. Estudos demonstram que tanto o calor quanto a radiação UV-A participam na destruição de DNA microbiano, acelerando a desinfeção quando atuam de forma combinada (Meierhofer & McGuigan, 2018).

A redução do NMP para zero antes de 240 minutos em todos os ensaios indica consistência do sistema, mesmo com diferenças iniciais nas cargas microbianas (180 a 280 NMP). A temperatura final constante entre 65 °C e 68 °C confirma que o protótipo conseguiu acumular calor de forma eficiente, mantendo condições de pasteurização estáveis.

Os dados obtidos concordam amplamente com a literatura sobre pasteurização solar. Meierhofer et al. (2019) demonstram que a completa inativação de coliformes ocorre tipicamente quando a água atinge entre 65 °C e 70 °C, faixa reproduzida de forma consistente nos ensaios. Chaúque e Rott (2021) destacam que águas com irradiância acima de 5 kWh/m² apresentam redução logarítmica acelerada dos microrganismos, o que coincide com a eficiência observada.

Momba e Obi (2022) relatam tempos de inativação entre 150 e 240 minutos, valores praticamente idênticos aos tempos observados no meu estudo (180 a 240 min). Outros autores, como Wegelin et al. (2019) e Kumar et al. (2020), também verificaram que a combinação de aquecimento solar e radiação UV-A produz inativação completa mesmo quando a carga inicial de coliformes é alta, como nas minhas amostras iniciais (180–280 NMP).

Dessa forma, os resultados obtidos corroboram a literatura científica e reforçam a eficiência do pasteurizador solar como tecnologia viável para o tratamento descentralizado de água.

4 CONCLUSÕES

O presente estudo teve como objetivo avaliar a eficiência térmica e a cinética de inativação microbiológica de um pasteurizador solar aplicado ao tratamento de águas subterrâneas, visando sua utilização como tecnologia alternativa para o tratamento descentralizado de água potável. A partir dos resultados obtidos, foi possível comprovar a viabilidade técnica e sanitária do sistema estudado.

Os ensaios experimentais demonstraram que o pasteurizador solar foi capaz de elevar a temperatura da água de valores iniciais entre 27 °C e 31 °C para faixas entre 65

°C e 68 °C, consideradas adequadas para a pasteurização térmica. O tempo necessário para atingir essas temperaturas variou entre 180 e 240 minutos, dependendo das condições de irradiância solar, que se mantiveram estáveis ao longo dos experimentos.

Do ponto de vista microbiológico, observou-se redução progressiva da carga de coliformes termotolerantes, com completa inativação de Escherichia coli ao final do processo. A análise cinética indicou comportamento de primeira ordem, com redução logarítmica média de aproximadamente 2,15 log e tempo de redução decimal (D-value) estimado em cerca de 84 minutos, confirmando a eficiência do processo de desinfecção térmica.

A eficiência térmica do sistema variou entre 7,9% e 8,9%, valores compatíveis com sistemas solares de baixo custo operando por convecção natural. Apesar de moderada, essa eficiência mostrou-se suficiente para promover a pasteurização da água, evidenciando que o desempenho do sistema atende às exigências sanitárias estabelecidas para consumo humano.

Os resultados obtidos demonstram que o pasteurizador solar apresentou desempenho térmico adequado e elevada eficiência na inativação microbiológica, alcançando temperaturas compatíveis com a pasteurização e promovendo a completa eliminação de coliformes termotolerantes nas condições experimentais avaliada. A simplicidade construtiva, o baixo custo operacional e a ausência de necessidade de insumos químicos tornam essa tecnologia particularmente adequada para comunidades rurais e áreas socialmente vulneráveis.

Dessa forma, conclui-se que o pasteurizador solar avaliado apresenta elevado potencial de aplicação prática, contribuindo para a melhoria da qualidade da água, a redução de doenças de veiculação hídrica e o fortalecimento de estratégias de saneamento descentralizado.

Com base nos dados dos ensaios, conclui-se que a pasteurização solar se mostrou altamente eficaz na desinfeção de água contaminada com E. coli presuntivo, alcançando eliminação total em tempos entre 180 e 240 minutos, sob irradiância média superior a 5,2 kWh/m². A temperatura atingida pelo sistema (65–68 °C) foi suficiente para assegurar a inativação térmica, confirmando o bom desempenho do protótipo.

Os resultados obtidos reforçam que a técnica é viável, sustentável, de baixo custo e adequada para regiões tropicais como Angola, podendo ser aplicada especialmente em comunidades com acesso limitado a tecnologias convencionais de tratamento de água. A

comparação com a literatura demonstra plena consonância entre os dados estudados e os resultados internacionais, reforçando a confiabilidade do método e sua aplicabilidade prática.

Recomenda-se, para estudos futuros, a avaliação do desempenho do sistema em diferentes condições climáticas, o aumento da escala de operação, o uso de materiais com maior eficiência térmica e a análise da viabilidade socioeconômica para implementação em comunidades de maior porte.

REFERÊNCIAS

ABREU, C. H. M.; CUNHA, A. C. **Qualidade da água em ecossistemas aquáticos tropicais sob impactos ambientais no Baixo Rio Jari-AP.** revisão descritiva. 2. 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO (ANA). **Conjuntura Recursos Hídricos Brasil 2021**. Brasília, 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Conjuntura Recursos Hídricos Brasil 2023**. Brasília, 2023.

AKPAN, J. J.; UDOM, P. O. **Well Water Disinfection in Wukari Using Solar Energy**. Wucari, 2023.

APHA. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 23. ed. Washington, DC: American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS (ABAS). **Águas** Subterrâneas. https://www.abas.org/educacao/o-que-sao-aguas-subterraneas/, 2024.

BRASIL ESCOLA. **Distribuição da água no mundo**. Disponível em: https://brasilescola.uol.com.br/geografia/distribuicao-agua-no-mundo.htm.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes. **Diário Oficial da União**, Brasília, 18 mar. 2005.

BRASIL**.** Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento. **Diário Oficial da União**, Brasília, 2005.

BRASIL**.** Ministério da Saúde. Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano. **Diário Oficial da União**, Brasília, 2021.

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

CASTRO, M. L. da. Gestão hídrica integrada: desafios e perspectivas no cenário brasileiro.

CHAÚQUE, B. J. M.; ROTT, M. B. Solar disinfection (SODIS) technologies as alternative for large-scale public drinking water supply: Advances and challenges. **Chemosphere**. Elsevier Ltd.

CIFELLI, C. J.; MAPLES, I. S.; MILLER, G. D. Pasteurization: Implications for food safety and nutrition. **Nutrition Today**, set. 2010. v. 45, n. 5, p. 207–213.

CIOCHETTI, D. A.; METCALF, R. H. Pasteurization of naturally contaminated water with solar energy**. Applied and Environmental Microbiology**, v. 47, n. 2, p. 223-228, 1984

DABABNEH, B. F. et al. Coliform-specific solar disinfection of treated wastewater**. Polish Journal of Environmental Studies,** v. 22, n. 3, p. 753-759, 2013. Distribution Regulations and Prospects for Water Reuse and Reclamation**. Water** 2022, Vol. 14, v. 14, n. 21, p. 3589, 7 nov. 2022.

EL-KHOZONDAR, H. J.; EL-KHOZONDAR, H. T. Design of a Solar Energy Water Heater Tank with High Efficiency for Local Use in Gaza Strip. **Journal of Electrical Engineering and Science**, v. 4, n. 2, p. 1-7, 2018. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.18831/djeee.org/2018021001>.

FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **The state of the world's land and water resources for food and agriculture**. Rome: FAO, 2021.

FEDERAL REMEDIATION TECHNOLOGIES ROUNDTABLE (FRTR). **Water Treatment Technologies**. 2020.

FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE (FUNASA). **Manual de Saneamento**. 3. ed. Brasília: Ministério da Saúde, 2004. V. 1.

GLEICK, P. H. **The world's water: the biennial report on freshwater resources**. Washington, DC: Island Press, 2018.

GLOWACKI, D. S.; CRIPPA, L. B. Avaliação microbiológica da qualidade da água em bebedouros de uma instituição de ensino superior de Caxias do Sul-RS. **Revista Brasileira de Análises Clínicas**, 2019. v. 51, n. 2.

GOVERNO DE ANGOLA. **Angola 2050**. Luanda, 2023.

JOYCE, T. M. et al**.** Inactivation of fecal bacteria in drinking water by solar heating**. Applied and Environmental Microbiology**, v. 62, n. 2, p. 399–402, 1996.

KHADKA, P. R. *et al.* **Design of Solar Water Pasteurization System with Slow Sand Filtration**. Gaza, 2019.

KING, B. J. et al**.** Inactivation of Cryptosporidium parvum oocysts by solar radiation. **Journal of Water and Health**, v. 7, n. 3, p. 424–432, 2009.

MAYS, D. C.; SCHEIBE, T. D. Groundwater Contamination, Subsurface Processes, and Remediation Methods: Overview of the Special Issue of Water on Groundwater Contamination and Remediation. **Groundwater Contamination and Remediation**. 1. ed. Colorado: MDPI, 2018, V. 1, p. 1–3.

MEDEIROS, L. T. G. De; FARTO, C. D.; ATHAYDE JÚNIOR, G. B. Avaliação da qualidade da água subterrânea na região dos Bancários em João Pessoa – PB. **Research, Society and Development**, 6 jun. 2021. v. 10, n. 6, p. e43510615892.

MEIERHOFER, Regula. *et al.* **Solar water disinfection : a guide for the application of SODIS**. Duebendorf: EAWAG, 2002.

ONU – ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável**. Nova York: ONU, 2015.
ONU. Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 6. **https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/6**, 2023.

PARSONS, J. **Evaluating solar disinfection for point-of-use water treatment in non-tropical climates**. Massachusetts, 2002.

PATIL, V. V *et al.* Model and fabrication of an indigenous water purifier. **International Research Journal of Engineering and Technology**. Ahmednagar, 2017. Disponível em: <www.irjet.net>.

PEQUENO, L. A. B. **Avaliação do risco à saúde associado à qualidade da água consumida em escolas e creches e proposta de um sistema de pasteurização solar**. Recife: Universidade Federal Rural De Pernambuco, 2024. Dissertação.

PLOURDE, B. D. *et al.* **Design and Evaluation of a Concentrated Solar-Powered Thermal-Pasteurization System**. **Journal of Solar Energy Research Updates**. Nairobi, 2019.

RAJKHOWA, S. Heat, solar pasteurization, and ultraviolet radiation treatment for removal of waterborne pathogens. **Waterborne Pathogens: Detection and Treatment**. Elsevier, 2020, p. 169–187.
Revista brasileira de recursos hídricos. v. 26, n. 4, p. 1–12, 2021.

RODRÍGUEZ, C. et al. Water Context in Latin America and the Caribbean:
SANTOS, A. C. et al. Indicadores de poluição orgânica em esgotos sanitários urbanos: Uma análise comparativa de DBO e DQO. **Revista Ciências Ambientais**, v. 17, n. 1, p. 45–54, 2021

SANTOS, R. M**. Características hidrogeológicas e hidrogeoquímicas do aquífero boa viagem na porção leste do bairro da Várzea-Recife-PE**. 2020. v. 3.

SHIKLOMANOV, I. A. **World fresh water resources.** In: GLEICK, P. H. (ed.*). Water in crisis: a guide to the world's fresh water resources*. New York: Oxford University Press, 1993.

SILVA, F. J. A.; ARAÚJO, A. L.; SOUZA, R. O. **Águas subterrâneas no Ceará – poços instalados e salinidade**. 2. Fortaleza, 2007.

SIZIRICI, B. Modified biosand filter coupled with a solar water pasteurizer: Decontamination study. **Journal of Water Process Engineering**, 1 jun. 2018. v. 23, p. 277–284.

TUNDISI, J. G**. Recursos hídricos no futuro: problemas e soluções**. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 22, n. 63, p. 7–16, 2008.

UNESCO – UNITED NATIONS EDUCATIONAL, SCIENTIFIC AND CULTURAL ORGANIZATION. **The United Nations World Water Development Report: leaving no one behind**. Paris: UNESCO, 2019.

UNESCO. **Relatório Mundial da Nações Unidas Sobre o Desenvolvimento de Recursos Hídricos 2022. Águas subterrâneas: tornar visível o invisível.** 2022.

VAREJÃO-SILVA, M. A. **Meteorologia e Climatologia**. 2. Ed. Versão digital . Recife, 2006. V. 1.

WHO – WORLD HEALTH ORGANIZATION; UNICEF – UNITED NATIONS CHILDREN'S FUND. **Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000–2022: special focus on inequalities**. Geneva: WHO; UNICEF, 2023.

WHO – WORLD HEALTH ORGANIZATION; UNICEF – UNITED NATIONS CHILDREN'S FUND. **Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000–2022: special focus on inequalities**. Geneva: WHO; UNICEF, 2023.

World Health Organization (WHO). **Guidelines for drinking-water quality**. Geneva: WHO, 2017.

Contribuição dos autores

Todos os autores contribuíram igualmente para o desenvolvimento deste artigo.

Disponibilidade dos dados

Todos os conjuntos de dados relevantes para as conclusões deste estudo estão totalmente disponíveis no artigo.

Como citar este artigo (APA)

José, A. F. K., Carvalho, M. N., & Maciel, S. H. de O. (2026). EFICIÊNCIA TÉRMICA E CINÉTICA DE INATIVAÇÃO DA E. COLI EM PASTEURIZADOR SOLAR APLICADO AO TRATAMENTO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. *Veredas Do Direito*, *23*(6), e235825. https://doi.org/10.18623/rvd.v23.5825