

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

SILAS MODESTO DE MELO

**SATURAÇÃO E DECOMPOSIÇÃO DO OZÔNIO NA ÁGUA EM SISTEMA DE
MICROBOLHAS**

VIÇOSA – MINAS GERAIS

2024

SILAS MODESTO DE MELO

**SATURAÇÃO E DECOMPOSIÇÃO DO OZÔNIO NA ÁGUA EM SISTEMA DE
MICROBOLHAS**

Relatório final, apresentado a Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências para a obtenção do título de Engenheiro Agrícola e Ambiental.

Orientador: Ernandes Rodrigues de Alencar

Coorientadores: Marcus Vinícius de Assis

Silva

Eugénio da Piedade

Edmundo Siteo

VIÇOSA – MINAS GERAIS

2024


SILAS MODESTO DE MELO

**SATURAÇÃO E DECOMPOSIÇÃO DO OZÔNIO NA ÁGUA EM SISTEMA DE
MICROBOLHAS**


Relatório final, apresentado a Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências para a obtenção do título de Engenheiro Agrícola e Ambiental.

APROVADO: 06 de setembro de 2024.

Assentimento:

Documento assinado digitalmente
 **SILAS MODESTO DE MELO**
Data: 13/09/2024 20:36:18-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Silas Modesto de Melo
Autor

Documento assinado digitalmente
 **ERNANDES RODRIGUES DE ALENCAR**
Data: 19/09/2024 16:02:40-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Ernandes Rodrigues de Alencar
Orientador

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me dado sabedoria e discernimento, e por ter me iluminado em todos os momentos de dúvida e incerteza. Sua graça e misericórdia foram fundamentais ao longo desta jornada.

Aos meus pais, Maria do Rosário Arcanjo Melo e Estáquio Arcanjo de Melo, que me ensinaram a importância da disciplina, do esforço e da dedicação e me apoiaram em todas as escolhas que fiz durante minha jornada acadêmica. Seu exemplo de vida é minha inspiração e motivação para buscar sempre o melhor.

Aos meus irmãos, Sidineya, Sidiley, Irineia e Ítallo, e a toda minha família, que sempre estiveram ao meu lado e fizeram todos os esforços para que não desistisse diante os obstáculos.

Quero agradecer a minha namorada, Fernanda, que me apoiou incansavelmente em todas as fases dessa jornada. Seu carinho, apoio e incentivo foram fundamentais para que pudesse alcançar os meus objetivos.

Aos meus amigos, que sempre me encorajaram e me ajudaram a manter a motivação em momentos difíceis. As risadas e suas palavras de ânimo e incentivo foram fundamentais ao longo desses anos.

Ao meu orientador, Ernandes Rodrigues de Alencar, pela dedicação, compreensão e apoio. Aos meus coorientadores, Marcus Vinícius de Assis Silva e Eugénio da Piedade Edmundo Siteo, pela valiosa assistência nos procedimentos em laboratório.

À Universidade Federal de Viçosa, onde realizei meu curso, deixo meu sincero agradecimento por ter proporcionado um ambiente de aprendizado e crescimento. Minha gratidão também à Agrijúnior, ao PET-EAA e à SLC Agrícola, que desempenharam um papel fundamental na minha formação acadêmica e profissional.

“A melhor maneira de prever o futuro é criá-lo.” (Peter Drucker)

RESUMO

MELO, Silas Modesto de, Universidade Federal de Viçosa, setembro de 2024. **Saturação e decomposição do ozônio na água em sistema de microbolhas.** Orientador: Ernandes Rodrigues de Alencar. Coorientadores: Marcus Vinícius de Assis Silva e Eugénio da Piedade Edmundo Siteo.

A pandemia de COVID-19 impulsionou o uso de tecnologias baseadas no gás ozônio (O_3) para sanitização, devido ao seu alto potencial oxidativo e eficácia na inativação de microrganismos. Quando dissolvido em água, o ozônio se decompõe rapidamente, sendo influenciado por variáveis, como pH e temperatura. O uso do sistema de microbolhas aumenta a eficiência da incorporação do ozônio na água, ao ampliar a área de contato entre o gás e o líquido. Nesse contexto, objetivou-se com esse trabalho caracterizar o processo de saturação e decomposição do gás ozônio dissolvido em água destilada e em água da rede de distribuição, em diferentes temperaturas, utilizando um sistema de microbolhas. Foram realizadas análises de cloro residual livre, pH, condutividade elétrica e potencial redox das amostras de água, antes e após a ozonização. A concentração de entrada do O_3 foi de 10 mg L^{-1} , para os dois tipos de água. No que se refere às variáveis físico-químicas, não se verificou diferença significativa quando se compararam os valores obtidos antes e depois do processo de saturação, para os valores de pH e condutividade elétrica. Os valores médios de pH permaneceram na faixa de 5,27 a 5,66 para água destilada e entre 6,86 e 7,60 para água da rede de distribuição. A água destilada, como esperado, apresentou baixa condutividade elétrica, variando de $2,17 \mu\text{S cm}^{-1}$ a $3,14 \mu\text{S cm}^{-1}$, enquanto a água da rede de distribuição apresentou elevada condutividade elétrica, refletindo a presença de íons dissolvidos, variando de $100,69 \mu\text{S cm}^{-1}$ e $133,22 \mu\text{S cm}^{-1}$. Após a saturação, o potencial redox ultrapassou a 1999,0 mV para ambos os tipos de água, e o cloro residual livre aumentou significativamente. Para as temperaturas de 5, 15 e 25°C , a concentração de saturação do ozônio para água destilada foi de $4,60 \text{ mg L}^{-1}$, $2,95 \text{ mg L}^{-1}$ e $2,52 \text{ mg L}^{-1}$, com tempos de saturação de 16,50 min, 12,91 min e 14,00 min, respectivamente. Para a água da rede de distribuição, a concentração de saturação do ozônio foi de $3,35 \text{ mg L}^{-1}$, $2,70 \text{ mg L}^{-1}$ e $1,72 \text{ mg L}^{-1}$ e os tempos de saturação foram de 14,04 min, 10,04 min e 11,06 min, respectivamente. No processo de decomposição, nas temperaturas de 5, 15, e 25°C , para água destilada as meias-vidas do ozônio foram de 168,53 min, 96,55 min e

56,35 min, respectivamente. Para a água da rede de distribuição, as meias-vidas foram de 3,04 min, 2,67 min e 1,72 min, respectivamente. Concluiu-se que a concentração de saturação do ozônio é inversamente proporcional à temperatura, sendo maior em temperaturas mais baixas. As características físico-químicas da água influenciam o processo de ozonização, com a água destilada apresentando melhor desempenho em termos de saturação e estabilidade do ozônio, especialmente em temperaturas mais baixas.

Palavras-chave: Água Ozonizada. Tempo de Saturação. Concentração de Saturação. Meia-Vida

ABSTRACT

MELO, Silas Modesto de, Federal University of Viçosa, september 2024. **Saturation and decomposition of ozone in water in a microbubble system.** Adviser: Ernandes Rodrigues de Alencar. Co-advisers: Marcus Vinícius de Assis Silva and Eugénio da Piedade Edmundo Siteo.

The COVID-19 pandemic has boosted the use of technologies based on ozone gas (O_3) for sanitization, due to its high oxidative potential and effectiveness in inactivating microorganisms. Dissolved in water, ozone decomposes rapidly, being influenced by variables such as pH and temperature. The use of the microbubble system increases the efficiency with which ozone is incorporated into the water by increasing the contact area between the gas and the liquid. In this context, the aim of this work was to characterize the process of saturation and decomposition of ozone gas in distilled water and water from the distribution network, at different temperatures, using a microbubble system. Analyses of free residual chlorine, pH, electrical conductivity and redox potential were carried out on the water samples before and after ozonation. The O_3 input concentration was 10 mg L^{-1} for both types of water. With regard to the physicochemical variables, there was no significant differences were observed when comparing the values obtained before and after the saturation process for pH and electrical conductivity. The average pH values remained between 5.27 and 5.66 for distilled water and between 6.86 and 7.60 for water from the distribution network. The distilled water, as expected, showed low electrical conductivity, ranging from $2.17 \text{ }\mu\text{S cm}^{-1}$ to $3.14 \text{ }\mu\text{S cm}^{-1}$, while the water from the distribution network showed high electrical conductivity, reflecting the presence of dissolved ions, ranging from $100.69 \text{ }\mu\text{S cm}^{-1}$ to $133.22 \text{ }\mu\text{S cm}^{-1}$. After saturation, the redox potential exceeded 1999.0 mV for both types of water, and the free residual chlorine increased significantly. For temperatures of 5°C , 15°C and 25°C , the saturation concentration of ozone for distilled water was 4.60 mg L^{-1} , 2.95 mg L^{-1} and 2.52 mg L^{-1} , with saturation times of 16.50 min, 12.91 min and 14.00 min, respectively. For water from the distribution network, the saturation concentration of ozone was 3.35 mg L^{-1} , 2.70 mg L^{-1} and 1.72 mg L^{-1} and the saturation times were 14.04 min, 10.04 min and 11.06 min, respectively. In the decomposition process, at temperatures of 5, 15 and 25°C , for distilled water the ozone half-lives were 168.53 min, 96.55 min and 56.35 min, respectively. For water from the distribution network,

the half-lives were 3.04 min, 2.67 min and 1.72 min, respectively. It was concluded that the saturation concentration of ozone is inversely proportional to temperature, being higher at lower temperatures. The physicochemical characteristics of the water influence the ozonation process, with distilled water performing better in terms of ozone saturation and stability, especially at lower temperatures.

Keywords: Ozonated Water. Saturation Time. Saturation Concentration. Half-Life.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	MATERIAL E MÉTODOS	13
2.1	Local do experimento	13
2.2	Obtenção do gás ozônio.....	13
2.3	Características das amostras de água	13
2.4	Processo de ozonização da água	14
2.5	Processo de saturação do ozônio na água.....	14
2.6	Cinética de reação do ozônio na água	15
2.7	Análise estatística	16
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	17
3.1	Características da água	17
3.2	Processo de saturação do gás ozônio na água.....	21
3.3	Processo de decomposição do gás ozônio na água	24
4	CONCLUSÃO	30
	REFERÊNCIAS.....	31

1 INTRODUÇÃO

A pandemia de COVID-19, ocorrida entre março de 2020 e maio de 2023, trouxe consigo avanços recentes na utilização de diversas tecnologias baseadas em ozônio para a sanitização de superfícies, materiais e ambientes internos (EPELLE et al., 2023). Isso implicou na disseminação da aplicação do gás em diversas indústrias, abrangendo os setores alimentício, de tratamento de água, farmacêutico, têxtil e da saúde (LIMA et al., 2021). Além disso, diversos estudos têm avaliado o uso ozônio na preservação de produtos agrícolas da pós-colheita, devido à capacidade de eliminar microrganismos sem deixar resíduos químicos prejudiciais à saúde ao meio ambiente (ASLAM et al., 2020; ALVES et al., 2019; GONÇALVES-MAGALHÃES et al. 2024; SILVA et al. (2024); UZOMA et al., 2024).

O gás ozônio (O_3) é o segundo oxidante mais poderoso, possuindo um potencial oxidativo 1,5 vezes maior que o cloro (CUERDA-CORREA et al., 2019). Devido ao seu alto potencial oxidativo e à sua reatividade, pode inativar diversos microrganismos, com eficácia inclusive quando se adotam baixas concentrações e curtos tempos de contato (REZENDE et al., 2022). Há diversos relatos na literatura, em que foi comprovado que esse gás é capaz de inativar diversos grupos de microrganismos, tais como vírus, bactérias e fungos filamentosos e leveduriformes (ALENCAR et al., 2012; SOUZA et al., 2018; SCHROER et al., 2023; UZOMA et al., 2024). No processo de eliminação dos microrganismos, o ozônio provoca a oxidação de lipídios e proteínas e o rompimento e dispersão do citoplasma e de materiais genéticos como DNA e RNA (HUANG et al., 2024).

O ozônio pode ser aplicado na forma aquosa e dissolvido em água, sendo sua decomposição rápida influenciada por variáveis como pH, condições fluidodinâmicas, temperatura, radiação UV e a presença de compostos como carbono inorgânico e orgânico (GARDONI et al., 2012). A incorporação de ozônio na água pode ser realizada por meio de um sistema de geração de microbolhas, com tamanhos que variam de 1 a 50 μm (LIN et al., 2023). As microbolhas podem ser produzidas por fluxo turbulento, cisalhamento mecânico, dissolução pressurizada e geradores de microbolhas (JOHN et al., 2022). A produção de microbolhas de ozônio é uma tecnologia emergente com o objetivo de aprimorar a eficácia do tratamento com ozônio (CHU et al., 2007). Esse método se fundamenta no aumento da taxa de

transferência de massa do ozônio, alcançada ao aumentar a área de contato entre o gás e o líquido, através da redução do tamanho das bolhas (JOHN et al., 2023).

A temperatura e o pH da água exercem considerável influência tanto sobre o período de saturação do ozônio, quanto sobre a variação da concentração ao longo do tempo (GALDEANO et al., 2018). A concentração de ozônio dissolvido na água ozonizada é inversamente proporcional à temperatura dela, em que quanto menor a temperatura da água, maior é a solubilidade do ozônio (ASLAM et al., 2020). Embora o aumento da concentração de ozônio na água possa potencialmente melhorar a eficiência na descontaminação, outros fatores como o tempo de exposição, a natureza e a composição físico-química dos produtos também influenciam o processo (ALVES et al., 2019; CONTIGIANI et al., 2018; GONÇALVES-MAGALHÃES et al. 2024). Portanto, o controle dessas variáveis permite melhoria na eficiência dos tratamentos com o gás, além de contribuir para a redução dos custos elevados associados à produção de ozônio (RODRÍGUES-PEÑA, 2021).

O ozônio se destaca entre outras formas de tratamento por ser ligeiramente solúvel em água e esta característica constitui um fator crítico durante a ozonização, tendo em vista que o ozônio solúvel ou dissolvido pode contribuir à desinfecção (VON SONNTAG; VON GUNTEN, 2012). O gás se decompõe em soluções aquosas, resultando, em determinadas condições, em oxidantes secundários incluindo, principalmente, radicais hidroxila (OH⁻) (ELOVITZ et al., 2020; PIECHOWIAK et al., 2020). Dependendo das características do meio aquoso, a decomposição do ozônio varia e influencia a concentração do gás dissolvido (ASLAM et al., 2020).

Diante do exposto, é de suma importância que a geração de ozônio em sistema de microbolhas seja estudada. O estudo do processo de saturação e a determinação da cinética de reação do ozônio nesse sistema é essencial. Variáveis como pH, temperatura e composição da água devem ser consideradas, para que sejam determinadas condições de aplicação que sejam adequadas para as diversas aplicações, tais como controle de microrganismos, degradação de pesticidas (GARRIDO et al., 2023), dentre outros. Sendo fundamental para aprimorar a aplicação do ozônio na indústria, resultando em processos mais eficientes e sustentáveis.

Estudos anteriores demonstram a eficiência da água ozonizada em sistema de microbolhas na degradação de resíduos de pesticidas em maçã (LI et al., 2021),

morango, cereja e damasco (LI et al., 2024) e na desinfecção fúngica e bacteriana de alface (SILVA et al., 2024), sem afetar a qualidade físico-química dos vegetais ao longo do armazenamento. No entanto, ainda há muito a ser explorado sobre a cinética da reação do ozônio na água neste sistema.

Portanto objetivou-se com esse trabalho caracterizar o processo de saturação e cinética de reação do gás ozônio na água destilada e na água proveniente da rede de distribuição, em diferentes combinações de temperaturas, utilizando o sistema de geração de microbolhas.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Local do experimento

O trabalho foi conduzido no Laboratório de Pós-Colheita da Área de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas, do Departamento de Engenharia Agrícola (DEA), da Universidade Federal de Viçosa (UFV).

2.2 Obtenção do gás ozônio

O ozônio foi obtido por efeito corona por meio do gerador modelo M10i (myOzone, Jaguariúna, São Paulo, Brasil). Para produção do gás ozônio, foi utilizado um concentrador de oxigênio modelo EverFlo™ OPI 5LPM (Philips Respironics, Murrysville, Pensilvânia, EUA). O oxigênio fornecido pelo concentrador de oxigênio apresentava pureza de $90\pm 3\%$. A vazão volumétrica adotada no processo de ozonização foi de $1,0 \text{ L min}^{-1}$, aferida por medidor de vazão modelo MF5700 (Siargo Ltd, Chengdu, Sichuan, China). O método empregado na determinação das concentrações do ozônio foi o iodométrico, utilizando-se titulação indireta, conforme descrito por Eaton et al. (2005).

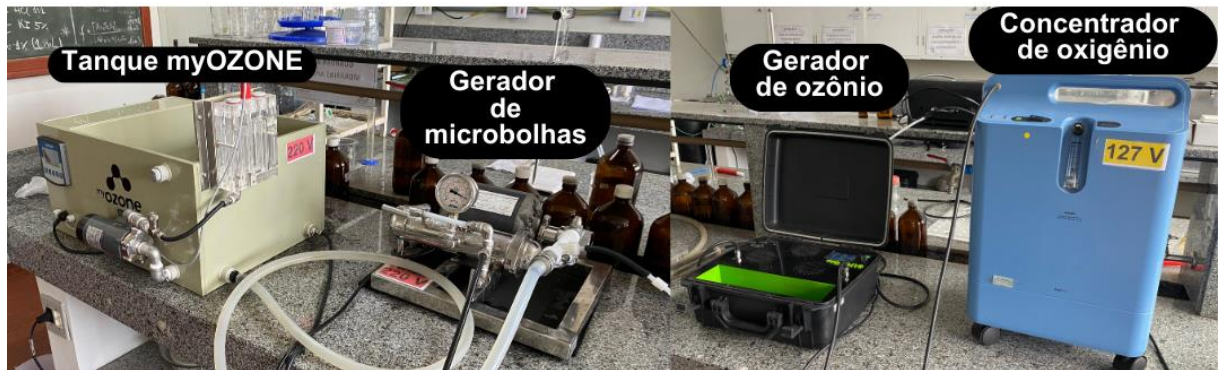
2.3 Características das amostras de água

Foram utilizadas amostras de água destilada e de água da rede de distribuição proveniente do Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Viçosa (SAAE), Viçosa, Minas Gerais. Amostras de água utilizadas foram previamente analisadas quanto ao cloro residual livre, pH, condutividade elétrica e potencial redox. A determinação de cloro residual livre foi realizada utilizando o método colorimétrico DPD (N, N-dietil-p- fenilenodiamina) (APHA; AWWA; WEF, 2012). O pH foi determinado em pHmetro digital portátil (K39-0014PA, KASVI, Brasil). A condutividade elétrica foi determinada utilizando-se condutivímetro (MCA-150,TECNOPON, Brasil). A determinação do potencial redox foi realizada utilizando-se o OPR/Redox Tester, com sensibilidade entre 0 a 1.999 mV (169E, Ningbo Sinotester Biological VO., Ltd).

2.4 Processo de ozonização da água

Para a ozonização da água (Figura 1), foi utilizado um tanque quadrado modelo myOZONE (Jaguariúna, São Paulo, Brazil) com capacidade para 30 L (53,0 cm comprimento x 19,5 cm largura x 26,5 cm altura). O tanque foi preenchido com 15 L de água. O processo de incorporação do ozônio na água foi realizado por um gerador de microbolhas modelo MB600® (myOZONE, Jaguariúna, São Paulo, Brasil) acoplado ao gerador de ozônio. A concentração de entrada do ozônio foi fixada em 10 mg L⁻¹. As temperaturas da água adotadas foram de 5, 15 e 25 °C.

Figura 1 - Processo de ozonização da água utilizando o sistema de geração de microbolhas



Fonte: Autor.

2.5 Processo de saturação do ozônio na água

Na avaliação do processo de saturação do ozônio, foi determinada a concentração do gás dissolvido na água, em intervalos regulares, adotando-se o método iodométrico, de acordo Eaton et al. (2005). A determinação da concentração do ozônio na água foi realizada até que se obtivesse concentração constante em três tempos de ozonização consecutivos. Em seguida, foi ajustada a equação sigmoideal de três parâmetros aos dados de concentração de ozônio dissolvido na água (Equação 1). Conhecendo-se as constantes b e c das equações sigmoideais, para cada uma das condições adotadas, foi possível obter os diferentes tempos de saturação (Equação 2) (OLIVEIRA et al., 2020).

$$C = \frac{a}{\left(1 + e^{-\left(\frac{t-b}{c}\right)}\right)} \quad (1)$$

$$t_{\text{sat}} = b + 2c \quad (2)$$

Em que:

C = Concentração do ozônio dissolvido na água (mg L^{-1});

t = Tempo (min);

a, b, c = constantes; e

t_{sat} = tempo de saturação (h).

2.6 Cinética de reação do ozônio na água

A cinética de reação do ozônio na água foi determinada a partir da obtenção da constante da taxa de decomposição (k) e da meia-vida do gás. Conhecendo-se os tempos de saturação, foi determinada a cinética de reação do ozônio na água. Inicialmente as amostras de água, nas diferentes condições de temperatura foram ozonizadas, adotando-se os diferentes tempos de saturação. Em seguida, a injeção de ozônio foi interrompida e a concentração residual do ozônio dissolvido na água foi determinada em intervalos regulares adotando-se o método iodométrico, de acordo Eaton et al., (2005), até que não fosse mais possível a quantificação do gás. Os modelos cinéticos de ordem zero, primeira ordem e segunda ordem foram ajustados aos dados de concentração residual do ozônio (Tabela 1) (WRIGHT, 2004).

Tabela 1 - Modelos de cinética de reação e respectivas equações linearizadas utilizadas para determinar a taxa de decomposição do ozônio e as respectivas meias-vidas

Ordem	Equações diferenciais	Equação integrada e linearizada	Meia-vida (min)
0	$\frac{dC}{dt} = -k$	$C = C_0 - kt$	$t_{1/2} = \frac{C_0}{2k}$
1	$\frac{dC}{dt} = -kC$	$\ln C = \ln C_0 - kt$	$t_{1/2} = \frac{\ln(2)}{k}$
2	$\frac{dC}{dt} = -kC^2$	$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_0} + kt$	$t_{1/2} = \frac{1}{kC_0}$

C – Concentração residual do ozônio na água (mg L^{-1}); k – Constante da taxa de decomposição (min^{-1}); t – tempo (min); e C_0 – Concentração inicial de ozônio (mg L^{-1}).

Fonte: Wright (2004).

O modelo cinético que melhor descreve a decomposição do ozônio na água foi aquele que apresentou maior coeficiente de determinação (R^2). Depois da definição do modelo cinético para a cinética de reação do ozônio, foram calculadas as meias-vidas para cada condição adotada no experimento.

2.7 Análise estatística

O experimento foi realizado em Delineamento Inteiramente Casualizado, com três repetições. O teste “t” de Student foi aplicado a 5% de significância para avaliação dos efeitos referentes às variáveis físico-químicas da água, antes e após a saturação. Todas as análises estatísticas foram realizadas por meio do software Spyder, versão 5.4.1 (Python 3.10.9).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Características da água

Apresentam-se, nas Tabelas 2 e 3, os valores médios referentes às variáveis físico-químicas da água destilada e da rede de distribuição, antes e após a saturação com ozônio em sistema de microbolhas, nas temperaturas de 5, 15 e 25°C. No que se refere ao pH, não verificou-se diferença significativa ($P > 0,05$), quando se compararam os valores obtidos antes e depois do processo de saturação, na água destilada e na água da rede de distribuição, nas diferentes temperaturas. Os valores médios de pH da água destilada permaneceram na faixa entre 5,27 e 5,66. Com relação à água da rede de distribuição, obtiveram-se valores entre 6,86 e 7,60.

O potencial redox é um indicativo da capacidade oxidante da água e tem uma relação direta com a eficiência da ozonização (REZENDE et al., 2021). Antes da saturação, a água destilada apresentou valores de 1043,50 mV a 5°C, 1092,17 mV a 15°C e 1041,67 mV a 25°C (Tabela 2). Após a saturação, o potencial redox atingiu valores superior a 1999,0 mV (limite máximo do equipamento). Comportamento semelhante foi observado na água da rede de distribuição (Tabela 3), que apresentou potenciais redox de 698,00 mV a 5°C, 770,33 mV a 15°C e 733,67 mV a 25°C antes da saturação, atingindo também o valor superior ao limite máximo do equipamento. Isso demonstra a principal característica do ozônio, que ao se dissolver na água, foi capaz de aumentar significativamente a capacidade de oxidação no meio (GUZEL-SEYDIM et al., 2004).

Tabela 2 - Variáveis físico-químicas da água destilada antes e após a saturação com ozônio em diferentes temperaturas, em sistema de microbolhas

Parâmetro	Água destilada 5 °C		Água destilada 15°C		Água destilada 25°C	
	Antes da Saturação	Depois da Saturação	Antes da Saturação	Depois da Saturação	Antes da Saturação	Depois da Saturação
pH	5,46 ± 0,15	5,66 ± 0,07	5,27 ± 0,09	5,46 ± 0,04	5,51 ± 0,64	5,49 ± 0,13
Potencial Redox (mV)	1043,50 ± 22,15	>1999,00	1092,17 ± 30,08	>1999,00	1041,67 ± 22,15	>1999,00
Condutividade Elétrica (µS cm⁻¹)	2,47 ± 0,32	2,66 ± 0,37	2,17 ± 0,20	2,57 ± 0,21	2,43 ± 0,29	3,14* ± 0,29
Cloro Residual Livre (mg L⁻¹)	0,02 ± 0,00	1,08* ± 0,03	0,025 ± 0,005	0,815* ± 0,049	0,07 ± 0,02	0,85* ± 0,02

* Diferença significativa pelo teste t de Student a 5% de probabilidade, quando comparado ao antes do processo de saturação.

Fonte: Autor.

Tabela 3 - Variáveis físico-químicas da água da rede de distribuição antes e após a saturação com ozônio em diferentes temperaturas, em sistema de microbolhas

Parâmetro	Água da rede de distribuição 5 °C		Água da rede de distribuição 15°C		Água da rede de distribuição 25°C	
	Antes da Saturação	Depois da Saturação	Antes da Saturação	Depois da Saturação	Antes da Saturação	Depois da Saturação
pH	7,60 ± 0,28	6,86 ± 0,70	7,36 ± 0,15	7,13 ± 0,14	7,31 ± 0,10	7,17 ± 0,02
Potencial Redox (mV)	698,00 ± 50,62	>1999,00	770,33 ± 52,73	>1999,00	733,67 ± 47,79	>1999,00
Condutividade Elétrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	101,4 ± 9,59	100,69 ± 8,03	112,17 ± 3,76	113,33 ± 3,12	133,22 ± 5,11	129,85 ± 5,26
Cloro Residual Livre (mg L⁻¹)	0,04 ± 0,03	0,74* ± 0,01	0,04 ± 0,01	0,74* ± 0,02	0,05 ± 0,01	0,66* ± 0,07

* Diferença significativa pelo teste t de Student a 5% de probabilidade, quando comparado ao antes do processo de saturação.

Fonte: Autor.

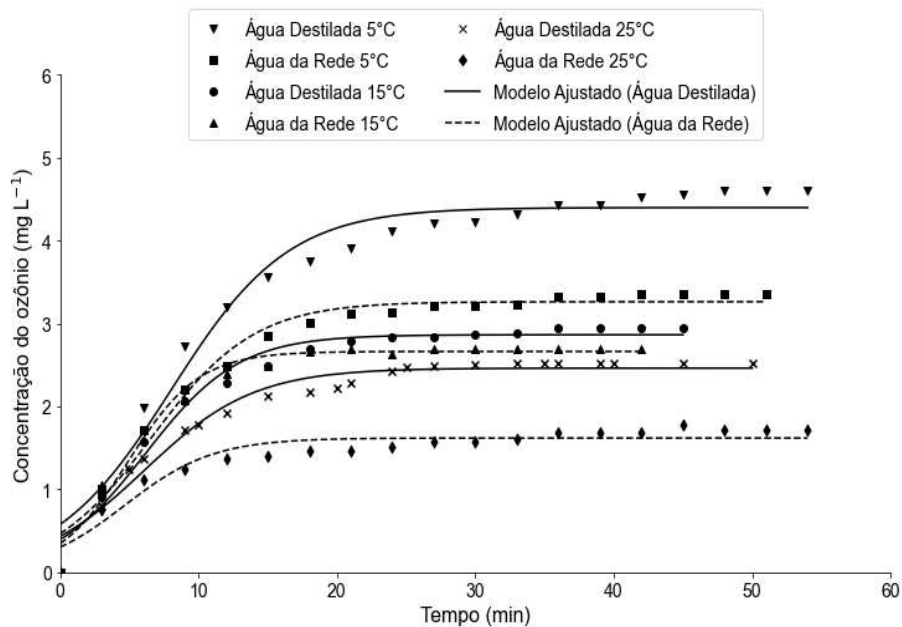
Em relação ao cloro residual livre, que representa a quantidade de cloro disponível na água, os valores antes da saturação foram $0,02 \text{ mg L}^{-1}$ a 5°C , $0,025 \text{ mg L}^{-1}$ a 15°C e $0,07 \text{ mg L}^{-1}$ a 25°C , na água destilada (Tabela 2). Após a saturação, esses valores aumentaram significativamente, atingindo $1,08 \text{ mg L}^{-1}$ a 5°C , $0,815 \text{ mg L}^{-1}$ a 15°C e $0,85 \text{ mg L}^{-1}$ a 25°C . Esses resultados, provavelmente, estão associados à interferência do ozônio dissolvido na quantificação do cloro residual livre na água, pela técnica adotada no presente estudo. Por outro lado, a água da rede de distribuição apresentou níveis de cloro residual livre maiores antes da saturação em relação a água destilada, como $0,04 \text{ mg L}^{-1}$ a 5°C , $0,04 \text{ mg L}^{-1}$ a 15°C e $0,05 \text{ mg L}^{-1}$ a 25°C devido à presença de cloro existente na água tratada (Tabela 3). Após a saturação, os valores de cloro residual livre aumentaram, mas de maneira menos expressiva do que na água destilada, atingindo $0,74 \text{ mg L}^{-1}$ a 5°C , $0,74 \text{ mg L}^{-1}$ a 15°C e $0,66 \text{ mg L}^{-1}$ a 25°C . De forma semelhante que na água destilada, é possível que o ozônio dissolvido na água tenha interferido na quantificação do cloro residual livre.

A condutividade elétrica é um indicador da presença de íons na água, sendo diretamente proporcional à quantidade de substâncias dissolvidas (PARRON et al., 2011). A água destilada, como esperado, apresentou baixos valores de condutividade antes da saturação, sendo $2,47 \mu\text{S cm}^{-1}$ a 5°C , $2,17 \mu\text{S cm}^{-1}$ a 15°C e $2,43 \mu\text{S cm}^{-1}$ a 25°C (Tabela 2). Após a saturação com ozônio, observou-se um aumento na condutividade, especialmente a 25°C ($3,14 \mu\text{S cm}^{-1}$). A água da rede de distribuição apresentou valores de condutividade elétrica significativamente mais altos, refletindo a presença de íons dissolvidos. Antes da saturação, os valores foram de $101,4 \mu\text{S cm}^{-1}$ a 5°C , $112,17 \mu\text{S cm}^{-1}$ a 15°C e $133,22 \mu\text{S cm}^{-1}$ a 25°C . Após a saturação, houve pequenas variações na condutividade, como um leve aumento a 15°C ($113,33 \mu\text{S cm}^{-1}$) e uma pequena redução a 5°C ($100,69 \mu\text{S cm}^{-1}$) e 25°C ($129,85 \mu\text{S cm}^{-1}$).

3.2 Processo de saturação do gás ozônio na água

Apresenta-se na Figura 2, a variação da concentração do ozônio dissolvido em função do tempo, para as águas destilada e da rede de distribuição, em diferentes temperaturas (5, 15 e 25°C), para concentração de entrada de O_3 de $10,0 \text{ mg L}^{-1}$ e vazão volumétrica de $1,0 \text{ L min}^{-1}$, em sistema de microbolhas. Na Tabela 4, tem-se as equações ajustadas que descrevem o processo de saturação do ozônio para os diferentes tipos de água e temperaturas.

Figura 2 - Concentração de ozônio em função do tempo para águas destilada e da rede de distribuição em diferentes temperaturas (5, 15 e 25°C), em sistema de microbolhas



Fonte: Autor.

Tabela 4 - Equações de regressão ajustadas para a concentração de ozônio durante o processo de saturação em diferentes temperaturas e tipos de água, em sistema de microbolhas

Tipo de água	Equação ajustada	T_{sat} (min)	C_{sat} (mg L⁻¹)	R²	EPE
Água da Rede de Distribuição 5°C	$C = \frac{3,26}{1 + e^{-\left(\frac{t-6,63}{3,70}\right)}}$	14,04	3,35	0,97	0,16
Água da Rede de Distribuição 15°C	$C = \frac{2,66}{1 + e^{-\left(\frac{t-4,90}{2,57}\right)}}$	10,04	2,70	0,97	0,14
Água da Rede de Distribuição 25°C	$C = \frac{1,62}{1 + e^{-\left(\frac{t-4,69}{3,19}\right)}}$	11,06	1,72	0,91	0,14
Água Destilada 5°C	$C = \frac{4,40}{1 + e^{-\left(\frac{t-8,02}{4,24}\right)}}$	16,50	4,60	0,97	0,24
Água Destilada 15°C	$C = \frac{2,86}{1 + e^{-\left(\frac{t-6,17}{3,37}\right)}}$	12,91	2,95	0,97	0,15
Água Destilada 25°C	$C = \frac{2,46}{1 + e^{-\left(\frac{t-6,10}{3,95}\right)}}$	14,00	2,52	0,96	0,14

t_{sat} – Tempo de saturação do ozônio; C_{sat} – Concentração de saturação do ozônio; R² - Coeficiente de determinação; EPE – Erro padrão da estimativa.

Fonte: Autor.

Os resultados obtidos no presente estudo quanto a saturação da água com ozônio (Figura 2) indicam tendência semelhante às curvas observadas por Galdeano et al. (2018). Em processos de saturação esse comportamento das curvas é esperado, pois, nos estágios iniciais do processo, a água possui uma alta capacidade de absorver ozônio, resultando em um aumento rápido na concentração. À medida que a água se aproxima da saturação, a capacidade de absorção diminui, e a taxa de dissolução do ozônio se torna mais lenta, estabilizando-se em um valor de concentração de saturação.

Os ajustes das curvas às equações sigmoidais, apresentados na Tabela 4, demonstram que o modelo utilizado descreve adequadamente o processo de saturação em todas as condições experimentais, com coeficientes de determinação (R²) variando de 0,91 a 0,97.

No presente trabalho, observou-se que os dois tipos de água utilizados (destilada e da rede de distribuição) responderam de maneira distinta ao processo

de saturação do ozônio. Esse comportamento pode ser evidenciado quando se comparam os tempos de saturação e as concentrações de saturação, conforme apresentados na Tabela 4.

Em todas as temperaturas analisadas, a água destilada apresentou concentrações de saturação superiores. A maior diferença foi observada a 5°C, em que a água destilada implicou em 4,60 mg L⁻¹. Por outro lado, a utilização de água da rede de distribuição acarretou em concentração de saturação de 3,35 mg L⁻¹, com diferença de 1,25 mg L⁻¹, em comparação com a água destilada. A 15°C, atingiu-se 2,95 mg L⁻¹ de ozônio na água destilada, enquanto a utilização de água da rede acarretou em 2,70 mg L⁻¹, ou seja, diferença de 0,25 mg L⁻¹. A 25°C, a diferença foi de 0,80 mg L⁻¹, com 2,52 mg L⁻¹ na água destilada e 1,72 mg L⁻¹ na água da rede de distribuição.

A água destilada possui menor pH e se caracteriza por uma baixa condutividade elétrica (Tabela 2), apresentando uma maior pureza, com mínima presença de íons dissolvidos. Essas características, como também observadas por Khadre et al. (2001) e Panebianco et al. (2022), favorecem maior capacidade de estabilização do ozônio, permitindo que a água destilada atinja concentrações de saturação mais altas, em comparação com a água da rede de distribuição.

Os tempos de saturação também diferiram entre os tipos de água. Na água destilada, o tempo de saturação foi de 16,50 minutos a 5°C, similar ao encontrado por Silva et al. (2024), que relatou um tempo de saturação de 18 minutos a essa mesma temperatura. Para as temperaturas de 15 e 25°C, os tempos foram de 12,91 minutos e 14,00 minutos, respectivamente. Para a água da rede de distribuição, os tempos foram menores, sendo 14,04 minutos a 5°C, 10,04 minutos a 15°C e 11,06 minutos a 25°C.

A temperatura influenciou o processo de saturação do ozônio em ambos os tipos de água. Na água destilada, a concentração de saturação foi de 2,52 mg L⁻¹ a 25°C para 2,95 mg L⁻¹ a 15°C (aumento percentual de 17,1%) e para 4,60 mg L⁻¹ a 5°C (aumento de 56,0%). O aumento percentual da concentração de saturação entre 25°C e 5°C foi de 82,7%. Na água da rede de distribuição, a concentração aumentou de 1,72 mg L⁻¹ a 25°C para 2,70 mg L⁻¹ a 15°C (57,4%) e para 3,35 mg L⁻¹ a 5°C (24,1%), resultando em um aumento percentual de 95,3% entre 25°C e 5°C.

O tempo de saturação apresentou uma tendência similar para ambos os tipos de água. A 5°C, o tempo de saturação foi de 16,50 minutos para a água destilada e 14,04 minutos para a água da rede de distribuição, representando os maiores tempos observados. A 15°C, os menores tempos foram registrados, sendo 12,91 minutos para a água destilada e 10,04 minutos para a água da rede de distribuição. Entre o menor e o maior tempo, houve um aumento percentual de 27,8% na água destilada e 39,8% na água da rede de distribuição. A 25°C, os tempos foram de 14,00 minutos para a água destilada e 11,06 minutos para a água da rede de distribuição.

Temperaturas baixas resultaram em tempos de saturação e concentrações de saturação maiores. Este comportamento foi similar aos resultados encontrados por Galdeano et al. (2018). O aumento na capacidade de dissolução do ozônio com a redução da temperatura pode ser atribuído a redução da energia cinética das moléculas de água, que contribui para retenção do ozônio dissolvido (LEVANOV et al., 2019).

3.3 Processo de decomposição do gás ozônio na água

Na Tabela 5, tem-se as equações de regressão ajustadas dos modelos cinéticos de ordem zero, primeira ordem e segunda ordem. As curvas de concentração residual do ozônio dissolvido na água em função do tempo são apresentadas na Figura 3 (A e B). Tem-se, na Tabela 6, as meias-vidas e equações de regressão ajustadas do modelo cinético que melhor descreve a decomposição do ozônio na água destilada e água da rede de distribuição á 5, 15 e 25°C.

Tabela 5 - Equações de regressão ajustadas para a concentração de ozônio durante o processo de decomposição em água destilada e água da rede de distribuição á 5, 15 e 25°C

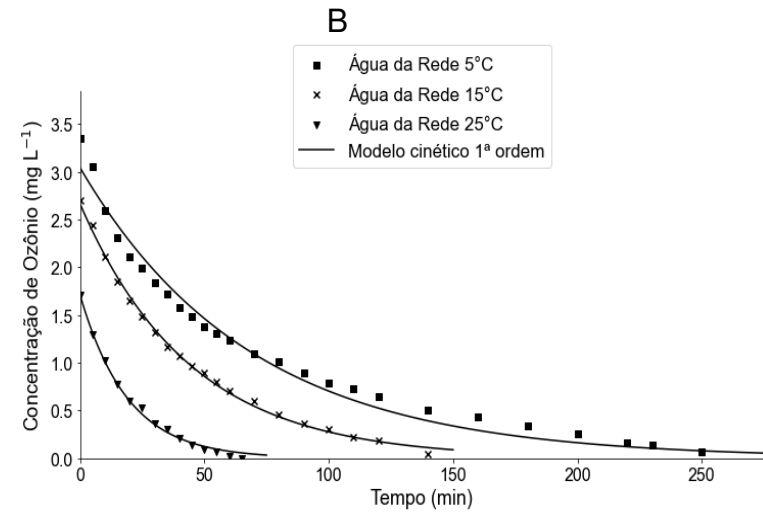
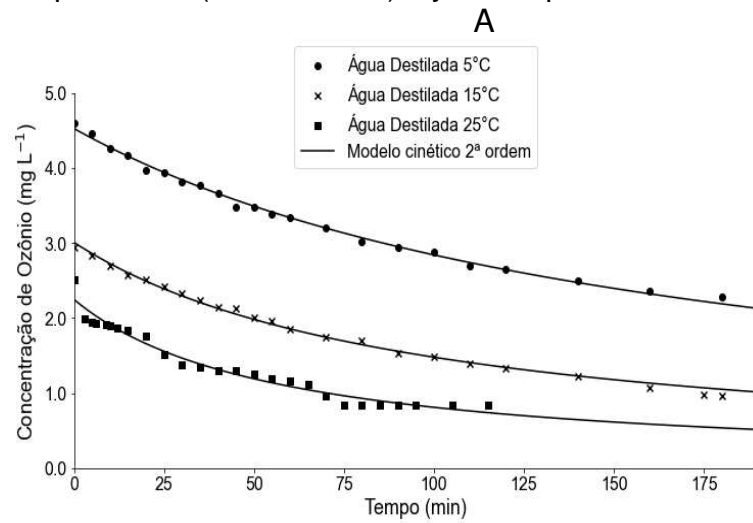
Água Destilada 5°C			Água Destilada 15°C			Água Destilada 25°C		
Ordem	Equação ajustada	R ²	Ordem	Equação ajustada	R ²	Ordem	Equação ajustada	R ²
0	$C = 4,24 - 0,0128t$	0,939	0	$C = 2,66 - 0,0106t$	0,949	0	$C = 1,98 - 0,0129t$	0,881
1	$\ln C = \ln(4,39) - 0,00423t$	0,977	1	$\ln C = \ln(2,85) - 0,00643t$	0,993	1	$\ln C = \ln(2,12) - 0,0106t$	0,942
2	$\frac{1}{C} = \frac{1}{4,52} + 0,00131t$	0,996	2	$\frac{1}{C} = \frac{1}{3,01} + 0,00344t$	0,995	2	$\frac{1}{C} = \frac{1}{2,25} + 0,00790t$	0,964

Água da Rede de Distribuição 5°C			Água da Rede de Distribuição 15°C			Água da Rede de Distribuição 25°C		
Ordem	Equação ajustada	R ²	Ordem	Equação ajustada	R ²	Ordem	Equação ajustada	R ²
0	$C = 2,23 - 0,0107t$	0,800	0	$C = 2,03 - 0,0176t$	0,857	0	$C = 1,27 - 0,0233t$	0,863
1	$\ln C = \ln(3,04) - 0,0146t$	0,982	1	$\ln C = \ln(2,67) - 0,0227t$	0,998	1	$\ln C = \ln(1,72) - 0,0525t$	0,996
2	$\frac{1}{C} = \frac{1}{3,48} + 0,00945t$	0,980	2	$\frac{1}{C} = \frac{1}{2,92} + 0,0162t$	0,955	2	$\frac{1}{C} = \frac{1}{1,82} + 0,0649t$	0,923

C – Concentração residual do ozônio na água (mg L⁻¹); t – tempo (min); R² - Coeficiente de determinação.

Fonte: Autor.

Figura 3 - Decomposição de ozônio em função do tempo para águas destilada (A) e da rede de distribuição (B) em diferentes temperaturas (5, 15 e 25°C), ajustado pelo modelo sigmoidal



Fonte: Autor.

Tabela 6 - Meias-vidas e equações de regressão ajustadas do modelo cinético que melhor descreve a decomposição do ozônio na água em diferentes temperaturas e tipos de água

Tipo de água	Ordem	Equação ajustada	C ₀ (mg L ⁻¹)	k (min ⁻¹)	Meia-vida (min)	R ²	EPE
Água da Rede de Distribuição 5°C	1	$\ln C = \ln(3,04) - 0,0146t$	3,04	0,0146	47,33	0,982	0,124
Água da Rede de Distribuição 15°C	1	$\ln C = \ln(2,67) - 0,0227t$	2,67	0,0227	30,59	0,998	0,0371
Água da Rede de Distribuição 25°C	1	$\ln C = \ln(1,72) - 0,0525t$	1,72	0,0525	13,20	0,996	0,0332
Água Destilada 5°C	2	$\frac{1}{C} = \frac{1}{4,52} + 0,00131t$	4,52	0,00131	168,53	0,996	0,0458
Água Destilada 15°C	2	$\frac{1}{C} = \frac{1}{3,01} + 0,00344t$	3,01	0,00344	96,55	0,995	0,0443
Água Destilada 25°C	2	$\frac{1}{C} = \frac{1}{2,25} + 0,00790t$	2,25	0,00790	56,35	0,965	0,0926

C – Concentração residual do ozônio na água (mg L⁻¹); k – Constante da taxa de decomposição (min⁻¹); t – tempo (min); C₀ – Concentração inicial de ozônio (mg L⁻¹); R² - Coeficiente de determinação; EPE – Erro padrão da estimativa.

Fonte: Autor.

Os resultados obtidos no presente estudo demonstraram que a decomposição do ozônio na água em sistema de microbolhas, tanto destilada quanto da rede de distribuição, segue uma tendência decrescente ao longo do tempo, conforme mostrado na Figura 3 (A e B). Essa redução da concentração é esperada, devido à instabilidade do ozônio em solução aquosa, onde reações de decomposição acontecem pela presença de íons e outras substâncias reativas na água (VON GUNTEN, 2003). Como observado na Tabela 6, os coeficientes de determinação, variando de 0,965 a 0,998, indicaram que o modelo cinético de primeira ordem fornece o melhor ajuste para os resultados da água da rede de distribuição e o modelo cinético de segunda ordem para a água destilada.

Na Figura 3A, as curvas demonstraram uma desaceleração mais gradual na decomposição do ozônio à medida que o tempo aumenta, especialmente a temperaturas mais baixas. Na Figura 3B, verifica-se uma decomposição mais rápida, especialmente nos primeiros minutos, antes de tender a estabilização.

Os diferentes tipos de água utilizados no experimento acarretaram em comportamentos distintos na decomposição do ozônio. A 5°C, a água destilada apresentou meia-vida do ozônio de 168,53 minutos (Tabela 6). Por outro lado, quando se utilizou a água da rede de distribuição obteve-se meia-vida menor, sendo equivalente a 47,33 minutos, resultando em uma diferença de 121,20 minutos. A 15°C, a diferença foi de 65,96 minutos, com a meia-vida de 96,55 minutos na água destilada e 30,59 minutos na água da rede. A 25°C, na água destilada, obteve-se meia-vida de 56,35 minutos, enquanto na água da rede de distribuição foi 13,20 minutos, resultando em diferença de 43,15 minutos.

Os resultados da taxa de decomposição, apresentados na Tabela 6, evidenciam a diferença na tendência de decomposição do ozônio entre os tipos de água. Os maiores valores da taxa de decomposição foram para a água da rede de distribuição, sendo $0,0146 \text{ min}^{-1}$, $0,0227 \text{ min}^{-1}$ e $0,0525 \text{ min}^{-1}$, para as temperaturas de 5, 15 e 25°C respectivamente, evidenciando que a decomposição do ozônio foi mais rápida do que na água destilada que obteve os menores valores, de $0,00131 \text{ min}^{-1}$, $0,00344 \text{ min}^{-1}$ e $0,00790 \text{ min}^{-1}$, para as temperaturas de 5, 15 e 25°C.

Conforme destacado por Gardoni et al. (2012), os resultados evidenciaram a influência significativa da composição química da água da rede de distribuição, que inclui íons e outras substâncias capazes de acelerar a decomposição do ozônio.

Além disso, os valores de pH mais elevados (Tabela 3) também possuem impacto relevante nesse processo.

De forma semelhante no observado no processo de saturação, a temperatura influenciou a decomposição do ozônio em ambos os tipos de água. Na água destilada, a meia-vida do ozônio reduziu de 168,53 minutos a 5°C para 96,55 minutos a 15°C, representando uma diferença percentual de 42,7%. A 25°C, a meia-vida foi de 56,35 minutos, tendo uma redução percentual de 41,6 %, em relação a 15°C. Considerando as temperaturas extremas de 5 e 25°C, a redução percentual total na meia-vida foi de 66,6%.

Tendência similar de comportamento foi observada na água da rede de distribuição. Entre as temperaturas de 5 e 15°C, a meia-vida reduziu de 47,33 minutos para 30,59 minutos, correspondendo a uma redução percentual de 35,4%. A 25°C, a meia-vida foi de 13,20 minutos, o que representa uma redução de 56,8% em relação a 15°C. Considerando as temperaturas de 5 e 25°C, a diferença percentual total na meia-vida foi de 72,1%.

A 25°C, a constante de decomposição do ozônio apresentou os maiores valores, sendo $0,0525 \text{ min}^{-1}$ para a água da rede de distribuição e $0,00790 \text{ min}^{-1}$ para a água destilada. Em contraste, a 5°C, os valores foram os menores observados, com $0,0146 \text{ min}^{-1}$ para a água da rede de distribuição e $0,00131 \text{ min}^{-1}$ para a água destilada.

Os resultados demonstraram uma redução na meia-vida do ozônio e um aumento na taxa de decomposição conforme a temperatura aumentava em ambos os cenários analisados. Como destacado no estudo desenvolvido por Epelle et al. (2022), este comportamento é consistente com a observação de que a estabilidade do ozônio é maior em temperaturas mais baixas, onde a resistência à decomposição é aumentada devido à estabilidade da molécula de ozônio.

4 CONCLUSÃO

A concentração de saturação e as meias-vidas de ozônio aumentaram na água destilada e na água da rede de distribuição à medida que a temperatura diminuiu. A água destilada apresentou maiores concentrações de saturação e meias-vidas do ozônio em comparação com a água da rede, evidenciando que as características físico-químicas da água influenciam no processo de saturação e decomposição do ozônio em sistema de microbolhas.

A ozonização com sistema de microbolhas pode ser utilizada para otimizar processos de desinfecção de frutas e vegetais, prolongando sua vida útil e reduzindo as perdas pós-colheita. Isso evita o uso de produtos químicos e minimiza resíduos, preservando a qualidade dos alimentos. Para estudos futuros, sugere-se investigar a viabilidade econômica de temperaturas mais baixas no processo de ozonização e explorar sua aplicação em outros tipos de águas, visando melhorar a eficiência e reduzir custos operacionais em larga escala.

REFERÊNCIAS

- ALVES, H.; ALENCAR, E. R.; FERREIRA, W. F. S.; SILVA, C. R.; RIBEIRO, J. L. Aspectos microbiológicos e físico-químicos de morango exposto ao gás ozônio em diferentes concentrações durante o armazenamento. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 22, p.1-12, 2019.
- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA); AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (AWWA); WATER ENVIRONMENT FEDERATION (WEF). **Standard methods for the examination of water and wastewater**. Washington, DC. v. 22, p. 1496, 2012.
- ASLAM, R.; ALAM, M. S.; SAEED, P. A. Sanitization potential of ozone and its role in postharvest quality management of fruits and vegetables. **Food Engineering Reviews**, v. 12, p. 48-67, 2020.
- CHU, L.; XING, X.; YU, A.; ZHOU, Y.; SUN, X.; JURCIK, B. Enhanced ozonation of simulated dyestuff wastewater by microbubbles. **Chemosphere**, v. 68, n. 10, p. 1854-1860, 2007.
- CONTIGIANI, E. V.; JARAMILLO-SÁNCHEZ, G.; CASTRO, M. A.; GÓMEZ, P. L.; ALZAMORA, S. M. Postharvest Quality of Strawberry Fruit (*Fragaria x Ananassa Duch* cv. Albion) as Affected by Ozone Washing: Fungal Spoilage, Mechanical Properties, and Structure. **Food and Bioprocess Technology**, v. 11, p. 1639-1650, 2018.
- CUERDA-CORREA, E. M.; ALEXANDRE-FRANCO, M. F.; FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ, C. Advanced Oxidation Processes for the Removal of Antibiotics from Water: An Overview. **Water**, v. 12, n. 102, p. 1-51, 2020.
- DE ALENCAR, E. R.; FARONI, L. R. D. A.; SOARES, N. D. F. F.; DA SILVA, W. A.; DA SILVA CARVALHO, M. C. Efficacy of ozone as a fungicidal and detoxifying agent of aflatoxins in peanuts. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 92, n.4, p. 899-905, 2012.
- EATON, A. D. **Standart methods for the examination of water and wastewater**. 21. ed. 2005.
- ELOVITZ, M. S.; VON GUNTEN, U.; KAISER, H. P. Hydroxyl radical/ozone ratios during ozonation processes. II. The effect of temperature, pH, alkalinity, and DOM properties. **Ozone: Science & Engineering**, v. 22, n. 2, p. 123-150, 2020.
- EPELLE, E. I.; MACFARLANE, A.; CUSACK, M.; BURNS, A.; AMAEZE, N.; RICHARDSON, K.; MACKAY, W.; RATEB, M. E.; YASEEN, M. Stabilisation of Ozone in Water for Microbial Disinfection. **Environmets**, v. 9, n. 45, p. 1-19, 2022.
- EPELLE, E. I.; MACFARLANE, A.; CUSACK, M.; BURNS, A.; OKOLIE, J. A.; MACKAY, W.; RATEB, M.; YASEEN, M. Ozone application in different industries: A

review of recent developments. **Chemical Engineering Journal**, v. 454, n. 2, p. 1-21, 2023.

GALDEANO, M. C.; WILHELM, A. E.; GOULART, I. B.; TONON, R. V.; FREITAS-SILVA, OTNIEL, GERMANI, R.; CHÁVEZ, D. W. H. Effect of water temperature and pH on the concentration and time of ozone saturation. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 21, p. 1-7, 2018.

GARDONI, D.; VAILATI, A.; CANZIANI, R. Decay of Ozone in Water: A Review. **Ozone: Science & Engineering**, v. 34, n. 4, p. 233-242, 2012.

GARRIDO, I.; MARTÍNEZ-ESCUADERO, C. M.; CONTRERAS, F.; FLORES, P.; HELLÍN, P.; DÍAZ-LÓPEZ, M.; BASTIDA, F.; FENOLL, J. Degradation of four pesticides by ozonation under field conditions and assessment of its influence on soil microbial activity. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 11, n. 3, p. 1-8, 2023.

GONÇALVES-MAGALHÃES, C.; FARONI, L. R. A.; ALENCAR, E. R.; RODRIGUES, A. A. Z.; CECON, P. R.; SILVA, M. V.; SITO, E. P. E.; MELO, C. E. L. D. Postharvest quality of lychee treated with ozone gas or ozonated mist. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 28, n. 12, 2024.

GUZEL-SEYDIM, Z. B.; GREENE, A. K.; SEYDIM, A. C. Use of ozone in the food industry. **LWT - Food Science and Technology**, v. 37, p. 453-460, 2004.

HUANG, H.; NI, Z.; XIE, J.; LI, Y.; WEN, H.; HUANG, Z.; SITU, W.; SONG, X. Good Feasibility of Ozone-Microwave Treatment as a Sterilization Technology to Extend the Edible Life of Candied Fruit as a Post-processed Fresh Fruit Product. **Food and Bioprocess Technology**, v. 17, p. 3086–3100, 2024.

JOHN, A.; CARRA, I.; JEFFERSON, B.; BERTOLASO, L.; BROOKES, A.; JARVIS, P. Enhancement of ozonation using microbubbles – Micropollutant removal, mass transfer and bromate formation. **Chemical Engineering Science**, v. 283, p. 1-11, 2023.

JOHN, A.; MAHATO, L. K.; DEVASHISH, K.; NAYAK, S.; JAVED, S. M.; SINHA, H. Comparison of misoprostol in conjunction with oxytocin and oxytocin alone for the prevention of postpartum hemorrhage during active management of the third stage of labor. **National Journal of Physiology, Pharmacy and Pharmacology**, v. 12, n. 10, p. 1682-1685, 2022.

KHADRE, M. A.; YOUSEF, A. E.; KIM, J.G. Microbiological Aspects of Ozone Applications in Food: A Review. **Journal of Food Science**, v. 66, n. 9, p. 1242-1252, 2001.

LEVANOV, A. V.; ISAIKINA, O. Ya.; LUNIN, V. V. Thermodynamic and Kinetic Parameters of the Solubility of Ozone in Water. **Russian Journal of Physical Chemistry A**, v. 93, n. 7, p. 1230–1234, 2019.

LI, C.; XIE, Y.; GUO, Y.; CHENG, Y.; YU, P.; QIAN, E.; YAO, W. Effects of ozone-microbubble treatment on the removal of residual pesticides and the adsorption mechanism of pesticides onto the apple matrix. **Food Control**, v. 120, p. 1-5, 2021.

LIMA, M. J. A.; FELIX, E. P.; CARDOSO, A. A. Aplicações e implicações do ozônio na indústria, ambiente e saúde. **Química Nova**, v. 44, n. 9, p. 1151-1158, 2021.

LIN, C.; CHEN, S.; LIN, Y.; HSIAO, C.; LIU, C.; HAZEENA, S. H.; WU, J.; HOU, C. Inactivating *Salmonella* Enteritidis on shell eggs by using ozone microbubble water. **International Journal of Food Microbiology**, v. 398, p. 1-11, 2023.

LI, X.; LIU, C.; LIU, F.; ZHANG, X.; CHEN, X.; PENG, Q.; WUB, G.; ZHAOB, Z. Substantial removal of four pesticide residues in three fruits with ozone microbubbles. **Food Chemistry**, v. 441, p. 1-9, 2024.

OLIVEIRA, J. M.; DE ALENCAR E. R.; BLUM, L. E. B.; FERREIRA, W. F. S BOTELHO, S. C. C.; RACANICCI, A. M. C.; LEANDRO, E. S.; MENDONÇA, M. A.; MOSCON, E. S.; BIZERRA, L. V. A. S.; SILVA, C. R. Ozonation of Brazil nuts: Decomposition kinetics, control of *Aspergillus flavus* and the effect on color and on raw oil quality. **LWT**, v.123, p. 1-9, 2020.

PANEBIANCO, F.; RUBIOLA, S.; DI CICCIO, P. A. The Use of Ozone as an Eco-Friendly Strategy against Microbial Biofilm in Dairy Manufacturing Plants: A Review. **Microorganisms**, v. 10, n. 162, p. 1-18, 2022.

PARRON, L. M.; MUNIZ, D. H. F.; PEREIRA, C. M. **Manual de procedimentos de amostragem e análise físico-química de água**. Colombo: Embrapa Florestas, 2011. 232 p.

PIECHOWIAK, T.; SKÓRA, B.; BALAWEJDER, M. Ozone treatment induces changes in antioxidative defense system in blueberry fruit during storage. **Food and Bioprocess Technology**, v. 13, p. 1240-1245, 2020.

REZENDE, A. J.; DE ALENCAR, E. R.; DE AGUIAR FERREIRA, M.; DE SOUZA FERREIRA. Control of *Listeria monocytogenes* in Refrigerated Ozonated Water. **Ozone: Science & Engineering**, v. 44, n. 3, p. 281-290, 2021.

RODRÍGUEZ-PEÑA, M.; PÉREZ, J. A. B.; LLANOS, J.; SÁEZ, C.; RODRIGO, M. A.; BARRERA-DÍAZ, C. E. New insights about the electrochemical production of ozone. **Current Opinion in Electrochemistry**, v. 27, p. 1-10, 2021.

SCHROER, I. A.; SILVA, J.; BROCHIER, B.; SILVA, P. R. S.; SILVA, S. B.; HANSEN, E. Study of ozone misting for sanitization of hospital facilities: A CFD approach. **Ozone: Science & Engineering**, v. 45, n. 3, p. 305-319, 2023.

SILVA, M. J.; DE ALENCAR, E. R.; FARONI, L. R. D.; SILVA, M. V. A.; MACHADO, S. G.; MAGALHÃES, C. G.; RIBEIRO, W. S.; MARTINS, A. H. R. Post-harvest quality of lettuce treated with ozonised water in a microbubble system. **New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science**, p. 1-18, 2024.

SOUZA, S. M. O.; DE ALENCAR, E. R.; RIBEIRO, J. L.; DE AGUIAR FERREIRA, M. Inactivation of *Escherichia coli* O157: H7 by ozone in different substrates. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 50, p. 247-253, 2019.

USEPA. U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Design manual: municipal wastewater disinfection**. Cincinnati. EPA-625/1-86/021. 1986.

UZOMA, S.; DE ALENCAR, E. R.; FARONI, L. R. D. A.; DE ASSIS SILVA, M. V.; SITO, E. D. P. E.; PANDISELVAM, R.; MACHADO, S. G. Association between low-temperature drying and ozonation processes to control pests and preserve maize quality. **Food Control**, v. 156, 2024.

VON GUNTEN, U. Ozonation of drinking water: Part I. Oxidation kinetics and product formation. **Water Research**, v. 37, p. 1443-1467, 2003.

VON SONNTAG, C.; VON GUNTEN, U. **Chemistry of ozone in water and wastewater treatment**. Lausanne. IWA publishing, 2012.

WRIGHT, M. R. **Experimental Procedures. Chap. 2 in An Introduction to Chemical Kinetics**, edited by John Wiley & Sons, Ltd. New York. 2004.