

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS - UFAM
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA - ICET
CURSO DE FARMÁCIA**

EVELYN PERLAYNE SERRÃO DA SILVA

TRATAMENTO FOTOCATALÍTICO DE ÁGUA CONTAMINADA COM *Escherichia coli* UTILIZANDO ELETRODOS NANOPOROSOS DE Ti/TiO₂

ITACOATIARA - AM

2024

EVELYN PERLAYNE SERRÃO DA SILVA

TRATAMENTO FOTOCATALÍTICO DE ÁGUA CONTAMINADA COM *Escherichia coli* UTILIZANDO ELETRODOS NANOPOROSOS DE Ti/TiO₂

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Farmácia da Universidade Federal do Amazonas (UFAM), como requisito para obtenção do título de Bacharel em Farmácia.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Fabiana Maria Monteiro Paschoal

ITACOTIARA – AM

2024

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

S586t Silva, Evelyn Perlayne Serrão da
Tratamento fotocatalítico de água contaminada com Escherichia coli utilizando eletrodos nanoporosos de Ti/TiO₂ / Evelyn Perlayne Serrão da Silva . 2024
46 f.: il. color; 31 cm.

Orientadora: Fabiana Maria Monteiro Paschoal
TCC de Graduação (Farmácia) - Universidade Federal do Amazonas.

1. Fotocatálise. 2. Escherichia coli. 3. tratamento de água. 4. TiO₂ - dióxido de titânio. I. Paschoal, Fabiana Maria Monteiro. II. Universidade Federal do Amazonas III. Título

EVELYN PERLAYNE SERRÃO DA SILVA

TRATAMENTO FOTOCATALÍTICO DE ÁGUA CONTAMINADA COM *Escherichia coli* UTILIZANDO ELETRODOS NANOPOROSOS DE Ti/TiO₂

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Farmácia da Universidade Federal do Amazonas (UFAM) como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Farmácia.

Este trabalho foi defendido e aprovado pela banca em 26/07/2024.

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Dr.^a Fabiana Maria Monteiro Paschoal - UFAM
Orientadora

Prof.^a Dr.^a Margarida Carmo de Souza - UFAM
Avaliador

Prof. Dr. Maxwell Adriano Abegg - UFAM
Avaliador

Dedico este trabalho aos meus pais, que
são exemplos de perseverança e força.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, por sempre me apoiarem; reconheço todos os seus esforços e sou muito grata por poder aproveitar tantas oportunidades graças a vocês.

À minha orientadora, Prof. Fabiana Paschoal, que confiou em mim desde a minha primeira iniciação científica, me incentivou e foi compreensiva e paciente durante toda essa jornada.

À Juliana Castro, Juliana Maia, Jamilly e ao Aldo, que além de me ajudarem na realização dos experimentos foram minha companhia durante horas em sábados, domingos e feriados.

Agradeço à FAPEAM pelo auxílio concedido para o desenvolvimento do projeto de Iniciação Científica, PIB-E/0078/2021, realizado de 2021 a 2022; ao ICET/UFAM pela infraestrutura e a FAPEAM PAINTER – Edital 003/2020 – Proc. 062.00792 pelo recurso financeiro.

Todos aqueles que diretamente ou indiretamente contribuíram para realização deste trabalho: professores, colegas e servidores do ICET/UFAM.

RESUMO

A contaminação da água por bactérias oferece risco à saúde da população e demonstra a necessidade da melhoria no processo de tratamento da água fornecida. A Fotocatálise tem sido estudada como tratamento de água para desinfecção e remoção de contaminantes, evitando o uso de reagentes e outros métodos que podem ser prejudiciais a longo prazo. Nesse sentido, há a necessidade de se avaliar os fotocatalisadores como o Ti/TiO₂ nanoporoso a fim de se obter a eficiência e melhoria na remoção de contaminantes pela fotocatalise. Desse modo, o objetivo do presente trabalho foi avaliar a aplicação do eletrodo de Ti/TiO₂ nanoporoso obtido pelo método de sol-gel e *dip-coating* na fotocatalise de água contaminada com *Escherichia coli*. A partir dos tratamentos realizados de 0 a 180 minutos, foram retiradas alíquotas para avaliação por espectroscopia em 600 nm, pela qual verificou-se 99% de remoção nos primeiros 30 minutos, enquanto na fotólise obteve-se 98% de remoção a partir dos 60 minutos. Esse resultado foi confirmado pelo crescimento em placas, pelo qual observou-se os efeitos do tratamento às colônias remanescentes.

Palavras-chave: Fotocatálise; *Escherichia coli*; tratamento de água; TiO₂.

ABSTRACT

Water contamination by bacteria addresses a threat to public health and indicate the quality in water treatment process. Photocatalytic processes have been reported as an efficient method to improve water disinfection and removal of other contaminants in water. Photocatalysts such as TiO_2 and others are evaluated to the improvement of the photocatalysis. Thus, this study discusses photocatalytic treatment of water contaminated with *Escherichia coli* using nanoporous Ti/TiO₂ as photocatalyst, which was obtained by sol-gel and dip-coating methods. The treatment was evaluated by sampling aliquots from 0 to 180 minutes and analyzing by spectroscopy at 600 nm. In the first 30 minutes, approximately 99% of removal was achieved, while photolysis achieved 98% after 60 minutes. These results were confirmed by bacteria growth on plates were the effects of the treatment on the remaining colonies were observed.

Keywords: Photocatalysis; TiO_2 ; *Escherichia coli*; water;

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Esquema da fotocatalise em TiO ₂	15
Figura 2 - Diagrama esquemático de paredes celulares (a) Gram-positivas e (b) Gram-negativas.....	18
Figura 3 - Representação esquemática de reator fotocatalítico de um compartimento.	22
Figura 4 - Curvas de fotocorrente-potencial obtidas para os eletrodos de Ti/TiO ₂ vs. Ag/AgCl em Na ₂ SO ₄ 0,1 mol.L ⁻¹ , pH = 7,0.	24
Figura 5 - Gráfico de tempo vs. absorbância da fotocatalise utilizando dois eletrodos.	25
Figura 6 - Gráfico de taxa de remoção de <i>E. coli</i> utilizando o eletrodo de nanoporos de Ti/TiO ₂	26
Figura 7 - Fotos das placas inoculadas com as alíquotas da suspensão bacteriana de <i>E. coli</i> em água submetidas ao tratamento fotocatalítico de 0 a 180 minutos.	27
Figura 8 - Fotos das placas inoculadas com <i>E. coli</i> sem tratamento em a) água e b) LB durante 180 minutos após 24h incubadas a 37°C.	29
Figura 9 - Gráfico absorbância vs. tempo comparativo dos tratamentos de fotólise e fotocatalise.	30
Figura 10 - Alíquotas da suspensão bacteriana de <i>E. coli</i> em água inoculadas em ágar submetidas ao tratamento fotolítico de 0 a 180 minutos.	31
Figura 11 - Gráfico de ln (A/A ₀) vs. tempo de fotocatalise da suspensão de <i>E. coli</i> em água com concentração inicial ajustada para 0,424 no comprimento de onda de 600 nm, fotocatalisada por 180 minutos utilizando os eletrodos de TiO ₂ nanoporosos. ...	32
Figura 12 - Gráfico de ln (A/A ₀) vs. tempo, se suspensão de <i>E. coli</i> em água e em caldo sem tratamento e com tratamento fotocatalítico e fotolítico. Concentração inicial ajustada por absorbância em 0,424 em 600 nm durante 180 minutos.	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Constantes de velocidade (k) para a suspensão de *E. coli* com concentração inicial ajustada em 0,424 no comprimento de onda de 600 nm para os diferentes estudos realizados por 180 minutos. R^2 = Coeficiente de correlação linear.
.....34

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>E. coli</i>	<i>Escherichia coli</i>
eV	Elétron-volt
H ⁺	Cátion Hidrogênio ou próton
OD	Densidade óptica
OH ⁻	Hidroxila
nm	nanômetros
POA	Processo Oxidativo Avançado
R	Coefficiente de correlação linear
TiO ₂	Dióxido de Titânio
UV	Ultravioleta
Vis	Visível
Vs.	Versus

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	REVISÃO DE LITERATURA	14
2.1	PROCESSOS OXIDATIVOS AVANÇADOS	14
2.2	FOTOCATÁLISE.....	14
2.3	ELETRODOS DE NANOPOROS DE DIÓXIDO DE TITÂNIO.....	17
2.4	CARACTERÍSTICAS GERAIS DA <i>ESCHERICHIA COLI</i> E APLICAÇÃO DA FOTOCATÁLISE PARA REMOÇÃO DE BACTÉRIAS	18
3	OBJETIVOS	20
3.1	OBJETIVO GERAL	20
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	20
4	METODOLOGIA	21
4.1	PREPARO DO FOTOELETRODO DE TI/TIO ₂ NANOPOROSO	21
4.2	PREPARO DA CEPA BACTERIANA E CONDIÇÕES DA CULTURA	21
4.3	TESTE DE FOTOATIVIDADE DOS ELETRODOS	22
4.4	TRATAMENTO FOTOCATALÍTICO	22
4.5	AVALIAÇÃO DO MÉTODO FOTOCATALÍTICO.....	23
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	24
5.1	ESTUDO DA FOTOATIVAÇÃO DOS ELETRODOS DE TI/TIO ₂ NANOPOROSOS	24
5.2	OXIDAÇÃO FOTOCATALÍTICA DA <i>E. COLI</i> EM ÁGUA UTILIZANDO OS ELETRODOS DE TI/TIO ₂ NANOPOROSOS	25
5.3	ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS MÉTODOS DE FOTOCATÁLISE E FOTÓLISE	29
5.4	ESTUDO DA VELOCIDADE DE DEGRADAÇÃO FOTOCATALÍTICA	31
6	CONCLUSÃO	36
	REFERÊNCIAS	37

1 INTRODUÇÃO

A qualidade da água é um fator fundamental para a saúde da população, uma vez que a aplicação do tratamento adequado auxilia na eliminação de patógenos como bactérias, vírus, protozoários e helmintos relacionados a doenças de veiculação hídrica, permitindo a prevenção e o controle de enfermidades como diarreias agudas, hepatites, leptospirose e outras (Brasil, 2006; Brasil, 2024; Viana *et al.*, 2022).

Nesse sentido, alguns parâmetros devem ser avaliados para atestar a qualidade da água para consumo humano a partir de características organolépticas, físico-químicas e microbiológicas (Brasil, 2021). Um dos indicadores utilizados trata-se da *Escherichia coli*, uma bactéria encontrada em fezes humanas e animais, de modo que sua detecção em amostras indica a deficiência nas condições de higiene e saneamento, o que pode também apontar a presença de outros microrganismos patogênicos (Matthiensen *et al.*, 2014).

Com o objetivo de eliminar os riscos de contaminações, a Portaria do Ministério da Saúde Nº 888, de 04 de maio de 2021 recomenda a aplicação do processo de cloração, um dos mais utilizados para a desinfecção de água. Entretanto, a adição de cloro à água pode causar danos à saúde, pois reage com compostos orgânicos presentes em solução gerando compostos com potencial carcinogênico, associados a câncer de intestino grosso, câncer de estômago, câncer retal e tórax (Meyer, 1994; Alvarenga, 2010).

Desse modo, se faz necessário o desenvolvimento de métodos alternativos capazes de realizar a descontaminação com eficiência, sendo um deles a fotocatalise heterogênea, que utiliza semicondutores e luz para gerar espécies reativas de oxigênio, que ao interagir com componentes orgânicos como os da parede celular bacteriana podem levar a morte celular (Nogueira; Jardim, 1998; Rizzo *et al.*, 2007). Um dos semicondutores mais utilizados é o dióxido de titânio (TiO₂) por apresentar alta fotoatividade, ser atóxico e de baixo custo, além de que suas diferentes morfologias e métodos de obtenção podem aumentar sua eficiência (Nogueira; Jardim, 1998; Navidpour *et al.*, 2023).

A fotocatalise heterogênea é um Processo Oxidativo Avançado (POA) que produz radicais hidroxilas e outras espécies reativas a partir da ativação de um semicondutor ou fotocatalisador pela luz, pois ao absorver fótons ocorre a promoção

de elétrons da banda de valência para a banda de condução, gerando um potencial positivo, que é capaz de quebrar moléculas de água adsorvidas na superfície do fotocatalisador para produzir OH^- e H^+ (Nogueira; Jardim, 1998).

Para a eficiência desses métodos, são verificados parâmetros como a concentração de oxidantes, a forma cristalina do TiO_2 , método de preparação, pH e temperatura; diante dessa avaliação, observa-se que muitas publicações demonstraram a eficiência da aplicação da fotocatalise utilizando o semiconductor citado para remoção de microrganismos e outras matérias orgânicas da água (Teixeira; Jardim, 2004; Gamage; Zhang, 2010).

Outros fatores fundamentais são a imobilização do semiconductor e a influência das características do meio reacional e da espécie a ser oxidada, visto que é necessário haver o contato entre a luz, as partículas do fotocatalisador e os microrganismos (Ribeiro, 2005).

A imobilização do TiO_2 é obtida através da obtenção da nanopartícula desse semiconductor, que possibilita a reutilização do eletrodo sem a perda de suas propriedades, e assim não requer etapas adicionais de remoção do TiO_2 , como ocorre quando é usado em suspensão (Nyamukamba *et al.*, 2016; Ameta *et al.*, 2018; Simon *et al.*, 2018).

Tendo em vista as vantagens da metodologia elencadas na literatura e a importância no desenvolvimento de alternativas para o tratamento de água, foi proposto neste trabalho o estudo da fotocatalise empregando o eletrodo de Ti/TiO_2 nanoporoso para remoção de *E. coli* da água.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 PROCESSOS OXIDATIVOS AVANÇADOS

Os processos oxidativos avançados têm como objetivo a formação de espécies reativas para reagir com um analito, modificando sua estrutura a partir de reações de oxidação, de forma que essa substância tenha sua toxicidade reduzida ou seja totalmente destruída (Comninellis *et al.*, 2008).

Nesse sentido, uma das principais vantagens associadas ao uso dos POAs é a degradação do contaminante, junto à possibilidade de sua associação a outros métodos, inclusive os convencionais e biológicos para otimizar todo o processo de remoção (Nascimento *et al.*, 2017). Os POAs aplicados ao tratamento de água e efluentes podem ser dos tipos químicos, fotoquímicos e eletroquímicos (Oturán; Aaron, 2014).

Os diferentes processos podem gerar agentes oxidantes como o radical alcoxila (RO^\cdot), ânion superóxido (O_2^\cdot) e, principalmente, o radical hidroxila (OH^\cdot), que é altamente oxidante (Saravanan, 2022). O radical hidroxila reage com o substrato por mecanismos de abstração de hidrogênio, adição e transferência de elétrons até que ocorra a mineralização completa em CO_2 , H_2O e ácidos minerais (Braun; Oliveros, 1997).

Devido a essa propriedade, aplicação dos POAs tem sido amplamente estudada para degradação de contaminantes como pesticidas, corantes, medicamentos e outras substâncias (Malato *et al.*, 2003; Paschoal; Anderson; Zanoni, 2009; Perondi *et al.*, 2020; Malakootian *et al.*, 2020; Sivaranjani *et al.*, 2023; Vinayagam *et al.*, 2024; Cordeiro *et al.*, 2024).

2.2 FOTOCATÁLISE

A fotocatalise pode ser definida como uma reação que se inicia ou tem cinética melhorada a partir de uma radiação eletromagnética, como a ultravioleta ou visível, incidida sobre um semicondutor ou fotocatalisador, responsável por absorver e

transformar a energia advinda da luz e os reagentes envolvidos na reação (Braslavsky *et al.*, 2011).

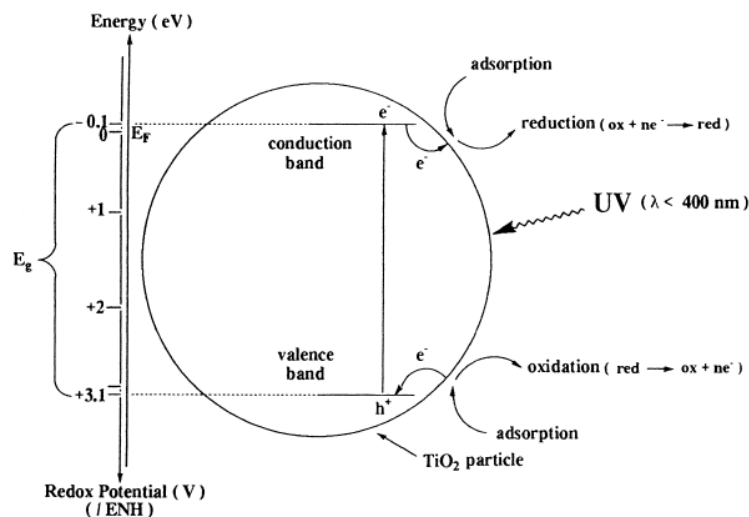
Os semicondutores são caracterizados pela separação entre as bandas, que ao ser irradiado, promove o fluxo de elétrons entre elas, formam pares de elétrons e lacunas com alta energia, causando sua condutividade elétrica (Kubacka; Fernández-García; Colón, 2012; Nascimento *et al.*, 2017).

A interação entre o semicondutor e o substrato pode ocorrer de quatro maneiras, a depender do equilíbrio, das estruturas eletrônicas e morfológicas do semicondutor e dos potenciais de redução dos substratos (Ramelli, 2021; Ameta *et al.*, 2018):

- Quando o potencial redox do substrato é menor que a banda de condução do semicondutor, ocorre a redução do substrato;
- quando o redox do substrato é maior que a banda de valência do semicondutor ocorre a oxidação do substrato;
- quando o redox do substrato maior que a banda de condução e menor que a banda de valência do semicondutor não ocorre reação;
- quando o redox do substrato é menor que o da banda de condução e maior que o da banda de valência pode ocorrer tanto a oxidação quanto a redução.

A Figura 1 demonstra um esquema da fotoativação do TiO₂, onde verificam-se as bandas de valência e a geração do elétron e da lacuna a partir da energia absorvida da irradiação ultravioleta.

Figura 1 – Esquema da fotocatalise em TiO₂.



Fonte: Herrmann (1999).

Na banda de valência, a geração de lacunas pode formar OH^- ou o OH^\bullet é formado pela decomposição da água; já a banda de condução leva à redução do oxigênio molecular a ânion peróxido, que na presença de moléculas orgânicas forma peróxidos orgânicos ou peróxido de hidrogênio (Ramelli, 2021).

Os semicondutores podem estar no meio reacional de dois modos: heterogêneo, quando o semicondutor se encontra em pó suspenso ou imobilizado em uma superfície, em fase separada da água ou outra solução; ou homogêneo, em que suas moléculas se encontram dissolvidas na solução (Zhu; Wang, 2017).

A fotocatalise homogênea apresenta uma desvantagem em relação à heterogênea, que se trata da etapa adicional para separação do semicondutor do meio após o tratamento (Zhou; Liu; Schmuki, 2017). Desse modo, o presente trabalho aborda a aplicação da fotocatalise heterogênea, utilizando o semicondutor imobilizado.

A fotocatalise heterogênea envolve cinco etapas independentes (Herrmann, 1999):

- 1) Os reagentes ou substratos são transferidos da fase fluida para a superfície do eletrodo;
- 2) Adsorção de pelo menos um dos substratos dependendo do potencial redox;
- 3) Reação na fase adsorvida;
- 4) Dessorção dos produtos;
- 5) Remoção dos produtos da região interfacial.

Para isso, parâmetros como concentração, área de superfície, intensidade da luz, comprimento de onda, estrutura do fotocatalisador, tamanho de partícula e outros devem ser avaliados para a eficiência da fotocatalise. Um exemplo está na alta concentração da substância a ser degradada que pode interferir na irradiação total de todos os sítios do semicondutor, prejudicando a fotoativação; assim como é necessário o estudo da concentração para evitar interferência na adsorção do substrato na superfície (Li; Yu; Jaroniec, 2016; Li, Yu, Jiang, 2020; Singh *et al.*, 2021).

A fim de otimizar os processos fotocatalíticos, muitos estudos têm investido na modificação do semicondutor, visando alterar junto da morfologia as propriedades relacionadas à atividade fotocatalítica como a área de superfície e conseqüente melhor captação da luz (Reghunath; Pinheiro; KR Devi, 2021).

2.3 ELETRODOS DE NANOPOROS DE DIÓXIDO DE TITÂNIO

O dióxido de titânio é normalmente encontrado nas formas cristalinas rutilo, anatase e *brookite* (Speight, 2017; Nogueira; Jardim, 1998).

A depender da estrutura do TiO_2 suas propriedades ópticas possuem particularidades no que se refere à absorção dos comprimentos de onda, principalmente na região do ultravioleta (UV), e energia de *band gap* (a banda de transição entre as outras bandas): a do rutilo é de 3,0 eV e a da anatase é de 3,2 eV (Gupta; Tripathi, 2011).

Essa absorção limitada a apenas uma região do espectro leva ao interesse na obtenção de estruturas do TiO_2 que melhorem as propriedades ópticas e elétricas que influenciam a atividade fotocatalítica (Ali *et al.*, 2018). Um dos métodos utilizados trata-se da síntese de nanoestruturas, baseando-se em justificativas como o aumento do *band gap*, da duração dos elétrons foto gerados e da área de superfície (Yu *et al.*, 2014).

Uma estrutura contendo poros conectados entre si, por exemplo, pode auxiliar na transferência do contaminante entre os sítios presentes nas superfícies e poros, melhorando a dissolução e a área de contato favorecendo a reação com as espécies reativas visto que ocorre um efeito de aprisionamento entre as partículas (Reghunath; Pinheiro; KR Devi, 2021; O'Hayre *et al.*, 2007).

Os nanoporos de TiO_2 podem ser sintetizados a partir de métodos como sol-gel, que envolve a dissolução de um precursor em um solvente posteriormente convertido em gel por calor ou agitação até a hidrólise, a depender das propriedades e aplicações desejadas (Bokov *et al.*, 2021). A deposição do gel é feita pelo processo denominado de "*dip-coating*", uma alternativa econômica e simples, que consiste na imersão do filme em uma superfície (Santiago, 2013). Essa é uma etapa crucial para a formação da nanopartícula, devendo-se considerar o tempo de mergulho da placa no gel para obtenção de comprimento e uniformidade do filme depositado (Ali *et al.*, 2018).

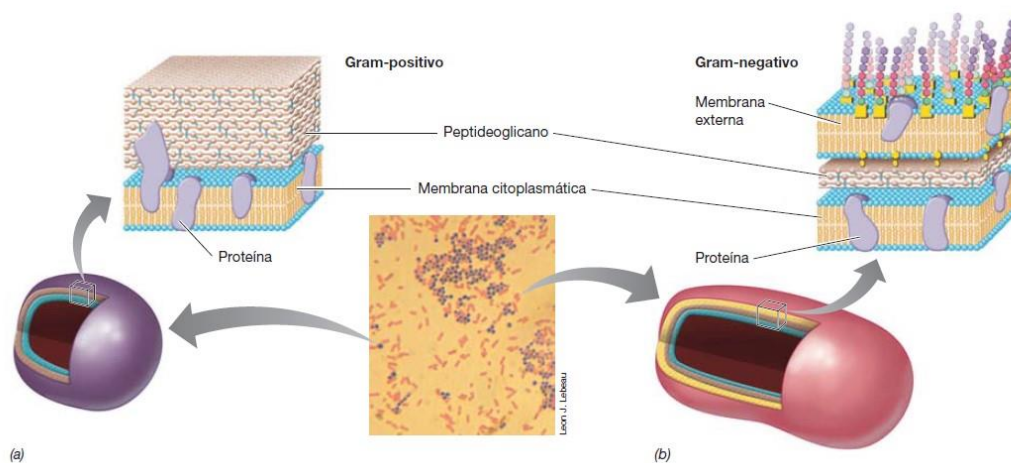
2.4 CARACTERÍSTICAS GERAIS DA *Escherichia coli* E APLICAÇÃO DA FOTOCATÁLISE PARA REMOÇÃO DE BACTÉRIAS

A *E. coli* pode ser encontrada residindo no intestino humano e animal como um comensal benigno, entretanto, algumas cepas da *E. coli* podem ser patogênicas e causar infecção grave seja intestinal como diarreia e disenteria, infecção urinária ou meningite (Kaper; Nataro; Mobley, 2004; Martinson; Walk, 2020; Ramos *et al.*, 2020).

Essa bactéria é classificada como Gram-negativa a partir da coloração de Gram, uma reação baseada na diferença de composição da parede celular e a capacidade de retenção do complexo formado pelo corante, desse modo, na observação por microscopia as células de *E. coli* apresentam-se em bacilos corados em rosa (Tortora; Funke; Case, 2012).

A principal diferença da parede celular de bactérias Gram-negativas se trata de uma fina camada de peptidoglicano, um polissacarídeo que confere rigidez à membrana, assim como a ligação entre essas moléculas constituintes também difere entre Gram positiva e negativa e entre espécies bacterianas (Madigan *et al.*, 2016). A Figura 2 apresenta as diferenças estruturais mencionadas entre uma bactéria Gram-positiva e uma Gram-negativa.

Figura 2 – Diagrama esquemático de paredes celulares (a) Gram-positivas e (b) Gram-negativas.



Fonte: Madigan *et al.* (2016).

Outra característica da *E. coli* é a sua motilidade oriunda dos flagelos, estruturas proteicas, que rotacionam para que a célula nade de um local a outro (Madigan *et al.*, 2016). Essa capacidade de locomoção da *E. coli* permite o seu crescimento, sobrevivência e resistência a antimicrobianos (Partridge *et al.*, 2019).

Tanto a membrana quanto a parede celular e outros componentes estruturais das células bacterianas são alvos das espécies reativas produzidas durante a fotocatalise. Carré *et al.* (2014) avaliaram os efeitos do uso de TiO₂ sob a luz UV em lipídios e proteínas de *E. coli*, e observaram que a depender do tempo de irradiação e da concentração do fotocatalisador ocorreu modificação principalmente nos conteúdos proteicos e lipídicos de membrana devido o contato direto com o TiO₂, porém, outras proteínas e ácidos nucleicos também foram oxidados.

As diferenças da citotoxicidade da fotocatalise para bactérias Gram-positivas e Gram-negativas pode ser observada por Ferreira e Daniel (2004), Ribeiro (2005) e Liu *et al.* (2021): o primeiro trabalho obteve limitação na aplicação da fotocatalise com TiO₂ para *Clostridium perfringens*, uma bactéria Gram-positiva que se mostrou mais resistente enquanto para *E. coli* o método de desinfecção foi mais eficiente. Já Ribeiro (2005) e Liu *et al.* (2021) avaliaram a resposta de *Staphylococcus aureus* e compararam com a inativação da *E. coli* e, da mesma maneira, verificaram que a primeira foi mais resistente à fotocatalise, visto que também se trata de uma bactéria Gram-positiva cujas camadas de peptidoglicano promovem espessura maior da parede celular, retardando a ação dos radicais oxidantes.

Por outro lado, Moreno *et al.* (2024) destacaram a necessidade de evidências quanto ao papel do peptidoglicano para a inativação microbiana, uma vez que os resultados obtidos apontaram a diferença nas taxas de inativação e a não linearidade entre os dois tipos de bactérias, no entanto, as bactérias Gram-positivas puderam ser eliminadas lentamente. Outro dado observado foi que tanto para Gram-negativas quanto para Gram-positivas a inativação se tornou mais lenta ao fim do tratamento, o que pode corresponder a uma adaptação da bactéria em resposta ao estresse ou competição entre os resíduos liberados pela lise celular para reagir com os radicais gerados.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

Realizar a desinfecção de água contaminada com *E. coli* a partir da aplicação de fotocatalise usando o eletrodo de Ti/TiO₂ nanoporoso.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Avaliar a eficiência da técnica de fotocatalise utilizando eletrodos de nanoporos de Ti/TiO₂ na oxidação da matéria orgânica presente na água contaminada com *Escherichia coli*.

Avaliar e comparar a remoção da *E. coli* na presença e ausência do eletrodo a fim de avaliar a eficiência da técnica.

4 METODOLOGIA

4.1 PREPARO DO FOTOELETRODO DE TI/TIO₂ NANOPOROSO

Placas de titânio foram recobertas com filmes de dióxido de titânio a partir de uma suspensão depositada por *dip-coating*, utilizando-se suspensão aquosa dialisada do óxido. Tais suspensões foram preparadas pelo processo sol-gel utilizando-se Tetraisopropóxido de titânio (Aldrich) que foi adicionado a uma solução de ácido nítrico em água deionizada (Milli-Q) de tal modo que a razão molar seguiu a seguinte relação: Ti: H⁺:H₂O – 1:0,5:200 conforme metodologia descrita por Paschoal *et al.* (2009).

Em seguida, o precipitado obtido foi agitado continuamente até a obtenção de uma suspensão estável e então dialisado com membrana Micropore (3500MW) em água deionizada até que o pH chegasse em torno de 3,5.

Para a confecção dos fotoeletrodos, foram utilizadas placas de Titânio. Inicialmente as placas foram submetidas a desgaste mecânico, utilizando lixas de granulometrias de 320, 220, 400, 800 e 1200; após isso, foram lavadas com acetona e depois, álcool etílico em banho de ultrassom, durante 20 minutos em cada e, então, lavadas com água destilada e levadas novamente para ultrassom por 20 minutos, e secas a temperatura ambiente.

O filme fino foi depositado imergindo as placas na suspensão do semicondutor e retirando-o a uma velocidade constante com auxílio de uma polia, método de *dip-coating*. Depois de seco a temperatura ambiente, o eletrodo foi calcinado a 450°C por três horas, completando um ciclo. Três ciclos (ou banhos) de *dip-coating* adicionais foram completados para que as placas estivessem prontas para uso.

4.2 PREPARO DA CEPA BACTERIANA E CONDIÇÕES DA CULTURA

As cepas de *E. coli* ATTC 25922 foram inoculadas em ágar Luria-Bertani, Miller (LB) e levadas à estufa por 24h a 37 °C. Para cada tratamento fotocatalítico as células bacterianas eram inoculadas em novas placas e incubadas nas condições citadas.

O preparo da suspensão era feito a partir de uma porção de uma ou mais colônias retiradas com alça bacteriológica e transferidas para água destilada

esterilizada até obtenção de concentração em aproximadamente 10^8 unidades formadoras de colônia (UFC)/mL, avaliada pela densidade óptica em 600 nm (OD_{600}), com auxílio de espectroscopia UV-Vis, conforme metodologia adaptada de Verdier *et al.* (2014).

4.3 TESTE DE FOTOATIVIDADE DOS ELETRODOS

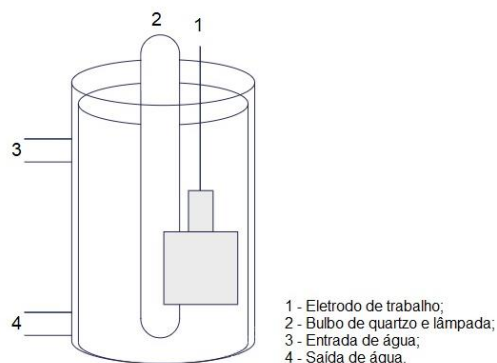
Os experimentos de fotoatividade do eletrodo de Ti/TiO₂ nanoporoso foram realizados utilizando voltametria linear, analisando a resposta do eletrodo no intervalo de potencial de -0,6 V a +1,0V, com velocidade de varredura de $10 \text{ mV}\cdot\text{s}^{-1}$.

O eletrólito utilizado foi uma solução de $0,1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ de Na₂SO₄, pH =7 na presença e na ausência de luz, aplicando o eletrodo como eletrodo de referência o Ag/AgCl.

4.4 TRATAMENTO FOTOCATALÍTICO

Os experimentos de fotocatalise foram realizados em célula com capacidade para 250 mL, com inserção dos eletrodos de trabalho, os Ti/TiO₂ nanoporosos de 3 e 4 ciclos, os quais foram posicionados a uma distância de 2 cm de um bulbo de quartzo, contendo a lâmpada de vapor de mercúrio de 125 W. A Figura 3 apresenta o esquema do reator fotocatalítico utilizado para os experimentos.

Figura 3 - Representação esquemática de reator fotocatalítico de um compartimento.



Fonte: elaboração própria.

O sistema foi refrigerado por banho termostatzado pela circulação externa de água e a temperatura mantida em 19°C.

A solução foi irradiada com a lâmpada e ficou em contato com o eletrodo, sendo agitada com agitador magnético durante os 180 minutos de tratamento fotocatalítico.

4.5 AVALIAÇÃO DO MÉTODO FOTOCATALÍTICO

Amostras de 0,1 ml foram retiradas periodicamente nos intervalos de tempo de tratamento controlados: tempo inicial (sem tratamento), após 5 minutos, 10 minutos, 15 minutos, 20 minutos, 30 minutos, 60 minutos, 90 minutos, 120 minutos, 150 minutos e 180 minutos. Cada amostra foi semeada em ágar nutriente utilizando a técnica de espalhamento em superfície com alça de Drigalski.

Imediatamente após a propagação, as placas foram incubadas a 37°C e as colônias observadas e contadas após 24h. Experimentos fotocatalíticos foram realizados em triplicata, para verificar a reprodutibilidade dos resultados.

O controle bacteriano consistiu em: controle da placa, contendo apenas o ágar LB, para verificar contaminação; a água que seria utilizada, para verificar a esterilidade; e o tempo 0, sendo a água inoculada com as colônias bacterianas para comparar o crescimento sem tratamento.

Além disso, alíquotas da solução em cada tempo foram submetidas às análises de espectroscopia UV-Vis e as absorbâncias obtidas, em 600 nm, foram anotadas para plotar os gráficos de velocidade cinética e porcentagem de remoção.

A fotólise foi realizada para comparar a eficiência da técnica de fotocátalise no qual somente a luz é inserida no reator sem o eletrodo de Ti/TiO₂.

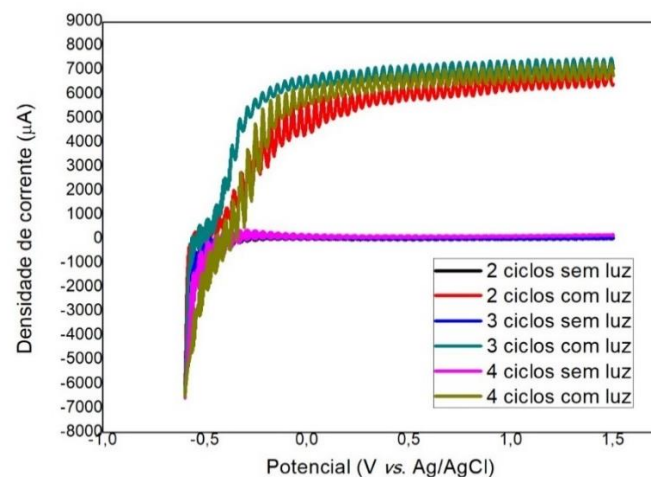
Uma solução sem tratamento foi realizada também, ou seja, a solução foi preparada e não foi submetida nem à fotólise nem à fotocátalise a fim de simular o que ocorre *in natura* com a água contaminada com *E. coli* ATTC 25922.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 ESTUDO DA FOTOATIVAÇÃO DOS ELETRODOS DE Ti/TiO₂ NANOPOROSOS

Os experimentos de voltametria linear foram conduzidos para caracterizar a fotossensibilidade dos eletrodos nanoporosos de Ti/TiO₂ obtidos pelo método sol-gel. A partir da curva de fotocorrente-potencial demonstradas na Figura 4 verificou-se que na ausência de luz a fotocorrente obtida foi negligenciável, enquanto com a exposição à radiação UV houve um aumento em potencial acima de -0,5 V vs. Ag/AgCl. Isso demonstra que durante a ausência de luz UV o eletrodo tem atividade como cátodo, enquanto na presença dela, sua função passa a ser de ânodo (Paschoal, 2008).

Figura 4 - Curvas de fotocorrente-potencial obtidas para os eletrodos de Ti/TiO₂ vs. Ag/AgCl em Na₂SO₄ 0,1 mol.L⁻¹, pH = 7,0.



Fonte: autora, 2024.

Além disso, observa-se que a corrente aumentou do eletrodo de 2 ciclos para o eletrodo de 3 ciclos, enquanto para o eletrodo de 4 ciclos não se obteve linearidade em relação à área de superfície do filme depositado e o número de ciclos realizados, indicando a ocorrência de gradientes de áreas ativas ou diferentes morfologias do TiO₂ presentes no filme; é possível que a maior espessura do filme formado diminua a fotocorrente devido a perda de contato elétrico com o substrato (a placa de Ti) (Kityakarn *et al.*, 2012).

Quando o filme é depositado em camadas mais grossas, a formação de radical hidroxila é reduzida em razão da profundidade onde as lacunas se encontram, de maneira que elas precisem chegar até a superfície para que as reações ocorram (Harrison *et al.*, 2003 apud Ribeiro, 2005).

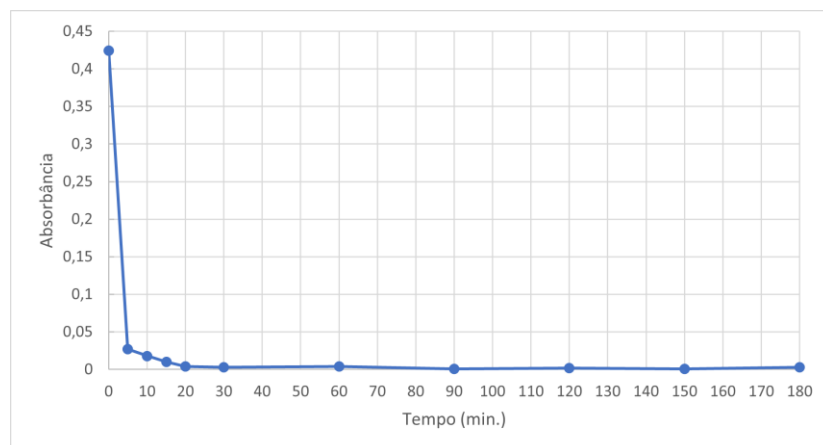
A curva referente ao 3º ciclo com luz apresentou a melhor fotoatividade, de modo que esse eletrodo foi o escolhido para as análises fotocatalíticas da água contaminada com *E. coli*.

5.2 OXIDAÇÃO FOTOCATALÍTICA DA *E. coli* EM ÁGUA UTILIZANDO OS ELETRODOS DE Ti/TiO₂ NANOPOROSOS

Os testes de fotocatalise foram realizados com suspensão bacteriana de *E. coli* ajustada para concentração de 0,424 (3×10^8 células/mL em OD₆₀₀) em água destilada autoclavada, de 0 a 180 minutos. Foram utilizados, como eletrodos de trabalho, os dois eletrodos de Ti/TiO₂ nanoporosos. O tempo de tratamento fotocatalítico foi de 180 minutos.

O gráfico representado na Figura 5 demonstra o decaimento nos valores de absorbância da *E. coli* no decorrer de 180 minutos de tratamento fotocatalítico. Nela, pode-se observar que a concentração de *E. coli*, inicialmente ajustada para 0,424 de absorbância sofre uma redução para 0,003 após os 30 minutos de tratamento fotocatalítico.

Figura 5 - Gráfico de tempo vs. absorbância da fotocatalise utilizando dois eletrodos.

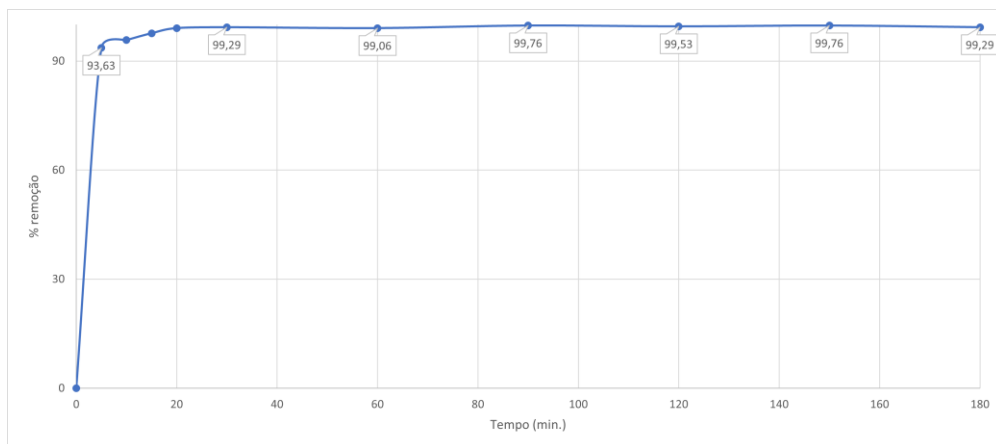


Fonte: autora, 2024.

O parâmetro para avaliar a eficiência do tratamento foi a absorvância correspondente a cada tempo, em que foi calculada a relação absorvância (Abs) final e absorvância inicial, conforme a Equação de remoção = $(Abs_{inicial} - Abs_{final}) \div Abs_{inicial} \times 100\%$ (Paschoal, 2008b).

A Figura 6 apresenta o percentual de remoção durante os 180 minutos de tratamento. Pode-se verificar que houve 99,29% de remoção da *E. coli* após 30 minutos, o que corrobora com a literatura, em que foi obtida redução aproximada de 99,9% e 100% em cerca de 20 a 40 minutos, a depender da modificação do eletrodo de TiO₂ e das condições experimentais (Carré *et al.*, 2014; Adhikari *et al.*, 2018; Kuliesiene *et al.*, 2020).

Figura 6 - Gráfico de taxa de remoção de *E. coli* utilizando o eletrodo de nanoporos de Ti/TiO₂.

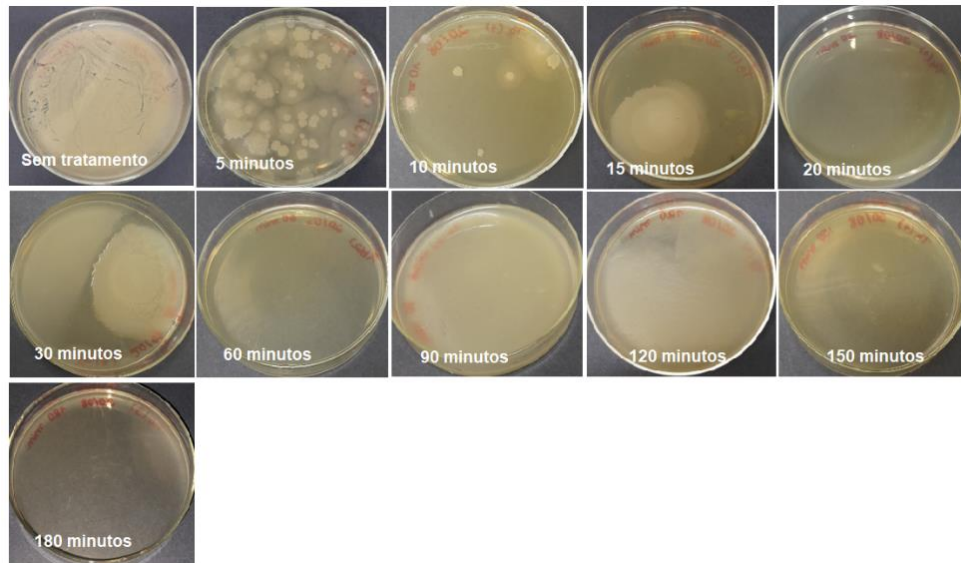


Fonte: autora, 2024.

A partir da inoculação em placas de cada alíquota correspondente aos tempos de tratamento, verificou-se as características das colônias advindas da suspensão submetida à fotocatalise nos mesmos intervalos de tempo.

O resultado expresso pela absorvância confirma o observado nas placas apresentadas na Figura 7, uma vez que se observa que a placa do tempo inicial demonstra um crescimento incontável de colônias bacterianas, enquanto as placas dos tempos sucessivos se têm redução para 7 unidades após 10 minutos, até nenhuma colônia correspondente aos 20 minutos, 60 minutos e 150 minutos e o crescimento discreto após 180 minutos.

Figura 7 - Fotos das placas inoculadas com as alíquotas da suspensão bacteriana de *E. coli* em água submetidas ao tratamento fotocatalítico de 0 a 180 minutos.



Fonte: autora, 2024.

Apesar de a cepa utilizada para os experimentos apresentar grande formação de biofilme em ágar LB, a amostra controle ou Tempo Inicial (T0) não apresentou o biofilme nas condições aplicadas (Crémet *et al.*, 2013; Naves *et al.*, 2008).

Foi possível perceber que o crescimento após os primeiros intervalos de tratamento passa a ter forma conhecida como coroa (*crowning*), melhor observada nos 15 e 30 minutos; essa ocorre quando os flagelos da bactéria não realizam suas funções adequadamente devido às condições do meio, ou seja, das espécies geradas pelo tratamento fotocatalítico tendo ação de inibição de crescimento ou inativação das células bacterianas a partir de alterações moleculares que aumentam a fluidez da membrana e comprometem a integridade celular (Gómez-Gómez; Amils, 2014; Carré *et al.*, 2014).

Outro dado poderia ser a ocorrência do *swarming*, um comportamento de migração em resposta a uma sinalização para alcançar nutrientes no meio ou escapar de espécies reativas de oxigênio (Neto; Pereira; Silva, 2020; Verstraeten *et al.*, 2008). Uma hipótese é que as bactérias passam a expressar genes em resposta às condições ambientais para que seja possível produzir proteínas de membrana a fim de manter a sua integridade e funcionalidade, assim como passam a produzir também as proteínas constituintes dos flagelos, responsáveis pela motilidade gerando seu transporte no meio de cultura (Zhang *et al.*, 2019).

É importante ressaltar que o efeito do tratamento em diferentes tempos pode não necessariamente destruir e/ou modificar a funcionalidade de proteínas, lipídios e outras moléculas importantes para a sobrevivência da *E. coli*, mas altera essas estruturas podendo induzir a produção de outras isoformas funcionais como mecanismo de resistência ao tratamento (Carré *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2019; Kearns, 2010; Marti *et al.*, 2017; Leung *et al.*, 2016).

Identifica-se ainda que apesar da diminuição, algumas culturas continuaram a apresentar crescimento, o que pode indicar a resistência da cepa ao tratamento ou a limitação nas metodologias aplicadas, como os fatores determinantes do sucesso da fotocátalise, da sensibilidade do meio utilizado para cultura e do mecanismo de geração bacteriano (Adhikari *et al.*, 2018; Sezonov; Joseleau-Petit; D'Ari, 2007).

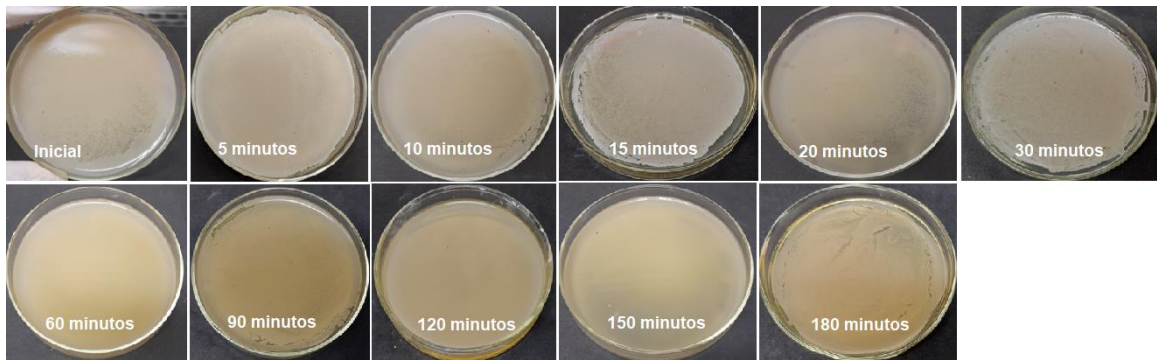
Um dos mecanismos de proteção da célula contra o estresse causado pelo tratamento é a produção de substâncias antioxidantes para reagirem com as espécies reativas produzidas na superfície do eletrodo durante a fotocátalise. Para garantir a efetividade do tratamento contra esses mecanismos e atingir a morte celular, seria necessário avaliar a produção de radicais hidroxilas para gerar um desequilíbrio entre as substâncias antioxidantes produzidas pela *E. coli* e as espécies reativas (Rockicka-Konieczna *et al.*, 2021).

A discordância visualizada entre a absorbância e a cultura em placa correspondente aos 15 minutos, 30 minutos, 90 minutos, 120 minutos e 180 minutos pode estar relacionada à capacidade de algumas bactérias de serem reativadas e retornarem ao seu metabolismo normalizado quando as condições ambientais são favoráveis ao crescimento bacteriano (Ribeiro, 2005; Oliver, 2010; Wang *et al.*, 2016).

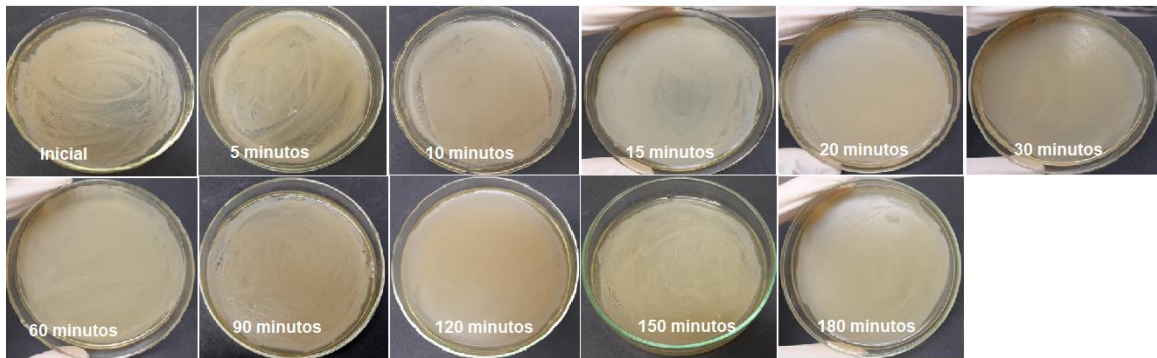
Diante disso, poderiam ser realizados testes para avaliar a viabilidade da *E. coli* pelo uso de Resazurina, que auxilia a determinar metabólitos bacterianos, assim, seria atestada a eficácia do tratamento após os 180 minutos de tratamento, como um método auxiliar à contagem em placas ou mesmo substituindo-a, já que pode ser mais simples e de custo menor que o uso de placas (Scimone *et al.*, 2021).

Entretanto, a avaliação do crescimento da *E. coli* em placas sem a sua submissão à fotocátalise auxiliou a considerar a eficiência do método, pois verificou-se o crescimento normal durante os 180 minutos contra a redução do crescimento após o tratamento fotocatalítico. Tanto para a suspensão em água, quanto para a inoculação no caldo LB apresentaram crescimento incontável nas placas, conforme pode ser visto na Figura 8.

Figura 8 - Fotos das placas inoculadas com *E. coli* sem tratamento em a) água e b) LB durante 180 minutos após 24h incubadas a 37°C.



a) Sem tratamento, em água.



b) Sem tratamento, em LB.

Fonte: autora, 2024.

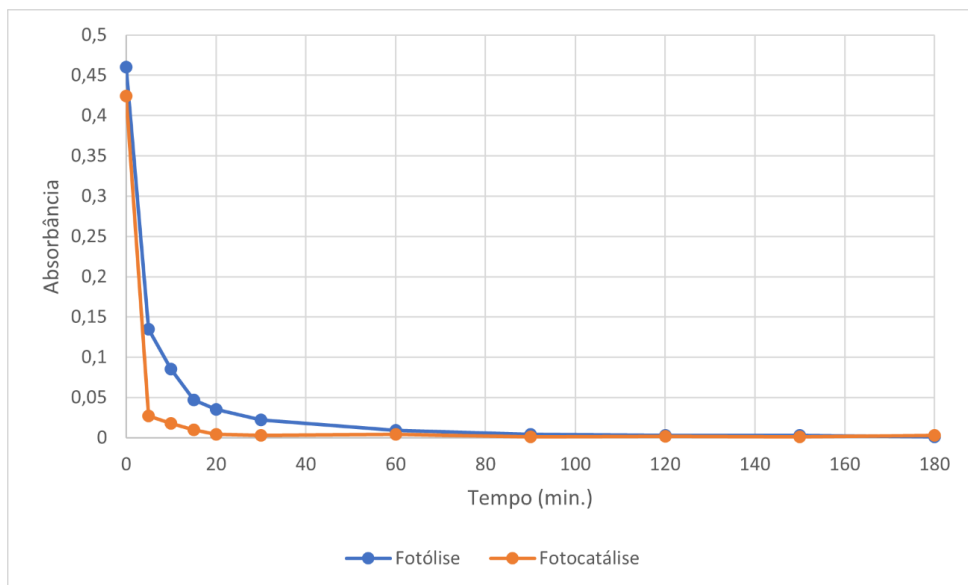
5.3 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS MÉTODOS DE FOTOCATÁLISE E FOTÓLISE

A fim de identificar a eficiência da fotocatalise utilizando os eletrodos de Ti/TiO₂, foram investigados o tratamento apenas com irradiação UV (fotólise) e o tratamento de fotocatalise irradiada, usando luz UV e o eletrodo de filme nanoporoso de Ti/TiO₂.

As alíquotas das soluções fotocatalisadas e fotolisadas foram retiradas em intervalos de tempo controlados e analisadas por espectroscopia UV-Vis no comprimento de onda de 600 nm, antes e após os 180 minutos de tratamento, para verificar e comparar o decaimento de absorbância, correspondente à concentração de *E. coli*, em relação ao tempo de reação.

Como pode ser observado na Figura 9, após os 5 minutos de tratamento fotocatalítico obteve-se cerca de 93,6% de remoção de *E. coli*, já para o processo fotolítico a remoção foi de 70,65% e, após 20 minutos de tratamento, observa-se aproximadamente 99% de remoção pelo processo fotocatalítico, enquanto o fotolítico levou cerca de 60 minutos para atingir 98% de remoção.

Figura 9 - Gráfico absorvância vs. tempo comparativo dos tratamentos de fotólise e fotocatalise.

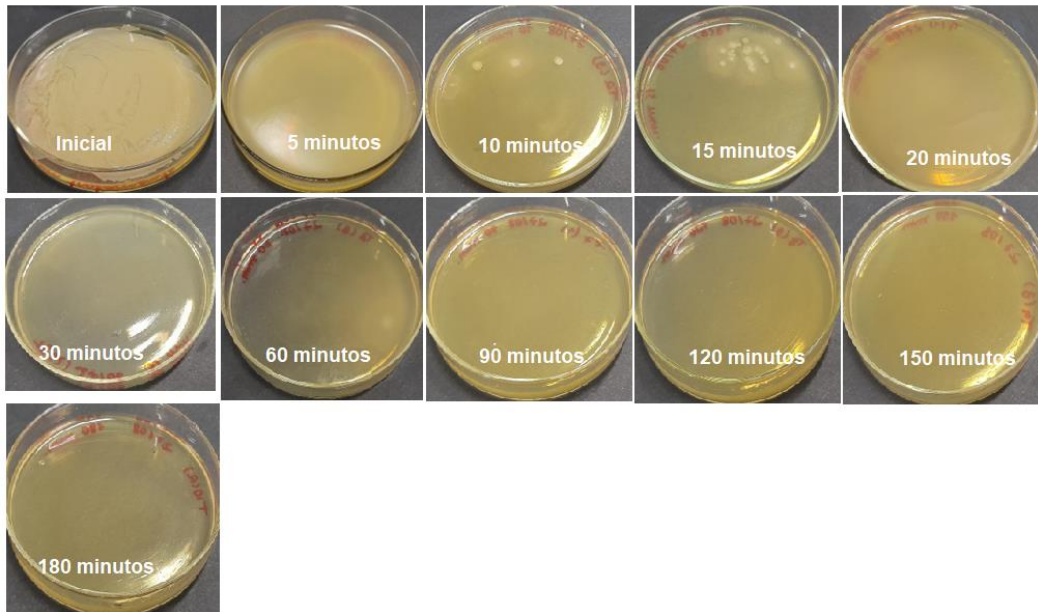


Fonte: autora, 2024.

A partir disso, identificou-se que a fotocatalise empregando os eletrodos de Ti/TiO₂ nanoporosos apresentou decaimento maior e em menor tempo quando comparado com a fotólise, o que correspondeu ao verificado por Rodrigues, Zioli e Guimarães (2007). Logo, o tratamento utilizando a luz e o semiconductor foi mais eficiente, principalmente nos primeiros minutos de tratamento.

O crescimento das alíquotas da suspensão de *E. coli* submetidas ao tratamento fotolítico demonstrou um padrão semelhante aos de outros testes; destaca-se a diferença na placa após 5 minutos de tratamento, em que comparado à fotocatalise, observou-se uma redução de colônias inferior, pois na fotocatalise foi possível visualizar colônias mais isoladas. A Figura 10 apresenta o resultado da inoculação das alíquotas nas placas.

Figura 10 - Alíquotas da suspensão bacteriana de *E. coli* em água inoculadas em ágar submetidas ao tratamento fotolítico de 0 a 180 minutos.



Fonte: autora, 2024.

Os resultados em placa mostram inibição no crescimento significativa a partir dos 30 minutos, em detrimento da capacidade da radiação UV sozinha ser letal à célula bacteriana (Vermeulen *et al.*, 2008; Shibai *et al.*, 2017). Observa-se também que as placas de 60 e 90 apresentaram novamente crescimento, enquanto as de 120 e 150 não, indicando que as células podem ter entrado em estado viável, porém não cultivável (Oliver, 2010).

5.4 ESTUDO DA VELOCIDADE DE DEGRADAÇÃO FOTOCATALÍTICA

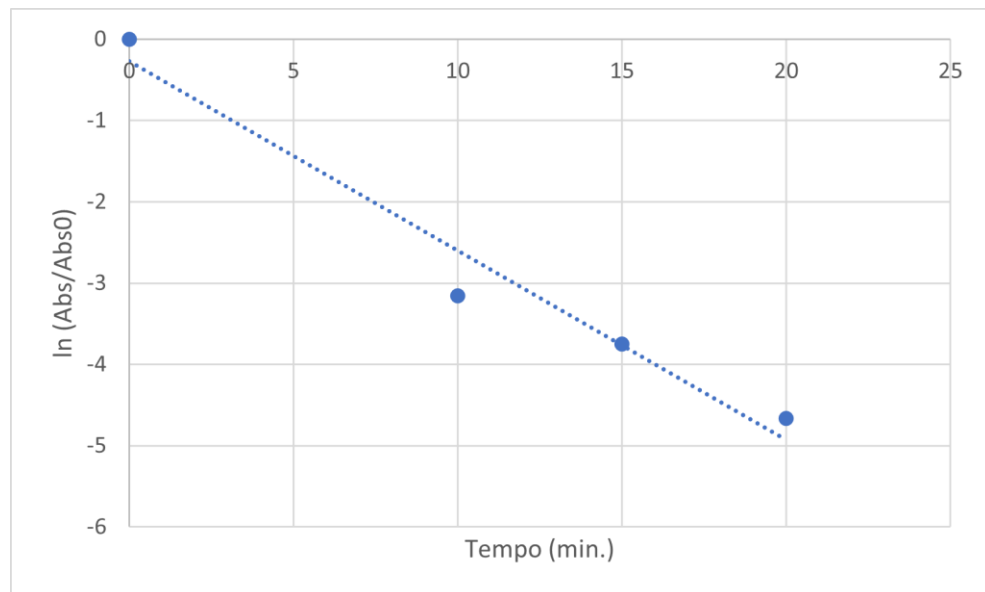
A cinética de degradação de *E. coli* em água foi determinada através da relação entre $\ln [A_t/A_0]$ vs. tempo de fotocatalise, onde os parâmetros foram o decréscimo da absorbância no comprimento de onda de 600 nm e os primeiros minutos de fotocatalise.

Observou-se um decaimento onde pode-se caracterizar uma cinética de pseudo-primeira ordem para a degradação da *E. coli* nas condições experimentais aplicadas (Atkins; Trapp, 1994), de acordo com a Equação 1:

$$\ln \left(\frac{A}{A_0} \right) = -kt \quad (1)$$

Onde A é a absorvância da solução de *E. coli* em água em um determinado tempo, A_0 é a absorvância inicial e k é a constante de velocidade da reação, como mostra a Figura 11.

Figura 11 - Gráfico de $\ln(A/A_0)$ vs. tempo de fotocatalise da suspensão de *E. coli* em água com concentração inicial ajustada para 0,424 no comprimento de onda de 600 nm, fotocatalisada por 180 minutos utilizando os eletrodos de TiO_2 nanoporosos.



Fonte: autora, 2024.

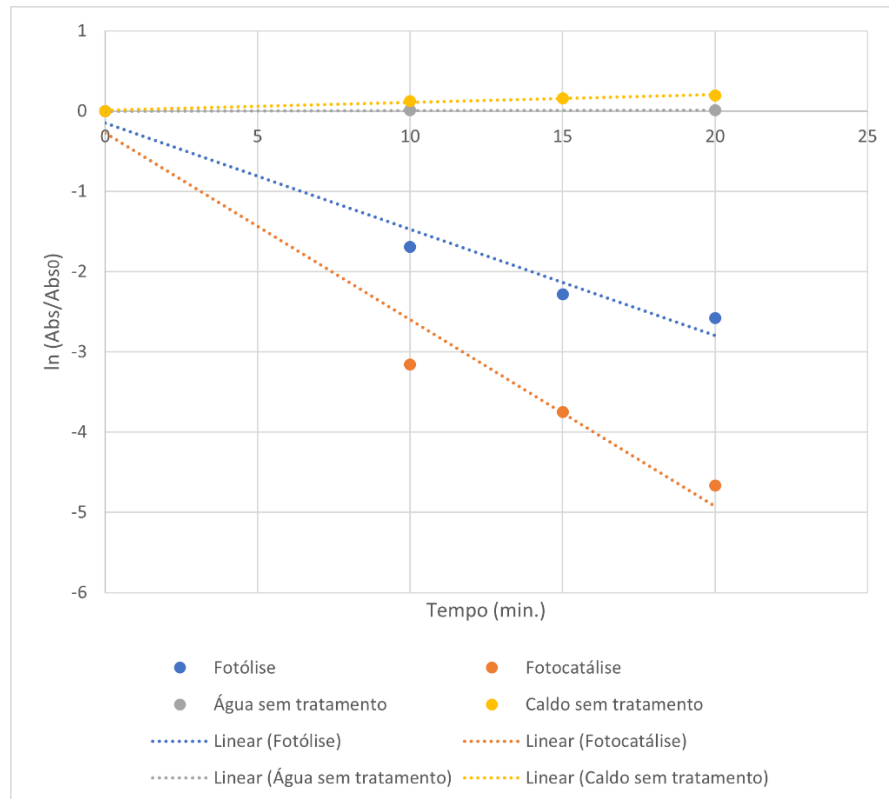
A partir destes dados, calculou-se que a constante de velocidade de oxidação fotocatalítica foi de 0,2327/min, com $R^2 = 0,963$. Segundo a literatura, a equação pode ser utilizada para comparar a eficiência da oxidação, entretanto, ressalta-se que para isso a taxa de remoção deveria ser constante durante todo o procedimento (Marugán *et al.*, 2008).

Segundo algumas avaliações, a inativação das células bacterianas pode não apresentar linearidade no início do tratamento, quando as bactérias são eliminadas lentamente (Moreno *et al.*, 2024). Por outro lado, o contrário pode ser verdadeiro, ou seja, a taxa de remoção pode ser constante e desacelerar após um longo período de tratamento, quando a concentração bacteriana já encontra-se reduzida (Marugán *et al.*, 2008; Cho; Chung; Yoon, 2003).

Desse modo, foi verificado pelos resultados obtidos que a oxidação fotocatalítica pode ser usada com sucesso para remoção de *E. coli* em água. Para isso, foi realizado o estudo da constante de velocidade de reação da suspensão de *E.*

coli comparando ao tratamento fotocatalítico e à suspensão em água e em caldo sem tratamento, demonstrado na Figura 12.

Figura 12 - Gráfico de $\ln(A/A_0)$ vs. tempo, se suspensão de *E. coli* em água e em caldo sem tratamento e com tratamento fotocatalítico e fotolítico. Concentração inicial ajustada por absorvância em 0,424 em 600 nm durante 180 minutos.



Fonte: autora, 2024.

Pela análise da Figura 12, observa-se que foram obtidas relações lineares tanto para a fotocatalise, quanto para a fotólise, demonstrando que a oxidação da *E. coli* pelos dois tratamentos ocorre segundo uma cinética de pseudo-primeira ordem.

A Tabela 1 reúne as constantes de velocidade para as alíquotas referentes a cada tempo e tratamento; assim como à suspensão de *E. coli* em água e em caldo, ambos sem tratamento.

Tabela 1 - Constantes de velocidade (k) para a suspensão de *E. coli* com concentração inicial ajustada em 0,424 no comprimento de onda de 600 nm para os diferentes estudos realizados por 180 minutos. R^2 = Coeficiente de correlação linear.

Método	$\lambda = 600 \text{ nm}$	
	k / min	R^2
Sem tratamento, em água	0,006	0,75
Sem tratamento, em caldo	0,0097	0,97
Fotólise	0,1325	0,9651
Fotocatálise	0,2327	0,9628

Fonte: autora, 2024.

A avaliação cinética de reação apresentada na Tabela 1 possibilita a comparação entre as eficiências de inativação bacteriana. Observou-se que a fotocatalise da suspensão aquosa de *E. coli* teve uma constante de velocidade maior, o que corresponde ao decaimento da concentração de células bacterianas de forma mais eficiente que a fotólise.

A diferença entre a fotocatalise e a fotólise está no uso de fotocatalisadores no primeiro procedimento, que aumentam a produção de radicais hidroxila ($\bullet\text{OH}$) contribuindo para o tratamento da água pela ação oxidante a partir da decomposição de componentes da membrana celular, o que altera sua permeabilidade, inibe sua proliferação e pode levar à morte celular (Joost *et al.*, 2015; Pigeot-Rémy *et al.*, 2011; Sekimoto; Gonda; Takayama, 2015).

Corroborando esses resultados, Neves *et al.* (2019) obteve uma constante de velocidade de 0,1525, valor próximo ao obtido nesse estudo, utilizando um eletrodo de fibra de vidro/ TiO_2 com o tratamento fotocatalítico realizado a 35°C.

Por outro lado, os valores das constantes de velocidade das suspensões bacterianas em água e em caldo descritas na Tabela 1 demonstram que a concentração de *E. coli* não é reduzida, mas aumenta, principalmente em caldo LB, uma vez que esse fornece meio nutricional favorável para o crescimento e não há estresse oxidativo causado pelo uso de irradiação UV nem pela aplicação de UV junto ao eletrodo de Ti/ TiO_2 nanoporoso.

Desse modo, pode-se concluir a eficácia da fotocatalise aplicando o eletrodo de Ti/ TiO_2 nanoporoso para a remoção de *E. coli* em água. De acordo com esses resultados, verifica-se a aplicabilidade do tratamento visto que se obteve cerca de

0,003 de absorvância e poucas colônias remanescentes após o tratamento fotocatalítico.

Segundo a Portaria GM/MS nº 888/2021, o padrão de qualidade de água para consumo humano é a ausência de *E. coli* em 100 mL de água, o que pode ser alcançado com o tratamento fotocatalítico a partir dos resultados obtidos e a otimização dos parâmetros experimentais.

6 CONCLUSÃO

Considerando os riscos à saúde oferecidos pelos microrganismos presentes na água e as desvantagens dos métodos tradicionais de tratamento, o presente trabalho teve como objetivo a aplicação de eletrodos de Ti/TiO₂ nanoporoso obtidos pelo método de sol-gel na fotocatalise para inativação de *E. coli*.

A partir dos estudos realizados, verificou-se a eficiência do tratamento proposto, uma vez que se obteve cerca de 99,3% de redução da concentração da bactéria nos primeiros 30 minutos de tratamento.

Em comparação com o tratamento fotolítico, observou-se que a presença do semicondutor acelera a reação de oxidação das células bacterianas, pois na ausência do eletrodo, foram necessários 60 minutos para atingir 98% de remoção da concentração nas condições avaliadas.

Além disso, foi possível observar as características das colônias após a submissão ao tratamento fotocatalítico em decorrência aos efeitos causados por ele, de modo que constatou-se que o eletrodo de Ti/TiO₂ nanoporoso contribuiu para a redução do crescimento de *E. coli* após o tratamento.

REFERÊNCIAS

- ADHIKARI, B. *et al.* Efficient bacterial disinfection based on an integrated nanoporous titanium dioxide and ruthenium oxide bifunctional approach. **Journal of Hazardous Materials**, v. 365, p. 73-81, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.05.036>. Acesso em: 19 mar. 2024.
- ALI, I. *et al.* Recent advances in syntheses, properties and applications of TiO₂ nanostructures. **RSC Advances**, n. 8, 2018. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2018/ra/c8ra06517a>. Acesso em: 07 jun. 2024.
- ALVARENGA, J. A. **Avaliação da formação de subprodutos da cloração em água para consumo humano**. 100 f. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, 2010. Disponível em: <https://www.smarh.eng.ufmg.br/defesas/845M.PDF>. Acesso em: 15 de mai. 2024.
- AMETA, R. *et al.* Chapter 6 – Photocatalysis. *In*: AMETA, S. C.; AMETA, R. (ed.). **Advanced Oxidation Processes for Wastewater Treatment: Emerging Green Chemical Technology**, Udaipur: Academic Press, Elsevier, p. 135-175, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-810499-6.00006-1>. Acesso em: 08 mai. 2024.
- ATKINS, P. W.; TRAPP, C. A. **Physical Chemistry: Solutions Manual**. 5. ed. Oxford University Press: Cambridge, 1994.
- BOKOV, D. *et al.* Nanomaterial by Sol-Gel Method: Synthesis and Application. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2021, n. 1, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2021/5102014>. Acesso em: 26 jun. 2024.
- BRASIL. Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde. **Vigilância e controle da qualidade da água para consumo humano**. 212 p. Série B. Textos Básicos de Saúde, Brasília: Ministério da Saúde, 2006. Disponível em: https://bvsms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/vigilancia_controle_qualidade_agua.pdf. Acesso em: 09 mai. 2024.
- BRASIL. Ministério da Saúde. Gabinete do Ministro. Portaria Nº 888, de 04 de maio de 2021. **Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS nº 5, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade**. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-gm/ms-n-888-de-4-de-maio-de-2021-318461562>. Acesso em: 09 mai. 2024.
- BRASIL. Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde e Ambiente. **Surtos de Doenças de Transmissão Hídrica e Alimentar. Informe – 2024**. Brasília: Ministério da Saúde, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/saude/pt-br/assuntos/saude-de-a-a-z/d/dtha/publicacoes/surtos-de-doencas-de-transmissao-hidrica-e-alimentar-no-brasil-informe-2024>. Acesso em: 25 mai. 2024.

BRASLAVSKY, S. E. *et al.* Glossary of terms used in photocatalysis and radiation catalysis (IUPAC Recommendations 2011). **Pure and Appl. Chem.**, v. 83, n.4, p. 931-1014, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1351/PAC-REC-09-09-36>. Acesso em: 02 jun. 2024.

BRAUN, A. M.; OLIVEROS, E. How to evaluate photochemical methods for water treatment. **Water Science and Technology**, v. 35, n. 4, p. 17-23, 1997. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(97\)00004-8](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(97)00004-8). Acesso em: 03 jun. 2024.

CARRÉ, G. *et al.* TiO₂ Photocatalysis Damages Lipids and Proteins in *Escherichia coli*. **Appl. Environ. Microbiol.**, 80, 8, 2537-2581, 2014. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3993174/>. Acesso em: 26 jun. 2024.

CHO, M.; CHUNG, H.; YOON, J. Disinfection of Water Containing Natural Organic Matter by Using Ozone-Initiated Radical Reaction. **Appl. Environ. Microbiol.**, v. 69, n. 4, p. 2284-2291, abr. 2003. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC154773/>. Acesso em: 14 jul. 2024.

COMNINELLIS, C. *et al.* Advanced oxidation processes for water treatment: advances and trends for R&D. **Journal of Chemical Technology & Biotechnology**, v. 83, n. 6, p. 769-776, 2008. Disponível em: <https://analyticalsciencejournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/jctb.1873>. Acesso em: 02 jun. 2024.

CORDEIRO, E. S. *et al.* Red mud as catalyst for the treatment of pharmaceuticals compounds by advanced oxidation processes – A review. **Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management**, v. 21, mai. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2024.100938>. Acesso em: 22 jun. 2024.

CRÉMET, L. *et al.* Comparison of three methods to study biofilm formation by clinical strains of *Escherichia coli*. **Diagnostic Microbiology and Infectious Disease**, v. 75, n. 3, mar. 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.diagmicrobio.2012.11.019>. Acesso em: 07 jul. 2024.

GAMAGE, J.; ZHANG, Z. Applications of Photocatalytic Disinfection. **International Journal of Photoenergy**, v. 2010, 11 out. 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2010/764870>. Acesso em: 08 mai. 2024.

GÓMEZ-GÓMEZ, J. M.; AMILS, R. Crowning: a novel *Escherichia coli* colonizing behaviour generating a self-organized corona. **BMC Res Notes**, v. 7, n.108, fev. 2014. Disponível em: <https://bmcrenotes.biomedcentral.com/articles/10.1186/1756-0500-7-108>. Acesso em: 06 jul. 2024.

GUPTA, S. M.; TRIPATHI, M. A review of TiO₂ nanoparticles. **Chinese Science Bulletin**, v. 56, n. 16, 1639-1657, 2011. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11434-011-4476-1>. Acesso em: 06 jun. 2024.

HERRMANN, J. M. Heterogeneous photocatalysis: fundamentals and applications to the removal of various types of aqueous pollutants. **Catalysis Today**, v. 53, 1999. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0920-5861\(99\)00107-8](https://doi.org/10.1016/S0920-5861(99)00107-8). Acesso em: 22 jun. 2024.

JOOST, U. *et al.* Photocatalytic antibacterial activity of nano-TiO₂ (anatase)-based thin films: Effects on *Escherichia coli* cells and fatty acids. **Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology**, v. 142, p. 178-185, jan. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2014.12.010>. Acesso em: 14 jul. 2024.

KAPER, J. B.; NATARO, J. P.; MOBLEY, H. L. T. Pathogenic *Escherichia coli*. **Nature Reviews Microbiology**, v. 2, p. 123-140, fev. 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/nrmicro818>. Acesso em: 26 jun. 2024.

KEARNS, D. B. A field guide to bacterial swarming motility. **Nature Reviews Microbiology**, v. 8, p. 634-644, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/nrmicro2405>. Acesso em: 07 jul. 2024.

KITYAKARN, S. *et al.* (Photo)Electrochemical characterization of nanoporous TiO₂ and Ce-doped TiO₂ sol-gel film electrodes. **Electrochimica Acta**, n. 83, p. 113-124, nov. 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2012.07.129>. Acesso em: 09 jul. 2024.

KUBACKA, A.; FERNÁNDEZ-GARCÍA, M.; COLÓN, G. Advanced Nanoarchitectures for Solar Photocatalytic Applications. **Chemical Reviews**, v. 112, n. 3, 1555-1614, nov. 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/cr100454n>. Acesso em: 16 jun. 2024.

KULIESIENE, N. *et al.* TiO₂ application for the photocatalytical inactivation of *S. enterica*, *E. coli* and *M. luteus* bacteria mixtures. **Environmental and Climate Technologies**, v. 24, n. 3, p. 418-429, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.2478/rtuect-2020-0113>. Acesso em: 16 mar. 2024.

LEUNG, Y. H. *et al.* Toxicity of ZnO and TiO₂ to *Escherichia coli* cells. **Scientific Report**, v. 6, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/srep35243>. Acesso em: 10 jul. 2024.

LI, X.; YU, J.; JARONIEC, M. Hierarchical photocatalysts. **Chemical Society Reviews**, v. 45, n. 9, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/C5CS00838G>. Acesso em: 10 jun. 2024.

LI, X.; YU, J.; JIANG, C. Chapter 1 – principle and surface science of photocatalysis. *In*: YU, J.; JARONIEC, M.; JIANG, C. (ed.). **Interface Science and Technology**, v. 31, Elsevier, 2020, p. 1-38. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102890-2.00001-4>. Acesso em: 10 jun. 2024.

LIU, N. *et al.* Sustainable photocatalytic disinfection of four representative pathogenic bacteria isolated from real water environment by immobilized TiO₂-based composite

and its mechanism. **Chemical Engineering Journal**, v. 426, 131217, dez. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.131217>. Acesso em: 27 jun. 2024.

MADIGAN, M. **Microbiologia de Brock**. 14. ed. Porto Alegre: Artmed, 2016.

MALAKOOTIAN, M. *et al.* Advanced oxidation processes for the removal of organophosphorus pesticides in aqueous matrices: A systematic review and meta-analysis. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 134, p. 292-307, fev. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.12.004>. Acesso em: 22 jun. 2024.

MALATO, S. *et al.* Photocatalytic Treatment of Diuron by Solar Photocatalysis: Evaluation of Main Intermediates and Toxicity. **Environmental Science & Technology**, v. 37, n. 11, p. 2516-2524, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/es0261170>. Acesso em: 22 jun. 2024.

MARTINSON, J. N. V.; WALK, S. T. *Escherichia coli* Residency in the Gut of Health Human Adults. **EscoSal Plus**, v. 9, n. 1, set. 2020. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32978935/>. Acesso em: 23 jun. 2024.

MARTI, R. *et al.* Biofilm Formation Potential of Heat-Resistant *Escherichia coli* Dairy Isolates and the Complete Genome of Multidrug-Resistant, Heat-Resistant Strain FAM21845. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 83, n. 15, ago. 2017. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5514686/>. Acesso em: 07 jul. 2024.

MARUGÁN, J. *et al.* Kinetics of the photocatalytic disinfection of *Escherichia coli* suspensions. **Applied Catalysis B: Environmental**, v. 82, n. 1-2, p. 27-36, 2008. Disponível em: <https://burjcdigital.urjc.es/bitstream/handle/10115/4007/2008-Marugan-AppCatalBEnviron-KineticsDisinfection.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 13 jul. 2024.

MATTHIENSEN, A. *et al.* **Monitoramento e diagnóstico de água superficial**. 1 ed. v.1. 127 p. Centro Tecnológico, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFSC, Florianópolis: Projeto Tecnologias Sociais para Gestão da água, 2014. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/140447/1/final7998.pdf>. Acesso em: 10 mai. 2024.

MEYER, S. T. O uso de cloro na desinfecção de águas, a formação de trihalometanos e os riscos potenciais à saúde pública. **Cadernos de Saúde Pública**, v.10, n.1, p. 99-110, 1994. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/csp/a/pQy9fHxmbtW7Jx7BkxNjttp/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 14 mai. 2024.

MORENO, R. *et al.* Modelling TiO₂/UV-vis bacterial inactivation: Useful tools for reactor optimization and design. **Catalysis Today**, 114520, jan. 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920586124000142>. Acesso em: 15 jan. 2024.

NASCIMENTO, R. F. (org.) *et al.* **Processos oxidativos avançados: fundamentos e aplicações em matrizes ambientais**. E-book. Fortaleza: Imprensa Universitária da UFC, 2017. 282 p. (Coleção de Estudos da Pós-graduação). Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/32127>. Acesso em: 03 jun. 2024.

NAVES, P. *et al.* Correlation between virulence factors and *in vitro* biofilm formation by *Escherichia coli* strains. **Microbial Pathogenesis**, v. 45, n. 2, ago. 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.micpath.2008.03.003>. Acesso em: 07 jul. 2024.

NAVIDPOUR, A. H. Investigation of Advanced Oxidation Process in the Presence of TiO₂ Semiconductor as Photocatalyst: Property, Principle, Kinetic Analysis, and Photocatalytic Activity. **Catalysts**, v. 13, n. 2, 232, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4344/13/2/232>. Acesso em: 12 mai. 2024.

NETO, L. A. A.; PEREIRA, T. M.; SILVA, L. P. Evaluation of behavior, growth, and swarming formation of *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus* in culture medium modified with silver nanoparticles. **Microbial Pathogenesis**, 149, 104480, dez. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.micpath.2020.104480>. Acesso em: 20 jul. 2024.

NEVES, R. A. *et al.* Inativação Fotocatalítica de *Escherichia coli* em Sistema Semicondutor de Fibra de Vidro/TiO₂ e Fibra de Vidro/TiO₂-Fe. **Revista DAE**, São Paulo, v. 67, n. 216, abr. 2019. Disponível em: http://revistadae.com.br/artigos/artigo_edicao_216_n_1771.pdf. Acesso em 15 jul. 2024.

NYAMUKAMBA, P. *et al.* Preparation of titanium dioxide nanoparticles immobilized on polyacrylonitrile nanofibers for the photodegradation of methyl orange. **Int. J. Photoenergy**, v. 2016, n. 1, dez. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2016/3162976>. Acesso em: 01 mai. 2024.

NOGUEIRA, R. F. P.; JARDIM, W. F. A fotocatalise heterogênea e sua aplicação ambiental. **Química Nova**, v.21, n.1, p. 69-72, 1998. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-40421998000100011>. Acesso em: 15 mai. 2024.

O'HAYRE, R. *et al.* Mott-Schottky and Charge-Transport Analysis of Nanoporous Titanium Dioxide Films in Air. **J. Phys. Chem. C**, v. 111, 4809-4814, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/jp068354l>. Acesso em: 16 jun. 2024.

OLIVER, J. D. Recent findings on the viable but nonculturable state in pathogenic bacteria. **FEMS Microbiology Reviews**, v. 34, n. 4, jul. 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1574-6976.2009.00200.x>. Acesso em: 06 jul. 2024.

OTURAN, M. A.; AARON, J. J. Advanced Oxidation Processes in Water/Wastewater Treatment: Principles and Applications. A Review. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 44, n. 23, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10643389.2013.829765>. Acesso em; 02 jun. 2024.

PARTRIDGE, J. D. *et al.* *Escherichia coli* Remodels the Chemotaxis Pathway for Swarming. **mBio**, v. 10, n. 2, 19 mar. 2019. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30890609/>. Acesso em: 26 jun. 2024.

PASCHOAL, F. **Aplicações da técnica de fotoeletrocatalise na oxidação de corantes ácidos, corantes dispersos, surfatantes e na redução de Cr(VI) e bromato em efluentes usando eletrodos nanoporosos de Ti/TiO₂**. 159 f. Tese (Doutorado em Química) – Universidade Estadual Paulista (UNESP), São Paulo, 2008b.

PASCHOAL, F. M. M.; ANDERSON, M. A.; ZANONI, M. V. B. The photoelectrocatalytic oxidative treatment of textile wastewater containing disperse dyes. **Desalination**, v. 249, n. 3, p. 1350-1355, dez. 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2009.06.024>. Acesso em: 22 jun. 2024.

PERONDI, T. *et al.* Advanced oxidative processes in the degradation of 17 β -estradiol present on surface waters: kinetics, byproducts and ecotoxicity. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, p. 21032-21039, jun. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08618-2>. Acesso em: 21 jun. 2024.

PIGEOT-RÉMY, S. *et al.* Photocatalysis and disinfection of water: Identification of potential bacterial targets. **Applied Catalysis B: Environmental**, v. 104, p. 390-398, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2011.03.001>. Acesso em: 14 jul. 2024.

RAMELLI, L. S. **Avaliação da eficiência da fotocatalise heterogênea com óxido de zinco na degradação de fármacos**. 62 f. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Química) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2021.

RAMOS, S. *et al.* *Escherichia coli* as Commensal and Pathogenic Bacteria among Food-Producing Animals: Health Implications of Extended Spectrum β -Lactamase (ESBL) Production. **Animals (Basel)**, v. 10, n. 12, 29 dez. 2020. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33260303/>. Acesso em: 25 jun. 2024.

REGHUNATH, S.; PINHEIRO, D.; KR DEVI, S. A review of hierarchical nanostructures of TiO₂: Advances and applications. **Applied Surface Science Advances**, v. 3, mar. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2021.100063>. Acesso em: 9 jun. 2024.

RIBEIRO, M. A. **Avaliação da atividade fotocatalítica sobre a inativação de *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus* e *Saccharomyces cerevisiae* utilizando dióxido de titânio, para aplicação em desinfecção de águas**. Dissertação (Mestrado) – Mestrado em Ciências Biológicas, Campus de Rio Claro, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, p. 64, 2005. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/95005/ribeiro_ma_me_rcla.pdf;jsessionid=03539A625D936F411059910800D1B114?sequence=1. Acesso em: 08 mai. 2024.

RIZZO, L. *et al.* Removal of methylene blue in a photocatalytic reactor using polymethylmethacrylate supported TiO₂ nanofilm. **Desalination**, v. 211, p. 1-9, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.02.081>. Acesso em: 13 mai. 2024.

RODRIGUES, C. P.; ZIOLLI, R. L.; GUIMARÃES, J. R. Inactivation of *Escherichia coli* in Water by TiO₂-assisted Disinfection using Solar Light. **J. Braz. Chem. Soc.**, v. 18, n. 1, p. 126-134, 2007. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/jbchs/a/K5Ms7pDD6dCBHjPSKPphJKD/abstract/?lang=en>. Acesso em: 05 jul. 2024.

ROKICKA-KONIECZNA, P. Effect of APTES modified TiO₂ on antioxidant enzymes activity secreted by *Escherichia coli* and *Staphylococcus epidermidis*. **Biochemical and Biophysical Research Communications**, v. 534, p. 1064-1068, jan. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2020.10.034>. Acesso em: 10 jul. 2024.

SANTIAGO, S. G. **Eliminación de contaminantes orgánicos emergentes mediante fotocatalisis heterogénea con TiO₂, empleando luz solar**. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2013. Disponível em: <http://repositorio.imta.mx/bitstream/handle/20.500.12013/1386/TC-1307.1.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 09 jul. 2024.

SARAVANAN, A. *et al.* A detailed review on advanced oxidation process in treatment of wastewater: Mechanism, challenges and future outlook. **Chemosphere**, v. 308, 136524, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136524>. Acesso em: 02 jun. 2024.

SCIMONE, A. *et al.* Development of a rapid method for assessing the efficacy of antibacterial photocatalytic coatings. **Talanta**, v. 225, abr. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2020.122009>. Acesso em: 17 jul. 2024.

SEKIMOTO, K.; GONDA, R.; TAKAYAMA, M. Effects of H₃O⁺, OH⁻, O₂⁻, NO_x and NO_x for *Escherichia coli* inactivation in atmospheric pressure DC corona discharges. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 48, n. 30, 2015. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0022-3727/48/30/305401/meta>. Acesso em: 06 jul. 2024.

SEZONOV, G.; JOSELEAU-PETIT, D.; D'ARI, R. *Escherichia coli* Physiology in Luria-Bertani Broth. **Journal of Bacteriology**, v. 189, n. 23, dez. 2007. Disponível em: <https://journals.asm.org/doi/10.1128/jb.01368-07>. Acesso em: 07 jul. 2024.

SHIBAI, A. *et al.* Mutation accumulatio under UV radiation in *Escherichia coli*. **Scientific Reports**, v. 7, nov. 2017. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-017-15008-1>. Acesso em: 11 jul. 2024.

SIMON, G. *et al.* Photocatalytic ozonation of monuron over suspended and immobilized TiO₂-study of transformation, mineralization and economic feasibility. **J. Photochem. Photobiol. A. Chem.**, v. 365, p. 512-520, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2018.01.025>. Acesso em: 08 mai. 2024.

SINGH, S. *et al.* 9 – Degradation of pesticides in wastewater using heterogeneous photocatalysis. *In*: SHAH; M. P (ed.). **Advanced Oxidation Processes for Effluent Treatment Plants**, Elsevier, p. 161-175, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821011-6.00009-8>. Acesso em 11 jun. 2024.

SIVARANJANI, T. *et al.* An advanced photo-oxidation process for pharmaceuticals using plasmon-assisted Ag-CoFe₂O₄ photocatalysis. **Chemosphere**, v. 341, nov. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139984>. Acesso em: 22 jun. 2024.

SPEIGHT, J. G. Chapter Three – Industrial Inorganic Chemistry. *In*: SPEIGHT, J. G. (ed.). **Environmental Inorganic Chemistry for Engineers**. Laramie: Butterworth-Heinemann, Elsevier, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-849891-0.00003-5>. Acesso em: 29 jun. 2024.

TEIXEIRA, C. P. D. A. B.; JARDIM, W. D. F. Processos Oxidativos Avançados: Conceitos teóricos. **Caderno Temático UNICAMP**, Campinas, v. 3, ago. 2004. Disponível em: <https://lqa.iqm.unicamp.br/cadernos/caderno3.pdf>. Acesso em: 08 mai. 2024.

TORTORA, G. J.; FUNKE, B. R.; CASE, C. L. **Microbiologia**. 10. ed. Porto Alegre: Artmed, 2012.

VERDIER, T. *et al.* Antibacterial Activity of TiO₂ Photocatalyst Alone or in Coatings On *E. coli*: The Influence of Methodological Aspects. **Coatings**, v. 4, n. 3, p. 670-686, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/coatings4030670>. Acesso em: 08 jun. 2024.

VERMEULEN, N. *et al.* The bactericidal effect of ultraviolet and visible light on *Escherichia coli*. **Biotechnology and Bioengineering**, v. 99, n. 3, fev. 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/bit.21611>. Acesso em: 11 jul. 2024.

VERSTRAETEN, N. *et al.* Living on a surface: swarming and biofilm formation. **Trends in Microbiology**, v. 16, n. 10, p. 496-506, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tim.2008.07.004>. Acesso em: 07 jul. 2024.

VIANA, A. R. *et al.* Perfil epidemiológico das doenças virais, bacterianas e parasitológicas de veiculação hídrica no Brasil de 2012 a 2021: internações e mortalidades: Epidemiological profile of waterborne viral, bacterial and parasitological diseases in Brazil from 2012 to 2021: hospitalizations and mortality. **Brazilian Journal of Development**, [S. l.], v. 8, n. 9, p. 63519–63536, 2022. DOI: 10.34117/bjdv8n9-207. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/52361>. Acesso em: 16 mai. 2024.

VINAYAGAM, V. *et al.* Recent developments on advanced oxidation processes for degradation of pollutants from wastewater with focus on antibiotics and organic dyes. **Environmental Research**, v. 240, part. 2, jan. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117500>. Acesso em: 22 jun. 2024.

WANG, X. *et al.* UV-TiO₂ photocatalytic disinfection and photoreactivation of pathogenic bacterium in municipal wastewater. **J. Cent. South Univ.**, v. 23, 2016. Disponível em: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s11771-016-3377-5.pdf>. Acesso em: 12 jul. 2024.

YU, Y. *et al.* The Design of TiO₂ Nanostructures (Nanoparticle, Nanotube, and Nanosheet) and Their Photocatalytic Activity. **The Journal of Physical Chemistry C**, v. 118, n. 24, 12727-12733, 2014. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/jp500252g>. Acesso em: 08 jun. 2024.

ZHANG, J. *et al.* Cellular Response of *Escherichia coli* to Photocatalysis: Flagellar Assembly Variation and Beyond. **ACS Nano**, 13, 2, 2004-2014, fev. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acsnano.8b08475>. Acesso em: 28 fev. 2024.

ZHOU, X.; LIU, N.; SCHMUKI. Photocatalysis with TiO₂ Nanotubes: “Colorful” Reactivity and Designing Site-Specific Photocatalytic Centers into TiO₂ Nanotubes. **ACS Catal.**, v. 7, n. 5, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acscatal.6b03709>. Acesso em: 20 jun. 2024.

ZHU, S.; WANG, D. Photocatalysis: Basic Principles, Diverse Forms of Implementations and Emerging Scientific Opportunities. **Advanced Energy Materials**, v. 7, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/aenm.201700841>. Acesso em: 31 mai. 2024.