

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
FACULDADE DE FARMÁCIA

LUDMILA LORRANE MARTINS SILVA

**ESTUDO DA EFICIÊNCIA DE PROCESSOS OXIDATIVOS AVANÇADOS (POAs)
PARA A DEGRADAÇÃO DE CONTAMINANTES EMERGENTES**

GOIÂNIA, 2023

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
FACULDADE DE FARMÁCIA**TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DA UFG**

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio do Repositório Institucional (RI/UFG), regulamentado pela Resolução CEPEC no 1240/2014, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei no 9.610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo dos Trabalhos de Conclusão dos Cursos de Graduação disponibilizado no RI/UFG é de responsabilidade exclusiva dos autores. Ao encaminhar(em) o produto final, o(s) autor(a)(es)(as) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação (TCCG)

Nome(s) completo(s) do(a)(s) autor(a)(es)(as): Ludmila Lorrane Martins Silva

Título do trabalho: ESTUDO DA EFICIÊNCIA DE PROCESSOS OXIDATIVOS AVANÇADOS (POAs) PARA A DEGRADAÇÃO DE CONTAMINANTES EMERGENTES

2. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador) Concorda com a liberação total do documento [X] SIM [] NÃO¹

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante: a) consulta ao(à)(s) autor(a)(es)(as) e ao(à) orientador(a); b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo do TCCG. O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro.

Obs.: Este termo deve ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.

Documento assinado eletronicamente por **Guilhermina Ferreira Teixeira, Usuário Externo**, em 19/12/2023, às 10:12, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ludmila Lorrane Martins Silva, Discente**, em 22/12/2023, às 21:56, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **4220535** e o código CRC **9C830D39**.

LUDMILA LORRANE MARTINS SILVA

ESTUDO DA EFICIÊNCIA DE PROCESSOS OXIDATIVOS AVANÇADOS (POAs)
PARA A DEGRADAÇÃO DE CONTAMINANTES EMERGENTES

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Farmácia da Universidade Federal de Goiás como requisito para a obtenção do Grau de Bacharel em Farmácia. Sob a orientação da Profa. Dra. Guilhermina Ferreira Teixeira.

Goiânia, 2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Silva, Ludmila Lorrane Martins

Estudo da eficiência de Processos Oxidativos Avançados (POAs) para a degradação de contaminantes emergentes [manuscrito] / Ludmila Lorrane Martins Silva. - 2023.

XXXVI, 36 f.: il.

Orientador: Profa. Dra. Guilhermina Ferreira Teixeira.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Goiás, Faculdade Farmácia (FF), Farmácia, Goiânia, 2023.

Bibliografia. Anexos.

Inclui fotografias, abreviaturas, gráfico.

1. Degradação. 2. Contaminantes emergentes. 3. Paracetamol. 4. Corante azul brilhante. 5. Ibuprofeno. I. Teixeira, Guilhermina Ferreira, orient. II. Título.

CDU 615.1



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
FACULDADE DE FARMÁCIA

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos dezoito dias do mês de dezembro do ano de 2023 iniciou-se a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) intitulado “ESTUDO DA EFICIÊNCIA DE PROCESSOS OXIDATIVOS AVANÇADOS (POAs) PARA A DEGRADAÇÃO DE CONTAMINANTES EMERGENTES”, de autoria de Ludmila Lorrane Martins Silva, do curso de Farmácia, da Faculdade de Farmácia da UFG. Os trabalhos foram instalados pela Profa. Dra. Guilhermina Ferreira Teixeira – Orientadora IQ/UFG com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Prof. Dr. Flavio Colmati Junior - IQ/UFG e Profa. Dra. Gisele Augusto Rodrigues de Oliveira - FF/UFG. Após a apresentação, a banca examinadora realizou a arguição do(a) estudante. Posteriormente, de forma reservada, a Banca Examinadora atribuiu a nota final de 10,0 (dez), tendo sido o TCC considerado aprovada.

Proclamados os resultados, os trabalhos foram encerrados e, para constar, lavrou-se a presente ata que segue assinada pelos Membros da Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Guilhermina Ferreira Teixeira, Usuário Externo**, em 19/12/2023, às 10:11, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Flavio Colmati Junior, Professor do Magistério Superior**, em 19/12/2023, às 10:40, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Gisele Augusto Rodrigues De Oliveira, Professor do Magistério Superior**, em 19/12/2023, às 14:54, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **4220534** e o código CRC **DE5CFA82**.

LUDMILA LORRANE MARTINS SILVA

ESTUDO DA EFICIÊNCIA DE PROCESSOS OXIDATIVOS AVANÇADOS (POAs)
PARA A DEGRADAÇÃO DE CONTAMINANTES EMERGENTES

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
à Faculdade de Farmácia da Universidade
Federal de Goiás como requisito para a
obtenção do Grau de Bacharel em Farmácia.

Professora Dra. Guilhermina Ferreira Teixeira

Presidente da Banca – Orientadora

Professor Dr. Flávio Colmati Junior

Membro da banca

Professora Dra. Gisele Augusto Rodrigues de Oliveira

Membro da banca

Mestre Tarso Leandro Bastos

Membro Suplente

Goiânia, GO, 18 de dezembro de 2023

AGRADECIMENTOS

Expresso os meus sinceros agradecimentos, primeiramente a Deus, por me conceder o dom da vida, e aos meus pais, Hamilton Pereira Silva e Simone Martins Ferraz Silva, por incentivarem desde sempre os meus estudos e acreditarem que eu me formaria em uma Universidade Federal. Pai e mãe, agradeço por todo o sacrifício, compreensão, auxílio e pela esperança que tiveram e ainda têm em mim.

Agradeço também ao meu namorado, Ian Moraes Eduardo, por acreditar nos meus sonhos tanto quanto eu e por vivê-los comigo durante esses cinco anos de graduação. Obrigada por me apoiar, acreditar no meu potencial e por ser a minha força e fonte de energia nos dias difíceis.

Gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos a minha orientadora Guilhermina Ferreira Teixeira, que desde o início da minha graduação, confiou a mim projetos de pesquisa que tornaram possível a realização deste trabalho e ao Flávio Colmati, que também me orientou em projetos de pesquisa e auxiliou no desenvolvimento de novas metodologias.

Agradeço, igualmente, aos meus verdadeiros amigos, com quem compartilhei horas de diversão, estudos, estágios, trabalhos, avaliações e boa parte do meu dia durante toda a graduação. Obrigada por me apoiarem e tornarem esses cinco anos em tempo integral um pouco mais leves.

Por fim, expresso minha gratidão ao meu padrinho, Adenilson Pereira da Silva que infelizmente se foi durante a minha graduação, antes que pudesse ver minha formatura. No entanto, assim como um segundo pai, apoiou e acreditou que seria possível, despertou em mim o amor pela farmácia e mostrou-me a beleza do universo farmacêutico.

A elaboração desse Trabalho de Conclusão de Curso não seria possível sem o apoio de cada um de vocês!

RESUMO

A fim de explorar métodos para contribuir para o acesso de água potável para a população, este trabalho empregou Processos Oxidativos Avançados (POAs) para a recuperação de efluentes aquáticos contaminados por contaminantes de preocupação emergente (CPEs). Os métodos escolhidos foram a fotocatalise, fotólise e eletrólise, e como contaminantes trabalhou-se com o corante Azul Brilhante e os fármacos Paracetamol e Ibuprofeno. A fotocatalise foi realizada utilizando um purificador de aquário equipado com lâmpada UV de 18 W como fotorreator, e o composto niobato de sódio como fotocatalisador. Em relação a degradação do corante, o processo fotocatalítico apresentou eficiência maior que 90%, enquanto para a degradação do fármaco paracetamol, a eficiência foi de aproximadamente 54%. Já quando se empregou a fotólise em pH=9 para a degradação do paracetamol, a eficiência ficou em torno de 75%. Em relação a eletrólise, ao trabalhar com solução de paracetamol com concentração igual a 10 mg.L⁻¹ e NaCl 0,05 mol.L⁻¹ como eletrólito, observou-se que após 5 minutos de experimento, a eficiência do processo é em torno de 90%. Já, quando a concentração de paracetamol aumenta para 20 mg.L⁻¹, a mesma eficiência de degradação ocorre após 15 minutos de teste. Em relação ao Ibuprofeno, devido à baixa solubilidade deste fármaco em água, os resultados obtidos foram inconclusivos.

Palavras-chave: contaminantes emergentes, paracetamol, ibuprofeno, azul-brilhante, degradação, eletrólise, fotólise, fotocatalise.

ABSTRACT

To explore methods to contribute to the access of potable water for the population, this work employed Advanced Oxidative Processes (AOPs) for the recovery of aquatic effluents contaminated by contaminants of emerging concern (CECs). The chosen methods were photocatalysis, photolysis, and electrolysis, and the contaminants studied were the Brilliant Blue dye and the drugs Paracetamol and Ibuprofen. Photocatalysis was conducted using an aquarium purifier equipped with an 18 W UV lamp as a photoreactor, and sodium niobate compound as a photocatalyst. Regarding the degradation of the dye, the photocatalytic process showed an efficiency of over 90%, while for the degradation of the drug Paracetamol, the efficiency was approximately 54%. When photolysis was employed at pH=9 for the degradation of Paracetamol, the efficiency was around 75%. In terms of electrolysis, when working with a Paracetamol solution with a concentration of 10 mg.L^{-1} and NaCl 0.05 mol.L^{-1} as an electrolyte, it was observed that after 5 minutes of the experiment, the process efficiency was around 90%. However, when the Paracetamol concentration increased to 20 mg.L^{-1} , the same degradation efficiency occurred after 15 minutes of testing. Regarding Ibuprofen, due to its low solubility in water, the results obtained were inconclusive.

Keywords: contaminants, paracetamol, ibuprofen, brilliant blue, degradation, electrolysis, photolysis, photocatalysis.

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 2. OBJETIVO..... | 5 |
| 3. METODOLOGIA | 6 |
| 3.1. Degradação via fotocatalise | 6 |
| 3.2. Degradação via fotólise | 7 |
| 3.3. Degradação via eletrólise..... | 7 |
| 3.4. Análise dos resultados | 8 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 9 |
| 4.1. Degradação do Corante azul brilhante | 9 |
| 4.2. Degradação do Paracetamol | 12 |
| 4.3. Degradação do Ibuprofeno..... | 20 |
| 5. CONCLUSÃO..... | 22 |
| 6. TRABALHOS FUTUROS | 23 |
| 7. ABREVIATURAS E SIGLAS..... | 24 |
| 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 25 |
| 9. ANEXO 1 | 27 |

1. INTRODUÇÃO

O acesso à água de forma segura, suficiente, aceitável, fisicamente acessível e disponível para uso pessoal e doméstico é um direito humano previsto pela Organização da Nações Unidas (ONU) que prevê a redução do risco de doenças relacionadas à qualidade da água. Para assegurar tal direito, órgãos nacionais e internacionais definem parâmetros de potabilidade e qualidade da água que devem ser seguidos de modo a permitir o acesso a fontes de água limpa para todos.

Apesar dos esforços da ONU e órgãos públicos para garantir tal direito, as fontes de água doce próprias para o consumo não são tão abundantes. O planeta terra é coberto por água em três quartos de seu território, mas mais de 97% de toda essa água é salgada e menos de 3% é doce, dessa porção, 2,3% estão congelados nos círculos polares, 0,6% compõem águas subterrâneas e apenas 0,1% está disponível em rios e lagos.

Além da porcentagem de água doce disponível ser baixa, nem toda a sua totalidade é de boa qualidade para consumo. Tal disponibilidade é ainda mais restrita ao considerar a presença de contaminantes físicos, químicos e microbiológicos, o tratamento inadequado e até mesmo a falta de legislação para determinadas substâncias, como os Contaminantes de Preocupação Emergente (CPEs). Exposição a longo prazo a mesmo baixas concentrações desses contaminantes pode levar a efeitos tóxicos.

Os CPEs são uma classe de produtos tóxicos, não removidos das águas fornecidas pelas estações de tratamento de efluentes (ETEs) e de águas para abastecimento público (ETAs) que podem causar riscos à saúde humana e ambiental (RATHI; KUMAR, 2021). Dentre os contaminantes de preocupação emergente se encontram microplásticos, resíduos químicos, corantes, toxinas de alga e medicamentos. (FARTO et al., 2021).

O corante azul brilhante, também conhecido como Azul Brilhante FCF é um aditivo alimentar comumente utilizado para conferir coloração azul intensa a diversos produtos. Segundo Bell et al. (2019), o FCF é um corante sintético do grupo dos triarilmetanos, amplamente empregado devido à sua estabilidade e capacidade de proporcionar uma cor atraente aos alimentos.

Tal composto tem sido objeto de preocupação em relação à sua presença como contaminante em esgotos e sistemas de tratamento de águas residuais. De acordo com Silva et al. (2018), o corante FCF é frequentemente encontrado em águas residuais industriais e domésticas devido à sua utilização em diversas indústrias, incluindo a têxtil, farmacêutica e alimentícia.

A presença desses corantes em águas residuais pode ser problemática, uma vez que eles podem persistir no meio ambiente e potencialmente afetar a qualidade da água e os ecossistemas aquáticos, devido à falta de tratamento adequado e o descarte incorreto de efluentes contaminados em outros efluentes livres do corante, além da sua difícil degradação natural no meio ambiente.

Os corantes sintéticos podem ser tóxicos para organismos aquáticos e interferir nos processos de fotossíntese, como apontado por Chen et al. (2020), o que destaca a necessidade de monitoramento e adoção de medidas adequadas para reduzir a contaminação desses corantes em esgotos e efluentes industriais.

O paracetamol, também conhecido como acetaminofeno, é um fármaco amplamente utilizado como analgésico e antipirético. Ele atua inibindo a produção de prostaglandinas, substâncias envolvidas na geração de dor e inflamação no organismo. Segundo Anderson et al. (2019), o paracetamol é um dos medicamentos mais comuns em todo o mundo devido à sua eficácia no alívio de dores leves a moderadas e redução de febres. Além disso, sua relativa segurança em doses terapêuticas o torna uma escolha popular entre pacientes de diferentes faixas etárias.

O paracetamol também tem sido identificado como um contaminante ambiental, especialmente em corpos d'água e águas residuais. De acordo com Santos et al. (2021), a presença do paracetamol no ambiente pode ser atribuída à sua excreção pelas pessoas que o utilizam como medicamento, bem como ao descarte inadequado de produtos farmacêuticos contendo essa substância.

A contaminação ambiental pelo paracetamol tem sido objeto de crescente preocupação, por conta de efeitos adversos em organismos aquáticos expostos a esse composto. A presença do paracetamol em águas superficiais também pode desencadear reações químicas complexas que resultam na formação de subprodutos potencialmente tóxicos, como a hidroquinona, benzoquinona, p-nitrofenol, e 1,2,4-trihidroxibenzeno (Jallouli et al., 2017). Portanto, é importante desenvolver estratégias adequadas de tratamento de águas residuais para minimizar a presença de paracetamol e seus metabólitos no ambiente.

O ibuprofeno é um fármaco amplamente utilizado como anti-inflamatório, analgésico e antipirético. Pertence à classe dos anti-inflamatórios não esteroides (AINEs) e exerce sua ação inibindo a enzima cicloxigenase, responsável pela produção de prostaglandinas, mediadores químicos envolvidos no processo inflamatório e na percepção da dor.

Assim como o paracetamol, o ibuprofeno também tem sido identificado como um contaminante ambiental, presente em águas superficiais e esgotos. Segundo Johnson et al.

(2018), a contaminação ambiental pelo ibuprofeno pode ser atribuída ao seu uso generalizado na medicina humana e veterinária, além de sua excreção pelos pacientes que o utilizam.

A presença do ibuprofeno em corpos d'água pode representar um risco para a vida aquática, considerando os efeitos negativos em organismos expostos. Além disso, a degradação do fármaco no ambiente pode levar à formação de subprodutos potencialmente mais tóxicos (Johnson et al., 2018) Portanto, é crucial desenvolver estratégias de tratamento de águas residuais e para abastecimento público que minimizem a presença do ibuprofeno e de outros fármacos no meio ambiente, a fim de proteger os ecossistemas aquáticos e a saúde pública.

Uma área que ganhou força nos últimos anos foi a química ambiental, com foco no desenvolvimento de tecnologias avançadas para descontaminação de efluentes aquáticos. Os Processos Oxidativos Avançados (POAs) são técnicas baseadas na geração de radicais livres altamente reativos que promovem a oxidação de compostos tóxicos, eficazes para tratamento de efluentes de indústrias químicas e farmacêuticas bem como águas residuais urbanas, além de serem eficazes na redução da formação de subprodutos tóxicos, o que minimiza os potenciais danos ao meio ambiente e à saúde pública.

Fotólise, fotocatalise e eletrólise são processos oxidativos avançados amplamente estudados na literatura científica devido ao seu potencial para a descontaminação de efluentes aquáticos e tratamento de águas residuais, e foram os métodos de descontaminação utilizados nesta pesquisa.

A fotólise é um processo que envolve a decomposição de compostos químicos por meio da absorção de luz. A energia luminosa é utilizada para romper as ligações químicas dos contaminantes, gerando produtos menos tóxicos e mais facilmente degradáveis. Um estudo realizado por Wu et al. (2019) investigou a aplicação da fotólise solar para a remoção de poluentes emergentes em águas residuais. Os resultados destacaram a eficiência da fotólise solar na degradação de fármacos e produtos de cuidados pessoais, contribuindo para a redução da presença desses contaminantes em corpos hídricos.

A fotocatalise, por sua vez, é um processo que se utiliza de um catalisador ativado pela luz para promover reações de oxidação de contaminantes. Dentre os catalisadores mais comuns, estão o dióxido de titânio (TiO_2) e o niobato de sódio (NaNbO_3). Em uma pesquisa conduzida por Chen et al. (2020), investigou-se a eficiência da fotocatalise heterogênea usando TiO_2 na remoção de corantes tóxicos de efluentes industriais. Os resultados mostraram que a fotocatalise com TiO_2 demonstrou uma alta taxa de degradação dos corantes, tornando-se uma abordagem promissora para o tratamento de efluentes contaminados com corantes industriais.

Em um experimento fotocatalítico tradicional, as espécies ativas fotogeradas (incluindo H^{\bullet} , radicais OH^{\bullet} , $O_2^{\bullet-}$ e e^-) são os principais agentes responsáveis pela degradação das moléculas orgânicas poluentes.

Já a eletrólise é um processo que tem como princípio a aplicação de uma diferença de potencial que estimula a ocorrência de reações não espontâneas, convertendo energia elétrica em energia química, contribuindo para a quebra das moléculas dos compostos contaminantes.

Neste caso, as reações ocorrem em uma célula eletroquímica, constituída por dois eletrodos, sendo um responsável pelas reações de oxidação (ânodo) e o outro, responsável pelas reações de redução (cátodo). Para o funcionamento destas células, é necessária uma solução eletrolítica para conduzir a corrente elétrica que promoverá o fluxo de elétrons do ânodo para o cátodo, resultando na reação redox que ocorre na interface entre o eletrodo e solução a ser degradada, resultando na quebra do composto contaminante (Smolinka, T., 2009).

Em uma pesquisa realizada por Pereira et al. (2018), explorou-se a aplicação da eletrólise na remoção de microplásticos em águas residuais. A eletrólise mostrou-se eficaz na degradação dos microplásticos, resultando em fragmentos menores e menos nocivos ao meio ambiente.

Eletrodos confeccionados de óxidos metálicos compostos por IrO_2 e RuO_2 vem sendo muito utilizados em processos eletroquímicos com foco ambiental. Estes materiais são mecanicamente resistentes e podem ser empregados em larga escala na indústria eletroquímica para a produção de cloro. Tais eletrodos podem ser uma boa escolha para a eletrólise da água, produção de cloro e redução de oxigênio (Randazzo et al., 2011).

Neste trabalho, a eletrólise foi realizada utilizando um eletrodo constituído de $Ti/Ru_{0.3}Ti_{0.7}O_2$, uma vez que tal eletrodo vem se mostrando eficiente para a degradação de contaminantes emergentes (de Faria et al., 2023), (Pipi et al., 2013).

A utilização de novas metodologias para o tratamento de efluentes tem sido amplamente abordada em diversos setores ambientais, de modo a trazer soluções eficazes para a recuperação de águas contaminadas e seu posterior aproveitamento por parte da população. Nesse âmbito, este trabalho teve como foco explorar métodos alternativos para a degradação de poluentes emergentes presentes em água contaminadas, visando encontrar as melhores condições de tratamento que possibilitem uma possível distribuição do produto para a população.

2. OBJETIVO

Esta pesquisa teve como objetivo estudar a eficiência de três diferentes Processos Oxidativos Avançados, sendo eles a fotocatalise, fotólise e eletrólise, para a degradação de contaminantes emergentes, como corantes e fármacos, além de avaliar a variação destas metodologias de degradação de modo a buscar resultados mais eficientes.

3. METODOLOGIA

3.1. Degradação via fotocatalise

A fotocatalise foi adotada para a degradação do corante Azul Brilhante G (Sigma-Aldrich® - $854,02 \text{ g.mol}^{-1}$) e do comprimido Paracetamol (medicamento genérico da marca União Química®). Para conduzir os ensaios de degradação, um reator fotocatalítico foi montado, composto por um filtro purificador de aquário da marca OceanTech, equipado com uma lâmpada ultravioleta (UV) de 18 W, obtendo um sistema de recirculação.

Com base em resultados anteriores que demonstraram a eficácia do niobato de sódio (NaNbO_3) na degradação do corante Rodamina B (Teixeira, G. F. et al, 2019) este composto foi utilizado como fotocatalisador. A obtenção do NaNbO_3 , realizada em um trabalho anterior a este, onde o material sintetizado foi aproveitado para esta pesquisa, envolveu a síntese hidrotérmica assistida por micro-ondas (Anexo 1) que resultou na formação de um composto metaestável, o $\text{NaNb}_2\text{O}_6\text{H}_2\text{O}$, na forma de fibras. Após a obtenção dessa fase metaestável, foi submetido a tratamento térmico a 550°C e 800°C para ajustar as características cristalinas, ópticas e morfológicas do material.

No caso da degradação do corante, foram preparadas soluções de concentração igual a $1,0 \cdot 10^{-5} \text{ mol.L}^{-1}$ contendo 80 mg de NaNbO_3 em suspensão. Para promover a adsorção-dessorção do fotocatalisador, a suspensão foi submetida a um banho de ultrassom por 15 minutos na ausência de luz. Após essa etapa, a suspensão foi inserida no reator, sob fluxo de vazão igual a 25 mL.s^{-1} , sob ausência de luz durante 15 minutos.

Ao término do processo de adsorção-dessorção e de estabilização do fluxo, foi recolhida a primeira alíquota em $t = 0$ e, durante o processo fotocatalítico, foram recolhidas alíquotas nos tempos iguais a $t = 5, 10, 15, 30, 60, 75$ e 90 minutos, a fim de monitorar a eficiência do processo. Para a degradação do fármaco, preparou-se uma solução de paracetamol com concentração de fármaco igual a $10,0 \text{ mg.L}^{-1}$ onde foram suspensos 300 mg do fotocatalisador NaNbO_3 , em diferentes valores de pH ($\text{pH}=7$ e $\text{pH}=9$). A escolha dos tempos e pH dos ensaios se deu com base em referências bibliográficas com condições semelhantes.

Para promover a adsorção-dessorção das moléculas de fármaco, na superfície do fotocatalisador, a suspensão foi mantida em banho de ultrassom durante 15 minutos, na ausência de luz. Feito isto, a suspensão foi inserida no reator, sob o mesmo fluxo utilizado para a degradação do corante, permanecendo durante 15 minutos na ausência de luz.

Após este tempo foi recolhida uma alíquota em $t=0$ (antes de ligar a lâmpada UV) e, após ligar a luz, o processo de fotodegradação foi monitorado coletando alíquotas em diferentes

tempos ($t = 15, 30, 45, 60$ e 75 minutos). Durante todo o teste, a temperatura foi mantida em torno de 25°C com o auxílio de banho de gelo. A degradação foi monitorada por Espectrofotometria de absorção na região do UV-visível.

3.2. Degradação via fotólise

Para evidenciar a necessidade ou não da utilização do fotocatalisador foi realizada a fotólise (degradação somente através da radiação UV, sem a presença de fotocatalisador) para degradação do corante Azul Brilhante G (Sigma-Aldrich® - $854,02 \text{ g.mol}^{-1}$) e do fármaco paracetamol.

Para execução dos ensaios foi utilizado o mesmo reator da fotocatalise. A solução de corante a ser degradada foi preparada com concentração igual a $1,0 \cdot 10^{-5} \text{ mol.L}^{-1}$, submetida à agitação e estabilização do fluxo no reator por 30 minutos, e posteriormente, exposta à luz ultravioleta. A degradação foi monitorada por meio do recolhimento de alíquotas nos tempos iguais a $t = 0, 5, 10, 15, 20, 30, 45$ e 60 minutos.

Já a fotólise do paracetamol foi testada nas condições de pH neutro, e $\text{pH}=9$. A solução foi preparada com concentração de fármaco igual a $10,0 \text{ mg.L}^{-1}$, submetida à agitação e estabilização do fluxo no reator por 30 minutos e posterior ativação da luz ultravioleta. As alíquotas foram recolhidas nos tempos de $t = 0, 15, 30, 45, 60$ e 75 minutos, sendo que a temperatura e a vazão do fluxo foram controladas respectivamente em 25°C e 25 mL.s^{-1} .

3.3. Degradação via eletrólise

Na busca por resultados mais eficientes, também foram realizados experimentos de degradação de fármacos via eletrólise. Neste processo, foram utilizados os fármacos paracetamol e ibuprofeno. Para realização dos ensaios foi montada uma célula eletroquímica utilizando uma fonte de alta tensão, um multímetro, cabos de ponta de prova do tipo banana-jacaré e, como eletrodo, um ânodo dimensionalmente estável (DSA - do inglês Dimensionally Stable Anode) constituído por $\text{Ti/Ru}_{0,3}\text{Ti}_{0,7}\text{O}_2$ com área igual a 15 cm^2 . Para promover o fluxo da solução a ser degradada na superfície do eletrodo foi utilizada a mesma bomba de aquário utilizada no sistema fotocatalítico. O fluxo da solução foi mantido em 100 mL.min^{-1} , em meio de NaCl como eletrólito.

Foram preparadas duas soluções estoques para a realização dos ensaios eletrolíticos: a solução de paracetamol $1,5 \text{ g.L}^{-1}$ foi preparada partindo-se da diluição de um comprimido genérico contendo 750 mg de Paracetamol da marca União Química® diluído em 500 mL de água deionizada, e a solução de Ibuprofeno $1,2 \text{ g.L}^{-1}$ foi preparada partindo-se da diluição do

comprimido Buprovil (600 mg de ibuprofeno) da Multilab® diluído em 500 mL de água deionizada. As duas soluções estoques foram armazenadas em refrigeração sob o abrigo da luz, sendo posteriormente utilizadas para o preparo das soluções a serem degradadas.

Durante a eletrólise do Paracetamol foram testadas tensões elétricas (U) iguais a 2,0 e 4,0 V, densidade de corrente (j) de aproximadamente 7,5 mA.cm⁻², concentrações de paracetamol igual a 10,0 e 20,0 mg.L⁻¹ e concentração de eletrólito igual a 0,05 mol.L⁻¹ de NaCl. Durante o processo eletrolítico, amostras da solução foram coletadas em diferentes momentos t = 0, 5, 10,15, 20, 25, 30, 40, 50 e 60 min para monitoramento do decaimento da concentração de fármaco na solução.

Já para a eletrólise do Ibuprofeno, foi utilizada uma solução de concentração igual a 10 mg.L⁻¹ de ibuprofeno, 0,05 mol.L⁻¹ de NaCl e j~ 7,5 mA.cm⁻². Assim como o paracetamol, foram recolhidas alíquotas nos momentos t = 0, 5, 10,15, 20, 25, 30, 40, 50 e 60 min durante o processo eletrolítico de modo a avaliar o decaimento da concentração de fármaco.

3.4. Análise dos resultados

Para avaliação da eficiência das metodologias de degradação para os contaminantes orgânicos, todas as alíquotas recolhidas foram submetidas à espectrofotometria na região do UV-visível por meio do equipamento Espectrofotômetro Lambda 45 da PerkinElmer. As medidas de absorbância foram tratadas por meio da fórmula $Eficiência (E) = \frac{(C_0 - C_t)}{C_0} \times 100\%$, onde C₀ é o valor da absorbância em t = 0 minutos e C_t é o valor da absorbância em cada tempo diferente de t = 0, no comprimento de absorção de cada contaminante, no caso do Corante Azul brilhante em torno de 600 nm (Sigma Aldrich, 2023), do paracetamol 246 nm (Jallouli et al., 2017), e do ibuprofeno em torno de 220 nm (Miranda et al., 2021).

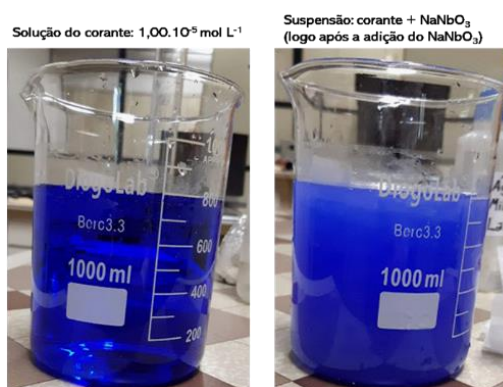
Os resultados obtidos de cada ponto de amostragem pela fórmula foram tratados como porcentagem em relação ao inicial, sendo a alíquota t = 0 a mais concentrada e as demais alíquotas os pontos de observação da degradação. Para melhor observação dos resultados, os dados foram tratados através do software Origin®, um software gráfico para análise de dados e estatística, desenvolvido pela Originlab para execução em plataforma Windows.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Degradação do Corante azul brilhante

Conforme observado na Figura 1, a solução do corante apresenta uma coloração azul intensa, e logo após a adição do pó fotocatalisador, a coloração é mantida, sendo que esta característica permaneceu a mesma para todos os experimentos realizados. Ao final do experimento, observou-se que a suspensão resultante se apresentava quase que totalmente descolorida tanto para o uso do NaNbO_3 -800°C (Figura 2) como fotocatalisador, quanto para o uso do NaNbO_3 -550°C.

Figura 1: Coloração da solução e da suspensão contendo o corante a ser degradado.



Fonte: Elaborado pela própria autora, 2020.

Figura 2: Suspensão resultante após a finalização do experimento de fotocatalise.

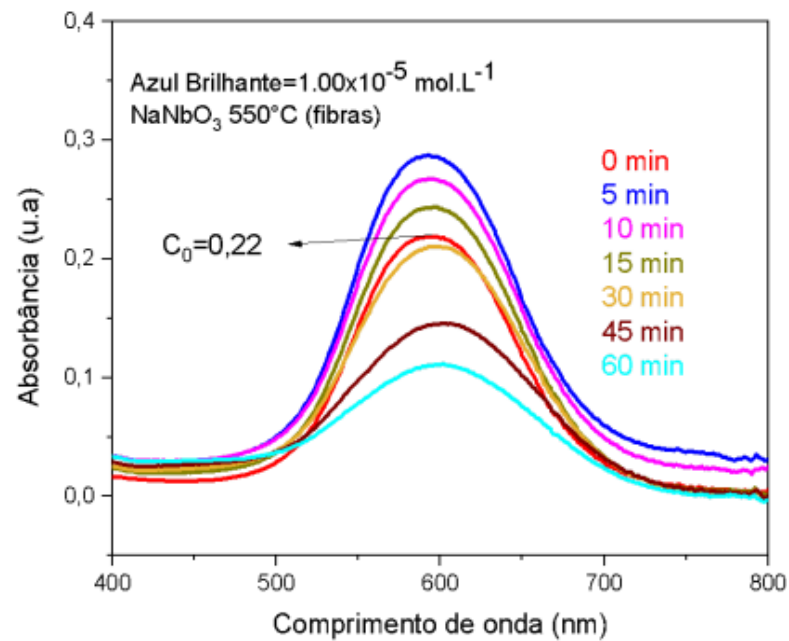
Suspensão: corante + NaNbO_3
(ao final do experimento utilizando o NaNbO_3
obtido a 800°C)



Fonte: Elaborado pela própria autora, 2020

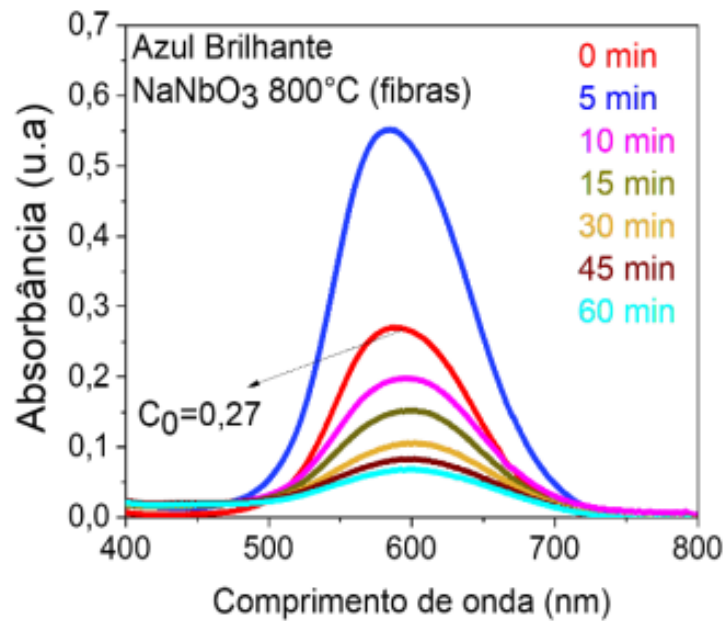
Durante a realização dos ensaios fotocatalíticos foi possível observar que, com o decorrer da degradação, as alíquotas retiradas sofreram um processo de descoloração, indicando que o processo se mostrou eficiente, o que é confirmado após a observação do espectro de absorção de cada alíquota, tanto para o $\text{NaNbO}_3\text{-}550^\circ\text{C}$, quanto para o $\text{NaNbO}_3\text{-}800^\circ\text{C}$ (Figuras 3 e 4).

Figura 3: Espectro de absorção na região do UV-Vis das amostras utilizando o $\text{NaNbO}_3\text{-}550^\circ\text{C}$ como fotocatalisador.



Fonte: Elaborado pela própria autora, 2020.

Figura 4: Espectro de absorção na região do UV-Vis das amostras utilizando o $\text{NaNbO}_3\text{-}800^\circ\text{C}$ como fotocatalisador.

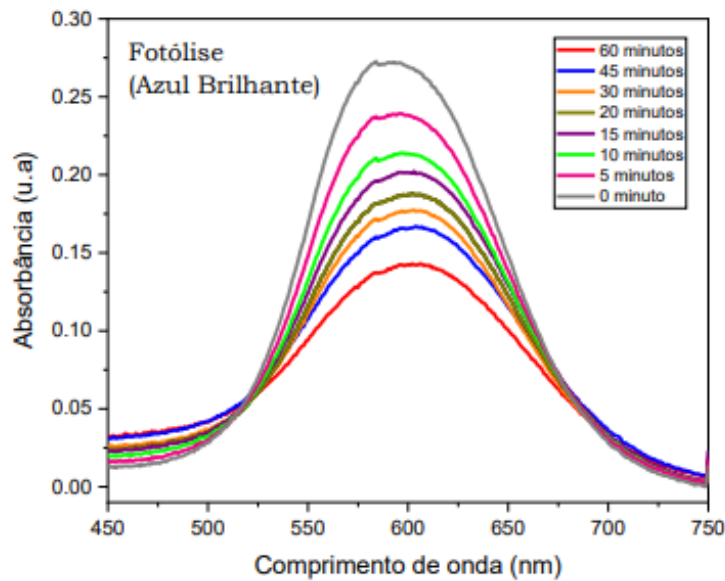


Fonte: Elaborado pela própria autora, 2020.

O espectro de absorção do UV-Visível na região de absorção do corante Azul Brilhante apresenta comprimento de onda de absorção na região em torno de 628 nm, indicando a presença de corante na solução, no entanto, através dos espectros apresentados, é possível notar que há valores de absorbância maiores do que o valor inicial ($t=0$).

Considerando a absorbância apresentada pela solução contendo o corante e o fotocatalisador, após 60 minutos de exposição à luz UV houve uma degradação de aproximadamente 90% utilizando $\text{NaNbO}_3\text{-}550^\circ\text{C}$ e aproximadamente 93% utilizando o $\text{NaNbO}_3\text{-}800^\circ\text{C}$. Além da fotocatalise, realizou-se ensaios de degradação do corante sem a presença de fotocatalisador, ou seja, apenas por meio da fotólise (Figura 5). Mesmo na ausência do fotocatalisador, após 60 minutos de irradiação UV, houve degradação de 50% do corante.

Figura 5: Espectro de absorção na região do UV-Vis das amostras obtidas realizando a fotólise do corante azul brilhante.



Fonte: Elaborado pela própria autora, 2021.

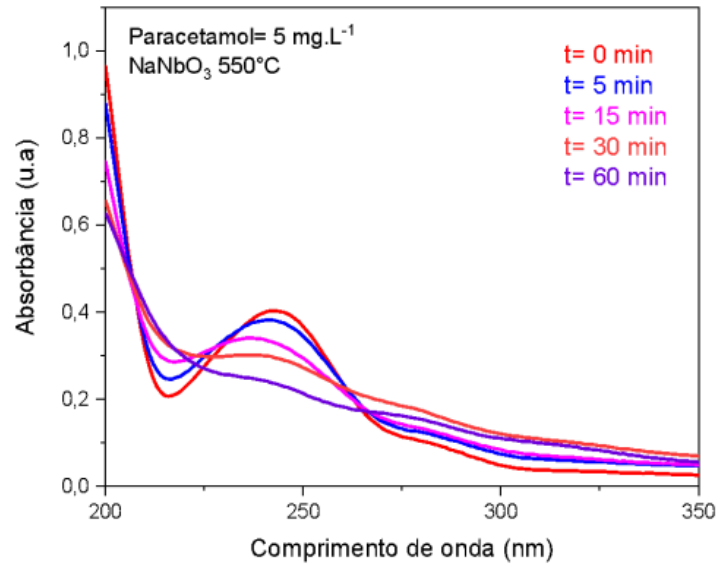
De acordo com os resultados, após 60 minutos de exposição à luz UV, o processo utilizando os fotocatalisadores apresenta maior eficiência que a fotólise. O comportamento referente à absorbância das amostras contendo o fotocatalisador pode ser devido a formação de algum possível subproduto que apresente maior absorbância que a molécula original do corante. No entanto, para confirmar tal hipótese, é necessário realizar outras caracterizações, como por exemplo, a Espectrometria de Massas.

4.2. Degradação do Paracetamol

Visto a eficácia do NaNbO_3 para degradação de corantes, o método também foi testado para a degradação do fármaco paracetamol. Para isto, foram utilizadas soluções contendo $5,0 \text{ mg.L}^{-1}$ e $10,0 \text{ mg.L}^{-1}$ de paracetamol.

O espectro representado na Figura 6, referente a degradação da solução contendo menor concentração de paracetamol, mostra que a absorbância diminui com o aumento de tempo de exposição à radiação UV. A baixa absorbância em $t=0$ deve-se à baixa concentração de fármaco na solução e, após 60 minutos, houve uma degradação de aproximadamente 50% do fármaco.

Figura 6: Espectro de absorção da solução contendo paracetamol após exposição à radiação UV utilizando o NaNbO_3 -550°C

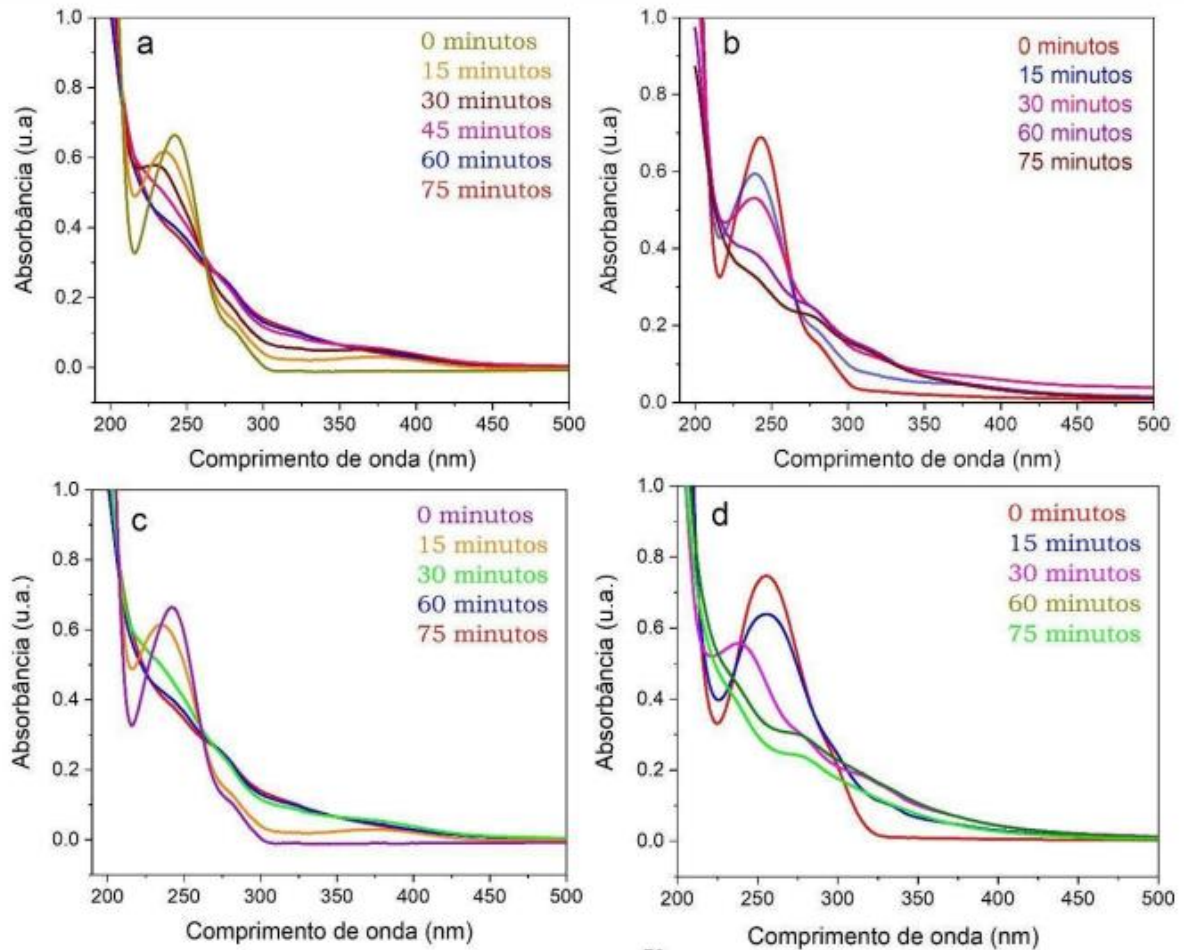


Fonte: Elaborado pela própria autora, 2020.

A fim de avaliar o resultado em função da variação da concentração e pH da solução a ser degradada, foram realizados ensaios de fotocatalise e fotólise, utilizando solução contendo 10,0 mg.L⁻¹ de paracetamol. A Figura 7 representa os espectros de absorção na região do UV-Vis, onde é possível observar que, tanto por fotocatalise, quanto por fotólise, houve decaimento da concentração de fármaco em relação à concentração inicial, indicando que houve degradação.

Resultados obtidos por Abdel-Wahab e colaboradores utilizando nanoestruturas core-shell de $\text{TiO}_2/\text{Fe}_2\text{O}_3$ como fotocatalisadores na degradação do paracetamol (Abdel-Wahab et al., 2017) demonstraram comportamento similar aos obtidos neste trabalho, indicando que, apesar de um percentual menor de degradação do que o percentual de degradação do corante, a fotocatalise também é eficiente para o fármaco paracetamol. Além disso, observando os espectros representados pela Figura 7 e Figuras 8-a e 8-b, nota-se que concentração do fármaco influencia diretamente na eficiência do processo.

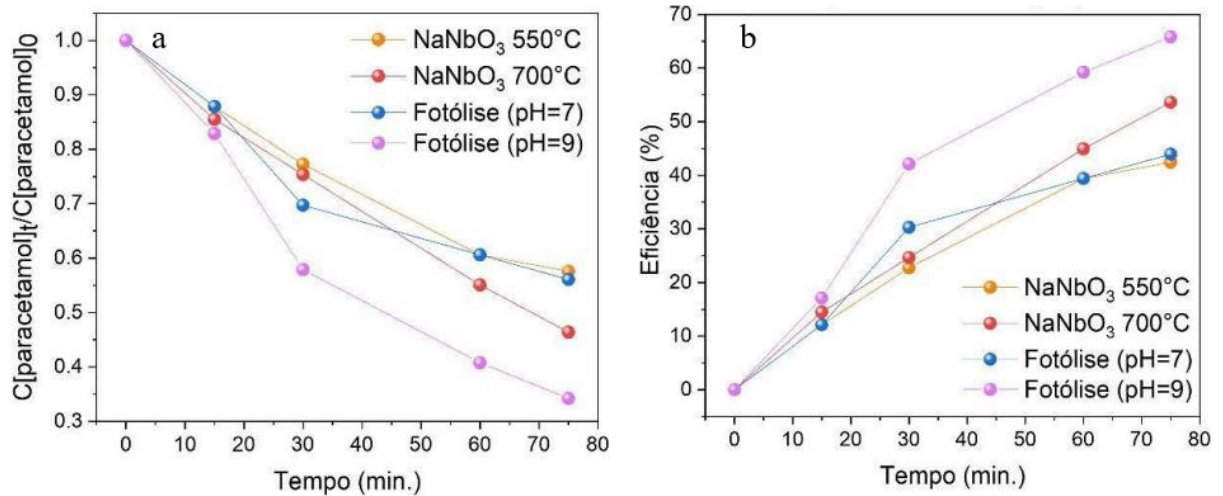
Figura 7: Espectros de Absorção da solução de Paracetamol 10 mg.L-1 na região do UV-visível a) utilizando fotocatalisador NaNbO_3 -550° e pH=7; b) utilizando fotocatalisador NaNbO_3 -700°C e pH=7; c) fotólise em pH=7; d) fotólise em pH=9



Fonte: Elaborado pela própria autora, 2022.

Observando os espectros da Figura 7 e os gráficos representados pela Figura 8, é possível inferir que a fotocatalise realizada utilizando o fotocatalisador obtido a 700°C (Figura 7 b e Figura 8-a e 8-b) apresentou maior eficiência em relação ao fotocatalisador obtido a 550°C, sendo elas em torno de 54% e 43%, respectivamente. Entretanto, ao comparar o processo fotocatalítico com a fotólise, nota-se que os resultados obtidos realizando a fotólise em pH=9 foram mais satisfatórios, uma vez que após 75 minutos de exposição à radiação UV, houve a degradação de aproximadamente 65% do fármaco, valor superior aos apresentados pelas demais amostras.

Figura 8: a) concentração de paracetamol em relação à concentração inicial, em função do tempo de teste; b) eficiência da degradação do paracetamol nas diferentes condições testadas.



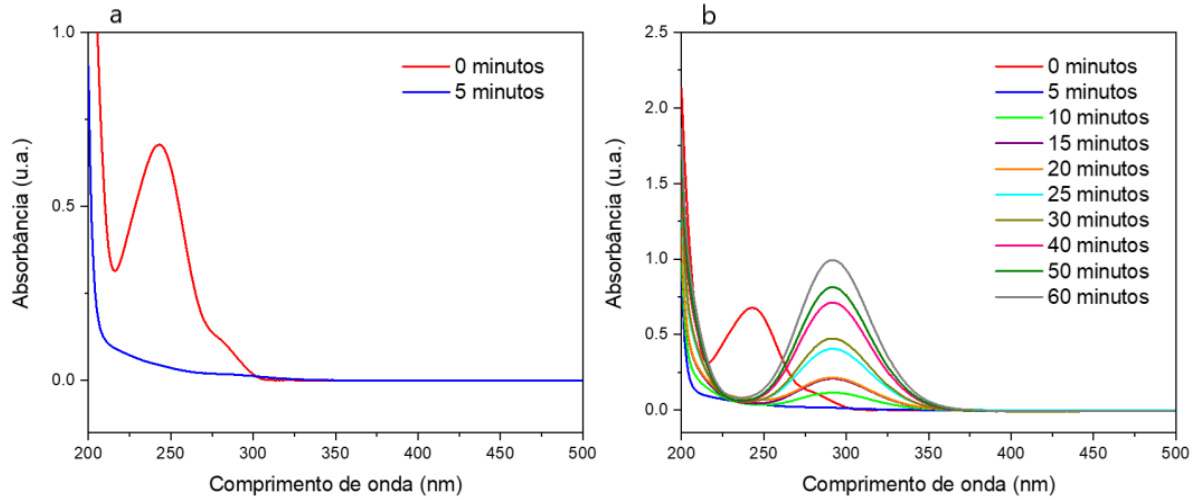
Fonte: Elaborado pela própria autora, 2022.

Visando explorar outros POAs a fim de obter melhores resultados, foram realizados ensaios utilizando a eletrólise como método de degradação. De acordo com a literatura, os processos de degradação do paracetamol podem acarretar a formação de possíveis intermediários que absorvem em comprimento de onda característicos: hidroquinona (290 nm), benzoquinona (245 nm), p-nitrofenol (317 nm) e 1,2,4-trihidroxibenzeno (286 nm) (Jallouli et al., 2017).

No entanto, como a eletrólise ocorreu em meio de NaCl, pode ocorrer a formação de hipoclorito de sódio, cujo comprimento de onda de absorção encontra-se em torno de 292 nm (Evans, K, 2020), região próxima à região de absorbância da hidroquinona.

Ao analisar os espectros representados na Figura 9-a é possível observar que houve um decaimento da absorbância do paracetamol nos primeiros cinco minutos, indicando uma rápida degradação, sendo a eficiência calculada aproximadamente 93%, no entanto, houve a identificação de uma nova curva nos tempos sequenciais (Figura 9-b) com absorbância em torno de 290 nm, podendo indicar a formação de um possível intermediário do paracetamol, a hidroquinona (Jallouli et al., 2017), ou ainda do hipoclorito de sódio, proveniente do NaCl, utilizado como eletrólito.

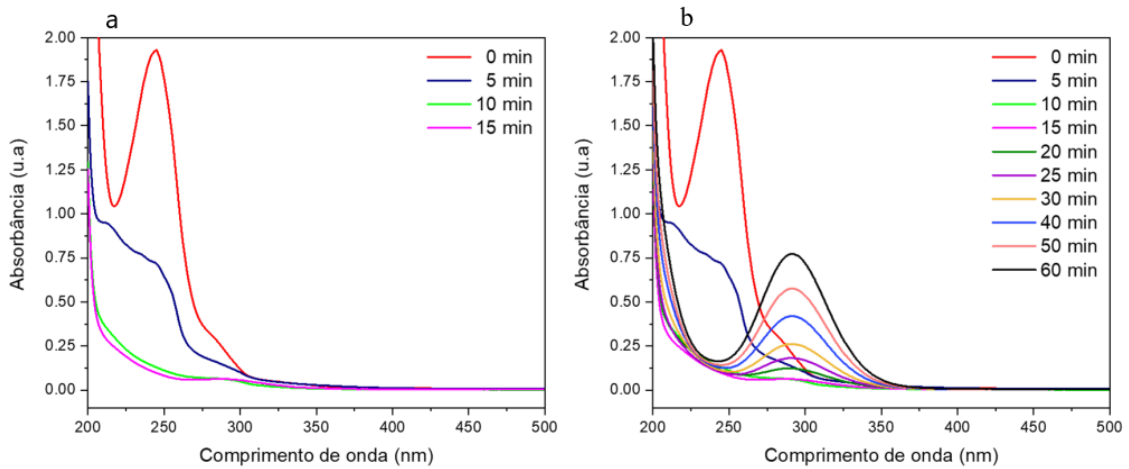
Figura 9: Espectros de absorção na região do UV-Visível para a eletrólise realizada nas condições de 10 mg.L⁻¹ de paracetamol, 0,05 mol.L⁻¹ de NaCl e j~7,5 mA.cm⁻²



Fonte: Elaborado pela própria autora, 2023.

Conforme apresentado na Figura 10-a, ao trabalhar com a concentração de paracetamol igual a 20 mg.L⁻¹, durante os 15 primeiros minutos houve um decaimento da curva de absorção do paracetamol, indicando que houve degradação, sendo a eficiência calculada aproximadamente 95%, no entanto, após 15 minutos inicia-se a formação de uma nova curva (Figura 10-b), assim como no ensaio anterior, indicando a possível formação de hidroquinona ou hipoclorito de sódio.

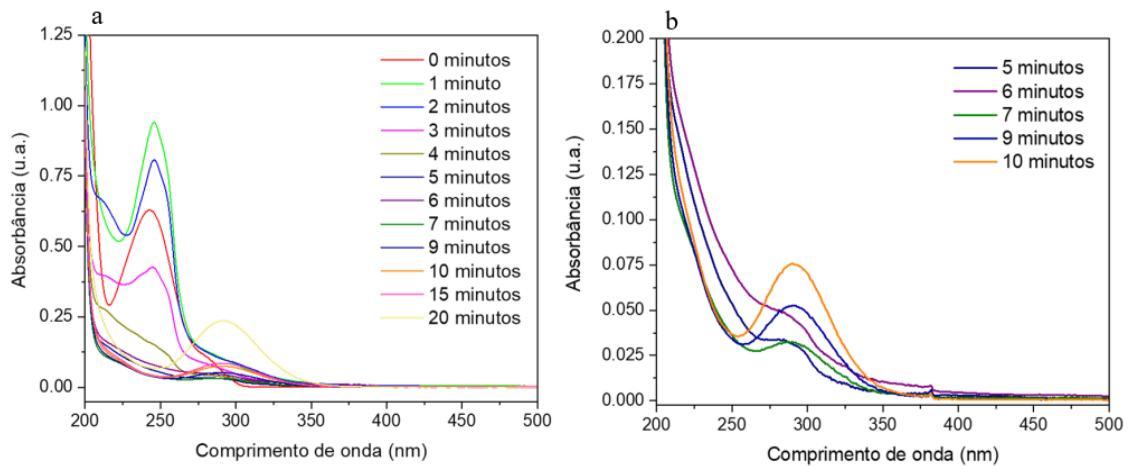
Figura 10: Espectros de absorção na região do UV-Visível para a eletrólise realizada nas condições de 20 mg.L⁻¹ de paracetamol, 0,05 mol.L⁻¹ de NaCl e j~7,5 mA.cm⁻²



Fonte: Elaborado pela própria autora, 2023.

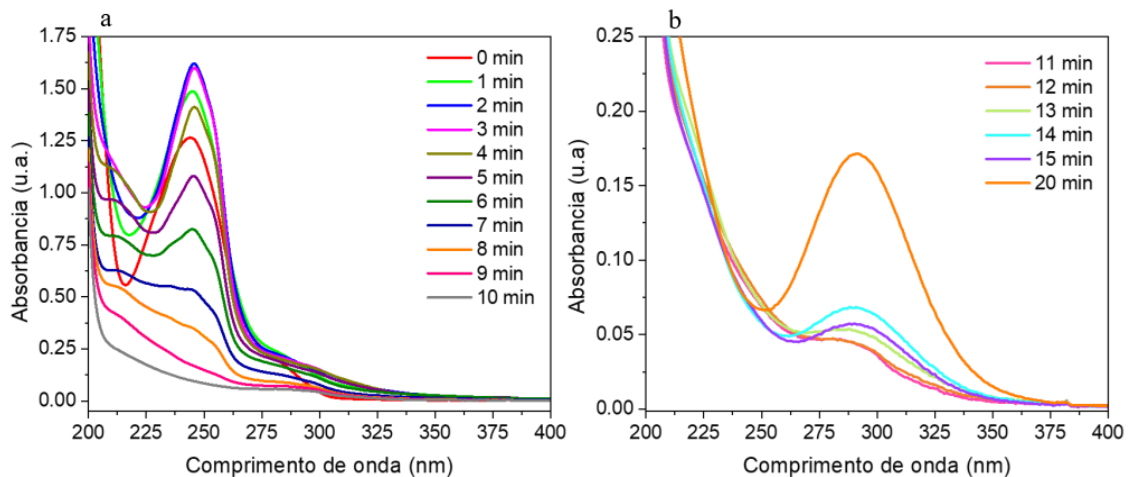
Com base nesses resultados, foram realizados ensaios mantendo a condições propostas e alterando-se a frequência amostral, de modo a retirar alíquotas a cada minuto. Os espectros representados pela Figura 11 demonstram que até 5 minutos é possível observar um decaimento da absorbância (figura 11-a), e que, ainda em 5 minutos já há a presença da banda em torno de 292 nm (figura 11-b). Para o ensaio com $20,0 \text{ mg.L}^{-1}$, o mesmo comportamento é observado até o tempo de 10 minutos (Figura 12-a e 12-b)

Figura 11: Espectros de absorção na região do UV-visível para o paracetamol obtidos na condição de 10 mg.L^{-1} de paracetamol, $0,05 \text{ mol.L}^{-1}$ de NaCl e $j \sim 7,5 \text{ mA.cm}^{-2}$, das alíquotas recolhidas até 20 minutos de experimento.



Fonte: Elaborado pela própria autora, 2023.

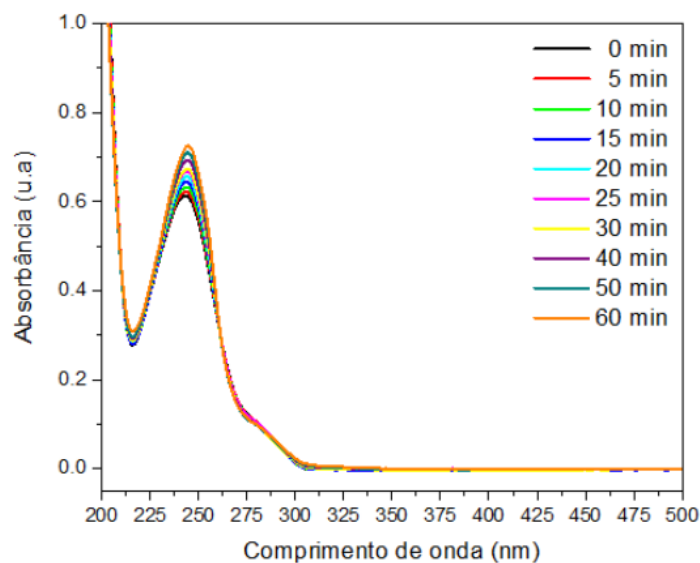
Figura 12: Espectros de absorção na região do UV-Visível para o paracetamol obtidos na condição de 20 mg.L^{-1} de paracetamol, $0,05 \text{ mol.L}^{-1}$ de NaCl e $j \sim 7,5 \text{ mA.cm}^{-2}$, das alíquotas recolhidas até 20 minutos de experimento.



Fonte: Elaborado pela própria autora, 2023.

De modo a investigar se o aparecimento da segunda banda de absorção seria devido a concentração de eletrólito, foram realizados ensaios utilizando menores concentrações de NaCl ($0,01 \text{ mol.L}^{-1}$ e $0,025 \text{ mol.L}^{-1}$) e solução contendo de $10,0 \text{ mg.L}^{-1}$ de paracetamol. A Figura 13 representa os espectros obtidos realizando o ensaio com a concentração de eletrólito igual a $0,01 \text{ mol.L}^{-1}$, mantendo $j \sim 7,5 \text{ mA.cm}^{-2}$. Ao observar o comportamento do gráfico é possível perceber que praticamente não houve degradação.

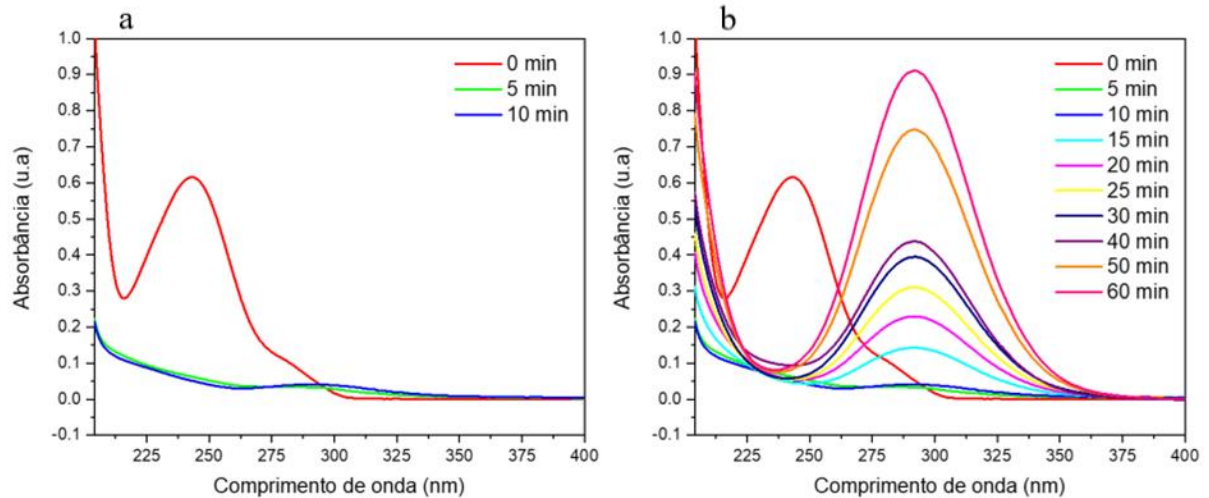
Figura 13: Espectros de absorção na região do UV-Visível para o paracetamol obtidos na condição de 10 mg.L^{-1} de paracetamol, $0,01 \text{ mol.L}^{-1}$ de NaCl e $j \sim 7,5 \text{ mA.cm}^{-2}$



Fonte: Elaborado pela própria autora, 2023.

Em contrapartida, os resultados retratados na Figura 14 utilizando $0,025 \text{ mol.L}^{-1}$ de NaCl evidenciam o mesmo comportamento dos resultados para $0,05 \text{ mol.L}^{-1}$, ou seja, a concentração de paracetamol decaiu nos primeiros 10 minutos (Figura 14-a) e, após esse tempo, já foi possível a observação da banda em torno de 290 nm (Figura 14-b), indicando a possível geração de subprodutos ou de hipoclorito de sódio. Essa condição experimental, mesmo com menor concentração de eletrólito, foi eficiente para degradar aproximadamente 90% do paracetamol.

Figura 14: Espectros de absorção na região do UV-Visível para o paracetamol obtidos na condição de 20 mg.L⁻¹ de paracetamol, 0,025 mol.L⁻¹ de NaCl e $j \sim 7,5 \text{ mA.cm}^{-2}$



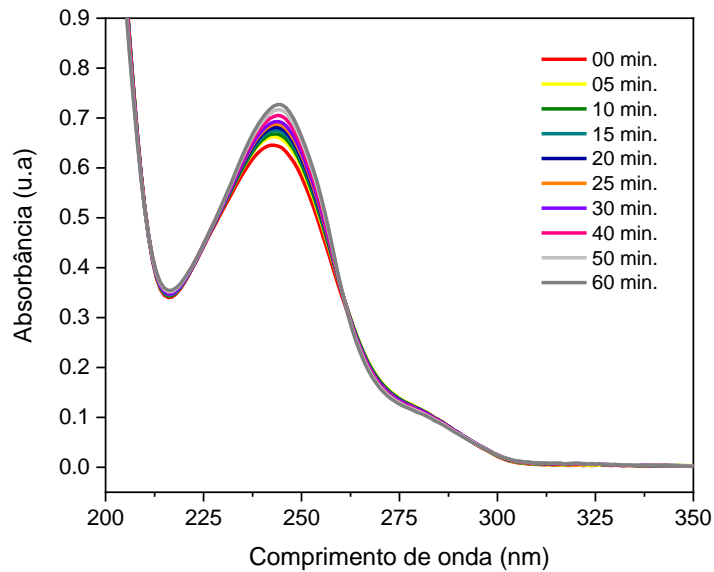
Fonte: Elaborado pela própria autora, 2023.

A fim de avaliar a demanda energética dos processos eletrolíticos, foi utilizada a equação 2: $E_d (\text{Wh L}^{-1}) = \frac{U \times I \times t}{V}$, onde E_d é a demanda energética, U é a média da voltagem aplicada (V), I é a corrente (A), t é a meia-vida (h), V é o volume da solução a ser degradada (L) (Wang, Y. et al, 2016)

Considerando o teste realizado com a concentração de paracetamol igual a $10,0 \text{ mgL}^{-1}$, $0,05 \text{ mol L}^{-1}$ de NaCl e $j \sim 7,5 \text{ mA.cm}^{-2}$, onde após 5 minutos presume-se que 95% (9,5 mg) do fármaco foi degradado, encontrou-se que a $E_d = 3,3 \times 10^{-3} \text{ WhL}^{-1}$. Já, quando se trabalhou com a solução de concentração igual a $20,0 \text{ mgL}^{-1}$, $E_d = 0,0131 \text{ WhL}^{-1}$.

No intuito de explorar a formação da banda de absorção em torno de 290 nm, e uma possível distinção se esta corresponde a um subproduto do paracetamol ou ao hipoclorito, realizamos um teste em meio de Na_2SO_4 como eletrólito, sendo a concentração do mesmo igual a $0,017 \text{ mol L}^{-1}$, de modo a manter a mesma força iônica apresentada quando utilizamos o NaCl como eletrólito. Neste experimento, a densidade de corrente foi mantida em $\sim 7,5 \text{ mA.cm}^{-2}$, utilizando a solução de paracetamol contendo $10,0 \text{ mgL}^{-1}$, e conforme os espectros representados pela Figura 15, observa-se que praticamente não houve degradação.

Figura 15: Espectros de absorção na região do UV-Visível para o paracetamol obtidos na condição de 10 mg.L⁻¹ de paracetamol, 0,017 mol.L⁻¹ de Na₂SO₄ e j~7,5 mA.cm⁻²

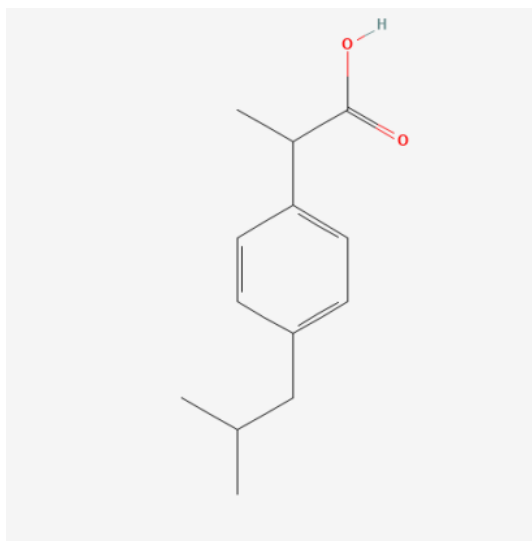


Fonte: Elaborado pela própria autora, 2023.

4.3. Degradação do Ibuprofeno

Para avaliar a eficiência da eletrólise para a degradação de outro fármaco, foi realizado um experimento utilizando 10,0 mg.L⁻¹ de ibuprofeno, empregando NaCl 0,05 mol.L⁻¹ como eletrólito e j~7,5 mA.cm⁻². A Figura 16 representa a fórmula estrutural do ibuprofeno. A porção hidrofílica que confere solubilidade em água é representada pela porção superior com função ácido carboxílico, em contrapartida, o restante da molécula tem caráter mais apolar.

Figura 16: Fórmula estrutural do ibuprofeno

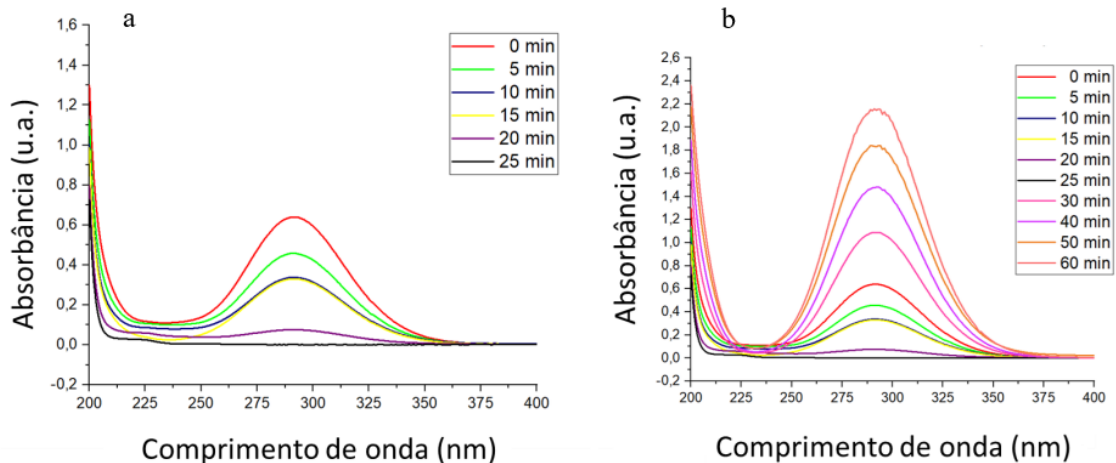


Fonte: (PUBCHEM, Ibuprofen, 2023).

Devido a essas características estruturais, o ibuprofeno possui solubilidade em água de $2,3 \text{ mg.mL}^{-1}$. Durante o preparo da solução estoque foi possível observar uma dificuldade na solubilização do comprimido, o que pode ter afetado a concentração de ibuprofeno desejada de $10,0 \text{ mg.L}^{-1}$. De acordo com a literatura, a absorbância do ibuprofeno encontra-se em torno de 220 nm , no entanto, nenhuma banda de absorção nessa região foi observada.

Os espectros representados pela Figura 17 (a e b) demonstram apenas uma banda em torno de 292 nm , região característica do hipoclorito de sódio. A dificuldade de solubilização do comprimido pode ter acarretado uma solução com quantidade indetectável de ibuprofeno, além disso, a presença de NaCl em meio reacional aponta para que a banda detectada seja referente ao hipoclorito de sódio.

Figura 17: Espectros de absorção na região do UV-Visível para o ibuprofeno obtidos na condição de 10 mg.L^{-1} de ibuprofeno, $0,05 \text{ mol.L}^{-1}$ de NaCl e $j \sim 7,5 \text{ mA.cm}^{-2}$



Fonte: Elaborado pela própria autora, 2023.

Para o Ibuprofeno, necessitam ser feitos mais ensaios de modo a obter resultados mais conclusivos.

5. CONCLUSÃO

Os POAs explorados neste trabalho foram eficientes para a degradação do corante Azul Brillante e do fármaco paracetamol. Em relação a fotocatalise, observou-se que para a degradação do corante, a utilização do NaNbO_3 obtido a $550\text{ }^\circ\text{C}$ de tratamento térmico, bem como a utilização do NaNbO_3 obtido a $800\text{ }^\circ\text{C}$, resultaram em uma degradação próxima a 90%, após 60 minutos de experimento. Já, realizando a fotólise, a degradação foi cerca de 50%.

Ao estudar a degradação via fotocatalise da solução contendo paracetamol com concentração igual a $10,0\text{ mg.L}^{-1}$, observou-se que após 75 minutos de experimento, a eficiência fotocatalítica foi de aproximadamente 54%. Em contrapartida, para o mesmo tempo de exposição à radiação ultravioleta na ausência de fotocatalisador, em pH básico, a eficiência foi de aproximadamente 64%.

Entre os POAs estudados, a eletrólise se mostrou mais eficiente, pois ao trabalhar-se com a concentração de $10,0\text{ mg.L}^{-1}$ de paracetamol em meio de $0,05\text{ mol L}^{-1}$ de NaCl , 95% do fármaco foi degradado. Já ao se aumentar a concentração de contaminante para $20,0\text{ mg.L}^{-1}$ a mesma eficiência foi obtida após 15 minutos de experimento. Além disso, observou-se a formação de uma banda de absorção na região do UV-Visível em torno de 290 nm. Tal banda pode ser referente à formação de um subproduto de degradação do paracetamol (hidroquinona) ou a presença de hipoclorito, uma vez que os experimentos foram realizados em meio a NaCl . No entanto, para a identificação de tal banda, é necessário realizar análises como a espectrofotometria de massas.

Em comparação com o paracetamol os testes com o ibuprofeno, nas condições avaliadas, demonstraram-se inconclusivos, sendo necessária a realização de ensaios em outras condições, seja variando o eletrólito e a concentração, utilizando o fármaco advindo de outras fontes, ou até mesmo alterando-se o método.

Com base nos resultados obtidos, observou-se que as metodologias avaliadas podem ser alternativas eficientes para recuperação de efluentes aquáticos contaminados por poluentes emergentes e que juntamente com outras técnicas de caracterizações como espectrofotometria de massas ou cromatografia líquida de alta performance, será possível identificar os produtos originados durante os processos, possibilitando otimizar os experimentos, visando obter as melhores condições para a geração de um produto de melhor qualidade que possa ser repassado a população.

6. TRABALHOS FUTUROS

Para avaliar a eficiência de tais métodos frente a contaminantes reais, pretende-se aplicar as metodologias exploradas para o tratamento de efluentes industriais e de águas de abastecimento.

Devido aos resultados obtidos na realização dos testes com o Ibuprofeno, tem-se a intenção de explorar outras condições experimentais que possam favorecer a degradação do medicamento, além da utilização do princípio ativo para determinar se há alguma interferência advinda de excipientes presentes no comprimido.

Além disso, visando obter informações mais precisas sobre os produtos obtidos após a realização da eletrólise, a fim de otimizar as condições experimentais, pretende-se executar análises para a identificação dos subprodutos de degradação, como por exemplo, a Espectrofotometria de Massas ou Cromatografia Líquida de Alta Performance, além de verificar possível mineralização do contaminante orgânico por meio da quantificação do Carbono Orgânico Total.

Com a identificação e quantificação dos subprodutos, também é pretendido realizar análises toxicológicas, de modo a avaliar se a solução tratada e descontaminada pode seguir para tratamento convencional nas estações de tratamento de água e esgoto sem que represente riscos para os seres vivos que entrem em contato ou a consumam.

Por fim, pretende-se aplicar a eletrólise para a degradação de outros fármacos, como outros medicamentos da classe dos analgésicos e antipiréticos, ou ainda ampliar o estudo para classes diferentes, mas que também representam um risco por se tratar de contaminantes emergentes, como anticoncepcionais, antibióticos e psicoterápicos.

7. ABREVIATURAS E SIGLAS

°C: graus celsius;

AINEs: Anti-inflamatórios não esteroides;

CPEs: Contaminantes de Preocupação Emergente;

DAS: ânodo dimensionalmente estável;

ETAs: Estações de Tratamento de Águas para abastecimento público;

ETEs: Estações de Tratamento de Efluentes;

FCF: corante azul brilhante FCF;

g.L⁻¹: grama a cada litro;

I: corrente;

j: densidade de corrente;

mA.cm⁻²: miliampere por centímetro quadrado;

mg.L⁻¹: miligrama a cada litro;

mg: miligrama;

mL.s⁻¹: mililitro a cada segundo;

mL: mililitro;

mol.L⁻¹: Mol a cada litro;

NaCl: Cloreto de sódio;

NaNbO₃: niobato de sódio (fotocatalisador);

ONU: Organização das Nações Unidas;

pH: potencial hidrogeniônico;

POAs: Processos Oxidativos Avançados;

t: tempo;

TiO₂: dióxido de titânio;

U: voltagem média;

UV: Ultravioleta;

V: Volume;

W: unidade de potência Watt;

WhL⁻¹: Watt hora por litro;

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ABDEL-WAHAB, A. M. et al. Photocatalytic degradation of paracetamol over magnetic flower-like TiO₂ /Fe₂O₃ core-shell nanostructures. **Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry**, v. 347, p. 186–198, 2017
- [2] Anderson, C., Martinez, K., & Johnson, R. (2019). Paracetamol: A comprehensive review. **Journal of Pain Management**, 26(4), 183-190.
- [3] Bell, R., Jones, D., & Smith, A. (2019). The role of synthetic food dyes in the modern diet. **Food Science Quarterly**, 12(4), 223-230.
- [4] Brilliant Blue G. **Sigma Aldrich**, 2023. Disponível em: <https://www.sigmaaldrich.com/BR/pt/product/sigma/27815>. Acesso em: 16, outubro de 2023.
- [5] CHEN, J. et al. Highly efficient removal of toxic dyes using TiO₂ based photocatalysis under visible light. **Chemical Engineering Journal**, v. 380, p. 122527, 2020.
- [6] Chen, W., Feng, L., & Zhao, D. (2020). Toxicity assessment of synthetic dyes to aquatic organisms: A review. **Aquatic Ecology**, 54(3), 289-301.
- [7] DE FARIA, L. B., et al. Electrochemical Degradation of Diuron by Anodic Oxidation on a Commercial Ru_{0.3}Ti_{0.7}O₂ Anode in a Sulfate Medium. **ChemEngineering**, v. 7, n. 4, p. 73, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/chemengineering7040073>.
- [8] EVANS, K. Quantification of Sodium Hypochlorite in Disinfectants. **PerkinElmer**, 2020.
- [9] FARTO, C.; JÚNIOR, G.; SENA, R.; ROSENHAIM, R. Contaminantes de preocupação emergente no Brasil na década 2010-2019 - Parte I: ocorrência em diversos ambientes aquáticos. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, v.18, n. 1, p. 6– 0, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.21168/rega.v18e6>
- [10] JALLOULI, N.; ELGHNIJI, K.; TRABELSI, H.; KSIBI, M. Photocatalytic degradation of paracetamol on TiO₂ nanoparticles and TiO₂/cellulosic fiber under UV and sunlight irradiation. **Arabian Journal of Chemistry**, v. 10, p. S3640–S3645, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2014.03.014>
- [11] Johnson, E., Martinez, K., & Anderson, C. (2018). Occurrence and fate of ibuprofen in aquatic environments: A review. **Environmental Chemistry Letters**, 16(3), 1035-1047.
- [12] PIPI, Angelo R. F.; AQUINO NETO, Sidney; DE ANDRADE, Adalgisa R. Electrochemical Degradation of Diuron in Chloride Medium using DSA®Based Anodes. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.5935/0103-5053.20130159>

- [13] PEREIRA, S. et al. Electrochemical degradation of microplastics in synthetic marine water. **Environmental Pollution**, v. 236, p. 22-28, 2018.
- [14] RANDAZZO, S.; SCIALDONE, O.; BRILLAS, E.; SIRÉS, I. Comparative electrochemical treatments of two chlorinated aliphatic hydrocarbons. Time course of the main reaction by-products. **Journal of Hazardous Materials**, v. 192, n. 3, p. 1555-1564, 2011.
- [15] RATHI, B. S.; KUMAR, P. S. Application of adsorption process for effective removal of emerging contaminants from water and wastewater. **Environmental Pollution**, v. 280, p. 116995, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116995>
- [16] Santos, A. B., Silva, C. D., & Pereira, E. A. (2021). Occurrence and fate of pharmaceuticals in the environment: A comprehensive review. **Environmental Pollution**, 278, 116832.
- [17] Silva, A. B., Santos, V. L., & Lopes, A. R. (2018). Occurrence and removal of synthetic dyes in wastewater: A review. **Environment and Pollution**, 6(2), 67-75.
- [18] Smith, J., Johnson, R., & Brown, A. (2020). Ibuprofen: A comprehensive review of its pharmacology and therapeutic uses. **Journal of Pharmacological Sciences**, 32(6), 421-435.
- [19] SMOLINKA, T. Encyclopedia of Electrochemical Power Sources. **Encyclopedia of Electrochemical Power Sources**, p. 394–413, 2009. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444527455003154>.
- [20] UNITED NATIONS – UN. Committee on Economic, Social and Cultural Rights. General Comment 15: **The right to water (Twenty-ninth session, 2003)**. Geneva, 2003.
- [21] VIANNA, R. C.; VIANNA JUNIOR, C. C.; VIANNA, R. M. Os recursos de água doce no mundo – situação, normatização e perspectiva. **JURIS - Revista da Faculdade de Direito**, [S. l.], v. 11, p. 247–270, 2008. DOI: 10.14295/juris.v11i0.598. Disponível em: <https://periodicos.furg.br/juris/article/view/598>.
- [22] WANG, Y. et al. Electrocatalytic degradation of ibuprofen in aqueous solution by a cobalt-doped modified lead dioxide electrode: influencing factors and energy demand. **RSC Advances**, 6, pp. 30598-30610, 2016.
- [23] WU, Y. et al. Solar photolysis for the removal of emerging pollutants in wastewater: A review. **Journal of Environmental Sciences**, v. 79, p. 203-216, 2019.
- [24] YOU, H. et al. Piezoelectrically/pyroelectrically-driven vibration/cold-hot energy harvesting for mechano-/pyro- bi-catalytic dye decomposition of NaNbO₃ nanofibers.

9. ANEXO 1

Sodium Niobate: Influence of particles processing route on the improvement of photocatalytic activity

Guilhermina Ferreira Teixeira¹, Euripedes Silva Junior², Vinícius Teodoro da Silva³, Maria Aparecida Zaghete², Elson Longo³, Flavio Colmati¹

¹Universidade Federal de Goiás (*Instituto de Química*) , ²Universidade Estadual Paulista (*Instituto de Química*) , ³Universidade Federal de São Carlos (*Departamento de Química*)

e-mail: mina.guilher@gmail.com

The growth of current society stimulates the study about materials able to work in problems related to environmental issues solutions. Among these problems are the energy crises and water pollution caused by organic compounds disposal. NaNbO_3 is a multifunctional material that can act as an alternative solution for both cases due to its piezoelectric and photocatalytic characteristics. The efficiency of this material is related to processing way. In this work, the photocatalytic behavior of NaNbO_3 will be addressed. For this NaNbO_3 particles were obtained from conventional thermal treatment at different temperatures of $\text{Na}_2\text{Nb}_2\text{O}_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$ metastable phase produced by microwave-assisted hydrothermal method. Products were used in photocatalytic tests performed using Rhodamine B as contaminant. The heating temperature of $\text{Na}_2\text{Nb}_2\text{O}_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$ has been driving the NaNbO_3 characteristics. Increasing the temperature from 550°C to 800°C, both crystalline structure and morphology of the particles change. In addition, the band gap energy increases from 3.24 to 3.34 eV. The best result was achieved using particles obtained by $\text{Na}_2\text{Nb}_2\text{O}_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$ thermal treatment at 800°C. In this condition, 100% of Rhodamine B was discolored in 60 minutes on UV radiation exposure. Also, tests performed based on scavengers use allowed to propose a degradation mechanism.

Acknowledgments:

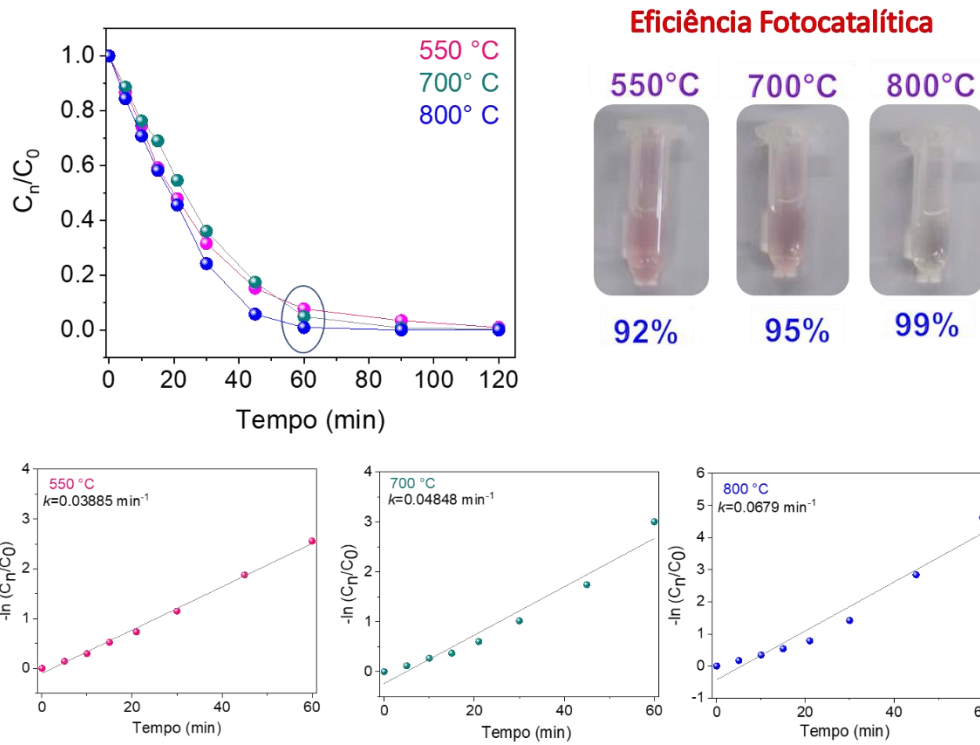
CAPES (Process number 88882 . 304680/ 2018 - 01), FAPESP-CEPID/CDMF 2013/07296-2 and FAPEG

References:

Ahmad, T.; Farooq, U.; Phul, R. *Industrial and Engineering Chemical Research* 57, 18-41, 2018

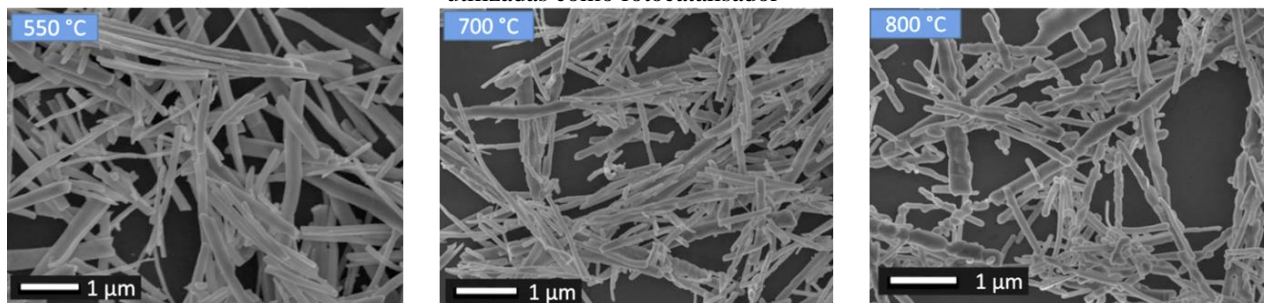
Trench, A. B.; Machado, T. R.; Gouveia, A. F.; Assis, M.; Trindade, L. G.; Santos, C.; Perrin, A.; Perrin, C.; Oliva, M.; Andrés, J.; Longo, E. *Applied Catalysis B: Environmental* 238, 198-211, 2018

Figura A1: Resultados obtidos pela realização da fotocatalise utilizando o NaNbO_3 como fotocatalisador para a degradação do corante Rodamina B.



Fonte: Elaborado pela própria autora, 2023.

Figura A2: Fotomicrografias obtidas por microscopia de varredura de alta resolução das fibras de NaNbO_3 utilizadas como fotocatalisador



Fonte: Elaborada pela própria autora, 2023.