



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

Estudo de processos Fenton e biológico para remoção de corante Índigo Carmin

Gabriela Cunha e Souza

Uberlândia – MG
2023



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



Estudo de processos Fenton e biológico para remoção de corante Índigo Carmin

Gabriela Cunha e Souza

**Orientadora: Profa. Dra Juliana de Souza
Ferreira**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Uberlândia – MG
2023

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

S729 2023	Souza, Gabriela Cunha e, 1993- Estudo de processos Fenton e biológico para remoção de corante Índigo Carmim [recurso eletrônico] / Gabriela Cunha e Souza. - 2023. Orientadora: Juliana de Souza Ferreira. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Química. Modo de acesso: Internet. Disponível em: http://doi.org/10.14393/ufu.di.2023.78 Inclui bibliografia. Inclui ilustrações. 1. Engenharia química. I. Ferreira, Juliana de Souza, 1975-, (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Química. III. Título. CDU: 66.0
--------------	--

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química
Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1K, Sala 206 - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902
Telefone: (34)3239-4249 - www.ppgeq.feq.ufu.br - secppgeq@feq.ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-graduação em:	Engenharia Química				
Defesa de:	Mestrado Acadêmico, 09/2023, PPGEQ				
Data:	10 de fevereiro de 2023	Hora de início:	14:00	Hora de encerramento:	15:50
Matrícula do Discente:	12112EQU007				
Nome do Discente:	Gabriela Cunha e Souza				
Título do Trabalho:	Estudo de processos Fenton e biológico para remoção de corante Índigo Carmim				
Área de concentração:	Desenvolvimento de Processos Químicos				
Linha de pesquisa:	Engenharia Ambiental				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Tratamento de efluentes empregando processos oxidativos e processos biológicos				
ODS-ONU:	ODS 6 - Água Potável e Saneamento; ODS 9 - Indústria, Inovação e Infraestrutura; ODS 12 - Consumo e Produção Responsáveis				

Reuniu-se por meio de webconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, assim composta: Professoras Doutoras: Bruna Vieira Cabral - ICTE/UFTM, Fabiana Regina Xavier Batista - PPGEQ/UFU, Miriam Maria de Resende - PPGEQ/UFU e Juliana de Souza Ferreira - PPGEQ/UFU, orientadora da candidata.

Iniciando os trabalhos a presidente da mesa, Profa. Dra. Juliana de Souza Ferreira, apresentou a Comissão Examinadora e a candidata, agradeceu a presença do público, e concedeu à discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação da discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir, a presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente às examinadoras, que passaram a arguir a candidata. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando a candidata:

Aprovada

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Bruna Vieira Cabral, Usuário Externo**, em 10/02/2023, às 15:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Juliana de Souza Ferreira, Professor(a) do Magistério Superior**, em 10/02/2023, às 15:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Fabiana Regina Xavier Batista, Professor(a) do Magistério Superior**, em 10/02/2023, às 15:48, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Miriam Maria de Resende, Professor(a) do Magistério Superior**, em 10/02/2023, às 15:48, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **4247027** e o código CRC **C0C3D988**.

*Dedico esta dissertação aos meus pais, Ivone e Ademir,
como reverência às suas vidas e agradecimento pelos seus esforços
a fim de me ensinar a importância do conhecimento.*

Agradecimentos

A Deus e Nossa Senhora Aparecida, pela proteção e pela perseverança que foi alimentada em mim ao longo desta jornada.

Aos meus pais, Ivone e Ademir, pelo amor, pelo apoio em todas as minhas escolhas e por me ensinarem a importância de estudar.

À minha irmã, Maria Rita, pelo carinho, pelo apoio e por acreditar nos meus projetos.

Ao Ulysses, pelo incentivo, pelo cuidado e pelo apoio em todas as situações.

Ao Eurípedes, pelo apoio e carinho em todos esses anos.

À Camila, pelo carinho e apoio mantidos mesmo à distância.

À professora Juliana, minha orientadora, pelo carinho, pela paciência e pelos ensinamentos nesses dois anos.

Aos colegas de pós-graduação, especialmente, Arthur, Amanda, Daniela, Erisson e Jussara, pela acolhida e por todos os conhecimentos compartilhados comigo.

A todos os funcionários e professores da FEQUI e UPEQ, e alunos de iniciação científica, pela colaboração e pelo carinho.

Ao CNPq pela concessão da bolsa.

À UFU, CAPES e FAFEMIG.

Sumário

Lista de Figuras	8
Lista de Tabelas.....	10
Resumo	11
Abstract.....	12
1. INTRODUÇÃO	13
2. OBJETIVOS.....	16
2.1. Objetivos Específicos.....	16
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
3.1. Indústria Têxtil.....	17
3.2. Corante Índigo Carmin	18
3.3. Método microbiológico de remoção de corantes	19
3.4. Processos Oxidativos Avançados: Fenton	20
4. MATERIAL E MÉTODOS	26
4.1. Material.....	26
4.2. Metodologia	27
4.2.1. Manutenção das culturas biológicas	27
4.2.2. Ensaio preliminar para seleção de cepas com potencial de descoloração	29
4.2.3. Experimento de descoloração com <i>Anabaena variabilis</i>	29
4.2.4. Experimento de descoloração com <i>Kluyveromices marxianus</i>	31
4.2.5. Experimento de descoloração com Fenton	33
4.2.6. Análises Físico-Químicas	33
4.2.6.1. Concentração Celular.....	33
4.2.6.2. Concentração de Corante	34
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
5.1. Seleção de cepas com potencial de descoloração	35
5.2. Remoção de corante por <i>Anabaena variabilis</i>	36
5.2.1. Remoção de corante por descoloração com <i>Anabaena variabilis</i>	36
5.3. Remoção de corante por descoloração com <i>Kluyveromices marxianus</i>	46
5.4. Remoção de corante por processo Fenton	50
6. CONCLUSÕES.....	52
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	53

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54
APÊNDICE A.....	62
A1. Composição do meio BG11 ₀	62
A2. Composição do meio YMA modificado.....	63
A3. Curva de calibração do Índigo Carmin.....	63
A4. Curva de calibração da <i>Anabaena variabilis</i>	64
A5. Curva de calibração da <i>Kluyveromyces marxianus</i>	64

Lista de Figuras

Figura 1 - Estrutura molecular do corante Índigo Carmin utilizado na pesquisa.....	19
Figura 2 - Esquema que exemplifica o mecanismo da adição eletrofílica.	22
Figura 3 - Esquema que explica a descoloração rápida de clorofenóis pela ação da adição eletrofílica.....	22
Figura 4 - Cianobactéria <i>Anabaena variabilis</i>	26
Figura 5 - Corante Índigo Carmin.	27
Figura 6 - Câmara de fotoperíodo mantida a temperatura de 30°C, luminosidade de 1.553 lx e fotoperíodo de 12 h.....	28
Figura 7 - (a) Levedura <i>Kluyveromices marxianus</i> cultivada em Erlenmeyer e (b) em placa de Petri, e mantida em geladeira a 4°C.....	28
Figura 8 - Resultado de teste preliminar de potencial de descoloração realizado com <i>Kluyveromices marxianus</i> , <i>Bacillus thuringiensis</i> e <i>Xantomonas sp.</i>	35
Figura 9 - Resultado dos experimentos na presença da cianobactéria <i>Anabaena variabilis</i> para as concentrações de 100 e 200 mg/L de corante índigo carmin e sob controle de pH a 5, 8 e 11.	37
Figura 10 - Remoções (%) de solução do corante índigo carmin nas condições com <i>Anabaena variabilis</i> e com luz, para concentrações de (a) 100 mg/L e (b) 200 mg/L e pHs controlados em 5, 8 e 11.	38
Figura 11 - Remoções de corante nas condições sem célula (s/c), com luz (c/l) e sem luz (s/l), para concentrações de (a) 100 mg/L e (b) 200 mg/L e pHs 8 e 11.....	40
Figura 12 - Remoções (%) de soluções do corante índigo carmin nas condições com <i>Anabaena variabilis</i> e com luz, para concentrações de (a) 100 mg/L e (b) 200 mg/L e pHs 5, 8 e 11 sem controle.	42
Figura 13 – Comportamento do pH nos experimentos com <i>Anabaena variabilis</i> e com luz, para concentrações de (a) 100 mg/L e (b) 200 mg/L e pHs 5, 8 e 11 sem controle.	43
Figura 14 - Remoção de soluções do corante índigo carmin nas condições sem célula e, com luz e sem luz, para concentrações de (a) 100 mg/L e (b) 200 mg/L e pHs 8 e 11 sem controle.	44
Figura 15 – Comportamento do pH dos experimentos sem célula, com luz e sem luz, para concentrações de (a) 100 mg/L e (b) 200 mg/L e pHs 8 e 11 sem controle.	45
Figura 16 - Remoções de corante na condição com célula, para concentração de 100 mg/L e pH controlado de 5, 8 e 11 e pH 5 sem controle.	46

Figura 17 - Concentração de <i>Kluyveromices marxianus</i> para concentração de corante de 100 mg/L e pH controlado de 5, 8 e 11 e pH 5 sem controle.	47
Figura 18 - Resultados dos experimentos com 100 mg/L de corante, em pH controlado de 5, 8, 11 e pH 5 sem controle, com células.	47
Figura 19 - Remoções de corante na condição com célula, para concentração de 200 mg/L e pH controlado de 5, 8 e 11 e pH 5 sem controle.	48
Figura 20 - Concentração de <i>Kluyveromices marxianus</i> para concentração de corante de 200 mg/L e pH controlado de 5, 8 e 11 e pH 5 sem controle.	49
Figura 21 - Resultados dos experimentos com 200 mg/L de corante, em pH controlado de 5, 8, 11 e pH 5 sem controle, com células.	49
Figura 22 - Remoção de corante pelo processo Fenton nas condições de concentrações de 100 e 200 mg/L e proporções de H ₂ O ₂ :Fe de 15,22:1, 5:1 e 3:1.	51
Figura 23 – 1 ^a , 3 ^a , 5 ^a e 7 ^a amostras dos experimentos com método Fenton da figura 23 ao longo do tempo.	51

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Potencial de oxidação e poder de oxidação relativa dos principais oxidantes.	21
Tabela 2 - Experimentos executados quanto a concentração de corante, presença de <i>Anabaena variabilis</i> , pH e incidência de luz.	30
Tabela 3 - Experimentos executados quanto a concentração de corante, presença de <i>Kluyveromices marxianus</i> e pH.	32
Tabela 4 – Experimentos do processo Fenton executados com variações de concentração de corante, massa de Fe, e proporção H ₂ O ₂ :Fe.	33

Resumo

A indústria têxtil é caracterizada pelo grande consumo de água em sua cadeia produtiva, e conseqüentemente, pela geração de grande quantidade de efluentes altamente coloridos pelas moléculas de corantes que não aderiram às fibras dos tecidos no processo de tingimento. Tais corantes, quando descartados inadequadamente, atuam como “barreiras” que prejudicam a entrada de luz solar no leito dos rios, atrapalhando o processo de fotossíntese das algas, além de aumentar a DQO do efluente. Tem crescido o interesse no estudo da remoção dessas substâncias por meio de métodos diversos. Este trabalho traz resultados de descoloração do corante Índigo Carmin pelo método Fenton aplicado em quatro condições diferentes, variando concentração de corante (100 e 200 mg/L) e proporção $\text{H}_2\text{O}_2\text{:Fe}$ (15,22:1; 5:1 e 3:1), tendo atingido remoção de 90% em uma delas (100 mg/L e 15,22:1) em 15 minutos de experimento. Este trabalho também avaliou o processo biológico de descoloração por cianobactéria, *Anabaena variabilis*, e por levedura, *Kluyveromyces marxianus*. Os ensaios foram realizados empregando a cianobactéria *Anabaena variabilis* na descoloração com variações de pH (5, 8 e 11), concentração de corante (100 e 200 mg/L) e controles sem a biomassa foram também preparados para verificar o efeito no meio na presença e ausência de luz. Em pHs 8,0 e 11,0 a remoção de cor chegou a 90% em 29 dias, sendo observado o favorecimento da descoloração nestas condições. No estudo utilizando a levedura *Kluyveromices marxianus* obteve-se remoções de cor maiores que 90%, para pHs 5 e 8, entretanto a pH 11 houve queda da concentração celular, sendo que, de modo geral a descoloração atinge seu máximo entre 10 e 20 dias, em função do pH do meio. Este trabalho mostrou que, apesar de o processo biológico levar dias, em comparação ao método de Fenton, a mesma porcentagem de remoção do Índigo Carmin foi possível, tanto pelo emprego de *Anabaena variabilis* como da *Kluyveromyces marxianus*. Outras variáveis de cultivo precisam ser avaliadas, principalmente o aumento da concentração de inóculo com o intuito de reduzir o tempo de processo.

Palavras-chave: corantes têxteis, índigo carmin, *Anabaena variabilis*, *Kluyveromices marxianus*, Fenton, biorremoção.

Abstract

The textile industry is characterized by high consumption of water in its production chain, and consequently, the generation of large volumes of highly colored effluents from dye molecules that did not adhere to fabric fibers in the dyeing process. When these dyes are improperly disposed, they act as "barriers" that interfere with the entry of sunlight into the riverbed, hindering the photosynthesis process of algae, as well as increase the COD of the effluent. There has been growing interest in the study of removing these substances through various methods. This work presents results of decoloration of the Indigo Carmine dye by the Fenton method applied under four different conditions, varying dye concentration (100 and 200 mg/L) and H₂O₂:Fe ratio (15,22:1; 5:1 and 3:1), achieving 90% removal under one condition (100 mg/L and 15,22:1) in 15 minutes of experiment. This work also evaluated the biological decoloration process using the cyanobacterium, *Anabaena variabilis*, and the yeast, *Kluyveromyces marxianus*. The assays were performed using the cyanobacterium *Anabaena variabilis* in decoloration with variations of pH (5, 8 and 11), dye concentration (100 and 200 mg/L), and controls without the biomass were prepared to verify the effect of medium under the presence and absence of light. At pHs 8.0 and 11.0, color removal reached 90% in 29 days, with decoloration favoring in these conditions. In the study using the yeast *Kluyveromyces marxianus*, color removals greater than 90% were obtained for pHs 5 and 8, however, at pH 11 there was a decrease in cell concentration, and in general, decoloration reached its maximum between 10 and 20 days, depending on the medium pH. Although the long time of process in comparison with Fenton method, this work proved that the use of microorganisms (*Anabaena variabilis* and *Kluyveromyces marxianus*) allowed to obtain the same removal percentage of indigo carmine. Further variables must be tested, mainly the increase of inoculum concentration in order to reduce the time of process.

Keywords: textile dyes, indigo carmine, *Anabaena variabilis*, *Kluyveromyces marxianus*, Fenton, bioremediation.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, várias indústrias utilizam os corantes em seus processos de produção. Estas substâncias são responsáveis por dar cor a alimentos, roupas, maquiagens e papéis, por exemplo. Segundo Hirschler et al. (2011) as águas residuais do segmento têxtil contêm corantes, íons orgânicos, surfactantes, agentes umectantes, entre outros, que são compostos recalcitrantes e/ou persistentes. Estas substâncias podem provocar alterações em águas superficiais, desencadeando graves problemas ambientais. Com isso, a humanidade tem buscado alternativas para a remoção de corantes dos efluentes.

Segundo O'Neill (1999) o fato dos efluentes têxteis terem como característica principal serem altamente coloridos se dá pela presença do corante que não foi fixado à fibra têxtil ao passar pelo processo de tingimento na cadeia da indústria.

Os corantes quando presentes nos corpos hídricos elevam a turbidez e isso reduz a incidência de luz solar na coluna d'água, o que interfere nos ciclos biogeoquímicos e afeta principalmente algas e peixes que se alimentam delas (Niebisch et al., 2014). Outro possível dano causado pela presença de corantes nos rios se dá pela sua deposição nos sedimentos. Tais substâncias podem percolar pelo solo e atingir algum lençol freático, o que pode afetar a qualidade das águas subterrâneas (Corseuil et al., 2011).

Existem tratamentos de efluentes que se provam eficientes na remoção de partículas que se baseiam em flotação ou sedimentação, porém na remoção de cor, tais processos não funcionam (Kunz, 2002). A aplicação do carvão ativado na remoção de corantes apresenta maior eficiência, quando não se trata de corantes de caráter catiônico (Al-Degs, 2000). O uso de sistemas de lodos ativados é bastante frequente, embora tenha o inconveniente da geração de resíduo sólido, assim com os processos citados anteriormente.

As tecnologias têm avançado no tratamento dos efluentes têxteis. Segundo Kunz (2002), a biodegradação é um processo biológico que visa degradar poluentes a baixo custo de operação com o uso de fungos, bactérias, leveduras e cianobactérias, entre outros, em que há o interesse tanto na degradação feita por estes seres quando na produção de suas enzimas, por exemplo, que também podem atuar neste processo como por biossorção. Entre as técnicas que empregam processos químicos estão a ozonização, na qual ocorre a oxidação pelo ozônio, no processo Fenton, no qual ocorre a oxidação pelo radical hidroxila, e a fotocatalise heterogênea, em que ocorre a oxidação por meio do radical hidroxila gerado. Os processos físicos mais estudados tem sido adsorção por carvão ativado e membranas.

O interesse na pesquisa do potencial de descoloração por meios biológicos é considerável, visto que descobertas de novas maneiras de contribuir para o tratamento de efluentes é de suma importância. Portanto, é necessária a investigação para encontrar novas cepas que tenham potencial de remoção do corante, e ainda, explorar seu mecanismo que pode ser por bioabsorção, bioacúmulo e/ou por degradação.

O processo biológico é conhecido por ser uma tecnologia econômica para tratamento de efluentes em comparação aos processos físicos e químicos. Com relação ao lodo ativado, que apresenta eficiência em remoção de compostos orgânicos solúveis e suspensos, porém tem a desvantagem de produzir resíduo secundário que pode ser tóxico. Os fungos se mostram uma alternativa, porém ainda tem a desvantagem de produzir o resíduo (lodo). Outra alternativa, que apresenta limitações de acordo com o composto orgânico do tipo os corantes, é o uso de cianobactérias, pois além de ser ambientalmente favorável, não produz lodo, intermediários carcinogênicos e ainda sequestram CO₂ (Touliabah et al., 2022). Neste sentido, este trabalho avaliou o uso de dois microrganismos e comparar suas eficiências na remoção com o processo oxidativo avanço Fenton, que foram *Kluyveromices marxianus* e *Anabaena variabilis*.

Existem diversos estudos de remoção de corantes pela levedura *Kluyveromices marxianus* na literatura, porém a maioria trata da descoloração por bioabsorção utilizando-se biomassa seca (Bustard et al., 1998; Aksu et al., 2003). O emprego desta espécie em estado vivo em estudos de remoção de corantes é menor, o principal artigo é de Meehan et al. (2000), portanto o interesse de pesquisa neste caso é maior.

As cianobactérias também são bastante estudadas de forma geral na remoção de corantes, espécies como *Chlorella vulgaris*, *Nostoc lincki*, *Phormidium sp.*, *Oscillatoria sp.* e *Spirulina platensis* são empregadas em pesquisas de descoloração (Ertugrul et al., 2008; El-Sheekh et al., 2009; Kumar et al., 2012; Padilla et al., 2020). A cianobactéria *Anabaena variabilis* aparece pouco explorada na literatura aplicada a experimentos relacionados a corantes, sendo um deles o estudo realizado por Hu et al. (2001). O gênero *Anabaena* tem sido usado para outros compostos de difícil tratamento como derivados de petróleo, pesticidas e fenólicos indicando que pode ser também investigado seu emprego para a remoção de corantes (Touliabah et al., 2022). É uma cianobactéria encontrada em lagoas no Brasil, sendo que esta espécie usada neste estudo foi isolada pelo Laboratório de Cianobactérias e Ficotoxinas – FURG (Rio Grande, RS)

Fenton é o processo de oxidação mais simples, no qual ocorre a oxidação de compostos orgânicos pelo radical hidroxila e a catalisação é realizada pelos íons férricos. É amplamente estudado, mas as condições ótimas de concentrações dos reagentes variam consideravelmente

de acordo com corante, fazendo-se necessário seu estudo para, na continuidade, propor suas variações combinado à radiação UV (foto-Fenton) e sonicação (sono-Fenton).

Neste projeto, a eficiência da remoção de corantes foi estudada com a comparação de processos de biodegradação a processos Fenton.

2. OBJETIVOS

A proposta deste estudo é avaliar o processo oxidativo avançado Fenton, e o processo biológico pela cianobactéria *Anabaena variabilis* e pela levedura *Kluyveromices marxianus* para remoção do corante índigo carmin. Para alcançar este objetivo, tem-se os seguintes objetivos específicos:

2.1. Objetivos Específicos

- ✓ Identificar microrganismos com potencial de descoloração do corante índigo carmin;
- ✓ Investigar o efeito dos parâmetros concentração de Fe^{+2} e razão $\text{H}_2\text{O}_2:\text{Fe}$ no processo Fenton;
- ✓ Estudar a biorremoção pela cianobactéria *Anabaena variabilis* e pela levedura *Kluyveromices marxianus*.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Indústria Têxtil

Segundo a Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção (Abit) existem 24,6 mil unidades produtivas formais em todo o país, e o Brasil está entre os quatro maiores produtores de malhas do mundo. O setor têxtil conta com 1,36 milhão de empregados diretos e 8 milhões de indiretos, dos quais 60% são mulheres. Em 2020 a produção foi de 1,91 milhão de toneladas em 2020 e o faturamento foi de R\$161 bilhões.

Com tanta relevância e robustez, há geração de grande quantidade de produtos na indústria têxtil, e conseqüentemente, de grande quantidade de efluentes. A indústria têxtil gera águas residuais que, geralmente, contêm altas cargas de sais dissolvidos, surfactantes, sólidos suspensos e matéria orgânica, principalmente na forma de moléculas corantes complexas (Neamtu et al., 2002).

Estima-se que cerca de 4% da produção de corantes orgânicos seja perdida para o meio ambiente (Kinkle et al., 2003). As substâncias corantes dificultam a penetração dos raios solares, prejudicando o metabolismo fotossintético de algumas espécies; além disso, apresentam-se como recalcitrantes e potencialmente cancerígenas (Peternel et al., 2006).

O processo da indústria têxtil é caracterizado por um alto consumo de água potável (cerca de 200 L/kg de produto) e, um efluente altamente contaminado com compostos químicos, metais e corantes sintéticos de difícil degradação, destacando por altas demandas biológica (DBO) e química (DQO) de oxigênio. Mais especificamente, os corantes sintéticos são compostos orgânicos e apresentam alta solubilidade em água, são tóxicos e possuem propriedades mutagênicas e carcinogênicas, ou seja, altamente prejudiciais à vida humana, aquática e que dificulta o processo de tratamento convencional deste tipo de efluente, inclusive a etapa biológica (Hasan et al., 2022, Adane et al, 2021, Shindhal et al, 2020).

Como os efluentes têxteis possuem uma composição complexa, na literatura referente ao seu tratamento, a caracterização é diversa, havendo estudos que se restringem a poucos parâmetros ou até uma caracterização mais completa, abrangendo os seguintes itens: cor real, pH, turbidez, composição (amido, açúcares, ácidos orgânicos, tipos de corantes, óxidos de diferentes metais), DQO, DBO, TOC, pH, nitrogênio amoniacal, fenóis totais, turbidez, salinidade (cloretos, sulfatos, fosfatos, carbonatos), alcalinidade, material particulado, sólidos

totais, sólidos sedimentáveis, sólidos dissolvidos totais, sólidos suspensos totais e condutividade (Pizato et al., 2017, Bilinska et al, 2016, Salgado et al., 2009, Arruda et al., 2007).

Em virtude desta complexidade e dificuldade de degradação dos corantes, os efluentes têxteis necessitam de tratamentos além do processo convencional envolvendo processos físico-químicos, químicos, biológicos ou ainda a integração entre eles, sendo: processos oxidativos avançados (POA) (oxidação por Fenton, fotocatalise, eletroquímica, sonicação, por ozônio), técnicas de filtração (nanofiltração, ultrafiltração, microfiltração, osmose reversa), processos microbiológicos (biodegradação e/ou bioadsorção por algas, fungos, bactérias), adsorção, troca iônica e coagulação (Adane et al, 2021, Shindhal et al, 2020).

3.2. Corante Índigo Carmin

Os principais corantes sintéticos utilizados na indústria são Índigo Carmin, Chromotrópico 2R, Vermelho de Fenol, Safranina T, Rodamina B, Alaranjado de Metila, Azul de Metileno, Azul de Tripán, Acid Black 10 BX, Direct Blue 10 e Verde Malaquita (Dellamatrice et al., 2017; Katheresan et al., 2018).

Os corantes têxteis podem ser classificados de algumas formas, dentre elas é possível determinar a classe de um corante pela estrutura química e pela fixação à fibra têxtil (Guaratini et al., 1999). Segundo Hunger (2003), a classificação mais adequada de um corante é feita ao levar-se em consideração sua estrutura química, por ser mais fácil de reconhecê-los na indústria se assim forem setorizados.

Quanto à estrutura química, os corantes podem ser classificados em: azo, antraquinona, metalizados, indigóide, ftalocianinas, metina, polimetina, polienos, di e triarilmetina, aza análogos, nitro, nitrosos e sulfurosos. Enquanto que, de acordo com a aplicação, a classificação é a seguinte: reativos, diretos, azoicos, dispersos, ácidos ou aniônicos, à tina, à cuba, pré-metalizados, branqueadores ópticos e catiônicos. (Zollinger, 2003)

O corante Índigo carmin ($C_{16}H_8N_2Na_2O_8S_2$), objeto de estudo deste projeto, é um sal dissódico do ácido 5,5 índigo dissulfônico da classe indigóide sulfonato e sua estrutura molecular do corante é representada na Figura 1 (Salgado et al., 2009).

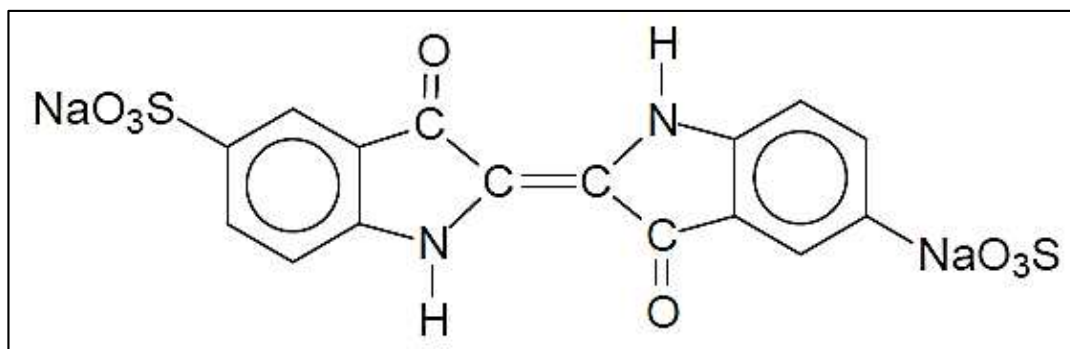


Figura 1 - Estrutura molecular do corante Índigo Carmin utilizado na pesquisa.

Fonte: Adaptado de Salgado et al. (2009)

A classe dos corantes indigóides é uma das classes mais antigas que a humanidade tem registros de terem sido usados no passado, sendo que nos tempos antigos era um artigo usado apenas por pessoas muito ricas devido ao seu preço elevado. Tal classe vem sendo muito utilizado na tintura de materiais como algodão e lã, e entre todos, o índigo é o corante mais importante e mais propagado desse grupo, sendo responsável pelo tingimento do tecido jeans (Hunger, 2003; Zollinger, 1991)

O corante Índigo Carmin é estudado em vários artigos, como por exemplo por Salgado et al. (2009) que estudou a descoloração de efluentes simulados contendo o corante em questão e o vermelho congo através de processo Fenton e foto-Fenton, e chegou a 100% de remoção de cor com os dois processos para o corante de interesse deste trabalho. Também foi investigada a degradação deste corante por foto-eleto-Fenton em meio aquoso ácido, que atinge 97% no tempo de 7 horas (Flox et al., 2006). Ramos et al. (2020) também estudaram a degradação deste corante por Fenton e foto-Fenton, e chegaram em valores de remoção próximos a 100% em 120 minutos. Podgornik et al. (2001) estudaram a transformação do corante por enzimas lignolíticas. Gemeay et al. (2003) se dedicaram ao estudo da cinética e degradação oxidativa do corante Índigo Carmin.

Como o foco deste trabalho foi a avaliação da remoção do Índigo Carmin por biodegradação microbiana (pela levedura *Kluyveromyces marxianus* e pela *Anabaena variabilis*) e pelo processo químico (Fenton), na seção seguir será apresentada uma descrição dos princípios e fatores que influenciam estes processos e os estudos encontrados na literatura que empregaram estes métodos.

3.3. Método microbiológico de remoção de corantes

A adsorção de corantes por microrganismos é chamada de biossorção e é um mecanismo considerado simples, cujo princípio é que o corante é concentrado na biomassa (Brás et al., 2001). Tal fenômeno se assemelha ao funcionamento de alguns métodos físicos usados para remoção de corantes, porém sua aplicação é limitada em termos de tempo de utilização porque a biomassa empregada se torna saturada ao longo do tempo, sendo necessária manutenção e destinação correta (Southern, 1995).

A biodegradação é a remoção que altera a estrutura original do corante podendo chegar ao nível de mineralização da molécula em água e dióxido de carbono. Seu precisa considerar que há diferenças de fisiologia, crescimento e comportamento entre os microrganismos, se a condição é aeróbica ou anaeróbica. É sabido, por exemplo, que bactérias aeróbias precisam de um período de adaptação até chegar em resultados significativos de remoção (Franciscon, 2005). Assim como as bactérias, outros microrganismos podem ter a necessidade de adaptação ao serem expostos a corantes com o objetivo de remoção de cor, e isso deve ser considerado nos estudos.

Em relação à cianobactéria *Anabaena variabilis*, existem poucos estudos na literatura. Hu et al. (2001) estudaram a espécie *Anabaena sp* no aspecto do comportamento enquanto esteve exposta a uma solução corante de RP₂B. As observações experimentais foram baseadas em variadas concentrações de corante, já a intensidade de luminosidade e temperatura foram mantidas constantes. O estudo concluiu que a cepa tem seu crescimento prejudicado pela presença do corante no meio, uma vez que a cianobactéria precisa de luz para sua fotossíntese.

A levedura *Kluyveromices marxianus* foi estudada por Meehan et al. (2000) em experimentos de descoloração do corante Remazol Black-B com variação de pH, temperatura e presença/ausência de oxigênio. Em condição anaeróbica a remoção foi baixa ou inexistente. Já em condição aeróbica, a máxima remoção foi observada a 38°C. A variação de pH de 3 a 5,5 não teve efeito sobre a descoloração.

3.4. Processos Oxidativos Avançados: Fenton

As águas residuais comumente passam por processos de remoção de poluentes que utilizam métodos de oxidação e biológicos. Além destes, também são utilizados os processos oxidativos avançados ou POAs, que são empregados em casos mais difíceis de remoção. Os POAs consistem na transformação da grande maioria dos contaminantes em água, dióxido de carbono e ânions inorgânicos, pela geração de radicais hidroxila que reagem com quase todos

os compostos orgânicos rapidamente. Entre as vantagens deste processo estão a possibilidade de combinação com outros processos a fim de reduzir custos, alta eficiência, versatilidade, e decomposição dos reagentes em substâncias que possuem menor impacto ambiental. (Stasinakis, 2008; Araújo et al., 2014; Xiang, 2016; Vasseghian, 2020)

A Tabela 1 mostra valores do potencial e do poder de oxidação de algumas espécies oxidativas disponíveis, e o radical hidroxila destaca-se pela boa classificação, o que mostra o grande potencial do emprego do processo Fenton na remoção de poluentes dos efluentes.

Tabela 1 - Potencial de oxidação e poder de oxidação relativa dos principais oxidantes.

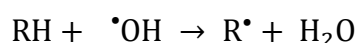
Oxidante	Potencial de oxidação (V)	Poder de oxidação relativa
F ₂	2,87	2,25
•OH	2,80	2,05
O ₂	2,42	1,78
O ₃	2,07	1,52
CH ₃ CO ₃ H	1,80	1,81
H ₂ O ₂	1,77	1,31
MnO ₄	1,68	1,24
Cl ₂	1,36	1,00
Br ₂	1,07	0,79
I ₂	0,54	0,40

Fonte: Adaptado de Yen et al. (2011) e Xu et al. (2016)

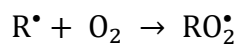
Segundo Legrini (1993), a formação do radical hidroxila se dá pela combinação entre oxidantes, catalisadores e irradiação. Os oxidantes podem ser, por exemplo, ozônio e peróxido de hidrogênio, os catalisadores podem ser íons metálicos e a irradiação pode ser ultravioleta ou visível.

Existem algumas reações que podem ocorrer a depender da estrutura do contaminante. Entre elas estão a abstração do átomo de hidrogênio, a transferência eletrônica, a adição eletrolítica a substâncias contendo insaturações e anéis aromáticos, e reações radical-radical.

De acordo Nogueira et al. (2007), os processos de oxidação denominados abstração de átomo de hidrogênio consistem no abstraimento ou captação do hidrogênio pelo radical hidroxila, gerando radicais orgânicos (Equação 1). Em seguida, são formados radicais peróxido a partir da adição de oxigênio molecular (Equação 2). Tais radicais peróxidos acabam iniciando reações em cadeia que levam a degradação até CO₂, sais inorgânicos e água.



Equação 1



Equação 2

As Figuras 2 e 3 demonstram como ocorre a adição eletrofílica. A Figura 2 mostra a formação de radicais orgânicos pela adição de radical hidroxila a compostos orgânicos com ligações do tipo π . Na Figura 3 demonstra este fenômeno para explicar a descoloração rápida de clorofenóis.

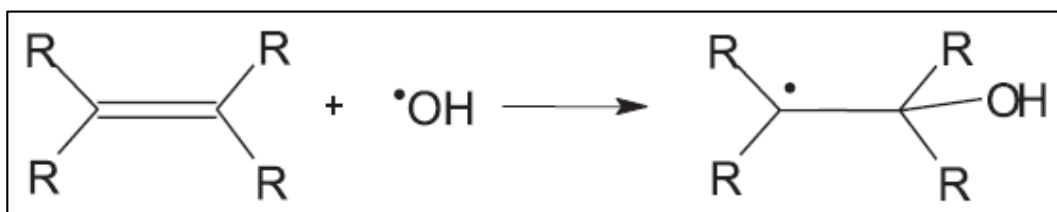


Figura 2 - Esquema que exemplifica o mecanismo da adição eletrofílica.

Fonte: Adaptado de Nogueira et al. (2007)

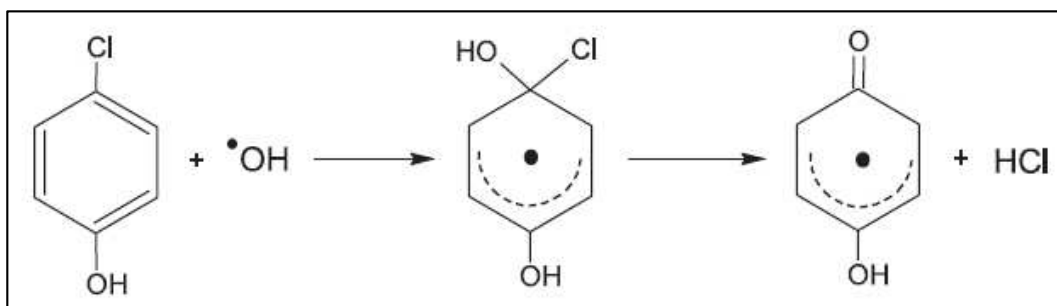
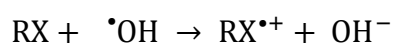


Figura 3 - Esquema que explica a descoloração rápida de clorofenóis pela ação da adição eletrofílica.

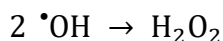
Fonte: Adaptado de Nogueira et al. (2007)

Na Equação 3, é demonstrado o que ocorre na transferência eletrônica. Ocorre o desfavorecimento da abstração de hidrogênio e adição eletrofílica na presença, por exemplo, de hidrocarbonetos clorados (Nogueira et al., 2007).

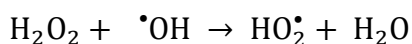


Equação 3

As Equações 4 e 5 mostram duas reações que são possíveis, e a prevalência de uma sobre a outra se dá pela concentração do substrato, pela presença de substrato, e pela recalcitrância.



Equação 4



Equação 5

Segundo Moradi et al (2020), o radical hidroxila não é a única espécie oxidante utilizada em POAs. Outros processos oxidativos avançados que utilizam, por exemplo, persulfato e geram radicais PS também podem gerar degradação. O uso de persulfato apresenta características como eficiência maior em degradar uma variedade maior de compostos orgânicos e maior estabilidade. (Rasoulifand et al., 2015; Lu et al., 2017)

Existem vários tipos de POAs utilizados na degradação de poluentes. Moradi et al. (2020) apresenta alguns desses tipos e mostra vantagens e desvantagens deles. Entre estes tipos, estão os métodos Fenton e foto-Fenton.

O método Fenton tem como vantagens a implementação barata e fácil, maior taxa de reação entre os POAs, não existir limite do uso de ferro como catalisador para o meio ambiente, não haver necessidade do uso de energia para a ativação do peróxido de hidrogênio, dentre outros. As desvantagens deste processo são necessidade de pH muito baixo, formação de resíduos perigosos, formação de iodo, gasto dos íons de ferro é maior que sua recuperação, dentre outros. (Görmez et al., 2019; Verma et al., 2019)

O processo foto-Fenton tem vantagens como estabilidade, não formação de sais, fácil operação, tempo curto de reação, e outros. Entre as desvantagens estão o desperdício de luz UV e não aplicabilidade a qualquer corante. (Schrack et al., 2005; Bahn Müller et al., 2015)

O início dos estudos relativos ao processo Fenton se deu pelo relato da observação da oxidação catalítica de ácido tartárico com sais ferrosos e peróxido de hidrogênio por Fenton (1894). Após quarenta anos do registro da reação Fenton, a hipótese levantada foi de que a espécie oxidante é o radical hidroxila (Haber et al, 1934). Desde então é sabido que esta espécie é a oxidante que atua no processo Fenton.

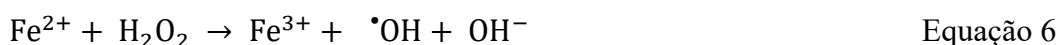
A aplicação da reação Fenton na oxidação de agentes contaminantes orgânicos em águas residuais começou um século depois do relato da oxidação feita por Fenton (1894). Barbeni et al. (1987) realizaram um dos primeiros trabalhos no estudo da degradação de clorofenóis no tratamento de água.

As principais vantagens da aplicação do método Fenton foram citadas por Bigda (1995). São elas: aplicação simples do processo, a reação ocorre em temperatura e pressão ambientes, método aplicável a várias espécies, dispensa de entrada de energia e não necessidade de reagentes e equipamentos especiais.

Segundo Araújo et al. (2014) o processo Fenton apresenta vantagens como operação flexível e sensível, pouco gasto com produtos químicos, dispensa de entrada de energia, ao tratar-se águas residuais. E apresenta desvantagens como alto custo, inviabilidade da completa mineralização dos poluentes orgânicos.

De acordo com Kuo (1992) e Kiwi et al. (2000), neste processo, o pH reacional interfere de forma consistente, sendo que em valores próximos a 3 a degradação dos compostos orgânicos tem atuação mais ativa do radical hidroxila, e em valores maiores que 4 a conversão de íons ferrosos em íons férricos é facilitada, que ocasionam a precipitação de matéria orgânica, na presença de hidróxido (WANG et al., 2008).

A Equação 6 demonstra a reação Fenton.



Outro íon férrico pode sofrer oxidação pelo radical hidroxila formado na reação acima. Isso pode ocorrer na ausência de substrato, conforme a Equação 7 a seguir.



As Equações 8, 9, 10, 11 e 12 são descritas por Nogueira et al. (2007) e tratam da decomposição de H_2O_2 em H_2O e O_2 por meio da catalisação pelos íons de ferro formados na reação Fenton. As reações ocorrem dependendo da mudança no pH.



Pelo fato do peróxido de hidrogênio apresentar potencial de redução menor que do radical hidroxila, quando esta espécie está em excesso também pode captar radicais hidroxila gerando a formação do radical hidroperoxila, como visto na equação 12. Esta reação atrapalha o mecanismo de degradação. O excesso de H_2O_2 ocorre quando a concentração de Fe^{2+} é menor que de Fe^{3+} , isso se dá porque a reação da equação 8 ocorre de forma mais lenta que a reação da Equação 7. Pela possibilidade de ocorrência deste fato que prejudica a degradação é necessária atenção à concentração adequada de H_2O_2 na utilização do método Fenton.

Grcic et al. (2014) aplicou o método Fenton em cinco soluções com concentração de 100 mg/L com corantes diferentes: Reactive Black 1 (RB1), C. I. Direct Red 23 (DR23), C. I. Acid Blue 25 (AB25), C. I. Basic Red 1 (BR1) e C. I. Mordant Orange 1 (MO1). A proporção H_2O_2 :Fe empregada neste processo foi 5:1. Para o corante BR1 a remoção chegou próximo a 90% em 60 minutos. O experimento com DR23 apresentou remoção de 40% em 60 minutos. Para a condição com corante AB25 apontou remoção próximo a 100% em 2 minutos. O teste com o corante BR1 apresentou remoção próxima a 100% em 40 minutos. Para a condição com MO1 foi apresentada remoção de aproximadamente 90% em 40 minutos.

O processo Fenton também foi empregado por Ramos et al. (2020) em descoloração de solução corante de concentração igual a 50 mg/L com índigo carmin. As proporções H_2O_2 :Fe utilizadas foram 3:1, 6:1 e 9:1.

O método Fenton foi aplicado por Salgado et al. (2009) a soluções de 20 ppm de índigo carmin e vermelho congo. A proporção H_2O_2 :Fe empregada neste processo foi 13:1. Para a solução de índigo carmin este processo atingiu 100% de remoção em menos de 5 minutos de experimento.

Rocha et al. (2016) utilizou proporção H_2O_2 :Fe de 5:1 no processo Fenton no tratamento de efluente têxtil. Este estudo foi realizado para corantes azul turquesa e verde malaquita, em soluções corantes de concentração igual a 200 mg/L. A maior remoção atingida foi de 99% a 25°C, enquanto que a 50°C a remoção de cor diminuiu para 94%.

4. MATERIAL E MÉTODOS

Nesta seção serão apresentados os procedimentos dos ensaios de remoção do Índigo Carmin em solução aquosa, por ação biológica de *Anabaena variabilis* (cianobactéria) e *Kluyveromices marxianus* (levedura) e pelo processo físico-químico, Fenton.

4.1. Material

Os microrganismos usados nos testes de descoloração biológica foram a cepa da cianobactéria, *Anabaena variabilis* ATCC 29413 (ver Figura 4), que foi obtida por meio de doação do Laboratório de Cianobactérias e Ficotoxinas da Universidade Federal do Rio Grande (FURG) (Rio Grande, RS) e a levedura *Kluyveromices marxianus* (64L) (ver Figura 7), ambas as cepas fazem parte do obtidas do banco de cultura mantido no Núcleo de Processos Biotecnológicos (NUCBIO) da Faculdade de Engenharia Química (FEQUI) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU).

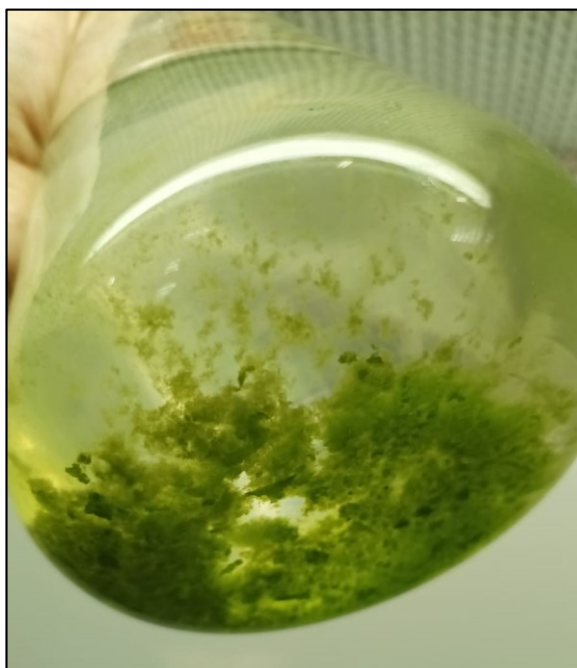


Figura 4 - Cianobactéria *Anabaena variabilis*

Fonte: Autor

O corante Índigo Carmin (CAS 860-22-0) fabricado pela Dinâmica Química Contemporânea Ltda. O corante (Figura 5) e os demais reagentes empregados na manutenção das cepas e nos ensaios de remoção do corante e análises físico-químicas foram de grau

analítico.

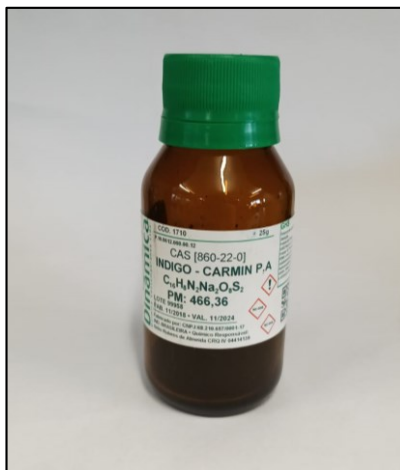


Figura 5 - Corante Índigo Carmin.

Fonte: Autor

4.2. Metodologia

4.2.1. Manutenção das culturas biológicas

A cianobactéria *Anabaena variabilis* foi cultivada em meio basal BG11₀ (ver Apêndice A) em Erlenmeyers de 250 e 500 mL. Seu cultivo foi feito em ambiente aeróbio, em uma câmara de madeira com fotoperíodo de 12 h, a 30°C e luminosidade de 1553 lx. A Figura 6 mostra a câmara em que é feito o cultivo da cianobactéria utilizada neste trabalho. Os repiques desta cepa foram realizados a cada 14 dias.

Quanto a outra cepa, a levedura *Kluyveromyces marxianus* (Figura 7) foi mantida em meio YMA modificado em placas de Petri para o fim de manter o cultivo por até três meses. Para os experimentos de descoloração a cepa foi reproduzida em meio submerso e mantida em Erlenmeyers 500 mL. O tempo de crescimento desta cepa após repique é de dois dias. Após este período, as placas de Petri e os Erlenmeyers foram armazenados em geladeira a 4°C para conservação celular por até três meses.



Figura 6 - Câmara de fotoperíodo mantida a temperatura de 30°C, luminosidade de 1.553 lx e fotoperíodo de 12 h.

Fonte: Autor

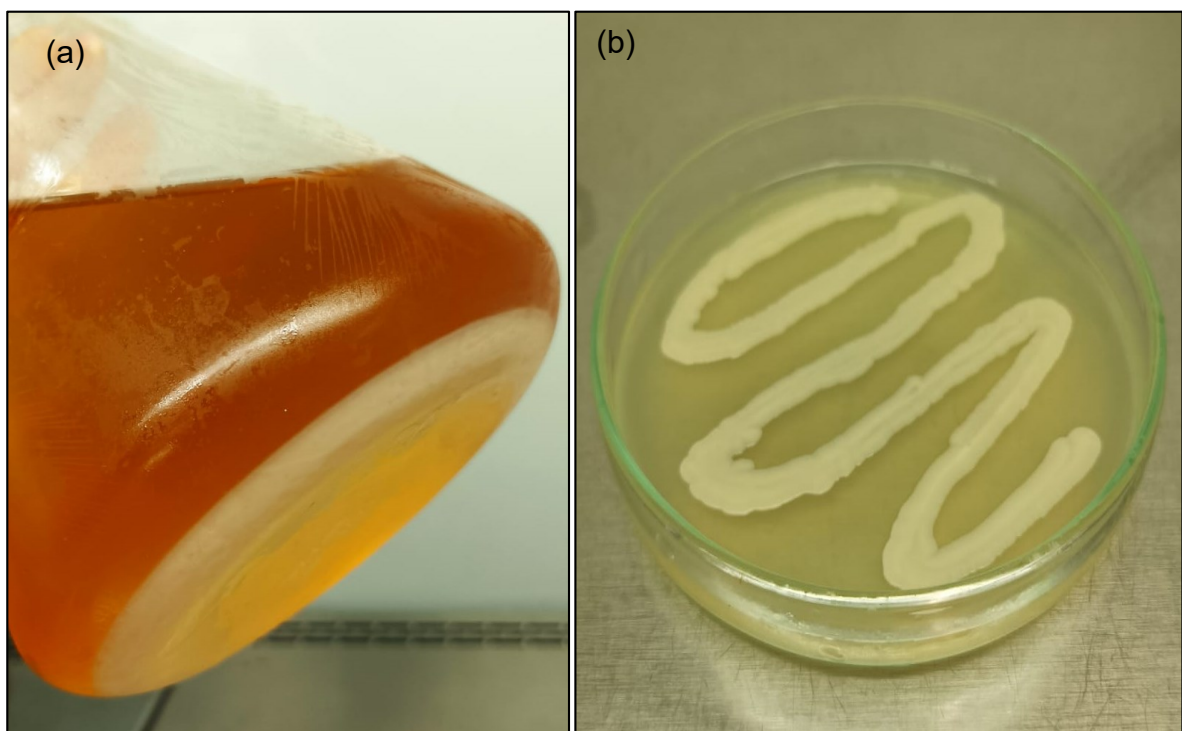


Figura 7 - (a) Levedura *Kluyveromyces marxianus* cultivada em Erlenmeyer e (b) em placa de Petri, e mantida em geladeira a 4°C.

Fonte: Autor

Deve-se ressaltar que esta levedura foi selecionada a partir de um teste de seleção de microrganismos com potencial de descoloração de corantes (Ver item 4.2.2).

O repique das cepas, assim como o preparado dos biorreatores para os ensaios de descoloração, foram realizados em câmara de fluxo laminar, com o devido uso de álcool 70% e luz UV para higiene e preparação da câmara. Também foi feita a esterilização de vidrarias e demais utensílios utilizados nestas ocasiões a fim de minimizar o risco de contaminação.

4.2.2. Ensaio preliminar para seleção de cepas com potencial de descoloração

Além do objetivo de testar a cianobactéria *Anabaena variabilis* para remoção de corante índigo carmin, este estudo propôs testar cepas disponíveis no banco de cultura dos laboratórios do NUCBIO, cujos gênero e/ou espécie foram identificados a partir de uma seleção de microrganismos usados em trabalhos científicos já publicados relacionados a descoloração de corantes.

Para esta seleção, foi adotada a metodologia utilizada por Martins et al. (1999) para detectar qualitativamente possíveis espécies com potencial de descoloração do corante estudado.

Com o intuito de avaliar o potencial destes microrganismos, para serem usados posteriormente nos ensaios de descoloração, foram, então, testadas a levedura *Kluyveromyces marxianus* (cultivada inicialmente meio Sabourand) e as bactérias *Bacillus thuringiensis* e *Xantomonas sp* (cultivadas em meio YMA).

O teste foi executado preparando-se os meios de cultivo necessários para a reprodução em placas de Petri das cepas selecionadas. Em cada placa correspondente a uma cultura diferente foram adicionados 20 mL de meio e 1 mL de solução corante de índigo carmin de 100 mg/L, que foi filtrada em filtro seringa 0,22 µm para evitar contaminação. Por fim foi feito repique nas placas de Petri e esperou-se dois dias para o crescimento dos microrganismos, e se o meio agar apresentou ou não descoloração em virtude do crescimento das colônias.

4.2.3. Experimento de descoloração com *Anabaena variabilis*

O experimento de descoloração foi realizado em Erlenmeyers de 250 mL contendo 100 mL de volume de reação que continha meio BG11, conforme Hu et al. (2001), solução corante e inóculo.

Os experimentos foram realizados em pHs de 5, 8 e 11, controlado durante todo o

experimento e sem controle; na presença e ausência de luz, para as concentrações de corante índigo carmin de 100 e 200 mg/L. Estas mesmas condições foram aplicadas para biorreatores na presença ou ausência da cianobactéria. Ensaios controles foram realizados simultaneamente, um apenas com o corante sem inóculo e outro apenas com o inóculo sem o corante, com o intuito de observar se a condição do meio em si promove a degradação do corante e qual o nível de toxicidade para o crescimento da de células.

As concentrações de 100 e 200 mg/L de corante índigo carmin foram atingidas com a adição de 10 mL de soluções preparadas previamente de 1000 e 2000 mg/L.

Os inóculos de cianobactéria foram retirados de meio com aproximadamente 0,1 g/L. Para os experimentos com solução corante e presença de inóculo, a proporção foi de 10% de solução corante, 10% de inóculo e 80% de meio BG11. Para os experimentos com solução corante e ausência de inóculo, a proporção foi de 10% de solução corante e 90% de meio BG11.

Todos os biorreatores foram submetidos a agitação constante a 100 rpm a temperatura ambiente ($28^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$).

As alíquotas de 5 mL foram retiradas periodicamente. Para os experimentos com a presença de inóculo foi utilizada a centrifugação a 4500 rpm por 10 minutos.

As alíquotas dos biorreatores com ausência de inóculo e o sobrenadante das alíquotas previamente centrifugadas foram analisadas por espectrofotometria no comprimento de onda correspondente ao corante Índigo Carmin (610 nm) a fim de verificar a concentração do corante nas amostras, a partir de curva de calibração previamente determinada (ver Apêndice A).

Primeiro o espectrofotômetro foi zerado em 610 nm utilizando-se água destilada. Em seguida, tanto as amostras dos reatores sem presença biológica quanto o sobrenadante das amostras dos reatores com presença biológica, foram lidas em 610 nm, com as devidas diluições.

A Tabela 2 a seguir mostra as condições dos experimentos executados.

Tabela 2 - Experimentos executados quanto a concentração de corante, presença de *Anabaena variabilis*, pH e incidência de luz.

Experimento	Concentração de corante (mg/L)	Presença de microrganismo	pH inicial	Controle de pH	Presença de luz
1	100	sim	5	sim	sim
2	100	sim	8	sim	sim
3	100	sim	11	sim	sim
4	200	sim	5	sim	sim

5	200	sim	8	sim	sim
6	200	sim	11	sim	sim
7	100	não	8	sim	não
8	100	não	11	sim	não
9	200	não	8	sim	não
10	200	não	11	sim	não
11	100	não	8	sim	sim
12	100	não	11	sim	sim
13	200	não	8	sim	sim
14	200	não	11	sim	sim
15	100	sim	5	não	sim
16	100	sim	8	não	sim
17	100	sim	11	não	sim
18	200	sim	5	não	sim
19	200	sim	8	não	sim
20	200	sim	11	não	sim
21	100	não	8	não	não
22	100	não	11	não	não
23	200	não	8	não	não
24	200	não	11	não	não
25	100	não	8	não	sim
26	100	não	11	não	sim
27	200	não	8	não	sim
28	200	não	11	não	sim

Fonte: Autor

4.2.4. Experimento de descoloração com *Kluyveromices marxianus*

O experimento de descoloração foi realizado em Erlenmeyers de 250 mL contendo 100 mL de volume de reação que continha meio YMA modificado, solução do corante índigo carmin e inóculo.

Os experimentos foram realizados em pHs 5, 8 e 11 controlado durante todo o experimento; concentração de corante de 100 e 200 mg/L e presença ou ausência de inóculo.

As concentrações de 100 e 200 mg/L de corante foi atingida com a adição de 10 mL de soluções preparadas previamente de 1000 e 2000 mg/L.

Os inóculos de levedura foram retirados de meio com aproximadamente 0,25 g/L.

Para os experimentos com solução corante e presença de inóculo, a proporção foi de 10% de solução corante, 10% de inóculo e 80% de meio YMA modificado. Para os experimentos com solução corante e ausência de inóculo, a proporção foi de 10% de solução corante e 90% de meio YMA modificado.

Todos os reatores foram submetidos a agitação constante a 100 rpm.

As alíquotas de 5 mL foram retiradas em determinados intervalos de dias. Para os experimentos com a presença de inóculo foi utilizada a centrifugação a 9000 rpm por 10 minutos.

As alíquotas dos reatores com ausência de inóculo e o sobrenadante das alíquotas centrifugadas previamente foram analisadas por espectrofotometria no comprimento de onda correspondente ao corante Índigo Carmin (610 nm) a fim de verificar a concentração do corante nas amostras, a partir de curva de calibração previamente construída.

O método para a análise tanto da descoloração do corante Índigo Carmin quanto do crescimento celular da cepa utilizada para todas as amostras correspondentes aos reatores com presença ou ausência de inóculo, se baseou no método utilizado de forma similar por Olukanni et al. (2010) no estudo da remoção do corante Reactive Blue 13 por *Proteus mirabilis* LAG.

Primeiro o espectrofotômetro foi zerado em 610 nm utilizando-se água destilada. Em seguida, tanto as amostras dos reatores sem presença biológica quanto o sobrenadante das amostras dos reatores com presença biológica, foram lidas em 610 nm, com as devidas diluições. Para os experimentos sem presença de inóculo, apenas esta etapa foi feita.

Para os experimentos com presença de inóculo após a análise anterior, fez-se também a leitura no comprimento de onda da levedura. Sendo assim, o espectrofotômetro foi zerado em 660 nm com a substância que foi lida anteriormente em 610 nm. Em seguida, foi feita a leitura do material centrifugado no comprimento de onda da levedura, com as devidas diluições.

A Tabela 3 a seguir mostra as condições dos experimentos executados.

Tabela 3 - Experimentos executados quanto a concentração de corante, presença de *Kluyveromices marxianus* e pH.

Experimento	Concentração de corante (mg/L)	Presença de microrganismo	pH inicial	Controle de pH
1	100	sim	5	sim
2	100	sim	8	sim
3	100	sim	11	sim
4	200	sim	5	sim
5	200	sim	8	sim
6	200	sim	11	sim
7	100	sim	5	não
8	200	sim	5	não

Fonte: Autor

4.2.5. Experimento de descoloração com Fenton

O experimento de descoloração foi realizado em Erlenmeyers de 250 mL contendo 100 mL de volume de reação que continha solução corante.

O teste envolvendo processo Fenton ocorre da seguinte maneira: é medida determinada quantidade de massa de sulfato de ferro em gramas e adicionada ao reator que já contém solução corante. Em seguida, o pH é reduzido a 3 com uma solução de NaOH. Então é feita a adição de determinada quantidade de peróxido de hidrogênio em microlitros. O reator é levado a agitação a 100 rpm sem incidência de luz de qualquer natureza. Periodicamente houve a retirada de amostra do reator, o pH da mesma é elevado a 11 e em seguida tal amostra é colocada em repouso por 30 minutos. Após repouso, foi feita a filtragem da amostra pois é possível haver o surgimento de precipitado. Foi feita a diluição, se necessária, do que foi filtrado e posterior leitura de absorbância no comprimento de onda do corante.

A Tabela 4 a seguir mostra as condições dos experimentos executados.

Tabela 4 – Experimentos do processo Fenton executados com variações de concentração de corante, massa de Fe, e proporção $H_2O_2:Fe$.

Experimento	Concentração de corante (mg/L)	Massa sulfato de ferro (mM)	Proporção $H_2O_2:Fe$
1	100	0,28	15,22:1
2	200	0,28	15,22:1
3	200	1,38	5:1
4	200	1,38	3:1

Fonte: Autor

As condições dos testes Fenton foram definidas com base na literatura já existente.

4.2.6. Análises Físico-Químicas

4.2.6.1. Concentração Celular

A determinação do crescimento celular foi realizada por análise de absorbância da alíquota do meio de cultivo em espectrofotômetro e correlacionado com a concentração em massa seca de célula (g/L).

Para obter-se a curva de calibração, a concentração de massa seca de célula foi determinada por gravimetria. Uma amostra de volume conhecido das cepas em manutenção foi

coletada e submetida à centrifugação (4500 rpm para *A. variabilis* e 9000 para *K. marxianus*) por 10 min. O sobrenadante foi descartado, adicionou-se água destilada e a amostra foi novamente centrifugada. O procedimento de lavagem foi realizado 2 vezes. Após o descarte do sobrenadante, o pellet foi transferido para um cadinho previamente seco em mufla (por 30 min, a 550°C) e pesado. Levou-se à estufa a 105°C até peso constante e, em seguida, mediu-se a massa do conjunto cadinho mais a massa seca. A partir da massa de células e do volume da amostra, tem-se a concentração de células em g/L.

Paralelamente, a amostra da mesma cepa em manutenção foi coletada e prepararam-se diluições, sendo que, para cada uma delas, fez-se a leitura de absorbância, sendo o comprimento de onda (750 nm para *A. variabilis* e 660 nm para *K. marxianus*). Para o branco, foi usado água destilada. As curvas de calibração padrão (concentração de célula versus absorbância) estão dispostas no Apêndice A.

4.2.6.2. Concentração de Corante

Uma amostra de solução corante com concentração conhecida de Índigo Carmin foi coletada e prepararam-se diluições, sendo que, para cada uma delas, fez-se a leitura de absorbância, sendo o comprimento de onda 610 nm para o corante. Para o branco, foi usado água destilada. As curvas de calibração (concentração de corante versus absorbância) estão dispostas no Apêndice.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados deste trabalho estão apresentados nesta seção que contém a seleção de cepas com potencial para descoloração do Índigo Carmin, os testes de remoção do corante em solução aquosa, por ação biológica de *Anabaena variabilis* (cianobactéria) e *Kluyveromyces marxianus* (levedura) e pelo processo físico-químico Fenton.

5.1. Seleção de cepas com potencial de descoloração

Por comparação dos microrganismos usados para descoloração de efluentes têxteis encontrados pela revisão bibliográfica com aqueles que disponíveis no banco de cultura do NUCBIO/FEQUI, verificou-se que havia duas espécies em comum, *Kluyveromyces marxianus* e *Bacillus thuringiensis* e um gênero *Xantomonas* sp.

Vale ressaltar que a *Anabaena variabilis* não foi testada por esse método, uma vez que, em projeto paralelo realizado também por pesquisadores deste mesmo núcleo de pesquisa (NUCBIO), obteve resultados positivos de remoção de corantes ao se utilizar outra cianobactéria *Nostoc* sp, também fixadora de nitrogênio e com heterocistos, assim com a *A. variabilis*, e visto que a literatura (HU e WU, 2001) também cita o uso deste gênero para remoção de corantes, esta cepa já foi usada diretamente em ensaios de descoloração.

O resultado deste teste de seleção, baseado no efeito de descoloração do meio de cultura com ágar em placas de Petri (MARTINS et al., 1999), está ilustrado na Figura 8.

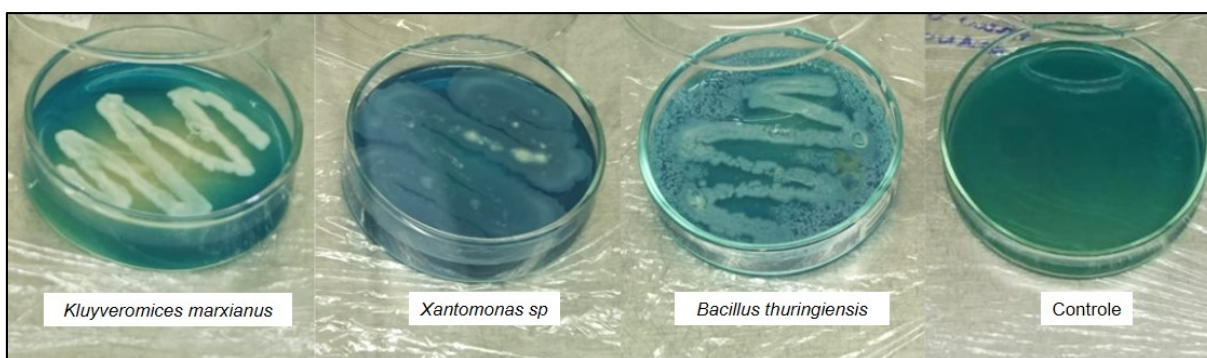


Figura 8 - Resultado de teste preliminar de potencial de descoloração realizado com *Kluyveromyces marxianus*, *Bacillus thuringiensis* e *Xantomonas* sp.

Fonte: Autor

Após o tempo de incubação, a análise qualitativa, ou seja, pela observação de qual placa apresentava descoloração, verificou-se que a levedura *Kluyveromyces marxianus* e a bactéria

Bacillus thuringiensis mostraram potencial de remoção do corante Índigo Carmin. Não sendo notado nenhum efeito pela cepa de *Xantomonas* sp.

Portanto, deu-se continuidade sobre a avaliação da remoção por *Kluyveromyces marxianus* nesta pesquisa, enquanto investigação semelhante foi dada com o bacilo em estudo paralelo desenvolvido também neste grupo de pesquisa (NUCBIO/FEQUI).

5.2. Remoção de corante por *Anabaena variabilis*

Além da aplicação das cianobactérias para a produção de bioativos, estes microrganismos têm sido estudados para tratamento de efluentes, com destaque para a remoção de metais, seja por bioissorção ou bioacúmulo. Pelo fato de as cianobactérias resistir a diferentes meios, podendo ser cultivada em meio autotrófico e mixotrófico, lhe dá a capacidade de converter diferentes poluentes orgânicos e, ainda, por serem procariontes fotossintetizantes, contribuem para o sequestro de dióxido de carbono (Cepoi E Zinicovscaia, 2016).

Por isso, há trabalhos que também têm focado em utilizar as cianobactérias na remoção de corantes, com destaque para bioissorção usando células mortas (Shetty e Krishnakumar, 2020, Rai et al., 2019, Kumar et al., 2012). Mas como algumas cepas possuem enzimas como catalases, peroxidases e laccases, há relatos de biodegradação de corantes por cianobactérias, e a *Anabaena variabilis* ATCC 29413 é uma delas (Afreen et al., 2017, El-Sheekh et al., 2009, Bernroitner et al., 2009). Como é escasso os relatos de uso de cianobactérias e ainda não está esclarecido seu mecanismo é importante o seu estudo para diferentes corantes.

5.2.1. Remoção de corante por descoloração com *Anabaena variabilis*

Os ensaios com a cianobactéria foram realizados com controle e sem o controle de pH durante os ensaios, isto é, para os ensaios com controle, a medida que alíquotas foram retiradas para a realização de análises, o pH era reajustado para o valor inicial, 5, 8 ou 11. Os biorreatores dos experimentos realizados com a *Anabaena variabilis*, com o controle de pH e ao final de 29 dias, estão expostos na Figura 9.

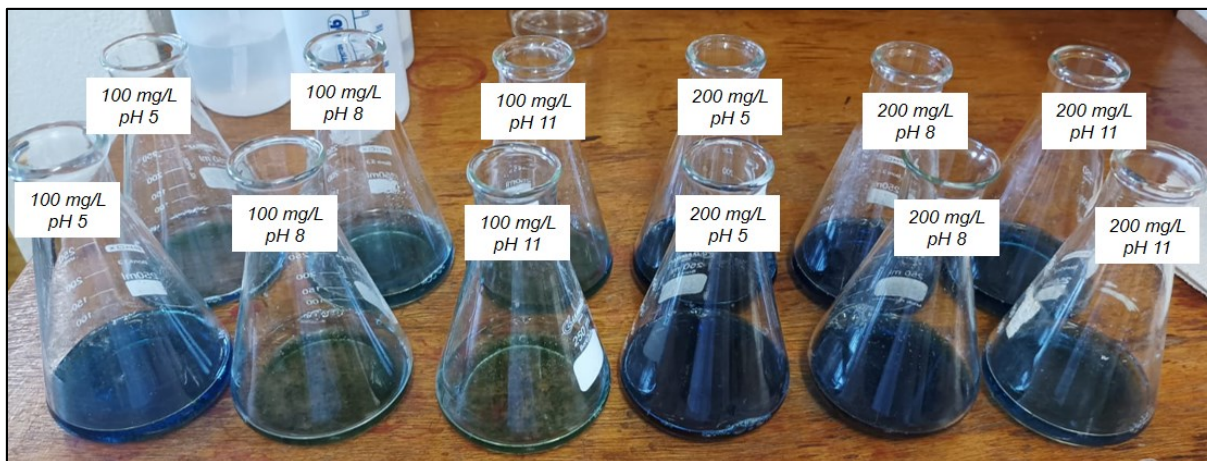


Figura 9 - Resultado dos experimentos na presença da cianobactéria *Anabaena variabilis* para as concentrações de 100 e 200 mg/L de corante índigo carmin e sob controle de pH a 5, 8 e 11.

Fonte: Autor

Pela Figura 9 é possível observar que há diferenças de cor entre os frascos. O meio dos biorreatores contendo inicialmente 100 mg/L de corante nos pHs 8 e 11 apresentaram descoloração maior do que para o ensaio em pH 5. Para os biorreatores referentes aos ensaios com 200 mg/L de corante, para todas as três condições de pH, a cor do meio se apresentou mais intensa que aquelas a menor concentração, indicando uma menor remoção do corante nos valores de pHs estudados. No entanto também indicou maiores remoções em pH 11 devido a menor colocação apresentada.

A análise das Figuras 10 (a e b) e 11 (a e b) corroboram com esta análise qualitativa, em que se observa a porcentagem de remoção de índigo carmin ao longo de 29 dias de experimento para as condições de 100 e 200 mg/L em pH controlado a 5, 8 e 11 por ação da *A. variabilis* e presença de luz.

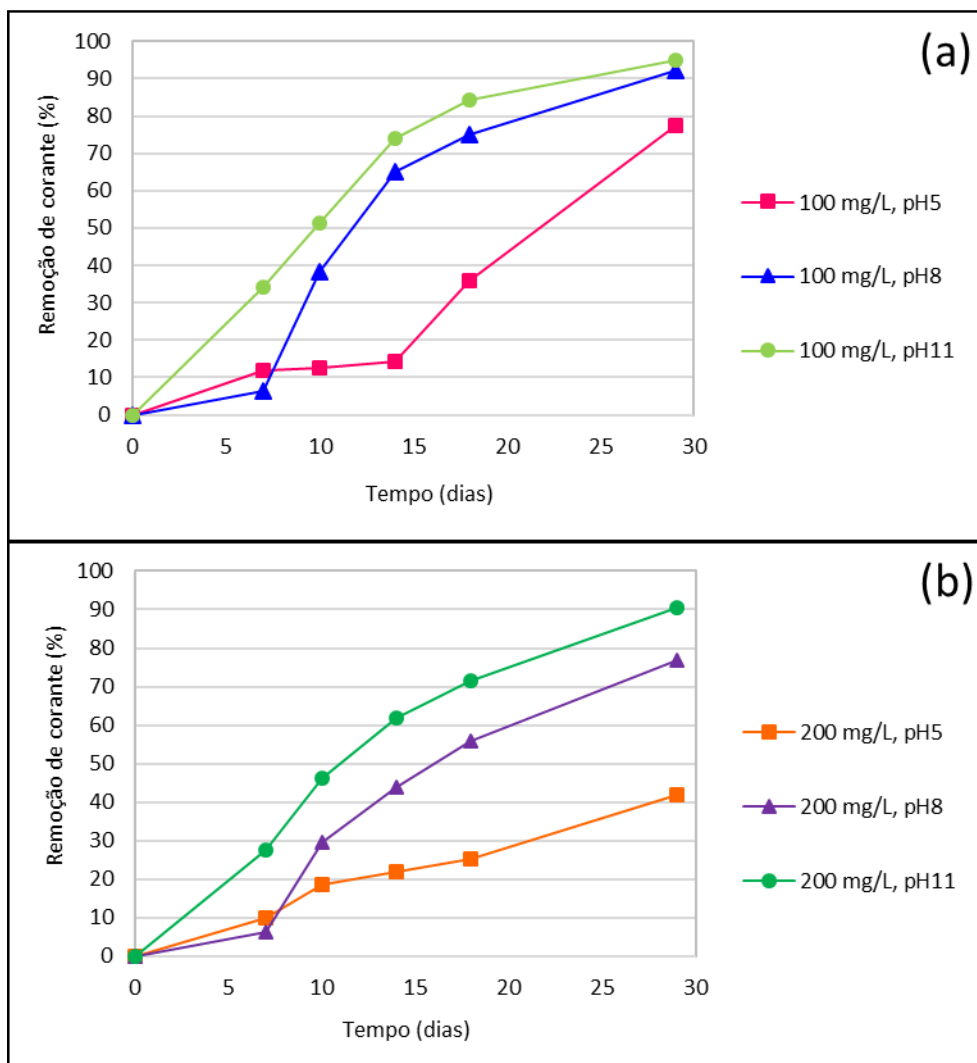


Figura 10 - Remoções (%) de solução do corante índigo carmin nas condições com *Anabaena variabilis* e com luz, para concentrações de (a) 100 mg/L e (b) 200 mg/L e pHs controlados em 5, 8 e 11.

Fonte: Autor

A Figura 10 (a) mostra que experimento de 100 mg/L e pH 11 apresentou a maior remoção, de 95%, nesta condição a concentração de corante ao final do teste, foi de 4,5 mg/L. Na sequência, tem-se a remoção de 92% para pH 8, e a menor remoção do índigo carmin ocorreu para pH 5, com 78% de remoção.

Com relação à legislação, não se pode afirmar que esta concentração final atende a Resolução CONAMA N° 430/2011, uma vez que esta resolução não discrimina os limites permitidos para o efluente quanto à concentração de corante no efluente têxtil, sendo estes critérios: pH 5 – 9; Temperatura < 40 °C; DBO₅ Remoção mínima de 60 %; Nitrogênio

amoniaco total 20 mg N/L, Óleos vegetais e gorduras animais Até 50 mg/L; Ferro dissolvido 15 mg Fe/L (CONAMA, 2011).

Para a condição inicial de 200 mg/L de corante, a mesma tendência é observada, sendo que o nível de remoção foi menor do que a 100 mg/L indicando que nesta concentração um maior tempo de cultivo seria necessário ou o meio foi tóxico para a biomassa. As remoções foram de 91%, 77% e 41%, para os pH 11, 8 e 5, respectivamente. A concentração final de 115 mg/L para o biorreator em pH 5 confirma a coloração intensa observada na Figura 9.

Simultaneamente aos ensaios de descoloração pela cianobactéria foram preparados frascos controle, apenas com a célula sem corante e apenas com corante, sem a cultura, neste caso com e sem luz para verificar o efeito do meio e da luz na degradação do corante.

A medida gravimétrica de biomassa mostrou que o meio foi muito tóxico à cianobactéria, indicando que uma maior concentração de inóculo ou um período de pré-adaptação da cultura ao corante fazem-se necessários.

A Figura 11 (a e b) apresenta os resultados dos experimentos com 100 e 200 mg/L em apenas pH controlado a 8 e 11 na condição sem célula e, com e sem incidência de luz, neste último caso, de forma semelhante aos biorreatores, fotoperíodo de 12h/12h dia/claro.

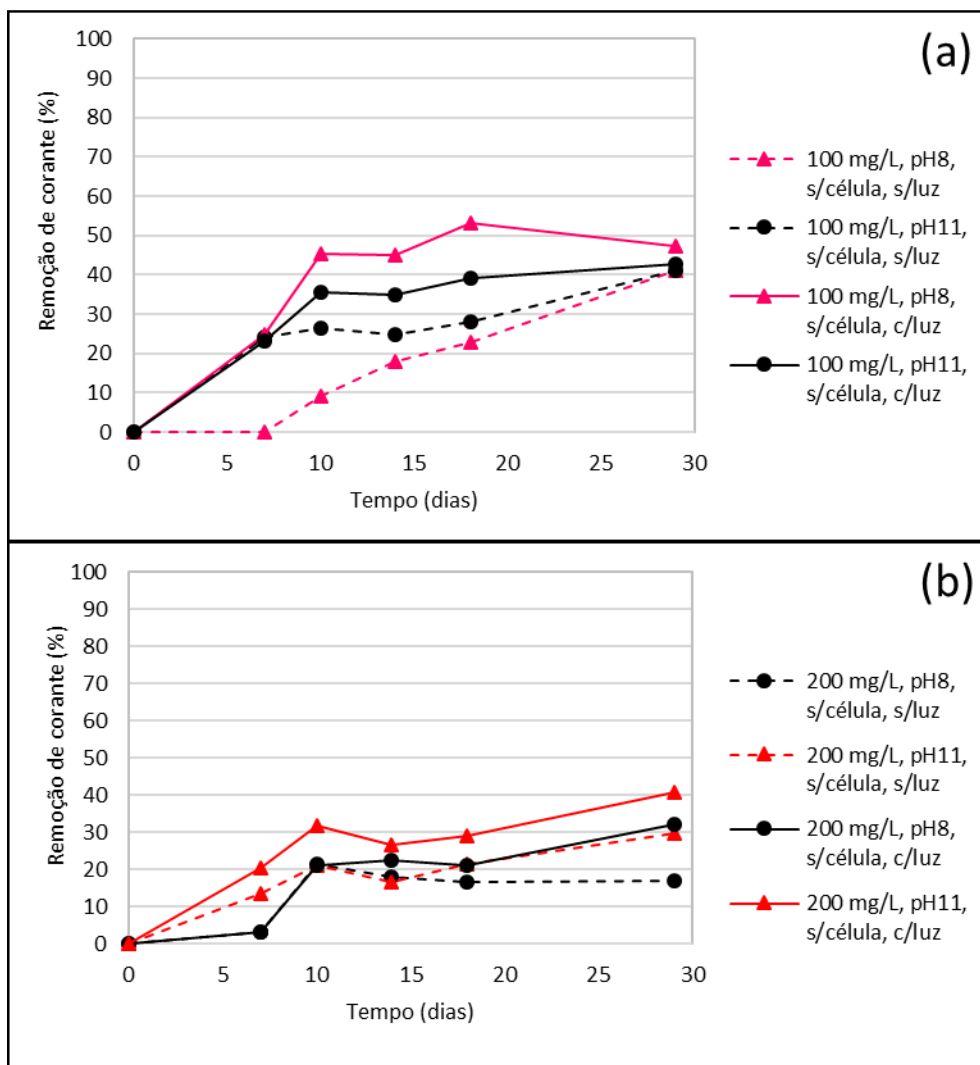


Figura 11 - Remoções de corante nas condições sem célula (s/c), com luz (c/l) e sem luz (s/l), para concentrações de (a) 100 mg/L e (b) 200 mg/L e pHs 8 e 11.

Fonte: Autor

Analisando a Figura 11, observa-se que o meio e a luz agem sobre a degradação do corante. Com relação ao pH, verifica-se que na ausência de luz, para a concentração inicial de 100 mg/L de corante, a degradação foi de 41%, para ambos os valores de pH. E na presença de luz, foi de 47% e 43%, para pHs 8 e 11, respectivamente. Portanto, para a menor concentração de corante, o nível de degradação foi praticamente o mesmo na presença ou ausência de luz e para pH 8 e 11 ao final de 29 dias.

Para a concentração de 200 mg/L de corante índigo carmin, o pH em 11 contribuiu para a degradação de 30% do corante em relação a 17% a pH 8, sem incidência de luz. Já no ensaio com fotoperíodo, as porcentagens de degradação aumentaram para 41% e 30%, respectivamente.

Esses dados mostram que a própria condição do meio auxilia na degradação do corante, mas que, apesar da concentração de célula ter sido reduzida, a *Anabaena variabilis* mostrou potencial para a remoção do corante índigo carmin. Conforme El-Sheek et al (2009), ao analisar o uso de diferentes algas e cianobactérias (*C. vulgaris*, *Lyngbya lagerlerimi*, *Nostoc linckia*, *Oscillatoria rubescens*, *Elkatothrix viridis* e *Volvox aureus*) para a remoção de diferentes corantes (vermelho de metila, laranja II, vermelho-G (FN-3G), catiônico básico e fucsina básica), argumentam que é fundamental saber muito sobre o mecanismo destes microrganismos de biossorção e de degradação, sendo necessário conhecer o sistema de enzimas da cultura.

Os experimentos que estão com seus resultados representados na Figura 11 foram executados sob as seguintes condições: 100 e 200 mg/L, pH controlado de 8 e 11, sem célula e com luz. Ao final dos testes, os experimentos com 100 e 200 mg/L e pH 11 apresentaram as menores remoções. A condição de 100 mg/L e pH 11 apresentou 42% de remoção, ou 49 mg/L de concentração de corante no fim do teste. A condição de 200 mg/L e pH 11 apontou remoção de 40%, que corresponde a 116 mg/L de corante.

A Figura 12 (a e b) mostra os mesmos experimentos da Figura 10 porém os valores de pH não foram controlados durante o tempo total do experimento. A partir da comparação entre as Figuras 10 e 12 é possível inferir que o controle do pH em 11 não afetou a remoção (95%) quando a concentração era de 100 mg/L. Nas outras condições o controle de pH afetou os valores de remoção atingidos, visto que foram menores quando não houve controle, apenas ajuste do pH inicial dos experimentos.

Para as condições sem controle de pH da Figura 12, na concentração de corante de 100 mg/L, em pH 8 a remoção caiu de 92% para 65% e em pH 5 a remoção caiu de quase 78% para 28%. Na concentração de corante de 200 mg/L, em pH 11 a remoção caiu de 91% para 77%, em pH 8 diminuiu de 77% para 36% e em pH 5 foi de 41% para 13%.

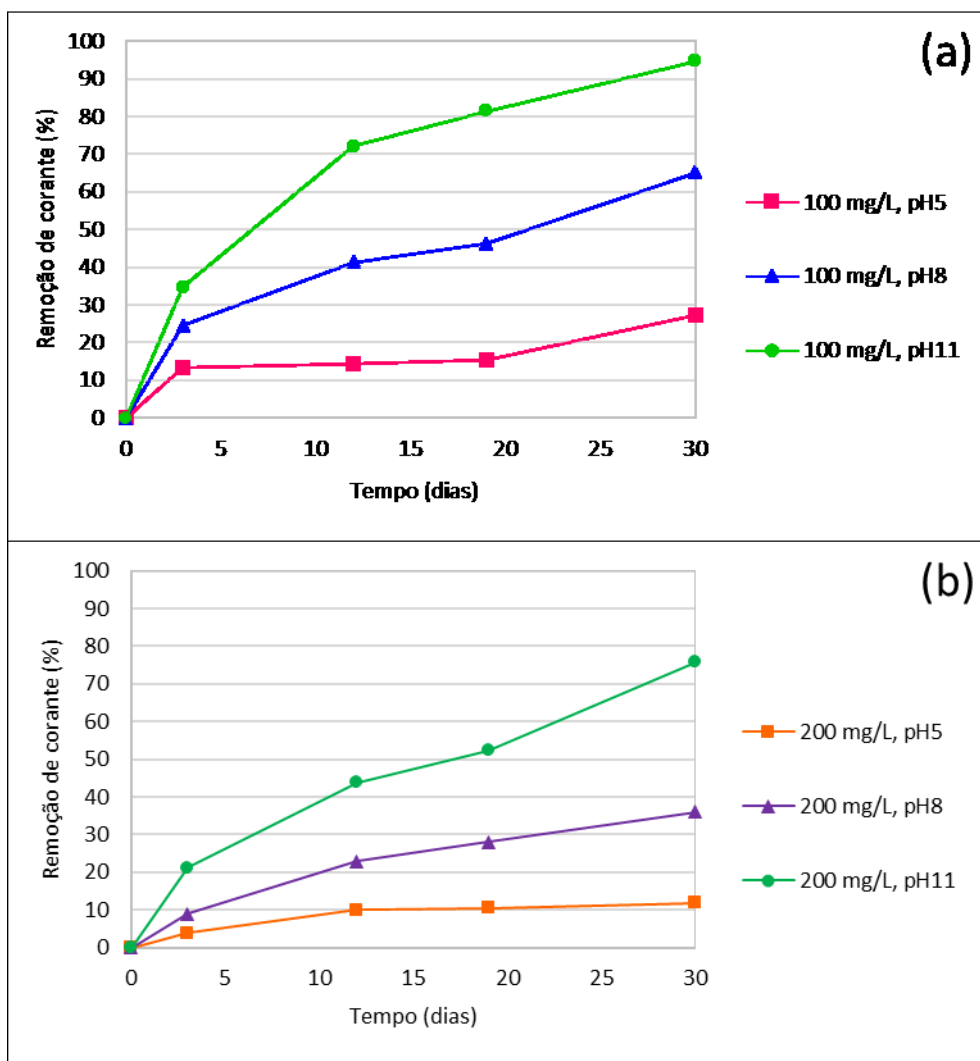


Figura 12 - Remoções (%) de soluções do corante índigo carmin nas condições com *Anabaena variabilis* e com luz, para concentrações de (a) 100 mg/L e (b) 200 mg/L e pHs 5, 8 e 11 sem controle.

Fonte: Autor

A Figura 13 (a e b) mostra o comportamento do pH nos experimentos com cianobactéria. Observa-se que o pH se adequa nos 3 primeiros dias e em seguida se mantém constante entre 6 e 8, em média.

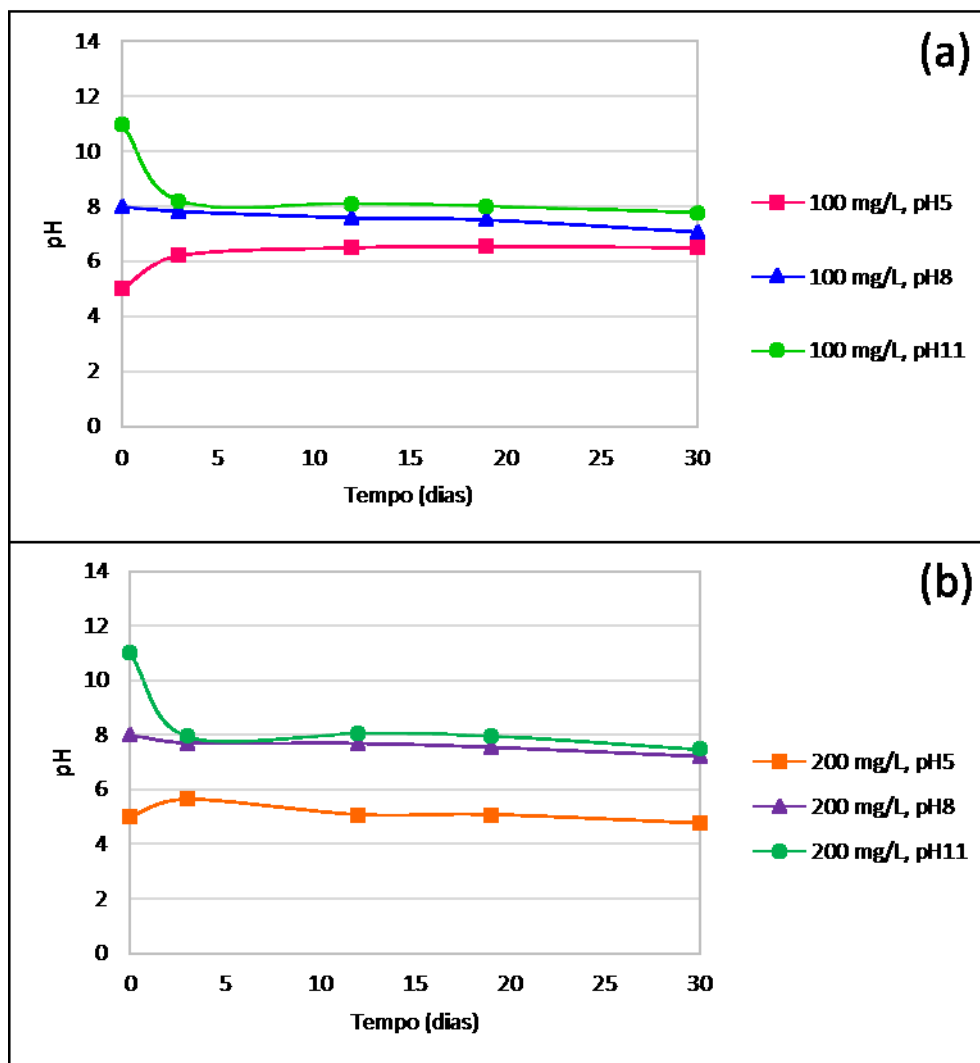


Figura 13 – Comportamento do pH nos experimentos com *Anabaena variabilis* e com luz, para concentrações de (a) 100 mg/L e (b) 200 mg/L e pHs 5, 8 e 11 sem controle.

Fonte: Autor

A Figura 14 (a e b) mostra os resultados dos experimentos nas mesmas condições da Figura 11 (a e b), porém sem controle de pH. Comparando-se as Figuras 11 e 14, nota-se que a falta do controle fez diferença em todas as condições. Para as concentrações 100 e 200 mg/L de corante índigo carmin foi observado o mesmo comportamento, houve maior variação entre as remoções em pH 11.

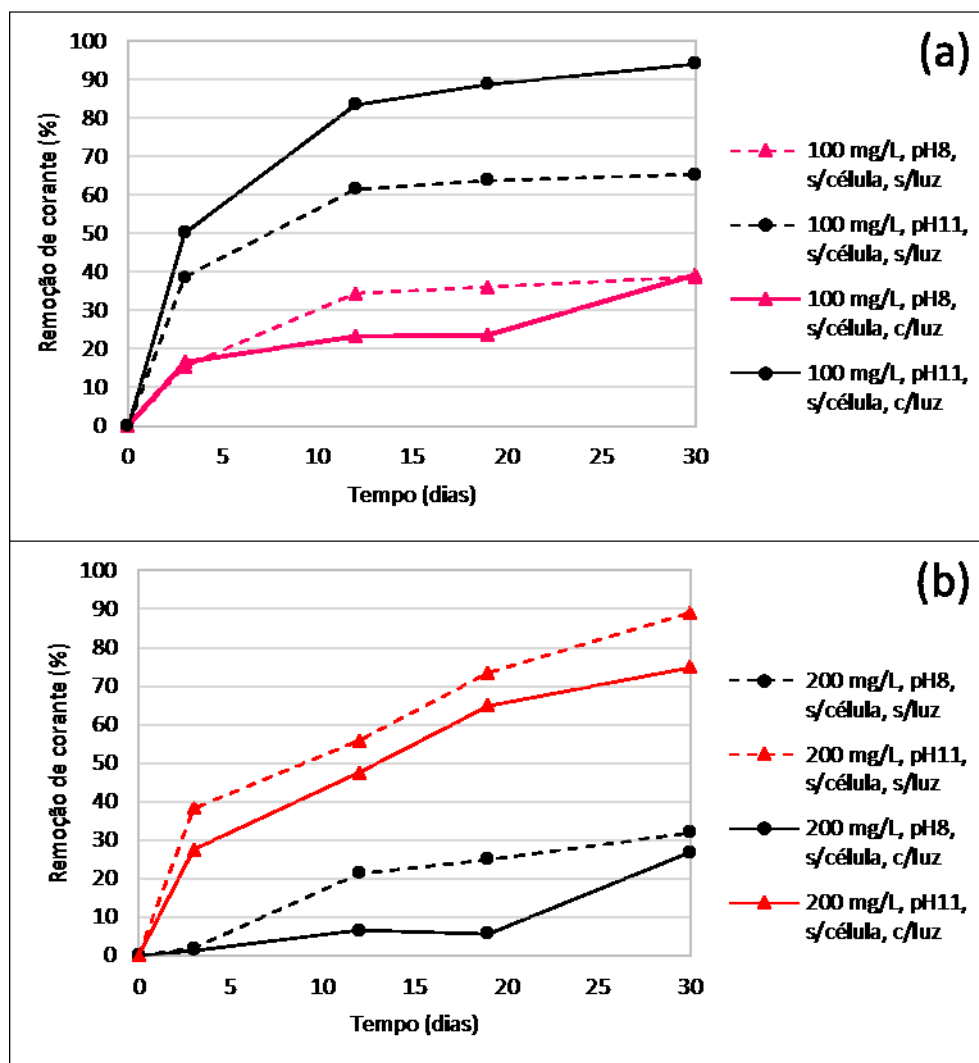


Figura 14 - Remoção de soluções do corante índigo carmin nas condições sem célula e, com luz e sem luz, para concentrações de (a) 100 mg/L e (b) 200 mg/L e pHs 8 e 11 sem controle.

A Figura 15 mostra o comportamento do pH ao longo dos experimentos executados nas condições da Figura 14. Observa-se que sob tais condições, a destacar a ausência da cianobactéria *Anabaena variabilis*, os valores de pH se estabilizaram por volta de 8. Enquanto que quando houve a presença da espécie o pH se estabilizou em valores um pouco mais baixos. Isto pode revelar que o corante índigo carmin tende a levar os valores de pH para mais próximo de 8, porém a presença da cianobactéria pode ser levado o equilíbrio do pH para valores um pouco menores.

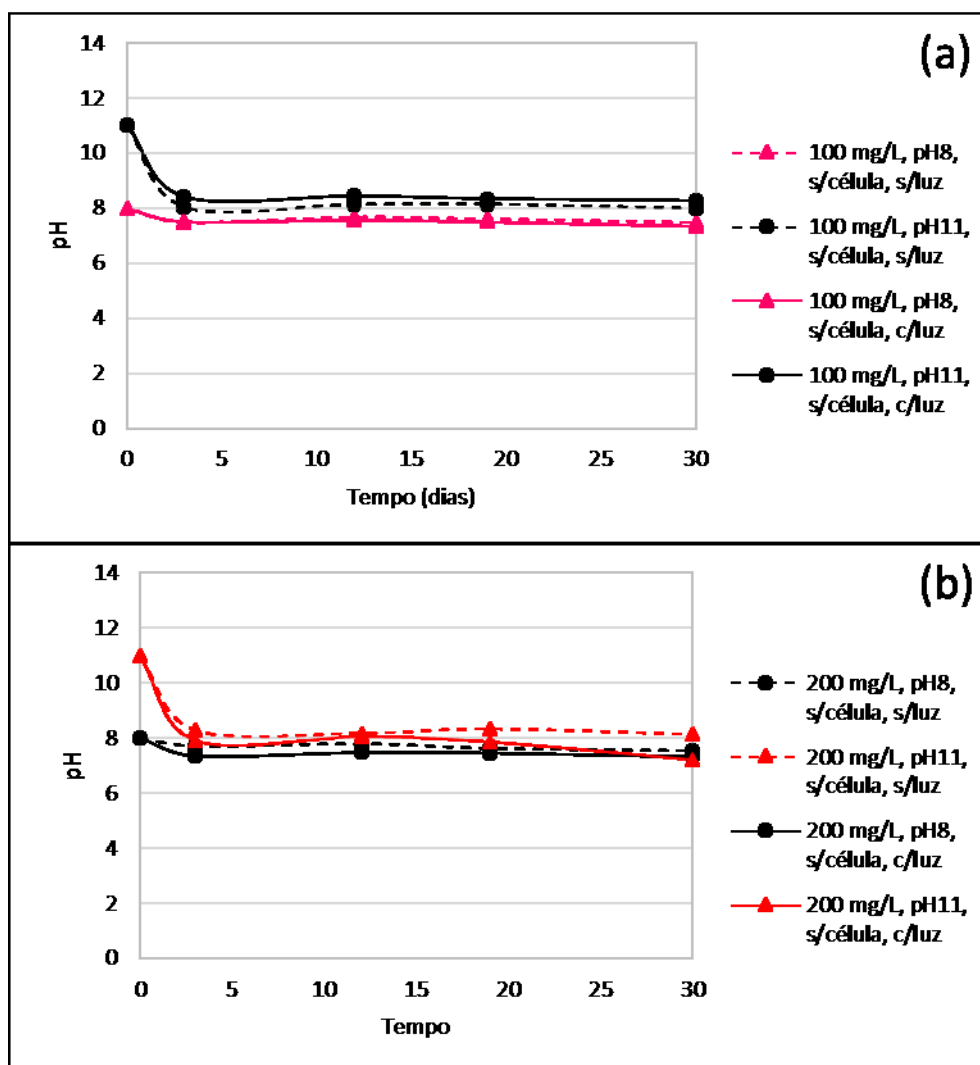


Figura 15 – Comportamento do pH dos experimentos sem célula, com luz e sem luz, para concentrações de (a) 100 mg/L e (b) 200 mg/L e pHs 8 e 11 sem controle.

Fonte: Autor

5.3. Remoção de corante por descoloração com *Kluyveromices marxianus*

A Figura 16 apresenta os resultados dos experimentos com 100 mg/L em pH controlado de 5, 8 e 11 e pH 5 sem controle, com célula. Para estas condições os valores de remoção de corante foram bem próximos no fim do teste. Na condição de pH 5 a remoção atingiu 91%, que corresponde a 7 mg/L de corante na última amostra retirada. Em pH 8, a concentração de corante chegou a 10 mg/L, 88% de remoção. Em pH 11 a porcentagem de remoção atingiu 92%, ou 7 mg/L de corante. Na condição de pH próximo a 5 sem controle durante o experimento, houve remoção de 82%, ou 16 mg/L de corante.

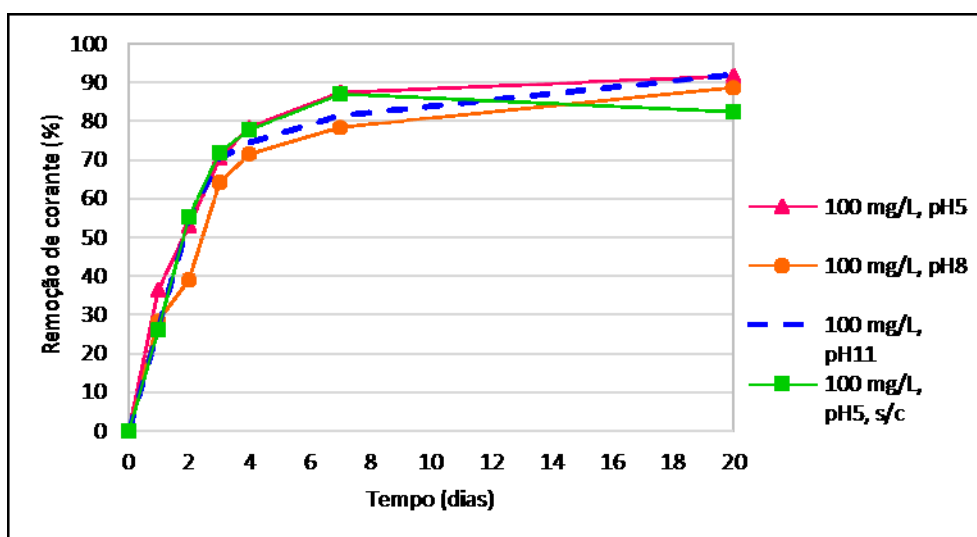


Figura 16 - Remoções de corante na condição com célula, para concentração de 100 mg/L e pH controlado de 5, 8 e 11 e pH 5 sem controle.

Fonte: Autor

A Figura 17 retrata o comportamento da concentração de células de *Kluyveromices marxianus* ao longo do experimento de descoloração para a concentração de corante de 100 mg/L. É possível inferir pelo gráfico que o crescimento ocorreu expressivamente no primeiro dia dos testes, sendo que em pH 5 e 8 o crescimento foi um pouco maior. A cultura foi menos resistente a pH 11, uma vez que após o 8º dia a concentração de biomassa tende a diminuir com o tempo de processo.

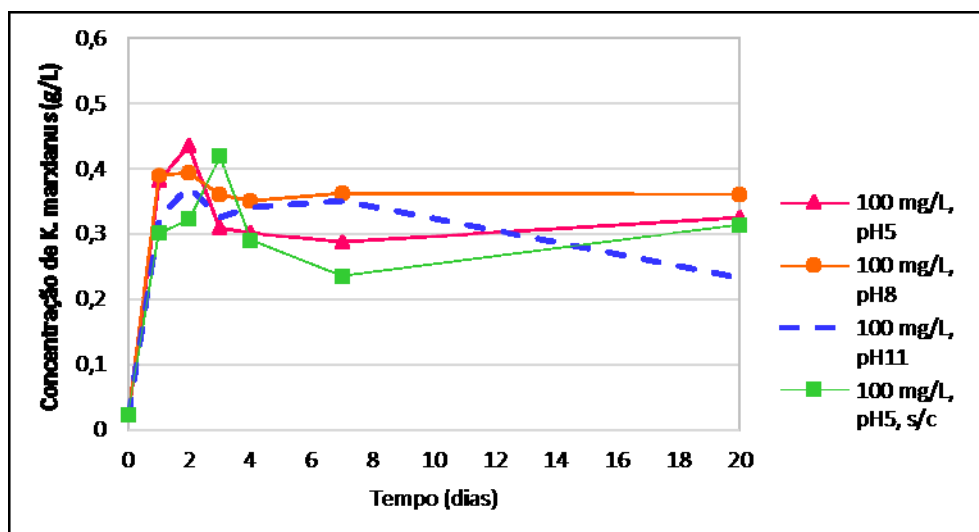


Figura 17 - Concentração de *Kluyveromyces marxianus* para concentração de corante de 100 mg/L e pH controlado de 5, 8 e 11 e pH 5 sem controle.

Fonte: Autor

A Figura 18 mostra os resultados dos experimentos com 100 mg/L de corante, em pH controlado de 5, 8, 11 e pH 5 sem controle, com células. Visualmente é possível notar a coloração do meio parecida, já que a remoção também foi semelhante. O fato da levedura não ter resistido bem em pH 11 não pode ser verificado visualmente.

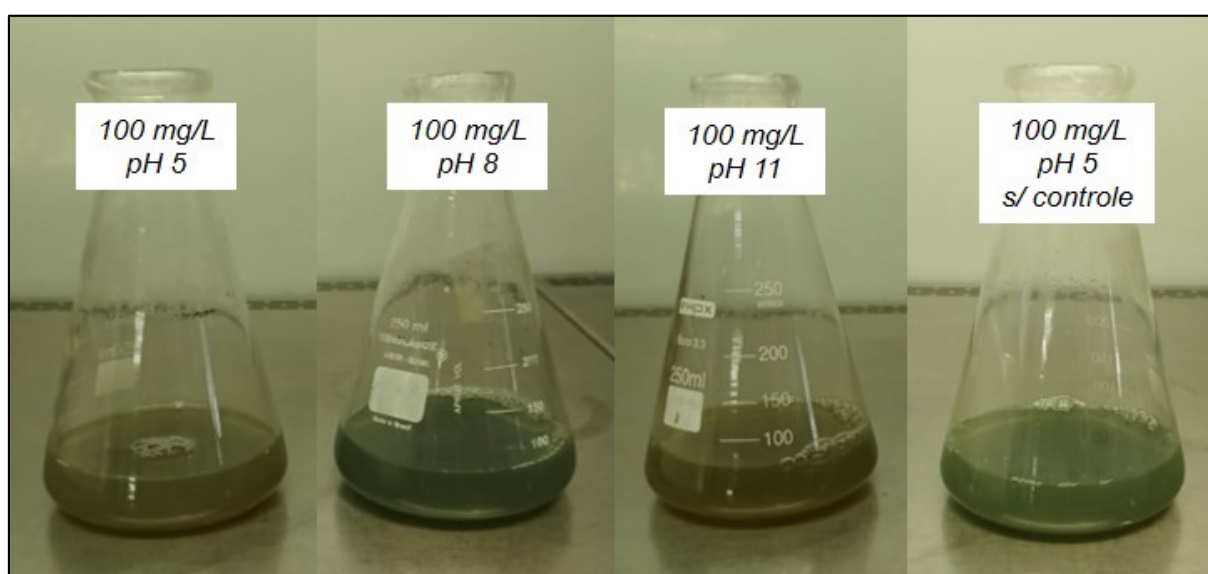


Figura 18 - Resultados dos experimentos com 100 mg/L de corante, em pH controlado de 5, 8, 11 e pH 5 sem controle, com células.

Fonte: Autor

No gráfico da figura 19 é mostrado o resultado de todos os experimentos realizados com 200 mg/L de corante em pH controlado de 5, 8 e 11 e pH 5 sem controle, com célula. Este teste também teve valores de remoção próximos, mas não tanto quanto os valores descritos para a Figura 16. Na condição de pH 5 a remoção atingida foi de 89%, correspondente a concentração de corante de 10 mg/L. Em pH 8, o teste terminou com concentração de 6 mg/L de corante, equivalente a 92% de remoção. Em pH 11, a remoção final chegou a porcentagem de 73%, equivalente a 24 mg/L de corante residual. Na condição de pH próximo a 5 sem controle durante o experimento, houve remoção de 81%, ou 17 mg/L de corante.

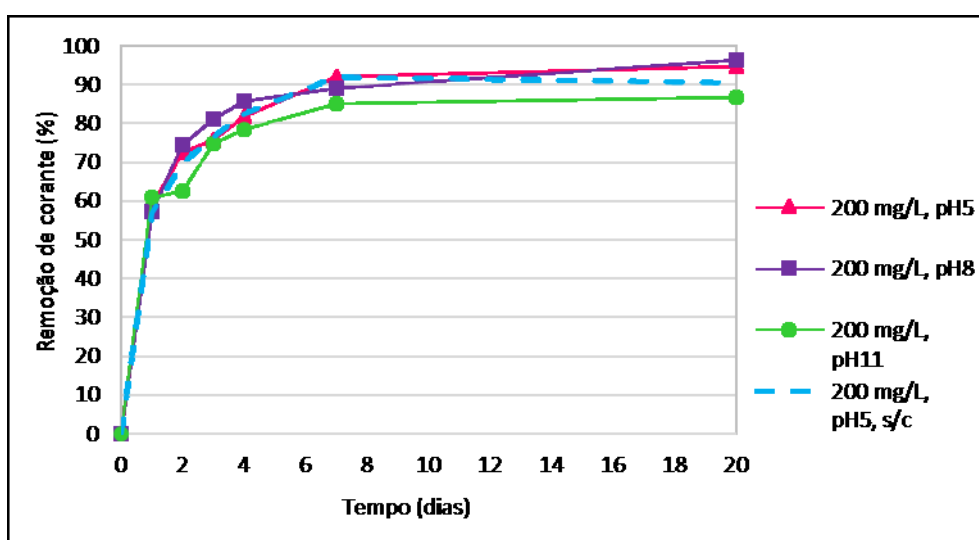


Figura 19 - Remoções de corante na condição com célula, para concentração de 200 mg/L e pH controlado de 5, 8 e 11 e pH 5 sem controle.

Fonte: Autor

Na Figura 20, o comportamento da concentração de células da levedura *Kluyveromices marxianus* durante os experimentos de descoloração na condição de 200 mg/L de corante índigo carmin. Pela observação na Figura 20 é possível dizer que o crescimento mais significativo acontece nas primeiras 24 horas de teste, sendo maior em pH 8. Assim como para a menor concentração de 100 mg/L, foi observado que a pH 11 o meio se torna desfavorável à levedura, e neste caso, para o dobro da concentração de corante, sendo que a partir do 4º dia, a concentração celular decresce atingindo o valor de 0,05 g/L.

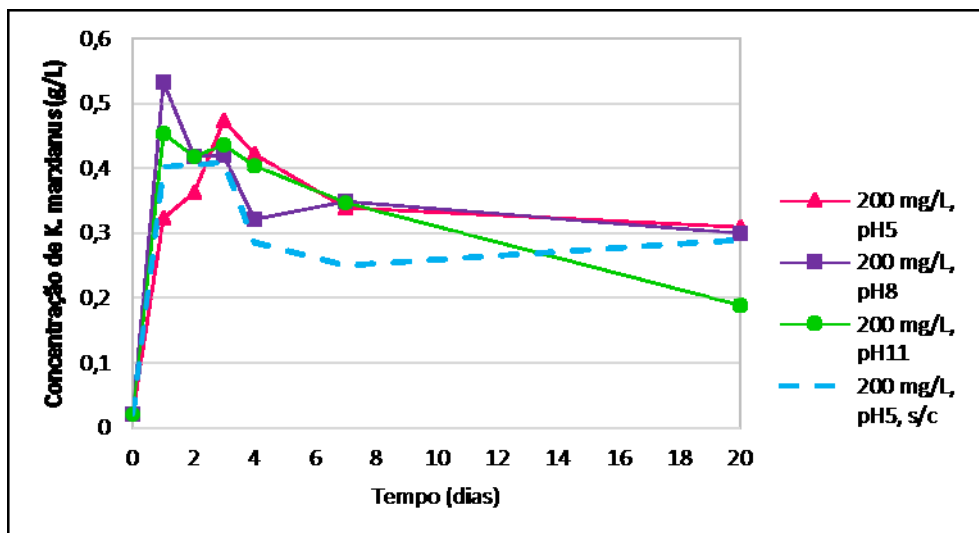


Figura 20 - Concentração de *Kluyveromyces marxianus* para concentração de corante de 200 mg/L e pH controlado de 5, 8 e 11 e pH 5 sem controle.

Fonte: Autor

Na Figura 21 é possível confirmar que, quanto à remoção de cor, os experimentos com pH 5 e 8 apresentaram resultados melhores.

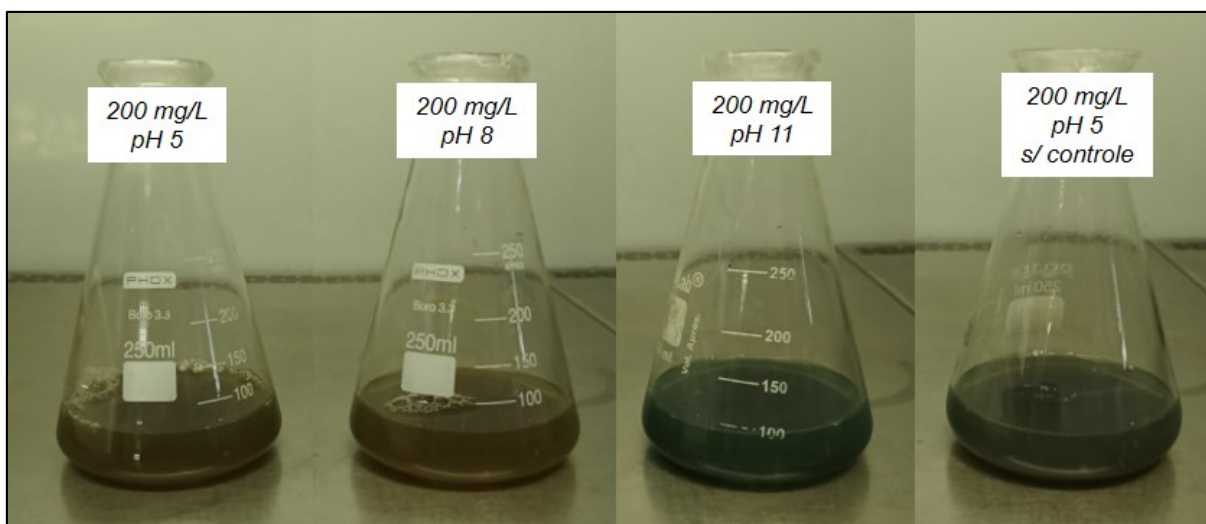


Figura 21 - Resultados dos experimentos com 200 mg/L de corante, em pH controlado de 5, 8, 11 e pH 5 sem controle, com células.

Fonte: Autor

Observa-se ao analisar as Figuras 16 e 19 referentes à levedura *Kluyveromyces marxianus*, a principal característica comum a eles é de que pH teve um efeito mais acentuado, com maior alteração nas porcentagens de recuperação para um meio mais tóxico à levedura, ao

ter uma concentração maior de corante. Para o pH 11, a recuperação menor é justificada pela queda mais acentuada da concentração celular.

Vale ressaltar que o tempo mínimo de processo para a máxima remoção foi de cerca de 10 dias a pH 5 e de 20 dias para pH 8. Visto que a pH 8 esta condição pode ser mais vantajosa apesar do maior tempo. Uma análise técnico-econômica pode contribuir para a conclusão da melhor condição de pH.

Outro destaque é para a comparação entre os ensaios com a levedura e a cianobactéria (Figura 10). Apesar de maior tempo de processo, 29 dias, foi possível remover acima de 90% de corante pela *Anabaena variabilis*, para pH 8 e 11, a uma concentração de 100 mg/L e pH 11 para 200 mg/L Visto que as cianobactérias também são estudadas e têm apresentado bons resultados também na remoção de metais, e há metais presentes nos efluentes têxteis, a *Anabaena variabilis* também se torna uma alternativa viável para o tratamento destes efluentes.

5.4. Remoção de corante por processo Fenton

A Figura 22 mostra os resultados da remoção pelo processo Fenton para concentrações de 100 e 200 mg/L de corante, para quatro proporções de $H_2O_2:Fe$. Apenas com 200 mg/L de corante índigo carmin e razão $H_2O_2:Fe$ de 3:1 a remoção chegou a 70%, as demais condições atingiram 100% de remoção em 15 minutos.

É possível notar que em 15 minutos, ou em menos tempo, todas as reações já atingiram um equilíbrio, a remoção atinge seu máximo potencial, e ao longo do tempo a concentração de corante é mantida constante em relação à primeira amostragem.

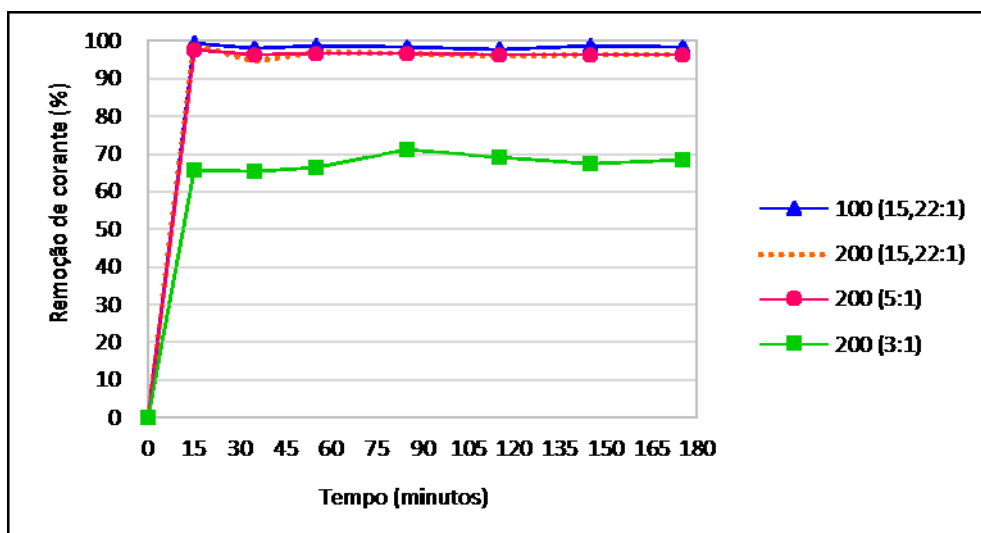


Figura 22 - Remoção de corante pelo processo Fenton nas condições de concentrações de 100 e 200 mg/L e proporções de H_2O_2 :Fe de 15,22:1, 5:1 e 3:1.

Fonte: Autor

A coloração das amostras cujos resultados de remoções foram apresentados na Figura 22, em que a condição 1 corresponde à 100 (15,22:1), a 2 a 200 (15,22:1), a 3 a 200 (5:1) e a 4 a (200 (3:1) da Figura 23.

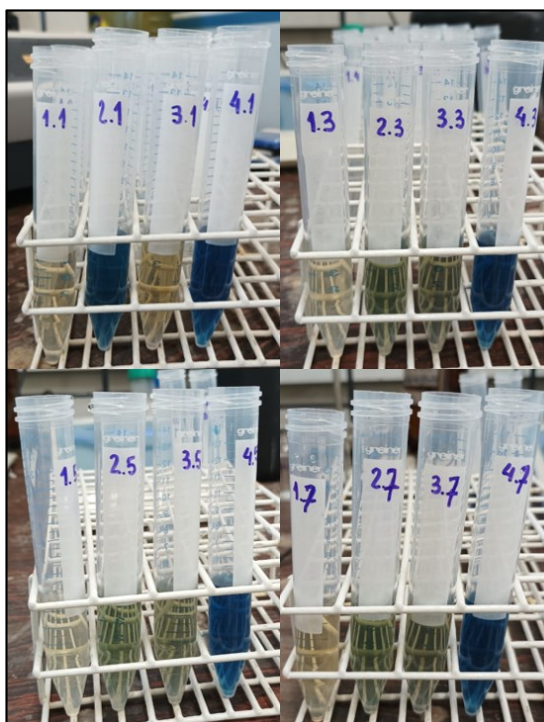


Figura 23 – 1ª, 3ª, 5ª e 7ª amostras dos experimentos com método Fenton da figura 23 ao longo do tempo.

Fonte: Autor

Os experimentos utilizando o método Fenton mostraram-se eficientes para descoloração da solução aquosa do corante índigo carmin, inclusive atingindo o máximo de remoção possível dentro das condições em pouquíssimo tempo.

6. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos no presente estudo conduziram às seguintes conclusões:

- ✓ No teste de seleção de culturas com potencial de descoloração, disponíveis no banco de cultura do NUCBIO/FEQUI/UFU, foram identificadas a levedura *Kluyveromyces marxianus* e a bactéria *Bacillus thuringiensis*.
- ✓ A descoloração pela cianobactéria:
 - Para ambas as concentrações de corante, em pH 8,0 e 11,0 foi alta atingindo níveis de remoção acima de 90% em 29 dias.
 - A descoloração de condições controles, sem a célula, com e sem luz indicou que tanto o meio de cultivo como a luz contribuem para a degradação do corante, sendo que o efeito depende do pH e da concentração do corante.
 - pH 8 e 11 favorecem a remoção pela cianobactéria.
- ✓ Para os testes de descoloração com a *Kluyveromyces marxianus*:
 - Pode-se obter remoções acima de 90% em até 10 dias, para pH 5, e até 20 dias para pH 8;
 - Para pH 11, observou-se uma queda considerável na concentração celular ao longo do processo, principalmente para a concentração maior de 200 mg/L.
- ✓ O processo Fenton nas remoções testadas chega ao equilíbrio em pouco tempo, portanto é necessário que se faça mais testes para que seja possível a determinação de uma condição ótima a fim de que seja possível a integração com outros processos de descoloração.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- ✓ Estudo do efeito do pH na descoloração;
- ✓ Testar diferentes corantes, de outras classes;
- ✓ Avaliar o processo de descoloração usando um efluente têxtil simulado (sintético) e não apenas solução aquosa do corante;
- ✓ Avançar nas condições do processo Fenton e suas variações, associados a radiação UV e à sonicação;
- ✓ Investigar o processo integrado entre o processo biológico e físico-químico, de forma a reduzir o tempo de processo e o consumo de reagentes;
- ✓ Incluir novas análises como o TOC, e teste com colorímetro.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADANE, T.; ADUGNA, A. T.; ALEMAYEHU. E. Textile Industry Effluent Treatment Techniques. Journal of Chemistry. 2021; Article ID 5314404; 14 pages; <https://doi.org/10.1155/2021/5314404>.
- AFREEN, S.; SHAMSI, T. N.; BAIG, M. A.; AHMAD, N.; FATIMA, S.; QURESHI, M.I. A novel multicopper oxidase (laccase) from cyanobacteria: Purification, characterization with potential in the decolorization of anthraquinonic dye. 2017; PLoS ONE 12(4): e0175144. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0175144>.
- AKSU, Z.; DÖNMEZ, G. A comparative study on the biosorption characteristics of some yeasts for Remazol Blue reactive dye. Chemosphere; 2003 Mar; 50(8); 1075-83. DOI: 10.1016/s0045-6535(02)00623-9.
- AL-DEGS, Y., KHRAISHEH, M.A.M., ALLEN, S.J. AND AHMAD, M.N. (2000) Effect of Carbon Surface Chemistry on the Removal of Reactive Dyes from Textile Effluent. Water Research, 34, 927-935. [http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1354\(99\)00200-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1354(99)00200-6)
- ARAÚJO, K.; MALPASS, G.; URIAS, P.; CUNHA, P. Processos oxidativos avançados: fundamentos e aplicações no tratamento de águas residuais e efluentes industriais. V Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental. Belo Horizonte/MG. 2014.
- ARRUDA, S. M.; NEGRI, R.; GEMELLI, E.; CAMARGO, N. H. A. Influência da adição de resíduos industriais de tinturarias têxteis na composição do clínquer de cimento Portland. 51º Congresso Brasileiro de Cerâmica; 2007.
- BAHNMÜLLER S, LOI CH, LINGE KL, GUNTEN UV, CANONICA S. Degradation rates of benzotriazoles and benzothiazoles under UV-C irradiation and the advanced oxidation process UV/H₂O₂. Water Res. 2015 May 1;74:143-54. doi: 10.1016/j.watres.2014.12.039. Epub 2014 Dec 30. PMID: 25725202.
- BARBENI, M.; MINERO, C.; PELIZZETTI, E.; BORGARELLO, E.; SERPONE. Chemical degradation of chlorophenols with Fenton's reagent (Fe²⁺ + H₂O₂), Chemosphere, Volume 16, Issues 10–12, 1987, Pages 2225-2237, ISSN 0045-6535, [https://doi.org/10.1016/0045-6535\(87\)90281-5](https://doi.org/10.1016/0045-6535(87)90281-5).

BERNROITNER, M.; ZAMOCKY, M.; FURTMÜLLER, P. G.; PESCHEK, G. A.; OBINGER, C. Occurrence, phylogeny, structure, and function of catalases and peroxidases in cyanobacteria. *J Exp Bot.* 2009; 60(2); 423-40. DOI: 10.1093/jxb/ern309.

BIGDA, R. J.; Consider Fenton's Chemistry for Wastewater Treatment. *Chem. Eng. Prog.* 1995; 95; 62.

BILINSKA, L.; GMUREK, M. Comparison between industrial and simulated textile wastewater treatment by AOPs – Biodegradability, toxicity and cost assessment, *Chemical Engineering Journal*, Volume 306, 2016, Pages 550-559, ISSN 1385-8947, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.07.100>.

BRÁS R, FERRA MI, PINHEIRO HM, CABRAL GONÇALVES I. Batch tests for assessing decolourisation of azo dyes by methanogenic and mixed cultures. *J Biotechnol.* 2001 Aug 23;89(2-3):155-62. doi: 10.1016/S0168-1656(01)00312-1. PMID: 11500209.

BUSTARD, M., MCMULLAN, G. & MCHALE, A. Biosorption of textile dyes by biomass derived from *Kluyveromyces marxianus* IMB3. *Bioprocess Engineering* 19, 427–430 (1998). <https://doi.org/10.1007/PL00009028>.

CEPOI, L.; ZINICOVSCAIA. I. Chapter 1: Introduction. 1-3. In: *Cyanobacteria for Bioremediation of Wastewaters*. Springer; 2016; 124 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-26751-7>.

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente, 2011. Resolução nº 403, 13 de Maio de 2011. Ministério do Meio Ambiente. 2011.

CORSEUIL, H. X., MONIER, A. L., FERNANDES, M., SCHNEIDER, M. R., NUNES, C. C., ROSARIO, M., & ALVAREZ, P. J. J. (2011). BTEX plume dynamics following an ethanol blend release: geochemical footprint and thermodynamic constraints on natural attenuation. *Environmental Science & Technology*, 45(8), 3422-3429. <http://dx.doi.org/10.1021/es104055q>. PMid:21410252.

COUGHLIN M. F.; KINKLE, B. K.; BISHOP, P. L. High performance degradation of azo dye Acid Orange 7 and sulfanilic acid in a laboratory scale reactor after seeding with cultured bacterial strains, *Water Research*, Volume 37, Issue 11, 2003, Pages 2757-2763, ISSN 0043-1354, [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(03\)00069-1](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(03)00069-1).

DELLAMATRICE P. M.; STENICO, M. E. S.; MORAES L. A.; FIORE M. F.; MONTEIRO, R. T. Degradation of textile dyes by Cyanobacteria. *Brazilian J. of Microbiology*, v. 48(1), p. 25-31. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.bjm.2016.09.012>

ERTUĞRUL, SEVGI, MELIKE BAKIR, AND GÖNÜL DÖNMEZ. Treatment of dye-rich wastewater by an immobilized thermophilic cyanobacterial strain: *Phormidium* sp., *Ecological Engineering*, Volume 32, Issue 3, 2008, Pages 244-248, ISSN 0925-8574, <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2007.11.011>.

Fenton, H. J. H. *J. Chem. Soc.* 1894; 65; 1899.

FLOX, C.; AMMAR, S.; ARIAS, C.; BRILLAS, E.; ZAVALA, A. V. V.; ABDELHEDI, R. Electro-Fenton and photoelectro-Fenton degradation of indigo carmine in acidic aqueous medium. *Applied Catalysis B: Environmental* 67;2006;93–104. DOI: 10.1016/j.apcatb.2006.04.020

FRANCISCON, E. Biodegradação de azocorantes por bactérias isoladas de efluentes industriais. Campinas, SP; 2005.

GEMEAY, A.H.; MANSOUR, I. A.; EL-SHARKAWY, R. G.; ZAKI, A.B. Kinetics and mechanism of the heterogeneous catalyzed oxidative degradation of indigo carmine. *J Mol Catal., A Chem* 2003; 193: 109–20. DOI: 10.1016/S1381-1169(02)00477-6

GÖRMEZ, F.; GÖRMEZ, Ö.; GÖZMEN, B.; KALDERIS, D. Degradation of chloramphenicol and metronidazole by electro-Fenton process using graphene oxide-Fe₃O₄ as heterogeneous catalyst. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 7; 2019; 102990. DOI:10.1016/j.jece.2019.102990

GRCIC, I.; PAPIC, S.; MESEC, D.; KOPRINAVAC, N.; VUJEVIC, D. The kinetics and efficiency of UV assisted advanced oxidation of various types of commercial organic dyes in water. *Journal of Photo chemistry and Photo biology A: Chemistry* 273 (2014) 49–58.

HABER, F.; WEISS, J.; *Proc. Royal Soc. London* 1934; 147; 332.

HASAN, M. N.; ISLAM, S.; ABEDIN, M. Z. Performance Evaluation of Textile Effluent Treatment Plant: Bangladesh Perspective. *International Journal of Engineering Materials and Manufacture* 2021; 7(1); 25-34. DOI: <https://doi.org/10.26776/ijemm.07.01.2022.03>

HIRSCHLER, R., OLIVEIRA, D. F., & LOPES, L. C. (2011). Quality of the daylight sources for industrial colour control. *Coloration Technology*, 127(2), 88-100. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1478-4408.2011.00283.x>.

HU, T. L.; WU, S. C. Assessment of the effect of azo dye RP2B on the growth of a nitrogen fixing cyanobacterium--*Anabaena* sp. *Bioresour Technol.* 2001 Mar;77(1):93-5. doi: 10.1016/s0960-8524(00)00124-3. PMID: 11211083.

HUNGER, K. 2003. *Industrial Organic Pigments Production, Properties, Applications* (Eds.: Herbst W. Hunger K) Third, Completely Revised Edition ISBN 3-527- 30576-9 Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.

IŞIK, M.; SPONZA, D. T. Anaerobic/aerobic treatment of a simulated textile wastewater, *Separation and Purification Technology*, Volume 60, Issue 1, 2008, Pages 64-72, ISSN 1383-5866, <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2007.07.043>.

KATHERESAN, V.; KANSEDO, J.; LAU, S. Y. Efficiency of various recent wastewater dye removal methods: A review, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, Volume 6, Issue 4, 2018, Pages 4676-4697, ISSN 2213-3437, <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.06.060>.

KIWI, J.; LOPEZ, A.; NADTOCHENKO, V. Mechanism and kinetics of the OH-radical intervention during Fenton oxidation in the presence of a significant amount of radical scavenger (Cl⁻). *Environmental Science & Technology*, v. 34, p. 2162–2168. 2000. <https://doi.org/10.1021/es991406i>

KUMAR, D.; SINGH, A.; LALIT, K.; GAUR, J. P. Sorption of Methylene Blue by an *Oscillatoria* sp.–Dominated Cyanobacterial Mat, *Bioremediation Journal*, 2012;16;1, 48-56. DOI: 10.1080/10889868.2011.628349.

KUNZ, A., PERALTA-ZAMORA, P., MORAES, S. G. DE., & DURÁN, N.. (2002). Novas tendências no tratamento de efluentes têxteis. *Química Nova*, 25(Quím. Nova, 2002 25(1)). <https://doi.org/10.1590/S0100-40422002000100014>.

KUO, W. G. Decolorinzing Dye Wastewater With Fenton's Reagent. *Water Research*, v. 26, p. 881-886. 1992. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(92\)90192-7](https://doi.org/10.1016/0043-1354(92)90192-7)

LEGRINI, O.; OLIVEROS, E.; BRAUN, A. M.; *Chem. Rev.* 1993, 93, 671. <http://dx.doi.org/10.1021/cr00018a003>

LU, X.; SHAO, Y.; GAO, N.; CHEN, J.; ZHANG, Y.; XIANG, H.; GUO, Y. Degradation of diclofenac by UV-activated persulfate process: Kinetic studies, degradation pathways and toxicity assessments, *Ecotoxicology and environmental safety* 141; 2017; 139–147. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2017.03.022

M.V.B. ZANONI, P.A. CARNEIRO, M. FURLAN, E.S. DUARTE, C.C.I. GUARATINI, A.G. FOGG, Determination of the vinylsulphone azo dye, remazol brilliant orange 3R, by cathodic stripping voltammetry, *Analytica Chimica Acta*, Volume 385, Issues 1–3, 1999, Pages 385–392, ISSN 0003-2670, [https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(98\)00735-1](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(98)00735-1).

MARTINS, M.A.; CARDOSO, M. H.; QUEIROZ, M. J.; RAMALHO, M. T.; CAMPOS, A. M. Biodegradation of azo dyes by the yeast *Candida zeylanoides* in batch aerated cultures. *Chemosphere*. 1999 May; 38(11):2455-60. DOI: 10.1016/s0045-6535(98)00448-2. PMID: 10204232.

MEEHAN, C.; BANAT, I. M.; MCMULLAN, G.; NIGAM, P.; SMYTH, F.; MARCHANT, R. Decolorization of Remazol Black-B using a thermotolerant yeast, *Kluyveromyces marxianus* IMB3. *Environment International* 26;2000; 75–79. DOI: 10.1016/s0160-4120(00)00084-2

MORADI, M.; ELAHINIA, A.; VASSEGHIAN, Y.; DRAGOI, E. N.; OMIDI, F.; KHANEGHAN, A. M. A review on pollutants removal by Sono-photo -Fenton processes. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 8;2020;104330. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104330>

MOSTAFA, M.; EL-SHEEKH, M. M.; GHARIEB, G.W.; ABOU-EL-SOUOD, Biodegradation of dyes by some green algae and cyanobacteria, *International Biodeterioration & Biodegradation*. 63; Issue 6; 2009; 699-704; ISSN 0964-8305. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2009.04.010>.

NEAMȚU, M.; SIMINICEANU, I.; YEDILER, A.; KETTRUP, A. (2002). Kinetics of Decolorization and Mineralization of Reaction Azo Dyes in Aqueous Solution by the UV/H₂O₂ Oxidation. *Dyes and Pigments - DYE PIGMENT*. 53. 93-99. 10.1016/S0143-7208(02)00012-8.

NEYENS, E.; BAEYENS, J. A review of classic Fenton's peroxidation as na advanced oxidation technique. *Journal of Hazardous materials B*98; 2003; 33–50. DOI: 10.1016/s0304-3894(02)00282-0

NIEBISCH, C. H., MALINOWSKI, A. K., SCHADECK, R., MITCHELL, D. A., KAVACORDEIRO, V., & PABA, J. (2010). Decolorization and biodegradation of reactive blue 220 textile dye by *Lentinus crinitus* extracellular extract. *Journal of Hazardous Materials*, 180(1-3), 316-322. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.04.033>. PMID:20452721

NOGUEIRA, R. F. P., TROVÓ, A. G., SILVA, M. R. A. DA ., VILLA, R. D., & OLIVEIRA, M. C. (2007). Fundamentos e aplicações ambientais dos processos Fenton e foto-Fenton. *Química Nova*, 30(Quím. Nova, 2007 30(2)). <https://doi.org/10.1590/S0100-40422007000200030>.

O'NEILL, C., HAWKES, F.R., HAWKES, D.L., LOURENÇO, N.D., PINHEIRO, H.M.; DELÉE, W. (1999) Colour in Textile Effluents—Sources, Measurement, Discharge Consents and Simula-tion: A Review. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 74, 1009-1018. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4660\(199911\)74:11<1009::AID-JCTB153>3.0.CO;2-N](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4660(199911)74:11<1009::AID-JCTB153>3.0.CO;2-N)

OLUKANNI, O.D.; OSUNTOKI, A.A.; KALYANI, D.C.; GBENLE, G.O.; GOVINDWAR, S.P. Decolorization and biodegradation of Reactive Blue 13 by *Proteus mirabilis* LAG. *J Hazard Mater*. 2010 Dec 15;184(1-3):290-298. doi: 10.1016/j.jhazmat.2010.08.035. Epub 2010 Aug 17. PMID: 20832936.

PADILLA, F. R.; AQUINES, O.; NUNEZ, A. S.; NAVA, G. S. A.; ZACARIAS, C. C.; MENDOZA, R. A. R.; YOE, R. Z.; IQBAL, H. M. N.; SALDÍVAR, R. P. Evaluation and Predictive Modeling of Removal Condition for Bioadsorption of Indigo Blue Dye by *Spirulina platensis*. *Microorganisms* 2020, 8, 82. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8010082>

PETERNEL, I.; KOPRIVANAC, N.; KUSIC, H. UV-based processes for reactive azo dye mineralization, *Water Research*, Volume 40, Issue 3, 2006, Pages 525-532, ISSN 0043-1354, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.11.029>.

PIZATO, E.; LOPES, A. C.; ROCHA, R. D. C.; BARBOSA, A. M.; CUNHA, M. A. A. Caracterização de efluente têxtil e avaliação da capacidade de remoção de cor utilizando o fungo *Lasiodiplodia theobromae* MMPI. *Eng. Sanit. Ambient*. 22 (05); Sep-Oct 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522017121743>.

PODGORNIK, H.; POLJANSEK, R.; PERDIH A. Transformation of indigo carmine by *Phanerochaete chrysosporium* ligninolytic enzymes. *Enzyme Microb Technol* 2001; 29; 166–72.

RAI, J.; KUMAR, D.; GAUR, J.P. Sorption of malachite green (a cationic dye) and heavy metals by dead biomass of *Phormidesmis molle* (cyanobacteria)-dominated mat. *Water and Environment Journal*, 2019; 33; 51-60. DOI: <https://doi.org/10.1111/wej.12368>;

RAMOS, R. O.; ALBUQUERQUE, M. V. C.; LOPES, W. S.; SOUSA, J. T.; LEITE, V. D. Degradation of indigo carmine by photo-Fenton, Fenton, H₂O₂/UV-C and direct UV-C:

Comparison of pathways, products and kinetics. *Journal of Water Process Engineering* 37; 2020; 101535. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101535>

RASOULIFARD, M.H.; AKRAMI, M.; ESKANDARIAN, M.R. Degradation of organophosphorus pesticide diazinon using activated persulfate: Optimization of operational parameters and comparative study by Taguchi's method. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers* 57; 2015; 77–90. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2015.05.014>

RIPPKA, R.; DESRUELLES, J.; Waterbury, J. B. Generic assignments, strain histories and properties of pure cultures of cyanobacteria. *J Gen Microbiol*; 1979;111(1);1-61.

ROCHA, M. V. J. et al. Degradation of organic compounds in a Fenton system based on chitosan/Fe-0/Fe₂O₃ composites: a theoretical and experimental study. *Journal Of The Iranian Chemical Society*. New York: Springer, v. 13, n. 2, p. 377-386, 2016. <http://dx.doi.org/10.1007/s13738-015-0746-1>

SALGADO, B. B. B.; NOGUEIRA, M. I. C.; RODRIGUES, K. A.; SAMPAIO, G. M. M. S.; BUARQUE, H. L. B.; ARAÚJO, R. S. Descoloração de efluentes aquosos sintéticos e têxtil contendo corantes índigo e azo via processos Fenton e foto-assistidos (UV e UV/H₂O₂). *Eng. Sanit. Ambient.* 14 (1); Mar 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522009000100001>.

SCHRANK, S.; JOSE, H.; MOREIRA, R.; SCHRÖDER, H. F. Applicability of Fenton and H₂O₂/UV reactions in the treatment of tannery wastewaters. *Chemosphere* 60; 2005; 644–655. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2005.01.033

SHETTY, K.; KRISHNAKUMAR, G. Algal and cyanobacterial biomass as potential dye biodecolorizing material: a review. *Biotechnol Lett.* 2020 Dec;42(12);2467-2488. DOI: 10.1007/s10529-020-03005-w.

SHINDHAL, T.; RAKHOLIYA, P.; VARJANI, S.; PANDEY, A.; NGO, H. H.; GUO, W.; NG, H. Y.; TAHERZADEH, M. J. A critical review on advances in the practices and perspectives for the treatment of dye industry wastewater, *Bioengineered*, 2021; 12:1; 70-87; DOI: 10.1080/21655979.2020.1863034.

SOUTHERN, T.G. Technical Solutions to the colour problem: a critical review. In: Cooper. P, editor. *Colour in dyehouse effluent*. Bradford: Society of Dyers and Colourists; p. 75; 1995.

STASINAKIS, A. S. Use of Selected Advanced Oxidation Processes (AOPs) for Wastewater Treatment – a mini review. *Global NEST Journal*, v. 10, p. 376-385, 2008. <https://doi.org/10.30955/gnj.000598>

- TOULIABAH, H.E.-S.; EL-SHEEKH, M.M.; ISMAIL, M.M.; EL-KASSAS, H. A Review of Microalgae- and Cyanobacteria-Based Biodegradation of Organic Pollutants. *Molecules* 2022, 27, 1141. <https://doi.org/10.3390/molecules27031141>
- VASSEGHIAN, Y.; MORADI, M.; PIRSAHEB, M.; KHATAEE, A.; RAHIMI, S.; BADI, M.Y.; KHANEGHAH, A.M. Pesticide decontamination using UV/ferrous-activated persulfate with the aid neuro-fuzzy modeling: a case study of Malathion. *Food Research International* 137; 2020; 109557. DOI: 10.1016/j.foodres.2020.109557
- VERMA, M.; HARITASH, A. Degradation of amoxicillin by Fenton and Fenton-Integrated hybrid oxidation processes. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 7; 2019; 102886. DOI:10.1016/j.jece.2019.102886
- WANG, X.; ZENG, G.; ZHU, J. Treatment of jean-wash wastewater by combined coagulation, hydrolysis/acidification and Fenton oxidation. *Journal of Hazardous Materials*. v. 153, p. 810-816. 2008. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2007.09.030
- XIANG, Y.; FANG, J.; SHANG, C. Kinetics and pathways of ibuprofen degradation by the UV/chlorine advanced oxidation process, *Water research* 90; 2016; 301–308. DOI: 10.1016/j.watres.2015.11.069
- XU, Y.; LIN, Z.; ZHANG, H.; Mineralization of sucralose by UV-based advanced oxidation processes: UV/PDS versus UV/H₂O₂, *Chemical Engineering Journal* 285; 2016; 392–401.
- YEN, C.-H.; CHEN, K.-F.; KAO, C.-M.; LIANG, S.-H.; CHEN, T.-Y. Application of persulfate to remediate petroleum hydrocarbon-contaminated soil: Feasibility and comparison with common oxidants. *Journal of Hazardous Materials* 186; 2011; 2097–2102. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2010.12.129
- ZOLLINGER, H. (1991) *Colour Chemistry*. Wiley-VCH, Weinheim.
- ZOLLINGER, H. (2003) *Color Chemistry: Synthesis, Properties and Applications of Organic Dyes and Pigments*. 3rd Edition, Wiley-VCH, Cambridge.

APÊNDICE A

A1. Composição do meio BG11₀

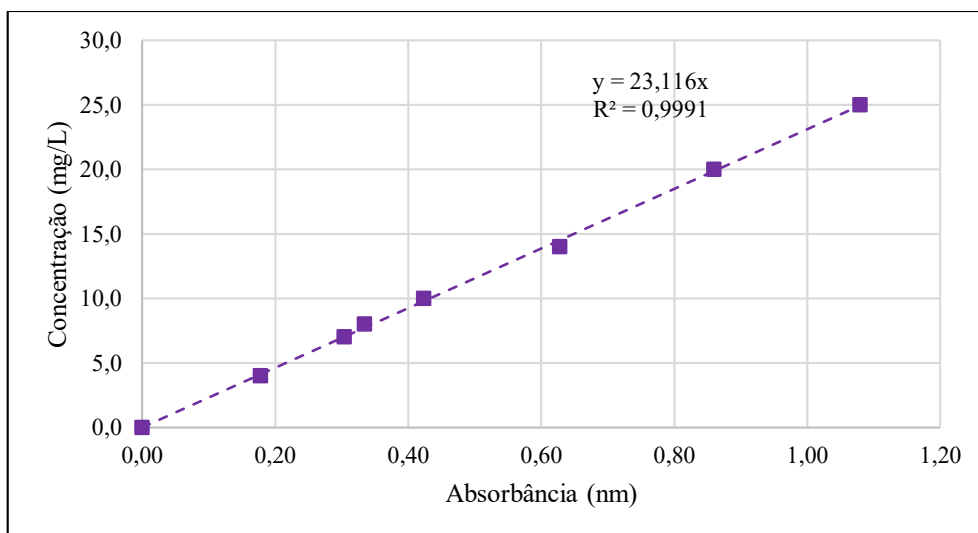
Composição		Concentração da solução	Volume
Fosfato dipotássico	K_2HPO_4	3g/100ml	1ml
Sulfato de magnésio	$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	7,5g/100ml	1ml
Cloreto de cálcio	$CaCl_2 \cdot 2H_2O$	3,6g/100ml	1ml
Citrato de Amônio Férrico	$(NH_4)_5[Fe(C_6H_4O_7)_2]$	0,6g/100ml	1ml
EDTA dissódico	$C_{10}H_{14}N_2Na_2O_8$	0,1g/100ml	1ml
Ácido Cítrico	$C_6H_8O_7$	0,6g/100ml	1ml
Carbonato de sódio anidro	Na_2CO_3	2g/100ml	1ml
Metais Traços (A ₅ +Co)	Sulfato de zinco	$ZnSO_4 \cdot 7H_2O$	0,222 g/L
	Cloreto de manganês	$MnCl_2 \cdot 4H_2O$	1,81 g/L
	Molibdato de sódio	$Na_2MoO_4 \cdot 2H_2O$	0,39 g/L
	Sulfato de cobre	$CuSO_4 \cdot 5H_2O$	0.079 g/L
	Cloreto de cobalto	$CoCl_2 \cdot 6H_2O$	0,04 g/L
	Ácido bórico	H_3BO_3	2,86 g/L
pH		7,4 - 7,6	
Água Deionizada		Até completar 1 litro	

Fonte: Rippka et al, 1979

A2. Composição do meio YMA modificado

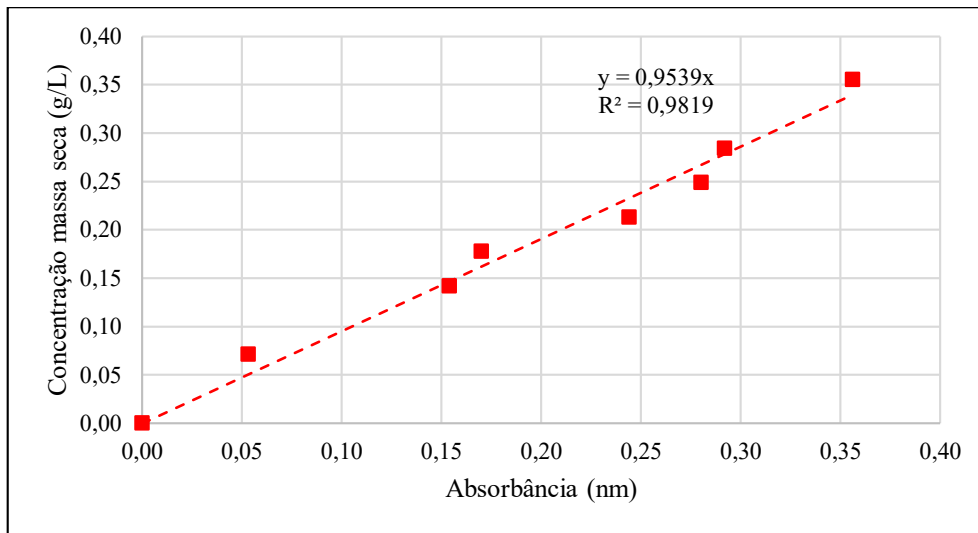
Composição	Massa (g)
Extrato de levedura	3,0
Glicose	10,0
Peptona	5,0
Ágar	18,0
Para 1000 mL de água destilada.	

A3. Curva de calibração do Índigo Carmin



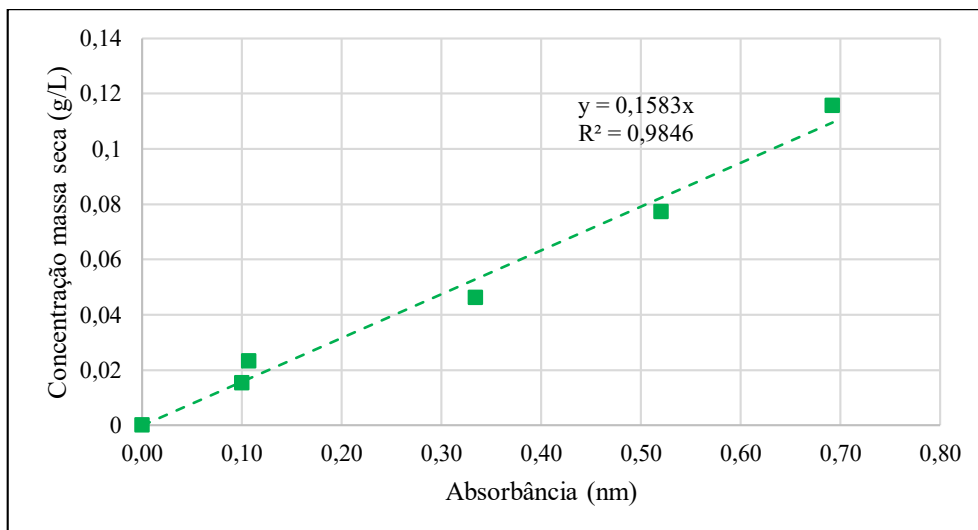
$\lambda_{\text{Índigo Carmin}} = 610 \text{ nm}$

A4. Curva de calibração da *Anabaena variabilis*



$\lambda_{Anabaena\ variabilis} = 750\text{ nm}$

A5. Curva de calibração da *Kluyveromices marxianus*



$\lambda_{Kluyveromices\ marxianus} = 660\text{ nm}$