



FACULDADE DE TECNOLOGIA DE AMERICANA “Ministro Ralph Biasi”
Curso Superior de Tecnologia em Produção Têxtil

DONIZETE BRUNO DE OLIVEIRA

**ANÁLISE COMPARATIVA DO TINGIMENTO COM ÍNDIGO: Processos
convencionais e sustentáveis na indústria têxtil**

AMERICANA/ SP

2026

FACULDADE DE TECNOLOGIA DE AMERICANA “MINISTRO RALPH BIASI”

Curso Superior de Tecnologia em Produção Têxtil

DONIZETE BRUNO DE OLIVEIRA

**ANÁLISE COMPARATIVA DO TINGIMENTO COM ÍNDIGO: Processos
convencionais e sustentáveis na indústria têxtil**

Trabalho de Conclusão de Curso desenvolvido
em cumprimento à exigência curricular do Curso
Superior de Tecnologia em Produção Têxtil pelo
CEETEPS/Faculdade de Tecnologia – FATEC/
Americana. *Sob a Orientação do Professor Dr.*
João Batista Giordano

Área de concentração: Tecnologia Têxtil

FICHA CATALOGRÁFICA – Biblioteca Fatec Americana
Ministro Ralph Biasi- CEETEPS Dados Internacionais de
Catalogação-na-fonte

OLIVEIRA , Donizete Bruno

Análise comparativa do tingimento com índigo: processos
convencionais e sustentáveis na indústria têxtil. / Donizete Bruno
Oliveira – Americana, 2026.

50f.

Monografia (Curso Superior de Tecnologia em Produção
Têxtil) -- Faculdade de Tecnologia de Americana Ministro Ralph
Biasi – Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza

Orientador: Prof. Dr. João batista Giordano

1. Proteção ao meio ambiente 2. Tecnologia têxtil 3.
Tecnologia têxtil – meio ambiente. I. OLIVEIRA , Donizete Bruno II.
GIORDANO , João batista III. Centro Estadual de Educação
Tecnológica Paula Souza – Faculdade de Tecnologia de Americana
Ministro Ralph Biasi

CDU: 504.06

677

677:504

Elaborada pelo autor por meio de sistema automático gerador de
ficha catalográfica da Fatec de Americana Ministro Ralph Biasi.

DONIZETE BRUNO DE OLIVEIRA

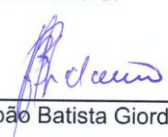
**ANÁLISE COMPARATIVA DO TINGIMENTO COM ÍNDIGO: Processos
convencionais e sustentáveis na indústria têxtil**

Trabalho de Conclusão de Curso desenvolvido
em cumprimento à exigência curricular do Curso
Superior de Tecnologia em Produção Têxtil pelo
CEETEPS/Faculdade de Tecnologia – FATEC/
Americana. Sob a Orientação do Professor Dr.
João Batista Giordano

Área de concentração: Tecnologia Têxtil

Americana, 11 de Junho de 2026.

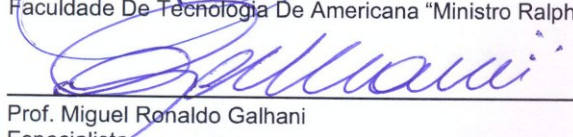
Banca Examinadora:



Prof. Dr. João Batista Giordano (orientador)
Doutor
Faculdade De Tecnologia De Americana "Ministro Ralph Biasi"



Prof. Mestre Edison Valentim Monteiro
Mestre
Faculdade De Tecnologia De Americana "Ministro Ralph Biasi"



Prof. Miguel Ronaldo Galhali
Especialista
Faculdade De Tecnologia De Americana "Ministro Ralph Biasi"

DEDICATÓRIA

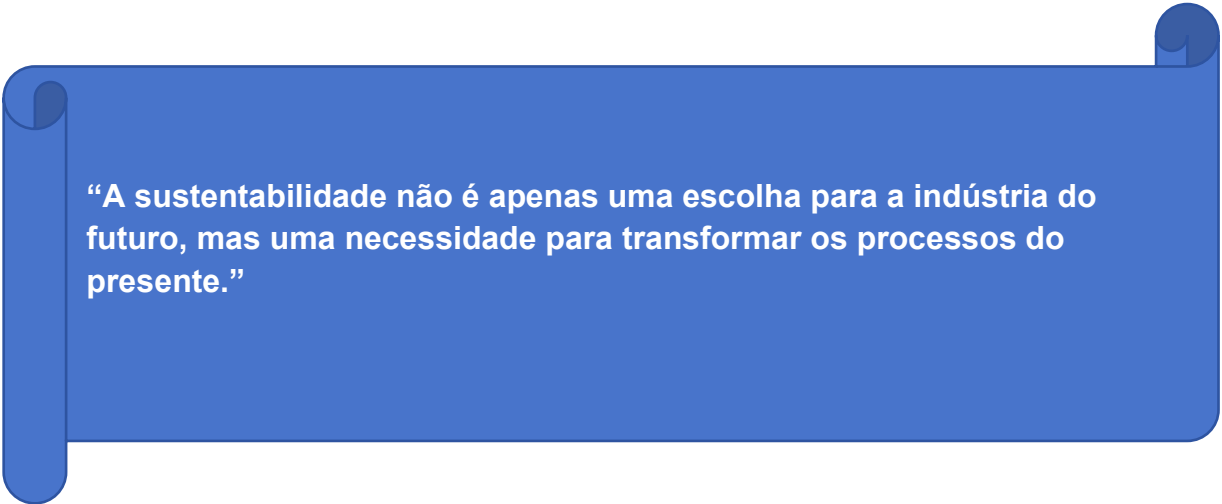
Dedico este trabalho a todos que contribuíram, direta ou indiretamente, para minha formação acadêmica e pessoal ao longo desta trajetória. Em especial, aos professores, colegas e profissionais da área têxtil, que compartilharam conhecimentos e experiências fundamentais para o desenvolvimento deste estudo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos os professores, colegas e profissionais que contribuíram para minha formação acadêmica e para a realização deste trabalho.

Aos docentes do curso, pela dedicação, pelos ensinamentos compartilhados e pelo incentivo ao longo desta trajetória. Aos colegas, pela convivência, troca de experiências e apoio durante o desenvolvimento deste estudo.

Também agradeço à minha família e a todos que, de alguma forma, ofereceram apoio e motivação para a conclusão desta etapa.

A blue graphic element resembling a scroll, with a vertical bar on the left and a horizontal bar at the bottom, both featuring rounded ends. The main body is a rectangle with rounded corners, containing white text.

“A sustentabilidade não é apenas uma escolha para a indústria do futuro, mas uma necessidade para transformar os processos do presente.”

RESUMO

Este estudo aborda a análise comparativa do tingimento com índigo na indústria têxtil, destacando aspectos relacionados à sustentabilidade, ao tratamento de efluentes e às inovações aplicadas aos processos produtivos. Caracteriza-se como uma pesquisa qualitativa, de caráter exploratório e descritivo, baseado em revisão bibliográfica de artigos científicos, livros e materiais técnicos relacionados à indústria têxtil e aos processos de tingimento. A análise foi realizada por meio da comparação entre métodos convencionais e tecnologias inovadoras, considerando critérios como eficiência produtiva, impacto ambiental e viabilidade econômica. Tendo como objetivo analisar o processo de tingimento com índigo na indústria têxtil, abordando sua evolução, fundamentos técnicos, impactos ambientais e inovações tecnológicas voltadas à sustentabilidade. Inicialmente, discute-se a transição do índigo natural para o sintético e sua ampla aplicação na produção de tecidos denim. Em seguida, são avaliados os impactos ambientais associados ao método convencional, com destaque para o elevado consumo de água, energia e uso de agentes químicos redutores, responsáveis pela geração de efluentes com alta carga poluente. O estudo também apresenta tecnologias emergentes, como o tingimento por espuma, processos sem uso de água e sistemas eletroquímicos. Como principal alternativa, destaca-se o tingimento eletroquímico, que possibilita a redução de impactos ambientais, mantendo a eficiência produtiva. Conclui-se que a adoção de tecnologias mais limpas é essencial para garantir a sustentabilidade e competitividade da indústria têxtil. No entanto, a busca por sustentabilidade na indústria têxtil não deve ser pautada, exclusivamente, pela substituição de materiais, mas pela reestruturação dos processos produtivos como um todo.

Palavras-chave: Tingimento com índigo; Sustentabilidade; Indústria têxtil; Efluentes; Inovação.

ABSTRACT

This study addresses a comparative analysis of indigo dyeing in the textile industry, highlighting aspects related to sustainability, effluent treatment, and innovations applied to production processes. It is characterized as qualitative research, exploratory and descriptive in nature, based on a literature review of scientific articles, books, and technical materials related to the textile industry and dyeing processes. The analysis was conducted by comparing conventional methods with innovative technologies, considering criteria such as productive efficiency, environmental impact, and economic viability. The objective is to analyze the indigo dyeing process in the textile industry, addressing its evolution, technical fundamentals, environmental impacts, and technological innovations focused on sustainability. Initially, the transition from natural to synthetic indigo and its wide application in the production of denim fabrics is discussed. Then, the environmental impacts associated with the conventional method are evaluated, highlighting the high consumption of water, energy, and the use of reducing chemical agents, responsible for generating effluents with a high pollutant load. The study also presents emerging technologies, such as foam dyeing, waterless processes, and electrochemical systems. Electrochemical dyeing stands out as a leading alternative, enabling the reduction of environmental impacts while maintaining production efficiency. It concludes that the adoption of cleaner technologies is essential to guarantee the sustainability and competitiveness of the textile industry. However, the pursuit of sustainability in the textile industry should not be based exclusively on the substitution of materials, but on the restructuring of production processes as a whole.

Keywords: Indigo dyeing; Sustainability; Textile industry; Effluents; Innovation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Planta Indigofera tinctoria em floração	17
Figura 2	secagem de tecido em tingimento com indigo natural	18
Figura 3	A principal fonte histórica do índigo natural é a planta Indigofera tinctoria, pertencente à família Fabaceae. Nessa espécie, o corante não está presente em sua forma final, mas sim como um precursor hidrossolúvel denominado indicano.	19
Figura 4	Fermentação da planta indigofera em panelas de barro	20
Figura 5	Indigo depois da fermentação, pronto para o tingimento	21
Figura 6	Tingimento artesanal com indigo Natural, uma das mais antigas colorações do mundo	22
Figura 7	Fluxograma extração do corante indigo da planta indigofera tinctoria	23
Figura 8	Descarte em meio ambiente	25
Figura 9	A tinta está sendo levada para os rios e para os mares	26
Figura 10	Contaminação causa a morte da vida aquática	27
Figura 11	Ciclo de vida de um par de calças Jeans	29
Figura 12	Máquina de Tingimento Contínuo de Fios de Urdimbre	30
Figura 13	fluxograma -Processo eletroquímico para tingimento de indigo	34
Figura 14	Comparação entre processos: tradicional x eletrônicos	34
Figura 15	Fluxograma -Tingimento de espuma (Foam Dyeing)	35
Figura 16	Tecnologias Waterless	37
Figura 17	processo de Tingimento com Índigo	40
Figura 18	maquina de secagem do processo indigo sintético	42
Figura 19	Tecnologias anilina-free no índigo sintético	43

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABVTEX = Associação Brasileira de Varejo Têxtil

ACV = Análise de Ciclo de Vida

CAPEX = Capital Expenditure ou Despesas de Capital

CO₂ = Carbono

CONAMA = Conselho Nacional do Meio Ambiente

DBO = Demanda Bioquímica de Oxigênio

DQO = Demanda Química de Oxigênio

IA = Inteligência Artificial

IoT = Internet das Coisas

NaOH = Hidróxido de Sódio

OPEX = Redução de Custos Operacionais

PH = Potencial Hidrogeniônico (indica se a água é ácida, neutra ou alcalina em uma escala de 0 a 14)

ZDHC = Zero Discharge of Hazardous Chemicals, (ou Eliminação Zero de Produtos Químicos Perigosos)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 O ÍNDIGO SOB A PERSPECTIVA HISTÓRICA E QUÍMICA.....	17
2.1 Contextualização Histórica do Índigo	18
2.2 Origens Naturais e o Processo da Indigofera tinctoria	19
2.3 Estrutura Molecular e Propriedades do Índigo	21
2.4 O Processo de Cuba e a Redução Química.....	22
2.5 Transição para o Índigo Sintético	24
2.6 Considerações Críticas	24
3 IMPACTOS AMBIENTAIS E DESAFIOS DA INDÚSTRIA TÊXTIL	25
3.1 Contextualização Ambiental do Setor Têxtil	25
3.2 A Química dos Efluentes e a Toxicidade do Hidrossulfito	27
3.3 Intensidade no Uso de Recursos: Água e Energia.....	28
3.4 Panorama Global e Pressões Regulatórias.....	30
3.5 Considerações Críticas	31
4 INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS E O MÉTODO ELETROQUÍMICO	33
4.1 Transformação Tecnológica e a Indústria 4.0 no Setor Têxtil	33
4.2 Tecnologias Emergentes no Cenário Global	35
4.3 Fundamentos do Tingimento Eletroquímico	38
4.4 Vantagens Ambientais e Operacionais	39
4.5 Viabilidade Econômica e Aplicação no Contexto Brasileiro.....	39
4.6 Considerações Críticas	41
4.7 O índigo sintético pré-reduzido como inovação técnica	41
4.8 Tecnologias “anilina-free” no índigo sintético	42
4.9 Técnicas de tingimento de baixo impacto ambiental	43
4.10 Análise crítica de ciclo de vida (acv) e o risco de “greenwashing”	44

4.11 O conceito de bio-índigo como solução futura	44
5 NORMAS, CERTIFICAÇÕES E EXIGÊNCIAS DO MERCADO TÊXTIL.....	46
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	47
REFERÊNCIAS.....	49

1 INTRODUÇÃO

O índigo é um dos corantes mais antigos utilizados pela humanidade, desempenhando um papel significativo na história econômica, cultural e tecnológica de diversas civilizações. Registros históricos indicam seu uso há milhares de anos em regiões como Índia, Egito e China, onde era valorizado não apenas pela sua coloração azul intensa e duradoura, mas também pelo seu simbolismo social e comercial. Ao longo do tempo, o índigo consolidou-se como um insumo essencial na produção têxtil, especialmente com o advento do tecido denim, amplamente difundido no vestuário contemporâneo.

Tradicionalmente, o índigo era obtido a partir de fontes naturais, principalmente da planta *Indigofera tinctoria*, por meio de processos que envolvem fermentação, oxidação e precipitação do corante. Apesar de sua origem vegetal, o processo de extração sempre apresentou limitações significativas, como baixa produtividade, elevada dependência de condições climáticas e dificuldade de padronização da qualidade. Além disso, a necessidade de grandes áreas de cultivo e o uso intensivo de recursos naturais levantam questionamentos quanto à real sustentabilidade desse modelo produtivo, especialmente quando analisado em larga escala.

Com o avanço da Revolução Industrial e o aumento da demanda por produtos têxteis, tornou-se evidente a necessidade de alternativas mais eficientes e escaláveis. Nesse contexto, o desenvolvimento do índigo sintético no final do século XIX representou um marco na história da indústria química e têxtil. A possibilidade de produzir o corante em laboratório, com maior controle de qualidade e menor custo, permitiu sua ampla disseminação, tornando-o a principal escolha para o tingimento de tecidos, sobretudo no segmento do denim. No entanto, essa evolução também trouxe consigo novos desafios, especialmente relacionados aos impactos ambientais decorrentes dos processos industriais.

O tingimento com índigo sintético, embora eficiente, é tradicionalmente associado ao uso intensivo de água, energia e agentes químicos, como os redutores utilizados para solubilizar o corante. Esses processos geram efluentes que, quando não tratados adequadamente, contribuem para a poluição de corpos hídricos e para

a degradação ambiental. Assim, tanto o índigo natural quanto o sintético apresentam limitações do ponto de vista da sustentabilidade, o que reforça a necessidade de reavaliar os métodos produtivos utilizados atualmente.

Nas últimas décadas, impulsionada por pressões ambientais, regulatórias e de mercado, a indústria têxtil tem buscado desenvolver e implementar tecnologias mais sustentáveis. Entre essas inovações, destacam-se processos que visam reduzir o consumo de água, minimizar o uso de substâncias químicas agressivas e otimizar a eficiência energética. Tecnologias como o tingimento por espuma, processos sem água e o uso de laser e ozônio para acabamento representam avanços significativos, porém ainda enfrentam desafios relacionados ao alto custo de implementação e à necessidade de infraestrutura especializada, o que limita sua adoção em larga escala, especialmente em países em desenvolvimento.

No contexto brasileiro, a indústria têxtil possui grande relevância econômica, sendo caracterizada por uma ampla diversidade de empresas, incluindo pequenas e médias organizações que muitas vezes operam com restrições financeiras e tecnológicas. Dessa forma, a adoção de soluções sustentáveis precisa considerar não apenas os benefícios ambientais, mas também a viabilidade econômica e operacional. Tecnologias altamente avançadas, embora eficientes, podem não ser aplicáveis à realidade nacional devido ao elevado investimento inicial e à complexidade de implementação.

Diante desse cenário, o tingimento eletroquímico surge como uma alternativa promissora, ao propor a substituição de agentes químicos redutores por processos baseados em corrente elétrica. Essa abordagem permite reduzir significativamente o uso de substâncias químicas, diminuir a geração de efluentes e melhorar o controle do processo de tingimento, sem demandar mudanças estruturais extremamente complexas. Além disso, apresenta potencial de adaptação à infraestrutura já existente em muitas indústrias, tornando-se uma opção mais acessível em comparação a outras tecnologias emergentes.

Assim, este trabalho tem como objetivo analisar a evolução do uso do índigo, desde sua origem natural até sua produção sintética, abordando os desafios históricos, produtivos e ambientais associados a cada etapa. Busca-se também discutir as principais inovações tecnológicas voltadas à sustentabilidade no tingimento têxtil, com ênfase na comparação entre diferentes processos. Por fim, pretende-se propor uma solução viável para a realidade brasileira, indicando o

tingimento eletroquímico como uma alternativa que equilibra eficiência, sustentabilidade e custo, contribuindo para a redução dos impactos ambientais da indústria têxtil no país.

Este trabalho caracteriza-se como uma pesquisa qualitativa, de caráter exploratório e descritivo, baseada em revisão bibliográfica. Foram utilizados artigos científicos, livros e materiais técnicos relacionados à indústria têxtil e aos processos de tingimento.

A análise foi realizada por meio da comparação entre métodos convencionais e tecnologias inovadoras, considerando critérios como eficiência produtiva, impacto ambiental e viabilidade econômica. Também foi adotado o conceito de Análise de Ciclo de Vida (ACV), permitindo avaliar os impactos ambientais ao longo de toda a cadeia produtiva.

2 O ÍNDIGO SOB A PERSPECTIVA HISTÓRICA E QUÍMICA

O índigo é um corante de tonalidade azul profunda amplamente utilizado na indústria têxtil, especialmente na produção de tecidos jeans. Tradicionalmente, ele pode ser obtido de fontes naturais, como plantas do gênero *Índigofera*, ou produzido de forma sintética em escala industrial.

Seu uso no tingimento têxtil se destaca pela capacidade de proporcionar diferentes tonalidades de azul e pelo efeito característico de desgaste observado no denim ao longo do tempo. No processo de tingimento, o índigo precisa passar por uma reação química de redução para se tornar solúvel em água e aderir às fibras têxteis, sendo posteriormente oxidado ao entrar em contato com o ar, recuperando sua coloração azul.

Atualmente, o tingimento com índigo também é tema de estudos voltados à sustentabilidade, devido ao consumo de água, produtos químicos e à geração de efluentes associados aos métodos convencionais de produção.

Figura 1 Planta *Índigofera tinctoria* em floração



Fonte: Imagem google (2026)

2.1 Contextualização Histórica do Índigo

O índigo é amplamente reconhecido como um dos corantes mais antigos utilizados pela humanidade, apresentando registros de aplicação que remontam a mais de 4.000 anos. Civilizações como as da Índia, Egito e China desenvolveram técnicas específicas para sua extração e aplicação, consolidando-o não apenas como um insumo têxtil, mas também como um elemento de valor econômico e simbólico.

Durante a Antiguidade e a Idade Média, o índigo desempenhou papel estratégico no comércio internacional, sendo frequentemente considerado um produto de alto valor agregado. Sua importância intensificou-se com a expansão das rotas comerciais e, posteriormente, com o processo de colonização, especialmente em regiões tropicais propícias ao cultivo de espécies produtoras do corante.

A predominância do índigo natural persistiu até o final do século XIX, quando avanços na química orgânica permitiram sua síntese em laboratório. Esse marco representou uma ruptura significativa no modelo produtivo, deslocando a produção agrícola para o ambiente industrial e inaugurando uma nova fase na história da indústria têxtil.

Figura 2 secagem de tecido em tingimento com índigo natural



Fonte: arquivo do autor

2.2 Origens Naturais e o Processo da *Indigofera tinctoria*

A principal fonte histórica do índigo natural é a planta *Indigofera tinctoria*, pertencente à família Fabaceae. Nessa espécie, o corante não está presente em sua forma final, mas sim como um precursor hidrossolúvel denominado índicano.

Figura 3 A principal fonte histórica do índigo natural é a planta *Indigofera tinctoria*, pertencente à família Fabaceae. Nessa espécie, o corante não está presente em sua forma final, mas sim como um precursor hidrossolúvel denominado índicano.



Fonte: arquivo do autor.

O processo tradicional de obtenção do índigo envolve uma sequência de etapas bioquímicas e físico-químicas. Inicialmente, as folhas são submetidas à fermentação em meio aquoso, na qual enzimas do tipo glicosidases promovem a hidrólise do índicano, resultando na formação de indoxil. Em seguida, por meio da aeração da solução, ocorre a oxidação do indoxil, levando à formação da índigotina, o pigmento azul insolúvel característico do índigo.

Figura 4 Fermentação da planta índigofera em panelas de barro



Fonte: site : istockphoto.com

Esse processo pode ser representado de forma simplificada pelas seguintes etapas:

- ✓ Hidrólise enzimática: Índicino $\rightarrow$ indoxil
- ✓ Oxidação: indoxil $\rightarrow$ Índigotina (Índigo)

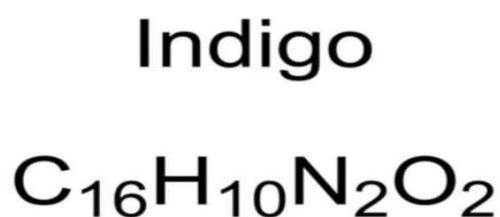
Apesar de tecnicamente eficiente em pequena escala, esse método apresenta limitações significativas, tais como baixa produtividade, variabilidade na

qualidade do produto final e elevada dependência de fatores ambientais, como temperatura, pH e disponibilidade hídrica. Além disso, sob a ótica da sustentabilidade, a necessidade de grandes áreas de cultivo e o uso intensivo de recursos naturais tornam esse modelo questionável em escala industrial.

2.3 Estrutura Molecular e Propriedades do Índigo

Do ponto de vista químico, o índigo ($C_{16}H_{10}N_2O_2$) apresenta uma estrutura molecular altamente conjugada e simétrica, composta por dois anéis indólicos ligados por uma dupla ligação central. Essa configuração favorece a formação de extensas interações intermoleculares, incluindo ligações de hidrogênio e forças de van der Waals.

Figura 5 Índigo depois da fermentação, pronto para o tingimento



Fonte: site istockphoto

Essas interações são responsáveis por características fundamentais do corante, tais como: elevada estabilidade química e fotolítica; baixa solubilidade em água e solventes orgânicos; alta resistência à degradação durante o uso.

A insolubilidade do índigo constitui, simultaneamente, uma vantagem e um desafio. Embora contribua para a durabilidade da coloração nos tecidos, impede sua aplicação direta no processo de tingimento. Para contornar essa limitação, é necessário converter o corante em sua forma reduzida, conhecida como leuco-índigo.

Essa transformação ocorre por meio de uma reação de redução em meio alcalino, na qual o índigo insolúvel é convertido em uma espécie solúvel e de coloração amarelada. Após a impregnação na fibra têxtil, o corante é reoxidado pelo oxigênio atmosférico, retornando à sua forma original insolúvel e fixando-se na estrutura da celulose.

2.4 O Processo de Cuba e a Redução Química

Figura 6 Tingimento artesanal com índigo Natural, uma das mais antigas coloração do mundo



Fonte: arquivo do autor

O processo industrial de tingimento com índigo é conhecido como processo de cuba, caracterizado pela necessidade de redução prévia do corante para viabilizar sua aplicação. Na indústria contemporânea, o agente redutor mais utilizado é o hidrossulfito de sódio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$), devido ao seu baixo custo e elevada eficiência.

Durante o processo, o hidrossulfito promove a redução do índigo à forma leuco, permitindo sua solubilização em meio alcalino. No entanto, essa reação gera subprodutos indesejáveis, principalmente sulfatos e sulfitos, que não podem ser reutilizados e são descartados nos efluentes industriais. Diferente do processo de redução do índigo natural que pode ser usado redutor natural.

Figura 7 Fluxograma extração do corante indigo da planta indigofera tinctoria



Fonte: <https://www.researchgate.net/figure/>

As principais limitações desse método incluem:

- Elevada geração de resíduos químicos
- Aumento da carga orgânica dos efluentes
- Consumo significativo de água e energia
- Baixa eficiência na reutilização de insumos

Esses fatores tornam o processo convencional ambientalmente oneroso, contribuindo para a poluição hídrica e aumentando os custos associados ao tratamento de efluentes.

2.5 Transição para o Índigo Sintético

A síntese do índigo, desenvolvida no final do século XIX, marcou um dos avanços mais relevantes da química orgânica aplicada. A produção sintética permitiu maior padronização, redução de custos e escalabilidade, fatores essenciais para atender à crescente demanda da indústria têxtil, especialmente com a popularização do denim.

Atualmente, estima-se que mais de 95% do índigo utilizado globalmente seja de origem sintética. Apesar disso, o processo produtivo continua dependente de etapas químicas intensivas, tanto na síntese quanto na aplicação do corante, mantendo desafios ambientais significativos.

2.6 Considerações Críticas

A análise histórica e química do índigo evidencia uma evolução marcada por ganhos de eficiência produtiva, porém acompanhada por impactos ambientais relevantes. O modelo atual, baseado na redução química com agentes como o hidrossulfito de sódio, demonstra limitações claras frente às exigências contemporâneas de sustentabilidade.

Nesse contexto, torna-se fundamental o desenvolvimento de alternativas tecnológicas que mantenham a eficiência do processo, ao mesmo tempo em que reduzam seus impactos ambientais. Essa necessidade abre espaço para a investigação de soluções inovadoras, como o tingimento eletroquímico, que será abordado nos capítulos seguintes

3 IMPACTOS AMBIENTAIS E DESAFIOS DA INDÚSTRIA TÊXTIL

A indústria têxtil configura-se como um dos setores mais relevantes da economia global, exercendo papel fundamental na geração de empregos, renda e desenvolvimento industrial. Entretanto, paralelamente à sua importância econômica, destaca-se como uma das atividades industriais com maior potencial de impacto ambiental, especialmente no que se refere ao consumo de recursos naturais e à geração de resíduos líquidos.

3.1 Contextualização Ambiental do Setor Têxtil

Entre as etapas produtivas, o processo de tingimento representa um dos principais pontos críticos, devido à sua elevada intensidade química e hídrica. No caso específico do tingimento com índigo, amplamente utilizado na produção de denim, os impactos ambientais são agravados pela necessidade de reações de oxirredução e pela utilização de agentes químicos potencialmente poluentes.

Figura 8 Descarte em meio ambiente



Fonte: Amapex Environment SL (2021)

Entre as etapas produtivas, o processo de tingimento representa um dos principais pontos críticos, devido à sua elevada intensidade química e hídrica e a enorme quantidade de poluentes provenientes das atividades industriais que são lançadas no meio ambiente conforme apresentado na figura 8 e 9.

Figura 9 A tinta está sendo levada para os rios e para os mares (Jeans Devastador)



Fonte: <https://nowtoronto.com/news/devastating-denim/>

A complexidade desses impactos exige uma abordagem sistêmica, frequentemente baseada em ferramentas como a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), que permite analisar os efeitos ambientais desde a obtenção da matéria-prima até o descarte do produto final. Sob essa perspectiva, o tingimento têxtil destaca-se como uma etapa de elevada carga ambiental dentro da cadeia produtiva. Diante da crescente preocupação com a preservação ambiental e a busca por práticas industriais mais sustentáveis, a indústria têxtil enfrenta o desafio de conciliar eficiência produtiva com a redução de seus impactos ambientais.

3.2 A Química dos Efluentes e a Toxicidade do Hidrossulfito

O principal desafio ambiental associado ao tingimento convencional com índigo reside na etapa de redução química, na qual se utiliza o hidrossulfito de sódio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$) como agente redutor. Apesar de sua eficiência operacional, esse composto apresenta elevada instabilidade, decompondo-se rapidamente em subprodutos como sulfatos (SO_4^{2-}) e sulfitos (SO_3^{2-}).

A presença desses compostos nos efluentes industriais contribui significativamente para o aumento da Demanda Química de Oxigênio (DQO) e da Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), parâmetros fundamentais para a avaliação da carga poluente da água. O aumento desses indicadores está diretamente relacionado ao consumo de oxigênio dissolvido nos corpos hídricos, comprometendo a respiração de organismos aquáticos e podendo levar à morte de peixes e outros organismos (KANT, 2012).

Figura 10 Contaminação causa a morte da vida aquática



Além disso, os sulfitos podem sofrer oxidação adicional no meio ambiente, intensificando o consumo de oxigênio e agravando o processo de eutrofização. Esse fenômeno resulta no crescimento excessivo de algas e na subsequente degradação da qualidade da água.

Outro fator crítico é o uso de soluções altamente alcalinas no processo, geralmente obtidas por meio da adição de hidróxido de sódio (NaOH). O descarte de efluentes com pH elevado provoca alterações significativas no equilíbrio químico dos ecossistemas aquáticos, afetando processos biológicos naturais, como a atividade microbiológica responsável pela autodepuração dos rios.

Portanto, a combinação entre alta carga química, alcalinidade e presença de compostos redutores torna os efluentes do tingimento com índigo particularmente desafiadores do ponto de vista ambiental e tecnológico.

3.3 Intensidade no Uso de Recursos: Água e Energia

O tingimento de tecidos denim é caracterizado como um processo de múltiplas etapas, envolvendo sucessivos ciclos de imersão, oxidação e lavagem. Esse modelo produtivo, conhecido como processo de "esgotamento", demanda volumes expressivos de água em todas as suas fases.

Estima-se que a produção de um único par de calças jeans possa consumir milhares de litros de água ao longo de seu ciclo de vida (demonstrado na figura 11), incluindo o cultivo do algodão, o tingimento e os processos de acabamento. Conferindo a imagem da figura 11(abaixo) pode-se constatar o “quão alto é o consumo e o desperdício da água em cada uma das etapas da produção de uma única peça de roupa”. (Site Sou de algodão,2026)

No contexto industrial, a água desempenha múltiplas funções, atuando como solvente, meio de transporte de reagentes e agente de limpeza para remoção de corantes não fixados e sais residuais.

Além do consumo hídrico, destaca-se o elevado gasto energético associado ao aquecimento da água, à operação de máquinas e aos sistemas de secagem. A água residual, frequentemente descartada em temperaturas elevadas, representa

uma perda significativa de energia térmica, contribuindo para a ineficiência global do processo.

Figura 11 Ciclo de vida de um par de calças Jeans



Fonte: site Sou de algodão.

Alem disso, máquinas como esta da figura 12, a seguir, consomem alta quantidade de água e de energia no processo de fabricação de jeans. Uma linha industrial média que processa cerca de 1.500 kg de fio por hora consome aproximadamente 10.000 a 22.000 litros de água por hora de operação contínua. E neste tipo de operação em regime de produção contínua, a máquina demanda uma média real de 70 a 160 kWh por hora.

Essa combinação de alto consumo de água e energia impacta diretamente a pegada hídrica e a pegada de carbono da indústria têxtil, reforçando a necessidade de tecnologias que promovam maior eficiência no uso de recursos.

Figura 12 Máquina de Tingimento Contínuo de Fios de Urdimbre



Fonte: <https://www.yanhuidye.com/liquid-indigo-blue-30-for-deep-black-liquid-product>

3.4 Panorama Global e Pressões Regulatórias

Globalmente, estima-se que a indústria têxtil seja responsável por aproximadamente 20% da poluição industrial de águas doces, consolidando-se como uma das principais fontes de contaminação hídrica (ROBINSON et al., 2001). Esse cenário é particularmente crítico em países em desenvolvimento, onde a

expansão industrial muitas vezes ocorre de forma mais acelerada que a implementação de sistemas eficazes de controle ambiental.

Entretanto, observa-se uma crescente intensificação das pressões regulatórias e de mercado. Normas ambientais mais rigorosas, certificações internacionais e a demanda por transparência na cadeia produtiva têm impulsionado mudanças no setor. Iniciativas como certificações ambientais, práticas de ESG (Environmental, Social and Governance) e exigências de rastreabilidade vêm redefinindo os padrões de competitividade industrial.

Nesse contexto, empresas que não se adaptam a essas exigências enfrentam riscos significativos, incluindo perda de mercado, restrições comerciais e aumento de custos operacionais relacionados à gestão ambiental.

No Brasil, esse cenário apresenta desafios adicionais. A indústria têxtil nacional é composta majoritariamente por pequenas e médias empresas, muitas das quais operam com limitações financeiras e tecnológicas. Assim, a adoção de soluções sustentáveis envolve um delicado equilíbrio entre investimento, retorno econômico e conformidade ambiental.

3.5 Considerações Críticas

A análise dos impactos ambientais associados ao tingimento com índigo evidencia que o modelo produtivo convencional apresenta limitações significativas frente às demandas contemporâneas de sustentabilidade. A dependência de agentes químicos redutores, o elevado consumo de água e energia, e a geração de efluentes complexos configuram um cenário de alto impacto ambiental.

Diante disso, torna-se evidente a necessidade de transição para tecnologias mais limpas e eficientes, capazes de reduzir a carga poluente sem comprometer a viabilidade econômica do processo. Essa transição não é apenas uma exigência ambiental, mas também uma estratégia de competitividade industrial em um mercado cada vez mais orientado por critérios sustentáveis.

Nesse contexto, alternativas como o tingimento eletroquímico emergem como soluções promissoras, ao propor a substituição de insumos químicos por processos baseados em corrente elétrica, reduzindo significativamente os impactos ambientais associados ao tingimento tradicional.

4 INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS E O MÉTODO ELETROQUÍMICO

A crescente incorporação dos princípios da Indústria 4.0 no setor têxtil tem promovido uma transformação significativa nos modelos produtivos tradicionais. Esse novo paradigma industrial baseia-se na integração de tecnologias digitais, automação avançada, monitoramento em tempo real e otimização de processos, com o objetivo de aumentar a eficiência produtiva e reduzir impactos ambientais.

4.1 Transformação Tecnológica e a Indústria 4.0 no Setor Têxtil

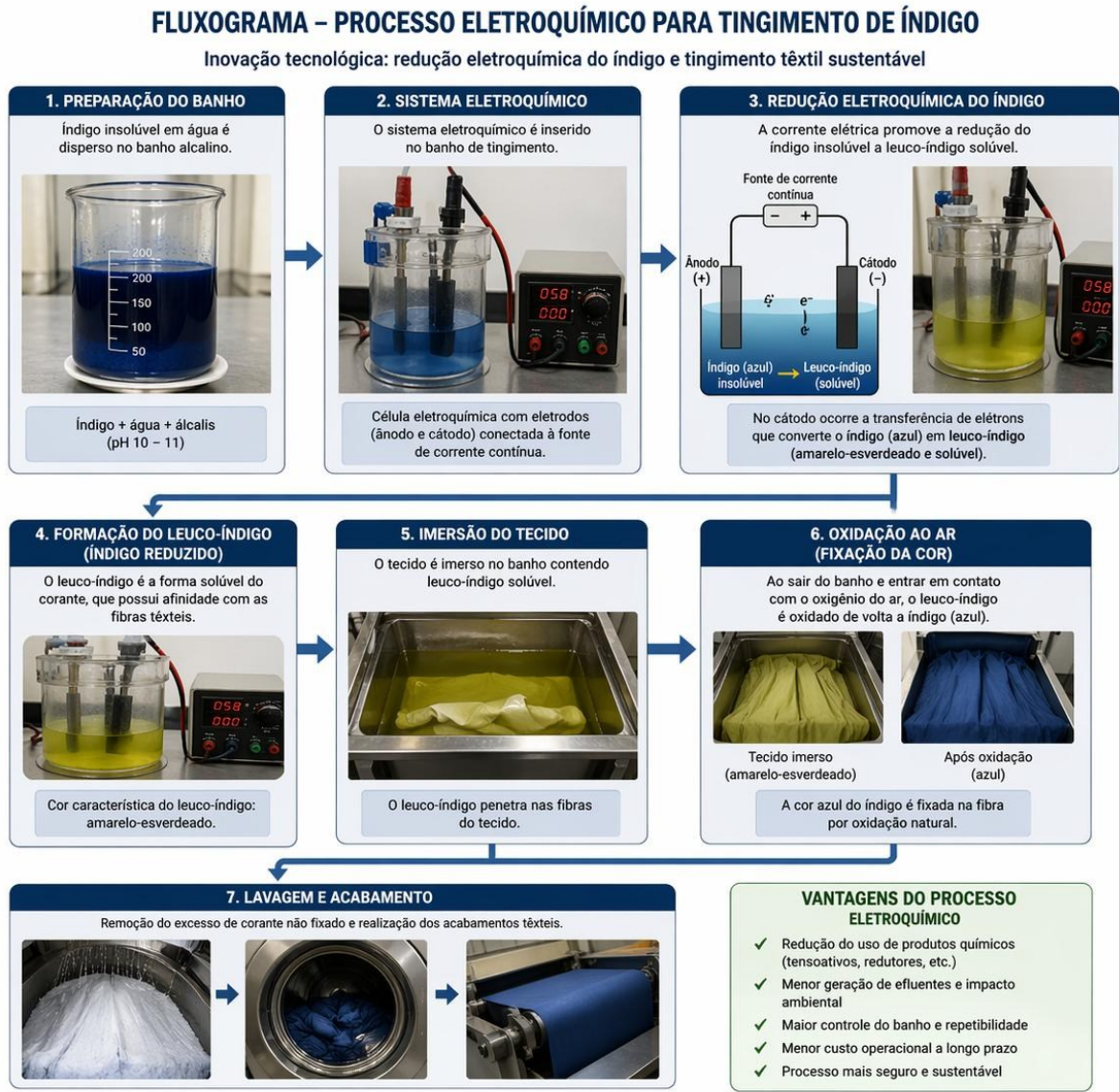
A transformação tecnológica no setor têxtil está relacionada à adoção de tecnologias digitais e automatizadas nos processos produtivos. Com a Indústria 4.0, recursos como inteligência artificial, internet das coisas (IoT), robótica e análise de dados tornam a produção mais eficiente, sustentável e personalizada.

No contexto do tingimento têxtil, essa transformação se traduz na substituição gradual de processos intensivos em recursos por tecnologias mais limpas, alinhadas aos princípios da química verde e da economia circular.

Nesse cenário, a inovação tecnológica não se limita à melhoria incremental de processos existentes, mas propõe mudanças estruturais na forma como o corante é aplicado às fibras têxteis.

Na figura 13 , abaixo, pode-se observar o passo a passo do processo eletroquímico no tingimento de índigo, com a inovação tecnológica num processo de redução e de tingimento têxtil sustentável. Demonstra, portanto, algumas vantagens como: redução de produtos químicos tóxicos, redutores entre outros, além de menor impacto ambiental, por gerar menos efluentes com maior controle nos banhos e repetitividade, portanto um processo mais seguro e sustentável, já que tem menor custo a longo prazo. Podendo ser observada esta comparação de melhoria no processo pela figura 14 que demonstra a comparação entre processo tradicional e eletrônicos.

Figura 13 fluxograma -Processo eletroquímico para tingimento de índigo



Fonte: Imagem produzida por IA.

Figura 14 Comparação entre processos: tradicional x eletrônicos



Fonte: Imagem produzida por IA

4.2 Tecnologias Emergentes no Cenário Global

Atualmente, diversas tecnologias têm sido desenvolvidas com o objetivo de mitigar os impactos ambientais do tingimento com índigo. Entre as mais relevantes, destaca-se: Tingimento por Espuma (Foam Dyeing), cujo fluxograma está demonstrado na figura 15 (abaixo).

Figura 15 Fluxograma -Tingimento de espuma (Foam Dyeing)



Fonte: Imagem elaborada por IA.

A tecnologia de Tingimento por Espuma Foam Dyeing, utiliza estruturas espumosas para transportar o corante até a fibra, substituindo o uso massivo de água. Como resultado, pode-se alcançar reduções superiores a 80–90% no consumo hídrico, além de menor demanda energética na etapa de secagem.

Entretanto, sua aplicação requer formulações químicas específicas para garantir a estabilidade da espuma, além de equipamentos dedicados, conforme pode -se observar no fluxograma da figura 16, o que eleva significativamente o investimento inicial.

Outras inovações para a Indústria Têxtil Sustentável emergente no cenário global são as chamadas Tecnologias Waterless demonstrados na figura 16(abaixo).

Observa-se na figura algumas dessas tecnologias como o tingimento de espuma Foam Dyeing, já demonstrado acima. Tingimento com CO₂ Supercrítico que substitui água por dióxido de carbono pressurizado em estado supercrítico. Também aponta o Tingimento a seco (Dry Dyeing) cujo conceito é aplicar cor aos tecidos com uso mínimo ou praticamente zero de água no processo principal de tingimento.

Na figura 16 , ainda pode -se observar outras tecnologias waterless como o Tingimento Digital (Digital printing) inspirado na lógica da impressão inkjet, cuja aplicação de tinta acontece apenas nas áreas desejadas. E também a tecnologia de tingimento por ultrassom que utiliza ondas ultrassônicas de alta frequência. Essas duas tecnologias — tingimento digital e tingimento por ultrassom — fazem parte da nova geração de processos têxteis de baixo consumo hídrico e químico. No denim/índigo ainda estão em expansão, mas têm enorme potencial.

Nesse modelo, o índigo já é fornecido na forma reduzida (leuco), evitando o uso direto de agentes redutores nas indústrias têxteis. Embora reduza a manipulação de substâncias químicas perigosas, transfere parte do impacto ambiental para etapas anteriores da cadeia produtiva, além de gerar dependência tecnológica e logística.

De forma geral, essas soluções apresentam avanços significativos do ponto de vista ambiental, porém compartilham limitações relacionadas ao alto investimento em infraestrutura (CAPEX), dificultando sua adoção em países em desenvolvimento.

Figura 16 Tecnologias Waterless



Sistemas que utilizam dióxido de carbono supercrítico ou outros meios alternativos eliminam completamente o uso de água no tingimento. Apesar do elevado potencial ambiental, essas tecnologias ainda apresentam alto custo operacional e restrições quanto ao tipo de fibra e corante aplicável.

4.3 Fundamentos do Tingimento Eletroquímico

Há três abordagens diferentes em reações de oxirredução (redox) nos processos químicos industriais. Eles descrevem como os elétrons ou agentes redutores são transferidos para a espécie química que será reduzida. São eles: Pré-redução Catalítica ou por Hidrogênio, Redução Direta e Redução indireta.

Na Pré-redução Catalítica ou por Hidrogênio, o tingimento eletroquímico representa uma abordagem inovadora baseada na substituição de agentes redutores químicos por corrente elétrica para promover a redução do índigo. Nesse processo, a transferência de elétrons ocorre diretamente a partir de um eletrodo, eliminando a necessidade de reagentes consumíveis.

Do ponto de vista conceitual, o processo fundamenta-se em reações de oxirredução controladas eletricamente, permitindo maior precisão no controle do potencial redox do sistema.

Na redução direta, o índigo entra em contato com o cátodo, onde recebe elétrons e é convertido em sua forma leuco solúvel. Apesar de sua simplicidade conceitual, essa abordagem apresenta limitações práticas, principalmente devido à baixa solubilidade inicial do corante, o que reduz a eficiência de transferência de massa.

Já na Redução Indireta (com Mediadores Redox) a abordagem mais promissora utiliza mediadores redox, como complexos metálicos (por exemplo, ferro). Nesse sistema: o eletrodo reduz o mediador, o mediador reduz o índigo no meio reacional e o mediador é regenerado continuamente.

Esse ciclo regenerativo caracteriza um sistema catalítico, no qual o mediador não é consumido, aumentando significativamente a eficiência do processo (BECHTOLD et al., 2002).

4.4 Vantagens Ambientais e Operacionais

O tingimento eletroquímico apresenta diversas vantagens em relação ao método convencional, especialmente no que se refere à sustentabilidade e eficiência operacional, tais como:

- a. eliminação de agentes redutores descartáveis
- b. Reduz drasticamente a geração de sulfatos e sulfitos nos efluentes.
- c. Redução da carga poluente (DQO/DBO)
- d. Simplifica o tratamento de efluentes e diminui os custos ambientais.
- e. Menor consumo de insumos químicos
- f. Alinha-se aos princípios da química verde.
- g. Controle preciso do processo
- h. A corrente elétrica permite ajuste fino da redução, garantindo maior padronização.
- i. Potencial de integração com energia renovável
- j. Favorece a descarbonização da cadeia produtiva.

4.5 Viabilidade Econômica e Aplicação no Contexto Brasileiro

A adoção de novas tecnologias no setor têxtil brasileiro depende fortemente de sua viabilidade econômica e adaptabilidade à infraestrutura existente. Nesse sentido, o tingimento eletroquímico apresenta vantagens estratégicas relevantes.

Diferentemente de outras tecnologias emergentes, que exigem substituição completa do parque industrial, os sistemas eletroquímicos podem ser integrados de forma gradual às linhas de produção existentes, reduzindo o investimento inicial.

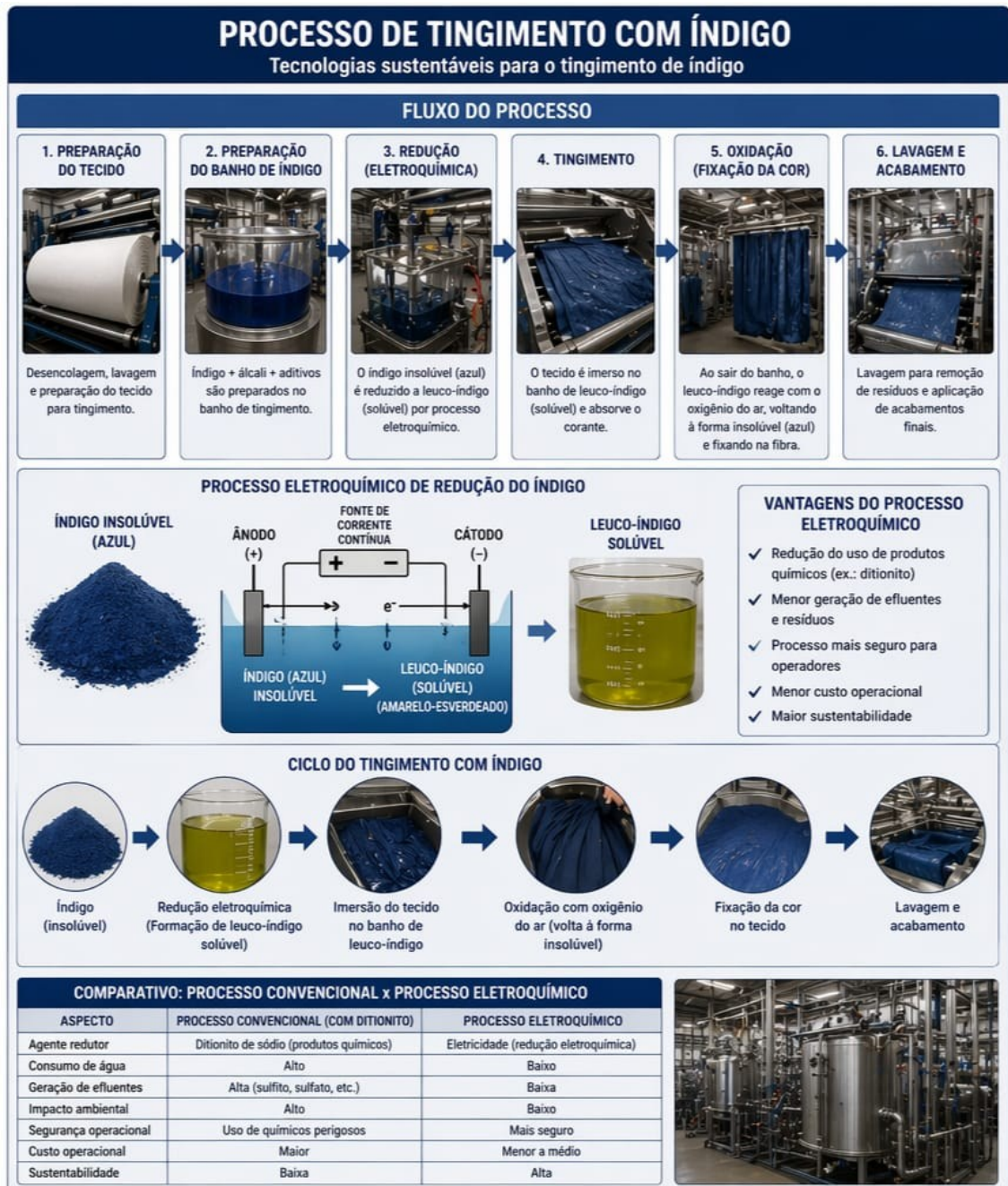
Entre os principais benefícios econômicos, destacam-se:

- a) Redução de custos operacionais (OPEX)
- b) Substituição de insumos químicos por energia elétrica, frequentemente mais barata e previsível.
- c) Diminuição de gastos com tratamento de efluentes
- d) Menor carga química implica menor complexidade nos sistemas de tratamento.
- e) Maior reprodutibilidade do processo
- f) Redução de perdas por não conformidade de cor.

- g) Conformidade com regulamentações ambientais (CONAMA)
- h) Facilita a adequação às exigências legais e evita penalidades.

No contexto brasileiro, caracterizado pela predominância de pequenas e médias empresas, essa tecnologia apresenta-se como uma alternativa viável para promover a transição sustentável sem comprometer a competitividade industrial.

Figura 17 processo de Tingimento ccom Índigo



Fonte: Imagem elaborada por IA

4.6 Considerações Críticas

Apesar de seu elevado potencial, o tingimento eletroquímico ainda enfrenta desafios relacionados à sua implementação em larga escala, incluindo: necessidade ; de otimização dos eletrodos controle de estabilidade dos mediadores redox e adaptação a diferentes tipos de fibras e processos industriais

No entanto, considerando o avanço das tecnologias eletroquímicas e a crescente demanda por soluções sustentáveis, é possível afirmar que essa abordagem representa uma das alternativas mais promissoras para a modernização do tingimento com índigo.

Dessa forma, o método eletroquímico não apenas atende às exigências ambientais contemporâneas, mas também se posiciona como uma solução estratégica para o futuro da indústria têxtil.

4.7 O índigo sintético pré-reduzido como inovação técnica

Tradicionalmente, o uso do índigo sintético em pó no tingimento do denim exige a aplicação de grandes quantidades de agentes redutores, como o hidrossulfito de sódio, além de soda cáustica para ajuste de pH. Esses insumos, embora eficientes para a redução do corante, contribuem significativamente para o aumento da carga salina e química dos efluentes industriais, exigindo sistemas complexos de tratamento.

Como avanço tecnológico relevante, destaca-se o uso do índigo sintético pré-reduzido em forma líquida, amplamente adotado pela indústria têxtil contemporânea. Nesse sistema, o corante já se encontra quimicamente reduzido e estabilizado, pronto para aplicação no processo de tingimento. Essa característica permite a redução expressiva do consumo de agentes redutores adicionais, diminuindo a geração de resíduos sulfídricos e o impacto ambiental associado ao processo.

A adoção do índigo pré-reduzido representa uma importante evolução técnica, pois alia eficiência produtiva, padronização cromática e redução de impactos ambientais, tornando o processo industrial mais sustentável sem comprometer a qualidade do produto final.

Figura 18 maquina de secagem do processo índigo sintético



Fonte : Zeva Denim

4.8 Tecnologias “anilina-free” no índigo sintético

Um dos principais desafios ambientais relacionados ao índigo sintético tradicional é a presença da anilina em sua cadeia produtiva. A anilina é classificada como uma substância potencialmente tóxica para organismos aquáticos e, quando presente nos efluentes, representa risco ambiental significativo.

Com o objetivo de mitigar esse problema, a indústria química desenvolveu tecnologias conhecidas como “anilina-free”, demonstrado na figura 19 (abaixo) , que eliminam esse composto do processo de fabricação do corante. Um exemplo relevante é o Índigo Pure, desenvolvido pela Archroma, que oferece um índigo sintético com maior grau de pureza e menor impacto ambiental.

Figura 19 Tecnologias anilina-free no índigo sintético



Fonte: Imagem elaborada por IA.

A utilização de corantes livres de anilina contribui para a redução da toxicidade dos efluentes e facilita o cumprimento de normas ambientais cada vez mais rigorosas, demonstrando que a sustentabilidade no tingimento têxtil também depende da inovação química aplicada à produção do corante.

4.9 Técnicas de tingimento de baixo impacto ambiental

Além da escolha do tipo de corante, o modo de aplicação do índigo exerce influência direta sobre os impactos ambientais do processo. Tecnologias tradicionais de tingimento por imersão demandam grandes volumes de água, energia e produtos químicos, principalmente em processos industriais de alta escala.

Entre as tecnologias emergentes de baixo impacto, destaca-se o tingimento por espuma, no qual o corante é aplicado ao tecido por meio de uma camada controlada de espuma, reduzindo drasticamente o volume de água utilizado. Outra inovação relevante é o uso de sistemas baseados em nitrogênio, nos quais a redução do índigo ocorre por meio de controle físico do ambiente, minimizando a necessidade de agentes químicos agressivos.

Essas tecnologias demonstram que a sustentabilidade no tingimento não está restrita à substituição do corante, mas também à modernização dos processos produtivos, aproximando a eficiência do índigo sintético da responsabilidade ambiental, frequentemente, associada ao índigo natural.

4.10 Análise crítica de ciclo de vida (acv) e o risco de “greenwashing”

A análise de sustentabilidade do índigo natural e sintético exige uma abordagem crítica baseada no conceito de Análise de Ciclo de Vida (ACV), que considera todas as etapas do processo produtivo, desde a extração da matéria-prima até o descarte final.

Embora o índigo natural seja frequentemente percebido como mais sustentável por sua origem vegetal, sua produção em larga escala pode demandar grandes extensões de terra agrícola, elevado consumo de água e transporte de longas distâncias, resultando em emissões significativas de dióxido de carbono. Em contextos industriais de alta demanda, esses fatores podem comprometer sua sustentabilidade global.

Nesse sentido, o uso indiscriminado do termo “natural” pode configurar práticas de greenwashing, quando a imagem sustentável não corresponde aos reais impactos ambientais do processo. Por outro lado, tecnologias modernas aplicadas ao índigo sintético, como processos anilina-free e sistemas de baixo consumo hídrico, podem apresentar desempenho ambiental superior quando avaliadas sob a ótica do ciclo de vida completo.

Essa análise crítica demonstra maturidade acadêmica ao reconhecer que a sustentabilidade depende do contexto produtivo e da escala de aplicação.

4.11 O conceito de bio-índigo como solução futura

Pesquisas recentes apontam o bio-índigo como uma alternativa promissora para o futuro do tingimento têxtil. Esse corante é produzido por meio de processos biotecnológicos, utilizando microrganismos ou fermentação de açúcares para sintetizar a molécula de índigotina, sem a necessidade de derivados petroquímicos ou cultivo agrícola extensivo.

Startups como a Huue têm se destacado no desenvolvimento dessa tecnologia, que combina a pureza química do índigo sintético com os princípios ambientais associados ao índigo natural. O bio-índigo apresenta potencial para reduzir emissões, consumo de água e uso de substâncias tóxicas, mantendo a viabilidade industrial em larga escala.

Embora ainda em fase de consolidação, essa tecnologia representa uma convergência entre inovação científica e sustentabilidade, apontando caminhos relevantes para o futuro da indústria têxtil.

5 NORMAS, CERTIFICAÇÕES E EXIGÊNCIAS DO MERCADO TÊXTIL

A sustentabilidade na indústria têxtil é cada vez mais orientada por normas e certificações reconhecidas internacionalmente. Entre as mais relevantes, destaca-se a OEKO-TEX Standard 100, que certifica a ausência de substâncias nocivas em produtos têxteis. E o programa ZDHC, que visa a eliminação de produtos químicos perigosos ao longo da cadeia produtiva. (Intertek Brasil,2026)

No Brasil, existem centros e empresas que auxiliam e orientam a indústria têxtil a obter certificações internacionais. Um deles é o Centro de Tecnologia da Indústria Química e Têxtil (Senai Cetiq), presente na Febratex 2022. (Tecnotêxtil Brasil,2022)

No contexto brasileiro, o programa ABVTEX desempenha papel fundamental ao auditar e certificar empresas do setor têxtil quanto às boas práticas ambientais, sociais e trabalhistas. (ABVTEX,2026)

A adoção de tecnologias de tingimento mais limpas e de corantes com menor impacto ambiental contribui diretamente para o atendimento a essas exigências, reforçando a importância da sustentabilidade como fator estratégico e competitivo no mercado atual.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo deste estudo foi analisar a evolução do uso do índigo, desde sua origem natural até sua produção sintética, abordando os desafios históricos, produtivos e ambientais associados a cada etapa. Buscou-se, também, discutir as principais inovações tecnológicas voltadas à sustentabilidade no tingimento têxtil, com ênfase na comparação entre diferentes processos.

Este trabalho caracterizou-se como uma pesquisa qualitativa, de natureza exploratória e descritiva, fundamentada em revisão bibliográfica. Para sua elaboração, foram analisados artigos científicos, livros e materiais técnicos relacionados à indústria têxtil e aos processos de tingimento.

A pesquisa permitiu comparar métodos convencionais e tecnologias inovadoras, considerando aspectos como eficiência produtiva, impacto ambiental e viabilidade econômica. Além disso, foi aplicado o conceito de Análise do Ciclo de Vida (ACV), possibilitando uma avaliação mais ampla dos impactos ambientais ao longo de toda a cadeia produtiva, desde a obtenção da matéria-prima até o descarte final.

A análise desenvolvida ao longo do trabalho permitiu compreender a evolução do uso do índigo sob as perspectivas histórica, química e ambiental, evidenciando sua relevância para a indústria têxtil e, especialmente, para a produção de tecidos denim. Desde sua origem natural, associada a processos artesanais e dependentes de condições ambientais, até sua consolidação como produto sintético em larga escala, o índigo demonstrou ser um elemento central na dinâmica produtiva do setor.

Entretanto, os avanços tecnológicos que possibilitaram maior eficiência e escalabilidade também trouxeram desafios significativos, sobretudo no que se refere aos impactos ambientais. O modelo convencional de tingimento, baseado no uso de agentes redutores químicos como o hidrossulfito de sódio, apresenta elevada carga poluente, alto consumo de água e energia, além de gerar efluentes complexos que exigem tratamento adequado.

Diante desse cenário, tornou-se evidente a necessidade de transição para tecnologias mais sustentáveis, capazes de conciliar eficiência produtiva e responsabilidade ambiental. Nesse contexto, o tingimento eletroquímico destaca-se como uma alternativa promissora, ao substituir insumos químicos por processos baseados em corrente elétrica, reduzindo significativamente a geração de resíduos e a carga poluente.

Além disso, a análise de inovações complementares, como o uso de índigo pré-reduzido, tecnologias anilina-free e o desenvolvimento do bio-índigo, demonstra que a sustentabilidade no setor têxtil depende de uma abordagem integrada, que

envolve tanto a modernização dos processos quanto a reformulação dos insumos utilizados.

No contexto brasileiro, a viabilidade econômica e a adaptabilidade tecnológica são fatores determinantes para a adoção dessas soluções. Assim, tecnologias que permitem implementação gradual e menor necessidade de investimento inicial, como o método eletroquímico, apresentam maior potencial de aplicação prática.

Além dos benefícios ambientais, as tecnologias eletroquímicas também demonstram vantagens econômicas significativas para a indústria têxtil. Enquanto o processo convencional utiliza grandes quantidades de hidrossulfito de sódio para a redução do índigo, o processo eletroquímico utiliza elétrons e possibilita a regeneração contínua dos mediadores químicos, permitindo uma economia de até 80% no consumo desses insumos. Adicionalmente, a reutilização dos banhos de tingimento por períodos mais prolongados contribui para a redução do consumo de água e para o aumento da eficiência operacional. Outro benefício relevante está relacionado à redução da carga poluente dos efluentes, uma vez que a diminuição da utilização de compostos sulfurados reduz a Demanda Química de Oxigênio (DQO) e os custos associados ao tratamento de águas residuais.

Aplicações industriais da tecnologia Smart Índigo™ demonstram resultados expressivos, com reduções de até 70% no consumo de energia, 30% no consumo de água e 90% nas emissões de dióxido de carbono (CO₂). Esses resultados evidenciam que a sustentabilidade pode estar diretamente associada à viabilidade econômica, permitindo que as empresas reduzam custos operacionais ao mesmo tempo em que minimizam seus impactos ambientais. Dessa forma, a adoção dessas tecnologias apresenta-se como uma estratégia capaz de aumentar a competitividade das organizações em um mercado cada vez mais orientado por critérios de sustentabilidade.

No Brasil, a Tabatex destaca-se como representante da tecnologia Smart Índigo™, contribuindo para a disseminação de soluções inovadoras voltadas à redução do consumo de recursos naturais e à modernização dos processos de tingimento na indústria têxtil.

Por fim, concluiu-se que a busca por sustentabilidade na indústria têxtil não deve ser pautada exclusivamente pela substituição de materiais, mas também pela reestruturação dos processos produtivos como um todo. O tingimento eletroquímico representa não apenas uma inovação tecnológica, mas uma alternativa viável para reduzir impactos ambientais, otimizar recursos e promover maior competitividade para o setor. A combinação entre a redução do consumo de água, energia e produtos químicos, associada à diminuição das emissões atmosféricas e da geração de efluentes, evidencia o potencial dessa tecnologia para contribuir com o desenvolvimento de uma cadeia produtiva mais eficiente, sustentável e alinhada às demandas futuras da indústria têxtil.

REFERÊNCIAS

ABVTEX (Associação Brasileira de Varejo Têxtil) 2026. **O Programa ABVTEX** . Disponível em: <https://www.abvtex.org.br/sobre-o-programa/> . Acesso: abril,2026.

AMAPEX ENVIRONMENT SL.**Descarte em meio ambiente**. 2021. Disponível em: <https://biotech-spain.com/en/articles/enzymatic-wastewater-treatment/>. Acesso em: 2025

ARCHROMA. **Indigo Pure: sustainable indigo solution**. Disponível em: <<https://www.archroma.com>>. Acesso em: 2024.

BECHTOLD, T.; TURCANU, A.; BERGER, H. **Electrochemical reduction of indigo**. Dyes and Pigments, 2002.

DEVASTATING DENIM.(2014) **A tinta está sendo levada para os rios e para os mares** . Disponível em: <https://nowtoronto.com/news/devastating-denim/>. Acesso em: 2026.

INTERTEK BRASIL.**Programa ZDHC**. (2026). Disponível em: <https://www.intertek-br.com/textil/programa-zdhc/>. Acesso em: 2026

ISTOCKPHOTO. **Fermentação da planta indigofera em panelas de barro**. Disponível em: <https://www.istockphoto.com/br>. Acesso em 2025.

KANT, R. Textile dyeing industry: an environmental hazard. **Natural Science**, v. 4, n. 1, 2012.

OEKO-TEX. **Standard 100 by OEKO-TEX**. Disponível em: <<https://www.oeko-tex.com>>. Acesso em: 2024.

ROBINSON, T.; McMULLAN, G.; MARCHANT, R.; NIGAM, P. **Remediation of dyes in textile effluent: a critical review**. Bioresource Technology, v. 77, 2001.

SHIJIAZHUANG YANHUI DYE CO. **Máquina de Tingimento Contínuo de Fios de Urdimbre** . Disponível em: <https://www.yanhuidye.com/liquid-indigo-blue-30-for-deep-black-liquid-product> . Acesso em 2026.

SOU DE ALGODÃO.**Ciclo de vida de um par de calças Jeans**. Disponível em: https://soudealgodao.com.br/?gad_source=1&gad_campaignid. Acesso em: 2026

TEECNOTÊXTIL BRASIL. **A importância das certificações ambientais OEKOTEX e CONTROL UNION.** (2022) Disponível em : <https://tecnotextilbrasil.com.br/a-importancia-das-certificacoes-ambientais-oekotex-e-control-union/>. Acesso em: 2026

VECTEEZY . **Contaminação causa a morte da vida aquática.** Disponível em: <https://pt.vecteezy.com/>. acesso em: 2026.

ZEVADENIM. **How Denim Is Made:** Beaming and Sizing Process in Denim Manufacturing. Disponível em: <https://www.zevadenim.com/ar/how-denim-is-made-beaming-and-sizing-process-in-denim-manufacturing/> 2023.

TABATEX. Smart Índigo™: tecnologia sustentável para tingimento de índigo. Americana: Tabatex 2025. Disponível em: [\[https://www.tabatex.com.br\]](https://www.tabatex.com.br)(<https://www.tabatex.com.br>). ****Acesso em:**** 16 jun. 2026