



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**



MATEUS HENRIQUE DE MARCO AVILA

**BRANQUEAMENTO DE CELULOSE E O PRÉ-BRANQUEAMENTO
ENZIMÁTICO: POTENCIAL, BENEFÍCIOS E DESAFIOS NA REDUÇÃO DO
USO DE PRODUTOS QUÍMICOS**

UBERLÂNDIA

2025

MATEUS HENRIQUE DE MARCO AVILA

**BRANQUEAMENTO DE CELULOSE E O PRÉ-BRANQUEAMENTO
ENZIMÁTICO: POTENCIAL, BENEFÍCIOS E DESAFIOS NA REDUÇÃO DO
USO DE PRODUTOS QUÍMICOS**

Monografia de Trabalho de Conclusão de
Curso apresentado ao curso de Engenharia
Química da Universidade Federal de
Uberlândia Campus Santa Mônica.
Orientador: Prof. Dr. Eloizio Julio Ribeiro

UBERLÂNDIA

2025

MATEUS HENRIQUE DE MARCO AVILA

**BRANQUEAMENTO DE CELULOSE E O PRÉ-BRANQUEAMENTO
ENZIMÁTICO: POTENCIAL, BENEFÍCIOS E DESAFIOS NA REDUÇÃO DO
USO DE PRODUTOS QUÍMICOS**

Monografia de Trabalho de Conclusão de
Curso apresentado ao curso de Engenharia
Química da Universidade Federal de
Uberlândia Campus Santa Mônica.
Orientador: Prof. Dr. Eloizio Julio Ribeiro

Uberlândia, 18 de Setembro de 2025

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Eloizio Julio Ribeiro

Orientador

Engenharia Química / FEQUI – UFU

Rubens Gedraite

Engenharia Química / FEQUI – UFU

Ricardo Amâncio Malagoni

Engenharia Química / FEQUI – UFU

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, aos meus pais e ao meu irmão, que foram fundamentais para a conclusão deste ciclo. Um obrigado a todo apoio incondicional, seja financeiro, emocional ou pelos incontáveis conselhos valiosos que me guiaram à vida adulta.

A Deus, minha gratidão pela vida, pela força e por Sua presença constante em todos os momentos, especialmente naqueles que exigiram fé e que não tinha minha família por perto.

Aos meus mestres e professores, deixo aqui meu reconhecimento por todo o conhecimento compartilhado, pela exigência e desafios propostos que me impulsionou a crescer. Como também os conselhos que transcendem a sala de aula que levarei para a vida.

Por fim, deixo meu agradecimento aos amigos que a universidade me deu, agradeço a pela parceria, pelos bons momentos de descontração, as longas horas de estudo e o apoio mútuo que tornaram a caminhada acadêmica mais leve e memorável.

Com carinho, Mateus Ávila.

RESUMO

Este trabalho explora o potencial do pré-branqueamento enzimático da celulose como uma alternativa para reduzir o uso intensivo de produtos químicos nos processos de branqueamento, alinhando-se às crescentes demandas por sustentabilidade na indústria de papel e celulose. Por meio de uma revisão bibliográfica abrangente, o estudo analisa a evolução das tecnologias de branqueamento, desde os métodos baseados em cloro elementar até as sequências ECF (Elemental Chlorine Free) e TCF (Totally Chlorine Free), contextualizando a inserção da biotecnologia como um avanço estratégico. Os resultados indicam que o pré-tratamento com enzimas, especialmente as xilanases, promove uma significativa redução no consumo de reagentes químicos, como o dióxido de cloro, em uma faixa de 15% a 25%, o que acarreta benefícios tanto econômicos, pela economia de insumos, quanto ambientais, pela menor formação de compostos organoclorados (AOX) nos efluentes. O mecanismo de ação das xilanases consiste na hidrólise da camada de xilana redepositada sobre as fibras, aumentando sua porosidade e facilitando a remoção da lignina residual nas etapas químicas subsequentes. Contudo, a implementação da tecnologia apresenta desafios, como o aumento da carga orgânica (DQO) no filtrado do estágio enzimático e uma potencial perda de rendimento do processo. Conclui-se que o branqueamento enzimático é uma tecnologia viável e consolidada, cujo sucesso depende de um balanço criterioso entre os ganhos econômicos e ambientais e os desafios operacionais, exigindo uma análise customizada para cada planta industrial. A contínua inovação em biotecnologia é fundamental para otimizar o processo e expandir sua aplicação, reafirmando seu papel na busca por uma indústria de celulose mais competitiva e sustentável.

Palavras-chave: branqueamento enzimático. celulose. xilanases. sustentabilidade.

ABSTRACT

This work explores the potential of enzymatic pre-bleaching of pulp as an alternative to reduce the intensive use of chemical products in bleaching processes, aligning with the growing demands for sustainability in the pulp and paper industry. Through a comprehensive literature review, the study analyzes the evolution of bleaching technologies, from methods based on elemental chlorine to ECF (Elemental Chlorine Free) and TCF (Totally Chlorine Free) sequences, contextualizing the introduction of biotechnology as a strategic advancement. The results indicate that pretreatment with enzymes, especially xylanases, promotes a significant reduction in the consumption of chemical reagents, such as chlorine dioxide, in the range of 15% to 25%. This leads to both economic benefits, through savings on inputs, and environmental benefits, through the lower formation of organochlorine compounds (AOX) in the effluents. The mechanism of action of xylanases consists of the hydrolysis of the redeposited xylan layer on the fibers, increasing their porosity and facilitating the removal of residual lignin in the subsequent chemical stages. However, the implementation of the technology presents challenges, such as an increase in the organic load (COD) in the filtrate from the enzymatic stage and a potential process yield loss. It is concluded that enzymatic bleaching is a viable and consolidated technology, whose success depends on a careful balance between economic and environmental gains and operational challenges, requiring a customized analysis for each industrial plant. Continuous innovation in biotechnology is fundamental to optimizing the process and expanding its application, reaffirming its role in the pursuit of a more competitive and sustainable pulp industry.

Keywords: enzymatic bleaching. pulp. xylanases. sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Produção global de celulose para papel entre 1961 e 2023.....	4
Figura 2 – Principais países produtores de celulose para papel em 2023.....	5
Figura 3 – Participação dos países nas exportações globais de celulose em 2023.....	6
Figura 4 – Participação dos países nas importações globais de celulose em 2023.....	7
Figura 5 – Distribuição da produção de celulose no mundo em 2023, por tipo.....	8
Figura 6 – Visão geral de uma planta de polpação kraft convencional.....	9
Figura 7 – Sistema descascador de madeira.....	10
Figura 8 – Digestor contínuo.....	10
Figura 9 – Sequência cozimento e branqueamento ECF de celulose.....	11
Figura 10 – Sequências moderna de branqueamento de fabricas de celulose Kraft de eucaliptos.....	13
Figura 11 – Sequências de branqueamento TCF de celulose Kraft de hardwood e softwood.....	16

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Sequências moderna de branqueamento de fabricas de celulose Kraft de eucaliptos.....	13
Tabela 2 – Sequências de branqueamento TCF de celulose Kraft de hardwood e softwood.....	16

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BLIOGRAFICA.....	4
2.1 MERCADO DE CELULOSE GLOBAL.....	4
2.2 PRODUÇÃO DE CELULOSE.....	8
2.3 BRANQUEAMENTO DE CELULOSE.....	12
2.4 BRANQUEAMENTO ECF.....	13
2.5 BRANQUEAMENTO TCF.....	16
2.6 PRÉ-BRANQUEAMENTO ENZIMÁTICO.....	18
3. DISCUSSÃO.....	22
4. CONCLUSÃO.....	24
5. REFERÊNCIAS.....	26

1. INTRODUÇÃO

A indústria de papel e celulose é um dos pilares fundamentais da economia global, atendendo a uma vasta gama de setores e consumidores. A evolução tecnológica da indústria de papel e celulose pode ser traçada desde a invenção do papel por Ts'ai Lun, passando pelos avanços industriais dos séculos XIX e XX até as tecnologias modernas voltadas à sustentabilidade, como o branqueamento enzimático (IDA, 2015). Atualmente, a indústria global de celulose está em constante transformação, impulsionada por mudanças na demanda internacional e pela crescente pressão por práticas ambientalmente responsáveis (FORESTRY.COM, 2023; STATISTA, 2024).

A indústria brasileira de celulose destaca-se nesse contexto como uma das mais competitivas do mundo, beneficiada por condições edafoclimáticas favoráveis, elevada produtividade florestal e ampla disponibilidade de terras para o cultivo de eucalipto. Desde os anos 2000, o Brasil consolidou-se como um dos principais exportadores de celulose de fibra curta, graças a investimentos privados e políticas públicas de incentivo, especialmente o apoio do BNDES (VIDAL; HORA, 2011). O setor passou por importantes fases: desde sua estruturação inicial nas décadas de 1950 a 1980 com forte apoio estatal, passando por modernizações nos anos 1990, até o atual foco em inovação, sustentabilidade e diversificação da matriz produtiva (VIDAL; HORA, 2011).

Com a crescente demanda por produtos sustentáveis e ambientalmente responsáveis, as indústrias têm buscado alternativas aos processos tradicionais que envolvem o uso intensivo de produtos químicos agressivos ao meio ambiente. Nesse contexto, o branqueamento enzimático da celulose surge como uma alternativa promissora ao processo convencional, oferecendo benefícios significativos do ponto de vista ambiental e econômico (PINHEIRO, 2018).

O branqueamento convencional de celulose, amplamente utilizado em processos industriais, envolve o uso de reagentes químicos como o dióxido de cloro (ClO_2), o peróxido de hidrogênio (H_2O_2) e o ozônio (O_3), com o objetivo de remover a lignina residual presente na polpa marrom e, assim, aumentar sua alvura. Entretanto, esses processos químicos podem gerar subprodutos tóxicos e recalcitrantes, como os

compostos organoclorados (AOX), que representam riscos ambientais e exigem complexas etapas de tratamento de efluentes (BAJPAI, 2012).

Diante dessa problemática, as enzimas, em especial as xilanases, têm se destacado como alternativas tecnológicas viáveis para reduzir a carga química nos processos de branqueamento. As xilanases atuam especificamente sobre a xilana, um componente da hemicelulose, facilitando a remoção da lignina e, conseqüentemente, aumentando a eficiência dos reagentes químicos subsequentes (VIIKARI et al., 1994). A aplicação dessas enzimas antes das etapas de branqueamento químico permite a redução no consumo de reagentes, menor formação de subprodutos tóxicos e economia nos custos operacionais.

Além disso, o uso de xilanases e outras enzimas hidrolíticas no branqueamento está alinhado com os princípios da química verde e com as exigências de sustentabilidade ambiental impostas por legislações e consumidores. A substituição parcial de reagentes químicos por tratamentos enzimáticos representa um avanço significativo no sentido de minimizar os impactos ambientais negativos e melhorar a eficiência energética dos processos industriais (VIIKARI et al., 1994).

Estudos indicam que o tratamento enzimático com xilanases pode reduzir significativamente o consumo de reagentes químicos no processo de branqueamento de celulose, especialmente o dióxido de cloro, sem comprometer a alvura final da polpa. Por exemplo, Madlala et al. (2001) observaram que a aplicação de xilanase em polpas kraft possibilitou uma economia de até 30% no uso de dióxido de cloro, mantendo os níveis de alvura dentro dos padrões industriais exigidos. Essa economia está diretamente relacionada à ação das xilanases na remoção de hemiceluloses associadas à lignina, facilitando a etapa química subsequente.

Além disso, Bajpai (2012) destaca que o uso de enzimas no pré-tratamento da polpa pode proporcionar uma redução de 10% a 25% no consumo total de cloro ativo em sequências de branqueamento. Essa redução não apenas diminui os custos com insumos químicos, mas também reduz a geração de subprodutos tóxicos nos efluentes, aliviando a pressão sobre os sistemas de tratamento de águas residuais. Com isso, empresas que

adotam o branqueamento enzimático podem melhorar sua eficiência operacional e fortalecer sua imagem sustentável no mercado global.

Contudo, apesar dos avanços e benefícios potenciais, a aplicação industrial do branqueamento enzimático ainda enfrenta desafios técnicos e econômicos. A variabilidade das matérias-primas, a necessidade de condições específicas de pH e temperatura para a atividade enzimática ideal, bem como os custos de produção e purificação das enzimas em larga escala, representam obstáculos a serem superados para sua ampla adoção.

Além disso, a resistência por parte de algumas indústrias em modificar seus processos tradicionais e a falta de padronização nas metodologias de aplicação das enzimas são fatores que limitam a difusão dessa tecnologia. Ainda assim, o desenvolvimento de novas linhagens microbianas, técnicas de engenharia enzimática e processos de produção mais eficientes tem contribuído para tornar o uso de enzimas cada vez mais viável tecnicamente e competitivo economicamente.

Outro aspecto relevante é a crescente pressão regulatória e de mercado por práticas industriais mais limpas. A adoção de tecnologias que reduzam a emissão de poluentes e o consumo de água e energia passou a ser um diferencial competitivo para empresas do setor de papel e celulose. Nesse sentido, o pré-branqueamento enzimático, por seus atributos ecológicos, pode ser um fator decisivo na escolha de fornecedores por parte de clientes mais exigentes em critérios de responsabilidade socioambiental.

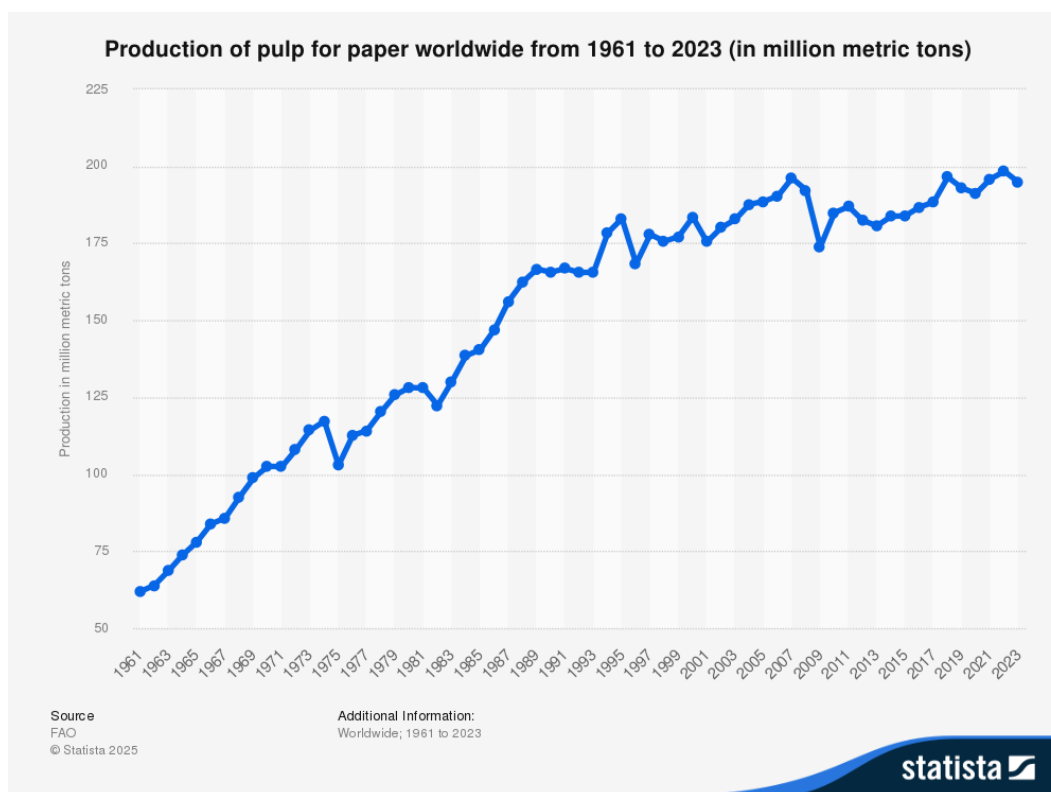
Com base no exposto, o presente trabalho tem como objetivo principal explorar o potencial do pré-branqueamento enzimático de celulose como uma alternativa sustentável ao uso intensivo de produtos químicos nos processos de branqueamento. Para isso, será realizada uma análise abrangente dos fundamentos técnicos do processo enzimático, seus benefícios ambientais e econômicos, além dos principais desafios enfrentados para sua implementação em escala industrial.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MERCADO DE CELULOSE GLOBAL

A indústria global de celulose possui um papel estratégico no setor industrial, sendo a base da cadeia produtiva de papéis gráficos, embalagens, papéis sanitários e produtos derivados. Conforme demonstra a Figura 1, desde a década de 1960, a produção mundial de celulose apresentou crescimento expressivo, impulsionada pelo aumento da demanda global por papel e produtos relacionados, especialmente nos países em desenvolvimento. Em 2023, a produção global de celulose destinada à fabricação de papel totalizou aproximadamente 194,75 milhões de toneladas métricas, dos quais mais de 75% foram provenientes do processo químico (STATISTA, 2024). Apesar de uma leve retração em relação ao ano anterior, essa produção revela a consolidação do setor como um dos principais mercados industriais de base florestal do mundo.

Figura 1 – Produção global de celulose para papel entre 1961 e 2023

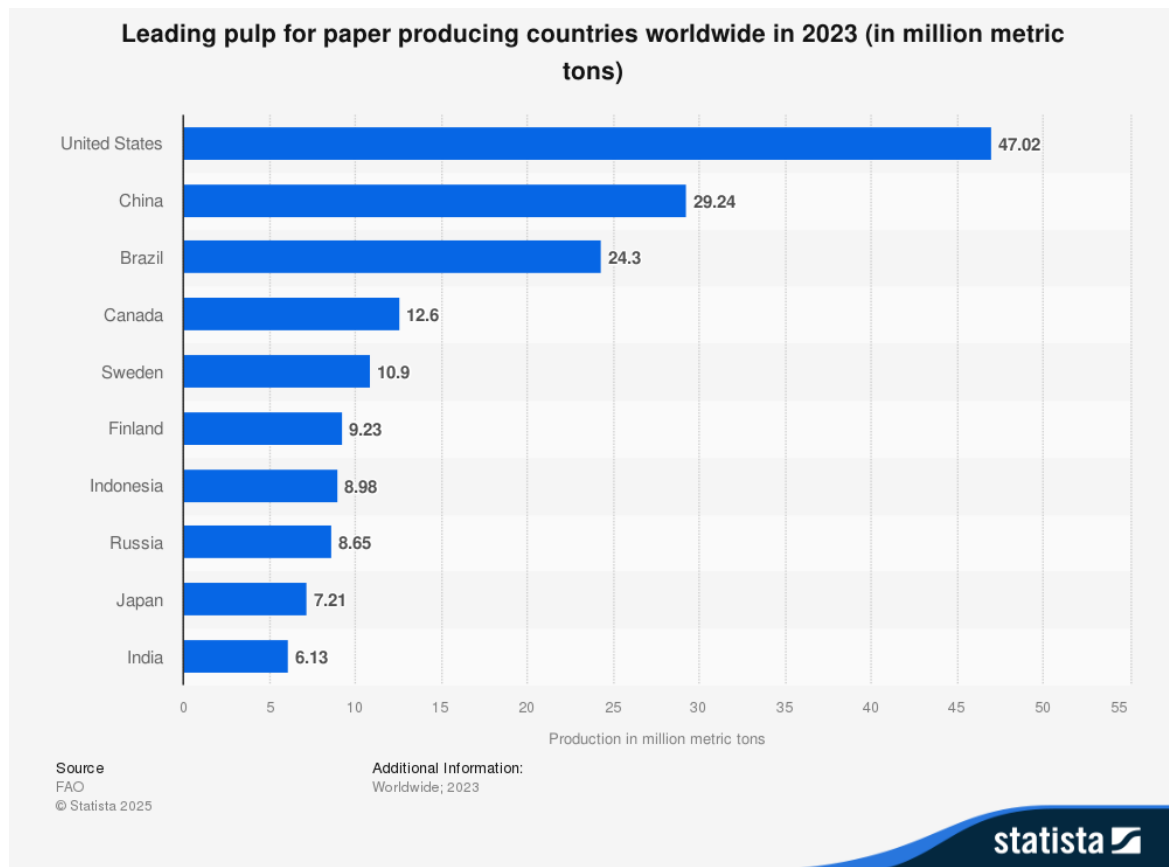


Fonte: STATISTA. Global pulp for paper production from 1961 to 2023. 2024.

A Figura 2, detalha os principais países produtores de celulose para papel em 2023. Conforme os dados, os Estados Unidos lideraram a produção global de celulose em

2023, com cerca de 47 milhões de toneladas métricas, seguidos pela China, com 29 milhões de toneladas. O Brasil ocupou a terceira posição entre os maiores produtores mundiais, à frente de países tradicionalmente relevantes como Canadá e Suécia.

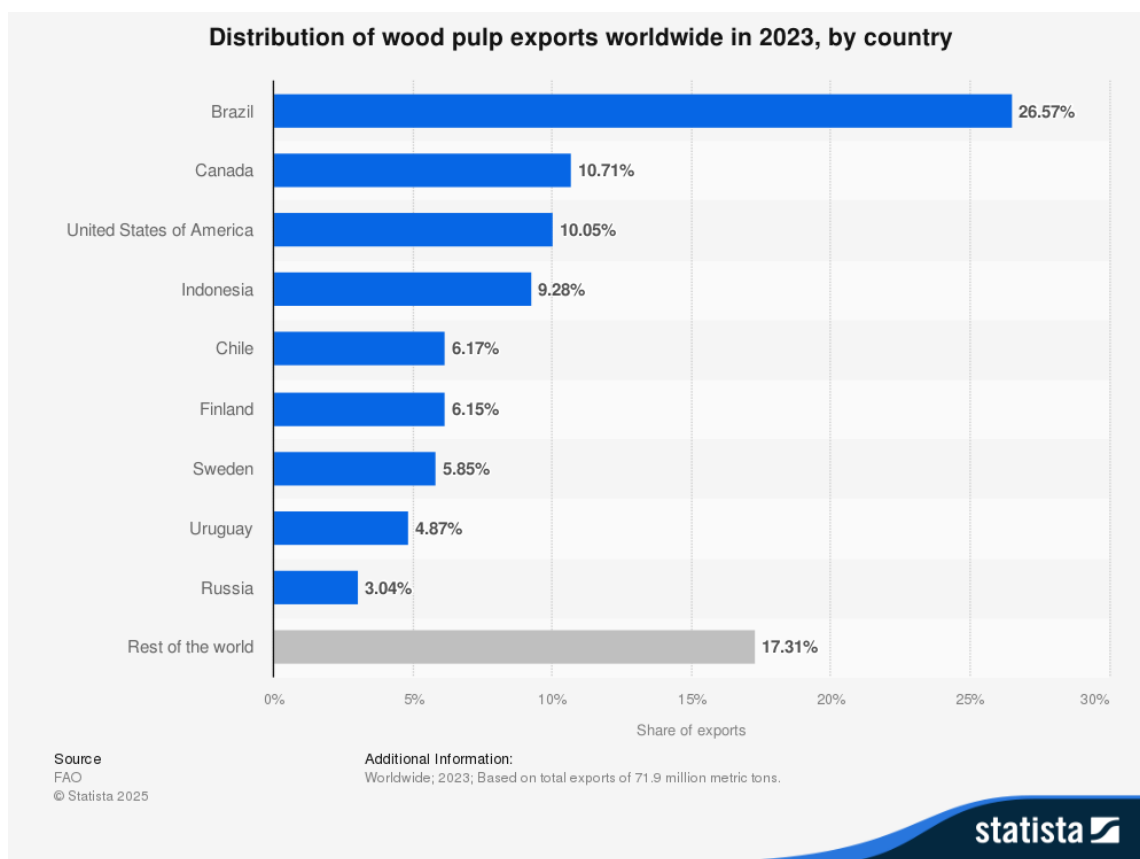
Figura 2 – Principais países produtores de celulose para papel em 2023



Fonte: STATISTA. Pulp for paper production worldwide in 2023, by country. 2024

Entretanto, quando se trata da exportação de celulose, o protagonismo brasileiro é ainda mais evidente, como ilustra a Figura 3. O país foi responsável por aproximadamente 26,57% de todas as exportações globais de celulose em 2023, consolidando-se como o maior exportador mundial com ampla margem em relação aos demais concorrentes, como o Canadá (11%) e os Estados Unidos (STATISTA, 2024).

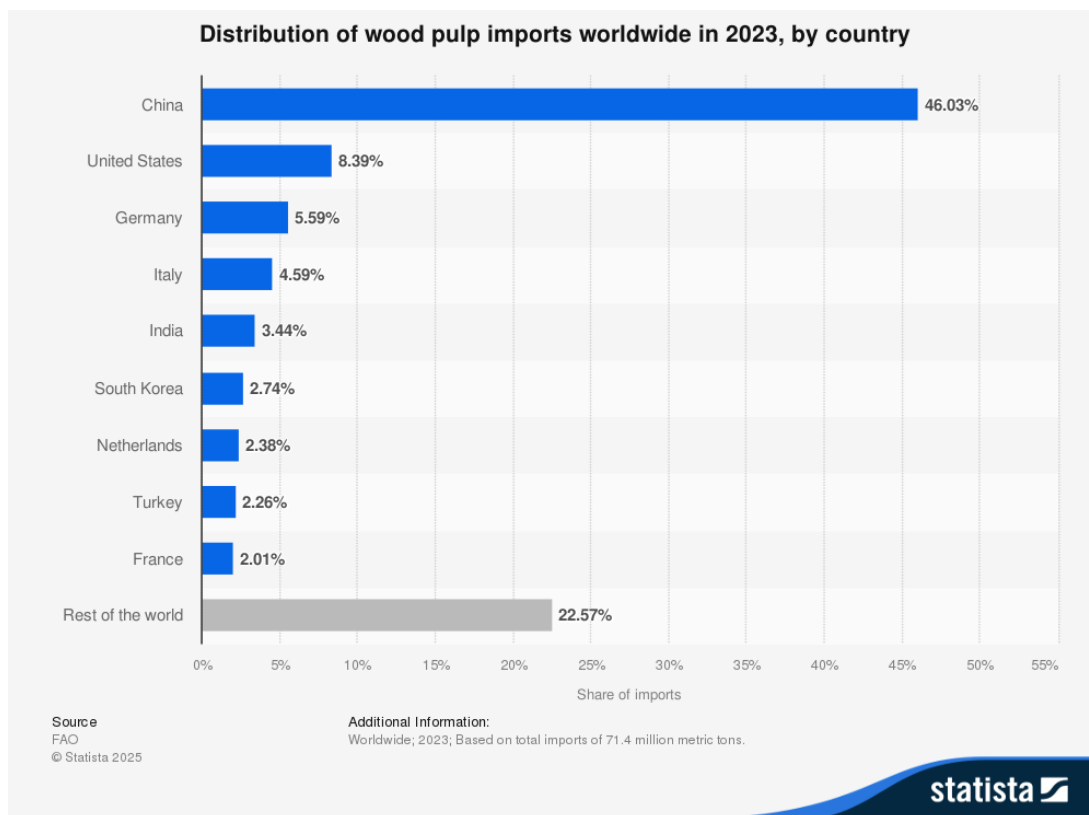
Figura 3 – Participação dos países nas exportações globais de celulose em 2023



Fonte: STATISTA. Share of global wood pulp exports in 2023, by country. 2024.

No âmbito do comércio internacional, conforme apresentado na Figura 4, a China se destacou como a maior importadora global de celulose em 2023, sendo responsável por 46% do total mundial de importações. Esse número reflete o papel central da China como grande consumidora e processadora de celulose para atender à sua extensa cadeia de produção de papel, embalagens e produtos higiênicos. Em segundo lugar, os Estados Unidos representaram cerca de 8% das importações globais, demonstrando uma menor, porém ainda relevante, dependência do insumo (STATISTA, 2024).

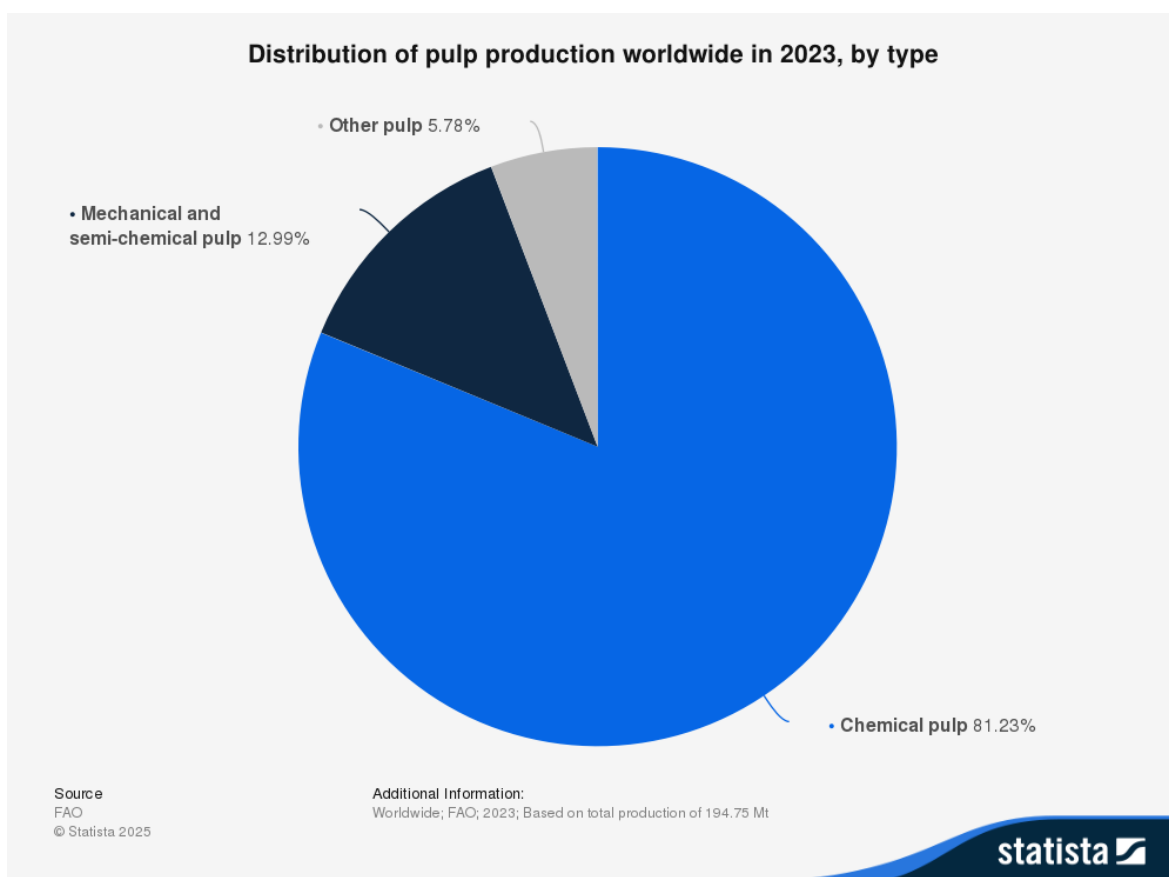
Figura 4 – Participação dos países nas importações globais de celulose em 2023



Fonte: STATISTA. Share of global wood pulp imports in 2023, by country. 2024.

Em termos de tipos de celulose produzidos globalmente, os dados de 2023, conforme ilustrado na Figura 5, revelam uma expressiva predominância da celulose química, que respondeu por aproximadamente 81,23% do total da produção mundial, equivalente a cerca de 194,75 milhões de toneladas métricas (STATISTA, 2025). Já a celulose mecânica e semichemical representou 12,99%, enquanto os demais tipos somaram 5,78% da produção. A larga participação da celulose química reforça sua importância na indústria papeleira, sobretudo para aplicações que exigem alta pureza e resistência das fibras, como papéis de imprimir e escrever, sanitários e embalagens de maior valor agregado.

Figura 5 – Distribuição da produção de celulose no mundo em 2023, por tipo



Fonte: STATISTA. Distribution of pulp production worldwide in 2023, by type. 2025.

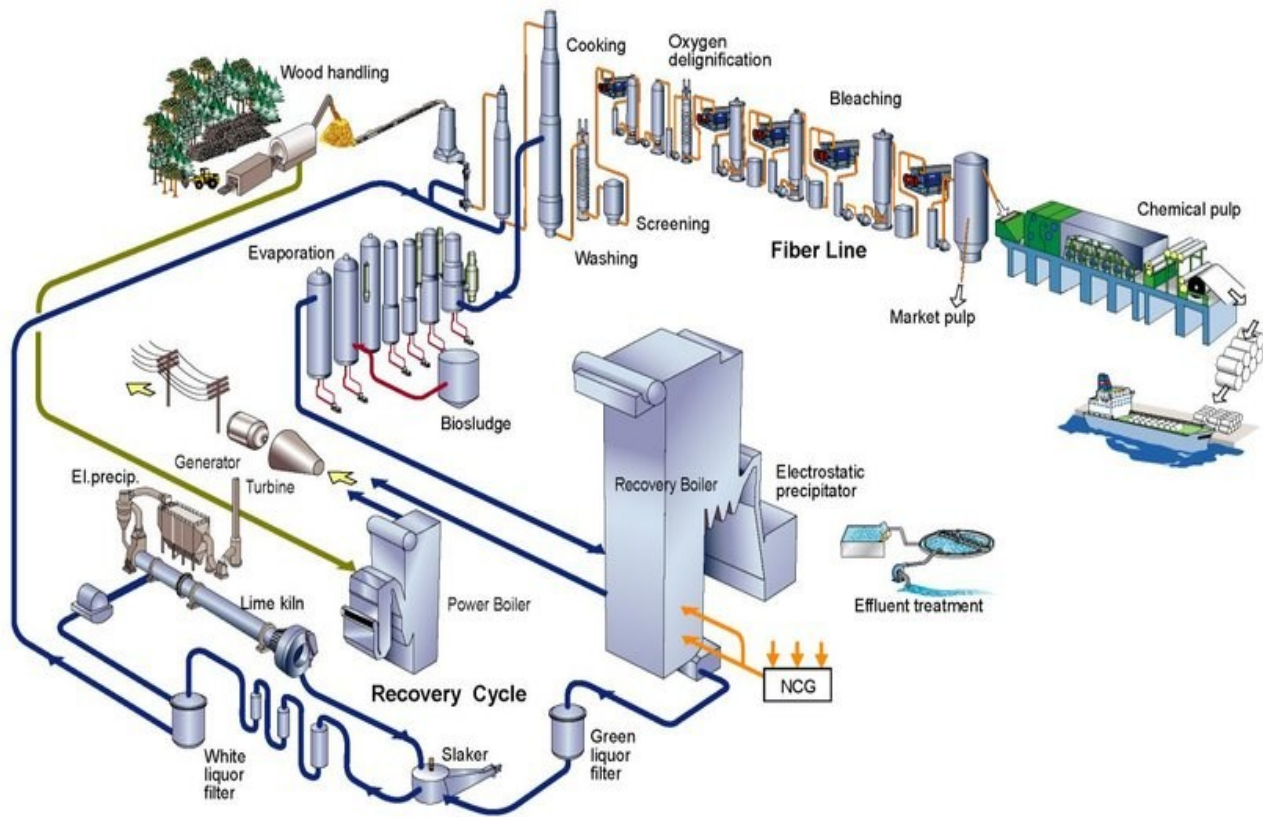
2.2 PRODUÇÃO DE CELULOSE

A produção de celulose utiliza como matéria-prima principal a madeira, proveniente de diversas espécies vegetais. No Brasil, destacam-se as espécies dos gêneros *Eucalyptus* e *Pinus*, cultivadas em florestas plantadas devido à sua adaptabilidade, rápido crescimento e características favoráveis para a produção de celulose. O *Eucalyptus*, originário da Austrália, é amplamente utilizado para a produção de celulose de fibra curta, empregada em papéis de imprimir e escrever, enquanto o *Pinus*, originário do hemisfério norte, é utilizado para a produção de celulose de fibra longa, destinada a papéis que exigem maior resistência, como os de embalagem. Além dessas, outras espécies como a acácia também são utilizadas em menor escala, dependendo das características desejadas no produto final. A escolha da espécie influencia diretamente

nas propriedades da celulose produzida, como resistência, alvura e rendimento do processo (FILIPIN, 2024).

Conforme ilustrado na Figura 6, que apresenta uma visão geral de uma planta de polpação kraft convencional, é possível observar todas as etapas do processo de produção de celulose, desde a chegada da madeira até a obtenção do produto final.

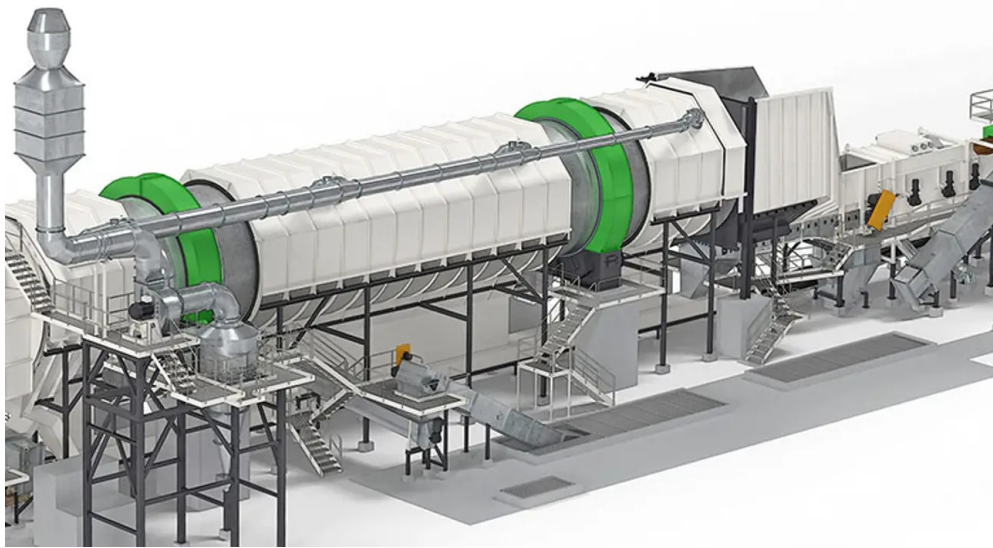
Figura 6 – Visão geral de uma planta de polpação kraft convencional



Fonte: PETTERSSON *et al.* (2008).

Ao chegar à fábrica, a madeira passa por um processo de descascamento para remover impurezas, conforme ilustrado na Figura 7, que mostra um descascador de madeira. Em seguida, é picada em cavacos de dimensões uniformes. Esses cavacos são armazenados em pátios específicos até serem utilizados no processo de cozimento (SILVA *et al.*, 2015).

Figura 7 – Sistema descascador de madeira



Fonte: VALMET (2025)

Os cavacos são introduzidos em digestores, onde são submetidos ao processo de polpação química, predominantemente o processo Kraft. Neste processo, os cavacos são cozidos em uma solução de hidróxido de sódio e sulfeto de sódio a altas temperaturas e pressões, promovendo a separação da lignina das fibras de celulose (FILIPIN, 2024).

Conforme apresentado na Figura 8, um digestor contínuo é o equipamento utilizado para essa etapa, garantindo a eficiência do cozimento e a qualidade da polpa.

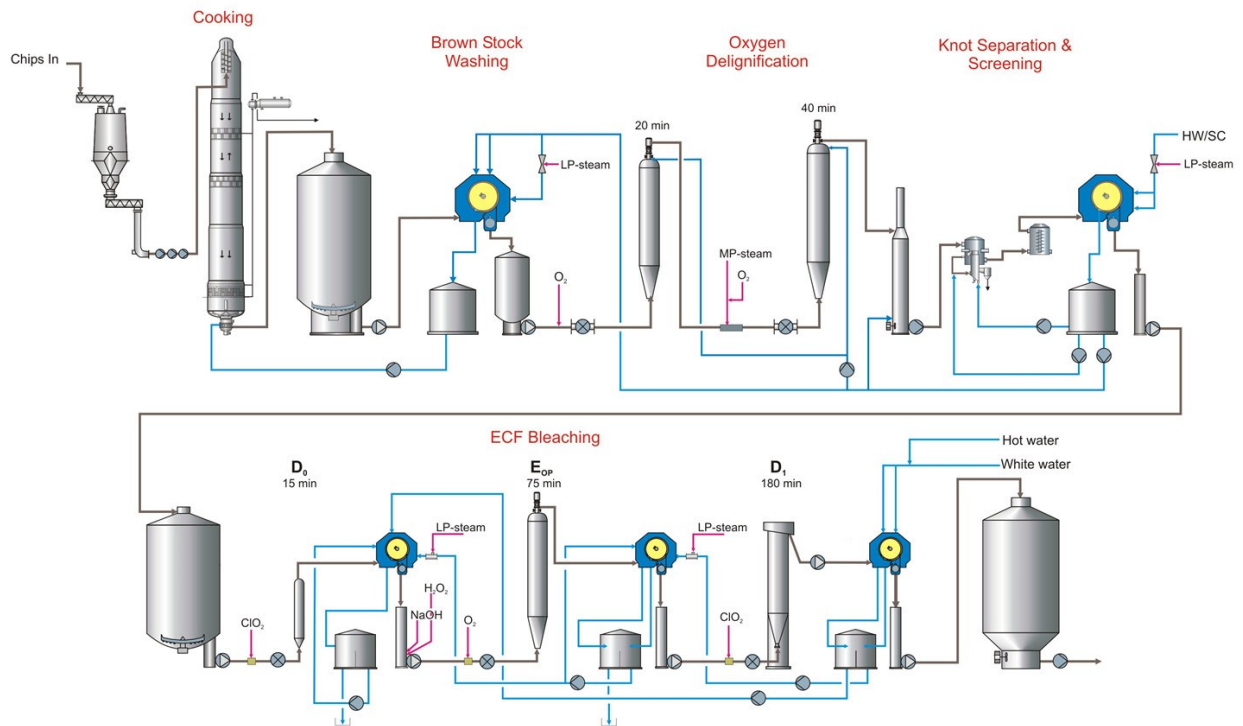
Figura 8 – Digestor contínuo



Fonte: VALMET (2025)

Após o cozimento, a polpa resultante, conhecida como polpa marrom, é lavada para remover resíduos do licor negro e outras impurezas. Esta etapa é crucial, pois, como exemplificado na Figura 9, a lavagem e depuração é realizada para eliminar partículas indesejadas, garantindo a qualidade da polpa antes do branqueamento (FILIPIN, 2024).

Figura 9 – Sequência de cozimento e branqueamento ECF de celulose



Fonte: OLIVEIRA (2023).

O branqueamento visa aumentar a alvura da celulose, removendo a lignina residual. Tradicionalmente, são utilizados agentes químicos como dióxido de cloro, oxigênio e peróxido de hidrogênio. A Figura 9 ilustra uma etapa de branqueamento que utiliza dois estágios de dióxido de cloro e peróxido de hidrogênio. No entanto, devido às preocupações ambientais, têm-se buscado alternativas mais sustentáveis, como os processos ECF (Elemental Chlorine Free), TCF (Totally Chlorine Free) e o branqueamento enzimático, que utiliza enzimas específicas para reduzir o uso de produtos químicos agressivos.

2.3 BRANQUEAMENTO DE CELULOSE

O branqueamento da celulose é uma etapa crucial na produção de papel, visando a remoção da lignina residual para alcançar a alvura desejada. Historicamente, o cloro elementar (Cl_2) foi amplamente utilizado nesse processo devido à sua eficácia na oxidação da lignina. No entanto, a utilização de Cl_2 gera compostos organoclorados, como as dioxinas, que são altamente tóxicos e persistentes no meio ambiente, acumulando-se na cadeia alimentar e apresentando riscos à saúde humana (SOLOMON, 1996).

A crescente conscientização ambiental nas décadas de 1970 e 1980, impulsionada por organizações como o Greenpeace, pressionou a indústria de celulose a adotar práticas mais sustentáveis. Em resposta, surgiram as tecnologias de branqueamento livre de cloro elementar (ECF) e totalmente livre de cloro (TCF). O processo ECF substitui o Cl_2 por dióxido de cloro (ClO_2), reduzindo significativamente a formação de compostos organoclorados, embora não os elimine completamente. Já o TCF elimina totalmente o uso de compostos clorados, utilizando agentes como oxigênio, ozônio e peróxido de hidrogênio, resultando em efluentes com menor toxicidade (VENTORIM et al., 1999).

A adoção de tecnologias de branqueamento de celulose varia conforme as exigências ambientais e econômicas de cada país. Enquanto o processo ECF (Elemental Chlorine Free) é amplamente utilizado devido à sua eficácia e menor custo de implementação, o TCF (Totally Chlorine Free) é preferido em mercados com maior rigor ambiental, como Suécia e Finlândia. Esses países implementaram regulamentações ambientais rigorosas que incentivaram a substituição do cloro elementar por métodos mais sustentáveis. Na Suécia, por exemplo, a legislação ambiental introduzida no final da década de 1960 contribuiu para a eliminação de quase todas as fábricas de celulose que utilizavam o método de sulfito, promovendo a adoção de processos mais limpos (OECD, 1999). Além disso, estudos indicam que, até o final da década de 1990, as indústrias sueca e finlandesa haviam substituído todas as instalações de branqueamento com cloro elementar para atender aos limites de descarga de AOX estabelecidos por suas respectivas regulamentações ambientais (SÖDERHOLM et al, 2017). Essas medidas

refletem o compromisso desses países com práticas industriais mais sustentáveis e a redução dos impactos ambientais associados ao branqueamento da celulose.

2.4 BRANQUEAMENTO DE CELULOSE ECF

O branqueamento ECF (Elemental Chlorine Free) objetiva remover a lignina residual da polpa marrom sem utilizar cloro elementar (Cl_2), empregando o dióxido de cloro (ClO_2) como agente químico principal. Essa abordagem reduz significativamente a formação de compostos organoclorados, como dioxinas e furanos, mitigando os impactos ambientais associados ao branqueamento convencional (NOURYON, 2020).

Conforme pode ser observado na Figura 10, diferentes fábricas adotam variações da sequência ECF. Para a análise a seguir, foi selecionada a sequência D_0 EOP D_1 D_2 por ser uma das mais completas e eficazes para atingir os altos padrões de alvura exigidos pelo mercado.

Tabela 1 – Sequencias moderna de branqueamento de fabricas de celulose Kraft de eucaliptos

Fábrica de Celulose Kraft de Eucalipto	Sequência de Branqueamento
Veracel	AD_0 EOP D_1 P
Aracruz C	AD_0 EOP D_1 D_2
Ripasa	Dhot PO D_1
UPM Fray Bentos	AD EOP D P
Ence-Navia	D_0 EOP D_1
Valdivia Arauco	D_0 EOP D_1 D_2
Nueva Aldea	Dhot EOP D_1 D_2
Santa Fe CMPC	AD_0 EOP D_1 D_2
A: Tratamento Ácido (HexA). D: Dióxido de Cloro (ClO_2). hot: Indica que o estágio é feito em alta temperatura. E: Extração Alcalina.(NaOH). EO: Extração Alcalina reforçada com Oxigênio. EOP: Extração Alcalina reforçada com Oxigênio e Peróxido. EP: Extração Alcalina reforçada com Peróxido (H_2O_2). O: Oxigênio (O_2). P: Peróxido de Hidrogênio (H_2O_2).	

Fonte: ADAPTADO DE EUROPEAN COMMISSION (2015, p. 263).

A etapa inicial de branqueamento consiste na aplicação de ClO_2 na chamada fase D_0 , em que ocorre a oxidação seletiva dos grupos fenólicos da lignina. Este processo quebra as ligações lignina-fibras, removendo cromóforos e diminuindo a cor da polpa

sem degradar a celulose, preservando suas propriedades mecânicas (RIBEIRO et al., 2014)

A etapa E (extração alcalina) ocorre após a primeira oxidação da lignina e tem como objetivo solubilizar os fragmentos lignínicos liberados na fase anterior. Geralmente usa-se hidróxido de sódio (NaOH), por vezes complementado com oxigênio e peróxido (OP) para intensificar a remoção da lignina e facilitar sua extração. Isso promove a abertura das fibras e melhora a reatividade da celulose, resultando em maior alvura e melhor qualidade do produto final (LOUREIRO et al., 2010).

A segunda aplicação de dióxido de cloro, denominada D₁, é direcionada à oxidação da lignina residual ainda presente após a etapa alcalina. Realizada em pH moderadamente ácido (entre 3,5 e 5,0), essa fase elimina vestígios de lignina, eleva a alvura e promove estabilidade da cor. Estudos mostram que ajustes precisos no pH durante essa etapa são fundamentais para otimizar o brilho e minimizar a formação de espécies inutilizáveis, como os íons clorato e clorito (RIBEIRO et al., 2014).

Em algumas plantas, ocorre uma etapa D₂ opcional, que consiste em uma aplicação final, com baixa carga de ClO₂, para refinar a alvura e garantir sua estabilidade no tempo. Essa fase contribui para polir a polpa, oferecendo maior controle sobre a reversão de cor e características ópticas acima dos padrões exigidos internacionalmente. A demanda por essa etapa varia de acordo com o nível de alvura requerido e o destino do produto final (RIBEIRO et al, 2014).

O processo ECF pode ser complementado por agentes oxidantes coadjuvantes, como peróxido de hidrogênio (H₂O₂), oxigênio (O₂) e ácido peracético. Esses aditivos contribuem para reduzir a carga química de ClO₂ e melhorar o desempenho ecológico do branqueamento, reforçando a remoção de traços de lignina (EUROPEAN COMMISSION, 2015).

A eficiência ambiental do ECF pode ser observada na substancial redução de compostos orgânicos adsorvíveis halogenados (AOX). Estudos indicam redução de até 95% nos níveis de AOX nos efluentes de branqueamento ao migrar do branqueamento com Cl₂ para o ECF (TOYOTA et al., 2009).

Do ponto de vista técnico-econômico, o ECF beneficia-se da produção in loco de ClO_2 , reduzindo custos logísticos e riscos operacionais associados à manipulação de cloro. Essa configuração favorece a viabilidade econômica e segurança nas fábricas de celulose (BILLETT, 2020).

Apesar desses avanços, o processo ECF apresenta desafios operacionais. É imprescindível o rigoroso controle dos parâmetros de reação, como pH, temperatura e tempo de contato. Desvios podem ocasionar baixa eficiência de branqueamento ou formação de subprodutos indesejáveis (HART; CONNELL, 2008).

A gestão de resíduos continua sendo uma preocupação. Ainda que o ECF reduza a toxicidade dos efluentes, os resíduos de lignina oxidada e agentes químicos devem ser adequadamente tratados para evitar impactos ambientais persistentes (ENVIRONMENTAL PAPER NETWORK, 2017).

Em termos de aplicação, o ECF tem ampla utilização em papéis para impressão, embalagem e higiene pessoal. Seu equilíbrio entre qualidade final da polpa, sustentabilidade ambiental e custos operacionais o torna uma das tecnologias preferidas na indústria de celulose (AF&PA, 2023).

O processo ECF demonstra elevado desempenho, frequentemente alcançando níveis de alvura acima de 88 ISO, com alvura final em torno de 90 ISO, o que é valorizado na produção de papéis de alta qualidade visual. No entanto, a estabilidade dessa alvura ao longo do tempo é uma preocupação técnica relevante (PERIN et al, 2017). Além disso, o branqueamento ECF mostra-se mais sustentável do que o método convencional com cloro elementar, apresentando significativa redução no consumo de água e energia. De forma geral, sequências modernas de ECF, são reconhecidas por combinar alta eficiência com menores consumos de recursos, alinhando melhor desempenho industrial com metas de sustentabilidade (SOUSA et al, 2023).

Por fim, embora o processo ECF utilize dióxido de cloro, ele atende à maioria das normas ambientais internacionais, por apresentar baixos níveis de compostos organoclorados (AOX) nos efluentes. A conformidade do ECF com regulamentações como a Diretiva Europeia de Emissões Industriais (IED 2010/75/EU) demonstra sua viabilidade ambiental. No entanto, em países com exigências ainda mais rigorosas, como

os da região nórdica, o processo TCF é preferido por eliminar completamente o uso de compostos clorados no branqueamento da celulose (SÖDERHOLM et al, 2017).

2.5 BRANQUEAMENTO DE CELULOSE TCF

O branqueamento TCF (Totally Chlorine Free) foi desenvolvido como resposta à crescente preocupação com os impactos ambientais causados por compostos organoclorados gerados nos processos com cloro. No TCF, o uso de cloro elementar (Cl_2) e dióxido de cloro (ClO_2) é completamente eliminado, dando lugar a agentes oxidantes livres de cloro, como peróxido de hidrogênio (H_2O_2), ozônio (O_3) ou agentes quelantes combinados com processos alcalinos e oxidação por oxigênio, visando a alta alvura sem formar dioxinas ou furanos (CPI, 2022). Essa abordagem atende a exigências regulatórias como a Convenção de Estocolmo, que visa eliminar os poluentes orgânicos persistentes (POPs) presentes em efluentes (CETESB).

Os estágios típicos do branqueamento TCF incluem o estágio O (oxigênio) para remoção inicial de lignina residual, estágio Q (extração alcalina ou quelantes) para solubilização de compostos remanescentes (geralmente metais), estágio P (peróxido de hidrogênio) como agente oxidante alcalino e estágio Z (ozônio). A combinações desses estágios tem como alvo a redução da reversão de cor e mantém a viscosidade da polpa, embora a agressividade do ozônio exija controle rigoroso para evitar a degradação da celulose (POPP et all, 2007).

Tabela 2 – Sequencias de branqueamento TCF de celulose Kraft de hardwood e softwood.

TCF/Softwood	TCF/Hardwood
Q(EP)(EP)(EP)	QPZP
Q(OP)(ZQ)(PO)	Q(OP)(ZQ)(PO)
Q(EOP)Q(PO)	Q(EOP)Q(PO)
Q(OP)ZQ(PO)	Q(OP)ZQ(PO)
Q/OP/(Q+Paa)/PO	O/OZPZP
O/O(O)OP(Paa/Q)PO	OmPZPZP
Q = Etapa ácida onde o agente quelante EDTA ou DTPA foi utilizado para remoção de metais. EP = Etapa de extração com uso de NaOH com adição subsequente de solução de H_2O_2 como agente reforçador. EOP = Etapa de branqueamento com extração alcalina utilizando hidróxido de sódio com adição subsequente de oxigênio e peróxido de hidrogênio como reforço. EO = Etapa de extração com NaOH com adição subsequente de oxigênio gasoso como reforço. P = Etapa alcalina com H_2O_2 em fase líquida. Z = Branqueamento com ozônio gasoso (O_3).	

Fonte: ADAPTADO DE EUROPEAN COMMISSION (2015).

As sequências de branqueamento TCF variam conforme o tipo de fibra utilizada e o nível de alvura desejado, sendo adaptadas para maximizar a eficiência química e a qualidade da polpa. Conforme ilustrado na Figura 11, são comuns combinações que envolvem etapas com quelantes (Q), oxigênio (O), peróxido de hidrogênio (P), ozônio (Z), e variantes com reforço pressurizado de peróxido (PO). Para madeiras macias (softwood), destacam-se sequências como Q(OP)(EP)(EP) e Q(OP)(ZQ)(PO), enquanto para madeiras duras (hardwood), as sequências QPZP e Q(OP)(ZQ)(PO) são mais frequentes. A escolha dos estágios visa equilibrar seletividade na remoção da lignina, alvura final e estabilidade óptica, ao mesmo tempo que elimina a necessidade de compostos clorados (EUROPEAN COMISSION, 2015).

No contexto do branqueamento TCF, a sequência Q–(OP)–(ZQ)–(PO) representa uma abordagem eficiente e ambientalmente responsável para a obtenção de altos níveis de alvura sem o uso de compostos clorados. O processo inicia-se com a etapa Q, na qual a polpa é submetida a um tratamento com agentes quelantes, como EDTA ou DTPA. Essa etapa tem como objetivo a remoção de íons metálicos presentes na polpa — como ferro, manganês e cobre — que poderiam catalisar reações indesejadas nas fases oxidativas seguintes. Além de prevenir a degradação da celulose, a retirada desses metais melhora significativamente a estabilidade dos agentes branqueadores, como o peróxido de hidrogênio, que será utilizado posteriormente (LIN et al, 2021; KRAMARSKI, 2004)

Na sequência, a polpa passa pelo estágio (OP), que combina oxigênio molecular e peróxido de hidrogênio em meio alcalino. Essa fase promove uma extração oxidativa da lignina residual, ampliando substancialmente a alvura da polpa. O ambiente alcalino, fornecido pelo hidróxido de sódio (NaOH) favorece a formação de espécies reativas capazes de atacar seletivamente os cromóforos lignínicos, contribuindo para a preservação das fibras e aumentando a eficiência global do branqueamento. A sinergia entre os dois oxidantes torna esta etapa essencial para preparar a polpa para os tratamentos seguintes (CARMEN et al, 2006; SIQUEIRA; SILVA FILHO, [s.d.]).

Posteriormente, a etapa (ZQ) introduz o ozônio gasoso em meio levemente ácido, seguido de novo tratamento com quelantes. O ozônio, por ser um agente oxidante extremamente potente, atua diretamente sobre os grupos aromáticos da lignina,

promovendo sua clivagem e eliminando compostos que causam coloração na polpa. Entretanto, devido à sua alta reatividade, é fundamental controlar parâmetros como pH, consistência da polpa e tempo de contato. O uso subsequente de agentes quelantes ajuda a remover quaisquer metais residuais mobilizados na etapa anterior, estabilizando a polpa e prevenindo reações indesejadas de decomposição do peróxido nas etapas seguintes (CARMEN et al, 2006; NASCIMENTO et al, 1998).

Por fim, a etapa (PO) representa o estágio de polimento final do processo. Nela, a polpa é tratada com peróxido de hidrogênio sob condições pressurizadas e alcalinas, resultando em uma elevação final da alvura e estabilização das propriedades ópticas. Essa fase é crucial para garantir que a polpa atinja os padrões de qualidade exigidos, especialmente em aplicações que demandam alta estabilidade de cor e resistência à reversão de alvura. Além disso, contribui para reduzir ainda mais a carga orgânica dos efluentes, consolidando o perfil sustentável do branqueamento TCF (LIN et al, 2021; SIQUEIRA; SILVA FILHO, [s.d.]).

O branqueamento TCF, exemplificado pela sequência Q-(OP)-(ZQ)-(PO), constitui uma tecnologia ambientalmente avançada, capaz de produzir polpa de alta alvura com zero emissão de organoclorados. Embora sua implementação exija maior complexidade operacional e um rigoroso controle de processo para preservar a qualidade da fibra, a tecnologia oferece vantagens significativas em termos de impacto ambiental. A viabilidade de sua aplicação depende de uma análise específica de fatores técnicos e econômicos, mas a contínua otimização dos processos TCF assegura sua relevância como uma alternativa sustentável para a indústria de celulose.

2.6 PRÉ-BRANQUEAMENTO ENZIMÁTICO

O setor de branqueamento é historicamente um dos maiores geradores de efluentes em volume e carga orgânica nas fábricas de polpa celulósica Kraft branqueada (BORGES, 2010). A crescente preocupação com os impactos ambientais associados ao uso de cloro elementar, como a formação de compostos organoclorados, impulsionou a indústria a adotar processos mais limpos, como as sequências ECF (*Elemental Chlorine Free*) e TCF (*Totally Chlorine Free*) (BORGES, 2010). Nesse contexto, o pré-

branqueamento com enzimas surgiu na década de 1980 como uma inovação biotecnológica promissora, com o objetivo de melhorar a qualidade da polpa, reduzir custos e minimizar os impactos ambientais (BORGES, 2010; DEMUNER, 2012)

Atualmente, o principal motivador para a adoção de um estágio enzimático é econômico, visto que a tecnologia permite uma redução significativa no consumo de reagentes químicos caros, como o dióxido de cloro. As enzimas, por serem biocatalisadores, apresentam vantagens como a necessidade de baixo investimento de capital para sua implementação, quando comparadas a outras tecnologias do setor. Dentre as enzimas aplicadas, as xilanases destacam-se como as mais utilizadas comercialmente (BORGES, 2010; DEMUNER, 2012).

As xilanases são proteínas catalíticas específicas que hidrolisam as xilanas, um dos principais componentes das hemiceluloses, sem degradar a celulose, desde que a preparação enzimática seja livre de atividade celulolítica. A eficácia das primeiras gerações de xilanases comerciais foi comprometida justamente pela contaminação com celulasas, o que causava perda de rendimento e de resistência da polpa (DEMUNER, 2012).

O mecanismo pelo qual as xilanases facilitam o branqueamento é explicado principalmente por duas hipóteses complementares. A primeira e mais aceita sustenta que, durante o cozimento Kraft, parte das xilanas solubilizadas no licor se redeposita na superfície das fibras de celulose, aprisionando fragmentos de lignina residual. As xilanases atuam hidrolisando seletivamente essa camada de xilana reprecipitada, o que aumenta a porosidade da parede da fibra e cria fissuras. Essa ação facilita tanto a difusão dos fragmentos de lignina para fora da fibra quanto o acesso dos reagentes químicos do branqueamento subsequente à lignina remanescente (BORGES, 2010; ZHANG et al., 2016).

Uma segunda hipótese afirma que as xilanases atuam diretamente na quebra das ligações covalentes existentes entre a lignina e as xilanas, que não foram solubilizadas durante a polpação. Independentemente do mecanismo principal, o resultado é uma

deslignificação mais eficiente nos estágios posteriores (BORGES, 2010; DEMUNER, 2012).

A aplicação de um estágio de pré-branqueamento com xilanases oferece vantagens significativas em termos de processo, qualidade da polpa e do efluente. O principal benefício é a diminuição da necessidade de reagentes de branqueamento, com estudos que demonstram uma redução de 15% a 25% no consumo de dióxido de cloro para atingir a mesma alvura final, podendo a economia chegar a 27% em estudos específicos. Essa redução de químicos não só diminui os custos operacionais, mas também a concentração de compostos organohalogenados adsorvíveis (AOX) no efluente final (BORGES, 2010).

Adicionalmente, o tratamento enzimático melhora a qualidade da polpa, resultando em menor número kappa e maior alvura já na saída do estágio de pré branqueamento. A remoção parcial de xilanas leva também à remoção de ácidos hexenurônicos (AHex), que estão a elas associados e são conhecidos por contribuir para a reversão de alvura. Em alguns casos, observa-se também um aumento na viscosidade da polpa (ZHANG et al., 2016; BORGES, 2010). A viabilidade da tecnologia é comprovada por sua aplicação comercial, com aproximadamente 50 fábricas na Europa e 20 na América do Norte utilizando xilanases para facilitar o branqueamento (DEMUNER, 2012).

Apesar dos benefícios, a implementação do pré-branqueamento enzimático enfrenta desafios técnicos e ambientais que devem ser cuidadosamente gerenciados. A principal desvantagem é o aumento significativo da carga orgânica (DQO - Demanda Química de Oxigênio) no filtrado do estágio enzimático, pois a hidrólise das xilanas e a liberação de lignina e ácidos hexenurônicos transferem grande quantidade de material orgânico da polpa para a fase líquida. Em um estudo, o filtrado enzimático apresentou uma DQO cinco vezes superior à da referência sem enzima, o que pode sobrecarregar a estação de tratamento de efluentes (BORGES, 2010).

Outro ponto crítico é a perda de rendimento do processo, que pode chegar a 2,5%, representando uma perda econômica que deve ser compensada pela economia com reagentes (BORGES, 2010).

Por fim, A busca pela compatibilidade com o processo industrial tem sido um grande motor para a evolução da tecnologia enzimática. Enquanto as primeiras enzimas não eram totalmente compatíveis com as altas temperaturas e o pH alcalino do processo industrial, esses desafios iniciais impulsionaram o desenvolvimento de novas gerações de xilanases mais robustas. Graças aos avanços em biotecnologia e engenharia de proteínas, foram projetadas enzimas termoestáveis e com maior tolerância a ambientes alcalinos, buscando alinhar cada vez mais as condições ótimas da enzima com a realidade da fábrica, essa otimização contínua é fundamental para expandir a aplicação da tecnologia, que segue em constante aperfeiçoamento para se adaptar a diferentes configurações de processo, como o de fábricas modernas com circuitos de água fechados, e superar os desafios impostos pela recirculação de efluentes com alta carga orgânica (DEMUNER, 2012).

3 DISCUSSÃO

A trajetória da indústria de celulose, conforme detalhado na revisão bibliográfica, é marcada por uma contínua evolução tecnológica impulsionada pela necessidade de conciliar produtividade e sustentabilidade. A transição dos processos baseados em cloro elementar para as tecnologias ECF (Elemental Chlorine Free) e TCF (Totally Chlorine Free) representa um marco nessa jornada, mitigando a formação de compostos organoclorados tóxicos. Nesse cenário, o pré-branqueamento enzimático, introduzido na década de 1980, surge não apenas como um complemento, mas como uma inovação biotecnológica de caráter estratégico, cujo potencial, benefícios e desafios merecem uma análise aprofundada (KENEALY; JEFFRIES, 2003).

Inicialmente motivada por preocupações ambientais, a adoção de um estágio enzimático no branqueamento é hoje impulsionada por um forte componente econômico. A capacidade de reduzir o consumo de reagentes químicos de alto custo, como o dióxido de cloro, em percentuais que variam de 15% a 25%, posiciona essa tecnologia como uma ferramenta competitiva para a otimização de custos operacionais. Essa redução no uso de químicos resulta em um benefício ambiental direto: a diminuição da carga de compostos organohalogenados adsorvíveis (AOX) no efluente final. Portanto, a tecnologia enzimática estabelece uma sinergia valiosa entre a sustentabilidade ambiental, exigida por consumidores e regulações, e a eficiência econômica, fundamental para a competitividade do setor (BORGES, 2010).

O mecanismo de ação das xilanases, as enzimas mais proeminentes nesse processo, revela a sofisticação da abordagem biotecnológica. A hipótese mais conhecida é que as enzimas não atuam diretamente sobre a lignina, mas sim sobre a barreira de xilana redepositada na superfície das fibras celulósicas. Ao hidrolisar seletivamente essa camada, as xilanases aumentam a porosidade da fibra, facilitando tanto a remoção dos fragmentos de lignina aprisionados quanto o acesso dos agentes químicos nas etapas subsequentes. Essa ação seletiva é crucial e evidencia um desafio tecnológico inicial: a necessidade de preparações enzimáticas livres de atividade celulolítica, pois a contaminação com celulasas comprometia o rendimento e a resistência da polpa, um problema superado com o avanço da biotecnologia (DEMUNER, 2012).

Contudo, a implementação do pré-branqueamento enzimático não é isenta de desafios. O principal contraponto aos seus benefícios é o expressivo aumento da carga orgânica, especificamente a Demanda Química de Oxigênio (DQO), no filtrado do estágio enzimático. A hidrólise das xilanas e a consequente liberação de açúcares, lignina e ácidos hexenurônicos transferem material orgânico da polpa para o efluente, podendo sobrecarregar a estação de tratamento. Esse fenômeno exige uma análise sistêmica da planta industrial, pois a solução para um problema (redução de AOX) pode intensificar outro (carga orgânica no tratamento de efluentes). Adicionalmente, a perda de rendimento, que pode atingir até 2,5%, representa um fator econômico que deve ser criteriosamente balanceado com a economia gerada pela redução no consumo de reagentes químicos (BORGES, 2010).

A evolução da tecnologia enzimática reflete a busca contínua para superar tais barreiras. As primeiras gerações de enzimas enfrentavam dificuldades de compatibilidade com as condições de processo industrial, como altas temperaturas e pH alcalino. A resposta a esses desafios veio por meio da engenharia de proteínas e da biotecnologia, que permitiram o desenvolvimento de xilanases termoestáveis e alcalofílicas, mais robustas e alinhadas à realidade das fábricas. Essa otimização contínua é fundamental para a difusão da tecnologia, especialmente em plantas modernas que operam com circuitos de água mais fechados, onde o gerenciamento de efluentes com alta carga orgânica se torna ainda mais crítico (DEMUNER, 2012).

Em suma, a discussão sobre o branqueamento enzimático revela que esta não é uma solução única, mas uma tecnologia estratégica que oferece um balanço favorável entre ganhos econômicos e ambientais, desde que seus desafios sejam devidamente gerenciados. Sua aplicação bem-sucedida, já uma realidade em dezenas de fábricas globalmente, depende de uma avaliação caso a caso, ponderando a economia com reagentes contra o impacto na estação de tratamento de efluentes e a perda de rendimento. O futuro da tecnologia reside na contínua inovação, visando enzimas ainda mais eficientes e perfeitamente adaptadas às condições de processo, consolidando o branqueamento enzimático como um pilar para uma indústria de celulose cada vez mais sustentável e competitiva.

4 CONCLUSÃO

O presente trabalho dedicou-se a analisar o branqueamento enzimático de celulose, explorando seu potencial como uma alternativa sustentável no contexto de uma indústria global crescentemente pressionada por práticas ambientalmente responsáveis. A revisão bibliográfica demonstrou que a evolução dos processos de branqueamento, marcada pela transição de tecnologias baseadas em cloro elementar para as sequências ECF e TCF, criou um cenário propício para a inserção de inovações biotecnológicas. Conclui-se que o pré-branqueamento com enzimas, especialmente as xilanases, representa uma tecnologia estratégica e madura, capaz de alinhar metas de eficiência econômica e de sustentabilidade ambiental.

A viabilidade do branqueamento enzimático se sustenta em um duplo pilar: econômico e ambiental. A motivação primária para sua adoção industrial é a significativa redução no consumo de reagentes químicos de alto custo, como o dióxido de cloro, com economias que podem variar de 15% a 25%. Essa diminuição no uso de insumos se traduz diretamente em um benefício ecológico relevante, que é a menor formação de compostos organoclorados (AOX) nos efluentes industriais. Dessa forma, a tecnologia atende simultaneamente à necessidade de redução de custos operacionais e ao fortalecimento da imagem sustentável da empresa no mercado.

Foi evidenciado que a eficácia do processo reside no mecanismo de ação específico das xilanases, que atuam sobre a barreira de xilana redepositada nas fibras de celulose, aumentando sua permeabilidade e facilitando a ação dos agentes químicos nas etapas subsequentes. O sucesso dessa abordagem dependeu da superação de desafios tecnológicos, como a produção de preparações enzimáticas puras e livres de atividade celulolítica, que no passado comprometiam o rendimento e a qualidade da polpa.

Contudo, a análise crítica da tecnologia, objetivo central deste trabalho, revela que sua implementação não é isenta de contrapartidas. A principal desvantagem identificada é o aumento substancial da carga orgânica (DQO) no filtrado do estágio enzimático, o que pode sobrecarregar a estação de tratamento de efluentes da planta. Adicionalmente, a potencial perda de rendimento, que pode chegar a 2,5%, constitui um fator econômico

que precisa ser rigorosamente ponderado em relação à economia obtida com os reagentes químicos. Fica claro, portanto, que a decisão pela adoção do processo enzimático exige uma análise sistêmica e customizada para a realidade de cada fábrica.

A viabilidade comercial da tecnologia, já implementada em dezenas de fábricas ao redor do mundo, comprova que esses desafios são gerenciáveis. A contínua evolução, impulsionada pela biotecnologia, tem gerado enzimas cada vez mais robustas e adaptadas às condições de pH e temperatura dos processos industriais modernos.

Diante do exposto, conclui-se que o branqueamento enzimático se consolidou como uma ferramenta valiosa e eficaz para a indústria de celulose, cumprindo o objetivo de reduzir o uso de produtos químicos agressivos. Não se trata de uma solução universal, mas de uma alternativa estratégica cujo sucesso depende de um balanço criterioso entre seus inegáveis benefícios econômicos e ambientais e os desafios operacionais que apresenta. O futuro da sua aplicação e expansão está atrelado à inovação contínua no campo da biotecnologia, para desenvolver enzimas ainda mais eficientes e perfeitamente integradas aos processos produtivos, reafirmando o papel da química verde na busca por uma indústria de celulose cada vez mais competitiva e sustentável.

Por último, a consolidação e a expansão desta tecnologia abrem novas e promissoras frentes de pesquisa. Uma vertente de grande potencial reside na valorização do efluente do estágio enzimático, rico em matéria orgânica, buscando transformar um desafio de tratamento em uma oportunidade para a geração de coprodutos de alto valor agregado, alinhando o processo aos conceitos de economia circular e biorrefinaria. Paralelamente, a otimização de parâmetros de processo, visando a minimização das perdas de rendimento de massa que podem atingir até 2,5%, apresenta-se como um campo crucial para maximizar a competitividade e a viabilidade econômica da tecnologia. A base para estes avanços, contudo, continuará sendo a busca incessante pelo desenvolvimento de enzimas mais robustas, eficientes e perfeitamente integradas às condições produtivas, assegurando um desempenho superior e ampliando ainda mais o alcance e a atratividade da rota biotecnológica para a indústria de celulose.

5 REFERÊNCIAS.

BAJPAI, P. *Biotechnology for Pulp and Paper Processing*. Springer, 2012.

VIIKARI, L.; KANTELINEN, A.; SUNDQUIST, J.; LINKO, M. Xylanases in bleaching: from an idea to the industry. *FEMS Microbiology Reviews*, v. 13, n. 2-3, p. 335-350, 1994.

ESTEVEES, A. P. et al. Application of xylanases from Amazon Forest fungal species in bleaching of eucalyptus kraft pulps. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, v. 46, n. 2, p. 231-239, 2020.

FORESTRY.COM. Pulp and paper industry trends. [S.l.]: Forestry.com, [2023]. Disponível em: <https://forestry.com/forestry-management/forestry-markets/pulp-and-paper-industry-trends/>.

STATISTA. Global pulp industry - Statistics & facts. [S.l.]: Statista, 2024. Disponível em: <https://www.statista.com/topics/7345/pulp-industry/>.

IDA, Kiyooki. The history of technological developments in pulp and paper industry: from Ts'ai Lun's invention to the birth of modern pulp and paper industry. *Japan TAPPI Journal*, v. 69, n. 6, p. 634-644, 2015. Disponível em: https://www.jstage.jst.go.jp/article/jtappij/69/6/69_634/article/-char/en.

VIDAL, André Carvalho Foster; HORA, André Barros da. A indústria de papel e celulose. *Revista do BNDES*, Rio de Janeiro, n. 36, p. 161-204, jun. 2011. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/935/1/A%20ind%C3%BAstria%20de%20papel%20e%20celulose_P-final.pdf.

PINHEIRO, Vanessa Elisa. *Produção de coquetéis enzimáticos para aplicação no branqueamento de polpa de celulose*. 2018. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/17/17131/tde-26042018-170614/publico/VANESSAELISAPINHEIRO.pdf>.

Xilanases microbianas e suas aplicações industriais. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1134008/1/Xilanases-microbianas-e-suas-aplicacoes-industriais-2021.pdf>>.

MADLALA, Andreas M.; BISSOON, Sadvir; SINGH, Suren; CHRISTOV, Lew. *Xylanase-induced reduction of chlorine dioxide consumption during elemental chlorine-free bleaching of different pulp types*. Biotechnology Letters, v. 23, n. 4, p. 345–351, 2001. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1023/A%3A1005693205016>.

KENEALY, William R.; JEFFRIES, Thomas W. *Enzyme Processes for Pulp and Paper: A Review of Recent Developments*. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2003. Disponível em: <https://www.fpl.fs.usda.gov/documnts/pdf2003/kenea03a.pdf>

THAKUR, J. M. et al. Studies on xylanase and laccase enzymatic prebleaching to reduce chlorine-based chemicals in elemental chlorine-free bleaching of hardwood kraft pulp. *BioResources*, v. 7, n. 2, p. 2220–2235, 2012. Disponível em: https://www.ncsu.edu/bioresources/BioRes_07/BioRes_07_2_2220_Thakur_JM_Xylanase_Laccase_Prebleach_Reduc_CEH_ECF_1180.pdf.

SILVA, M. A. A. et al. *Os Benefícios da Estabilidade da Descarga de Polpa do Digestor*. 2015. Disponível em: https://www.eucalyptus.com.br/artigos/2015_Beneficios%2BEstabilidade%2BDigestor.pdf

FILIPIN, N. R. *Processo de Produção de Celulose: Uma Revisão*. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2024. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/41946/1/ProcessoProdu%C3%A7%C3%A3oCelulose.pdf>

VENTORIM, G.; COLODETTE, J. L.; COSTA, M. M.; BRITO, A. C. Branqueamento ECF e TCF de celulose de fibras secundárias. *Ciência Florestal*,

Santa Maria, v. 9, n. 2, p. 41–54, 1999. Disponível em:
<https://periodicos.ufsm.br/cienciaflorestal/article/view/383>

EUROPEAN COMMISSION. *Integral Pollution Prevention and Control (IPPC) Reference Document on Best Available Techniques in the Pulp and Paper Industry*. Luxemburgo, 2001.

SIVARAM, T. V.; CHANDRA, D. R.; SATHEESAN, K. Chlorine Dioxide Bleaching, 1988. Disponível em: <https://ippta.co/wp-content/uploads/2021/01/IPPTA-254-72-87-Chlorine-Dioxide-Bleaching.pdf>.

ENVIRONMENTAL PAPER NETWORK. *Detoxing Future Pulp Production*. [s.l.], 2017.

TARKOUHI, M. E.; DJEGHMI, A.; BOUCHAREB, B. Elemental chlorine-free bleaching of halfa pulp. *Cellulose Chemistry and Technology*, v. 43, n. 5-6, p. 205–210, 2009. Disponível em:
https://www.researchgate.net/publication/244402255_Elemental_chlorine-free_bleaching_halfa_pulp.

ASSIS, Tiago de; PERRIN, Jordan; JAMEEL, Hasan; PHILLIPS, Richard; LACHENAL, Dominique; KIRKMAN, Adrianna; GONZALEZ, Ronalds. Techno-economic analysis of ECF bleaching and TCF bleaching for a bleached eucalyptus kraft pulp mill, 2017. Disponível em:
https://www.researchgate.net/publication/321705426_Techno-economic_analysis_of_ECF_bleaching_and_TCF_bleaching_for_a_bleached_eucalyptus_kraft_pulp_mill

BILLETT, B. ClO₂ Technology and Related Challenges. In: *TAPPI PEERS Conference 2020, Session 18 – Pulp Bleaching*. Nouryon, 2020. Disponível em:
https://www.nouryon.com/globalassets/inriver/resources/paper-barry-billett-tappi-peers-2020-session18-pulpbleaching-clo2-technology-and-related-challenges-en_us.pdf.

LI, J. Clean bleaching engineering for the pulp and paper industry. *BioResources*, v. 10, n. 2, p. 2667–2685, 2015. Disponível em: https://bioresources.cnr.ncsu.edu/wp-content/uploads/2016/06/BioRes_10_2_Li_2667_Clean_Bleaching_Engineering_6568.pdf.

VALMET. Bleaching of chemical pulp. Valmet, [s.d.]. Disponível em:
<https://www.valmet.com/pulp/cooking-and-fiberline/bleaching/bleaching-chemical-pulp/>.

OLIVEIRA, Luciano R. The Brazilian kraft pulp industry. LinkedIn, 2023. Disponível em: <https://www.linkedin.com/pulse/brazilian-kraft-pulp-industry-luciano-r-oliveira/>.

LOUREIRO, José et al. ECF bleaching of eucalyptus. *Bioresources*, v. 5, n. 4, p. 2567-2580, 2010. Disponível em: https://bioresources.cnr.ncsu.edu/BioRes_05/BioRes_05_4_2567_Loureiro_DEC_ECF_Bleach_H2O2_Chem_Comp_Eucalyptus_1143.pdf?utm_source=chatgpt.com

EUROPEAN COMMISSION. *Best Available Techniques (BAT) reference document for the production of pulp, paper and board (PP BREF)*. Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control). Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2015. Disponível em: https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2019-11/PP_revised_BREF_2015.pdf.

HART, Peter; CONNELL, Daniel. Improving chlorine dioxide bleaching efficiency by selecting the optimum pH targets. *Tappi Journal*, v. 7, n. 7, p. —, jul. 2008. Disponível em: <https://www.nouryon.com/globalassets/inriver/resources/paper-daniel-connell-tappi-vol-7-number-7-2008-improving-chlorine-dioxide.pdf>.

PARTHASARATHY, V. R. (Perry); COLODETTE, Jorge. Influence of final bleaching stage on ECF brightness development, refineability and pulp properties, 2007. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/237709665_INFLUENCE_OF_FINAL_BLEACHING_STAGE_ON_ECF_BRIGHTNESS_DEVELOPMENT_REFINEABILITY_AND_PULP_PROPERTIES.

BAJPAI, Pratima; ANAND, Aradhna; SHARMA, Nirmal; MISHRA, Shree P.; BAJPAI, Pramod K.; LACHENAL, Dominique. Enzymes improve ECF bleaching of pulp. *BioResources*, v. 1, n. 1, p. 34–44, 2006. Disponível em: https://dlwqtxts1xzle7.cloudfront.net/111636000/BioRes_01_1_034_044_BajpaiP_A_SMBL_EnzymesBleaching2-libre.pdf.

ZHU, H.; YAO, S.; JIANG, L.; WANG, S.; QIN, C. Kinetics of adsorbable organic halogen formation during the first chlorine dioxide bleaching stage of eucalyptus kraft pulp, 2016. Disponível em: https://bioresources.cnr.ncsu.edu/wp-content/uploads/2016/10/BioRes_11_4_8820_Zhu_YJWQ_Kinetics_AOX_Form_Chlorine_Diox_Bleaching_Eucalyptus_Pulp_10168.pdf

RIBEIRO, Robisnéa A. et al. Final chlorine dioxide stage at near-neutral pH for bleaching eucalypt pulp, 2014. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/DvzC5XH6bJsJz7GWysz8Xqf/>.

SOLOMON, K. R. *Chlorine in the Bleaching of Pulp and Paper. Pure and Applied Chemistry*, v. 68, n. 9, p. 1721–1735, 1996. Disponível em: <https://www.degruyterbrill.com/document/doi/10.1351/pac199668091721/>

OECD. ENVIRONMENTAL REQUIREMENTS FOR INDUSTRIAL PERMITTING COUNTRY PROFILES ON THE PULP AND PAPER SECTOR, 1999. Disponível em: <https://www.oecd.org>.

SÖDERHOLM, Kristina; BERGQUIST, Ann-Kristin; SÖDERHOLM, Patrik. *The transition to chlorine free pulp revisited: Nordic heterogeneity in environmental regulation and R&D collaboration*. *Journal of Cleaner Production*, [S. l.], v. 166, p. 1124–1133, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652617316463>

PERRIN, Jordan; LACHENAL, Dominique; CHIRAT, Christine. *Brightness stability of eucalyptus-dissolving pulps: effect of the bleaching sequence*.

SOUSA, A. M.; PINTO, I. S. S.; MACHADO, L.; GANDO-FERREIRA, L.; QUINA, M. J. *Sustainability of kraft pulp mills: Bleaching technologies and sequences with reduced water use*. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, v. 125, p. 58–70, 2023.

EUROPEAN COMMISSION. *Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council on industrial emissions (integrated pollution prevention and control)*. Official Journal of the European Union, L 334/17, 2010.

TOYOTA, Kazumasa; KANEKO, Reiji; KAWASAKI, Kazuhito; TERADA, Katsuichi. *Reduction of Pollutant from Bleached Kraft Pulp Mills by the Process Conversion to ECF Bleaching*, 2012.

POPP, D.; HAFNER, T.; JOHNSTONE, N. Environmental policy vs. public pressure: Innovation and diffusion of alternative bleaching technologies in the pulp industry, 2007.

CPI. Environmental Aspects of ECF and TCF Chemical Woodpulp Bleaching, 2022. Disponível em: https://thecpi.org.uk/library/PDF/Public/Publications/Fact%20Sheets/FS_ECF_TCF.pdf

LIN, B. et al. Totally chlorine free (TCF) bleaching of wheat straw soda-anthraquinone (AQ) pulp with a low initial kappa number. *BioResources*, v. 17, n. 1, p. 952–961, 2021.

Carmen S.R. Freire, Armando J.D. Silvestre, Carlos Pascoal Neto, Dmitry V. Evtuguin, Effect of oxygen, ozone and hydrogen peroxide bleaching stages on the contents and composition of extractives of Eucalyptus globulus kraft pulps, 2006.

KRAMARSKI, Sila. COMPLEXAÇÃO DE QUELANTES PARA METAIS DE TRANSIÇÃO EM BRANQUEAMENTO DE CELULOSE COM PERÓXIDO DE HIDROGÊNIO, 2004. Disponível em:

<https://teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11150/tde-20191218-180240/publico/KramarskiSila.pdf>

NASCIMENTO, Evandro A.; MORAIS, Sérgio A. L.; AQUINO, Francisco J. T.; PILÓ-VELOSO, Dorila. Ozonólise das ligninas organossolve e kraft eucalipto. Parte II: cinética nos meios ácido e básico, 1998. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/qn/a/MLg9qz55Jb38rrG3hDzBK4q/?lang=pt&format=pdf>

MOTA, Sofia M. F.; FERREIRA, Licínio M. G. A.; CARVALHO, M. Graça V. S. Cinética de branqueamento e de degradação da celulose num estágio de peróxido de hidrogênio pressurizado aplicado a pastas kraft de eucalipto. [S.l.: s.n.], [s.d.].

Disponível em: https://www.celso-foelkel.com.br/artigos/outros/28_Cinetica%20branqueamento.pdf

BORGES, M. T. Efeitos da aplicação de xilanase na polpa kraft-O de eucalipto. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.

DEMUNER, B. J. Inserção da tecnologia enzimática na indústria de celulose e papel. Tese (Doutorado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

ZHANG, D. et al. Xylanase Treatment Suppresses Light- and Heat-Induced Yellowing of Pulp. *Scientific Reports*, v. 6, n. 38374, p. 1-9, 2016.

KENEALY, W. R.; JEFFRIES, T. W. *Enzyme processes for pulp and paper: a review of recent developments*. Madison: Institute for Microbial and Biochemical Technology, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2003. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/281245044_Enzyme_Processes_for_Pulp_and_Paper_A_Review_of_Recent_Developments.