



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
Faculdade de Engenharia Química
Curso de Graduação em Engenharia Química



BRENNO BANDEIRA ROCHA

APLICAÇÃO DE INTELIGÊNCIAS ARTIFICIAIS GENERATIVAS NO ESTUDO
TÉCNICO SOBRE PRODUÇÃO DE CELULOSE SOLÚVEL

Uberlândia

2025

BRENNO BANDEIRA ROCHA

APLICAÇÃO DE INTELIGÊNCIAS ARTIFICIAIS GENERATIVAS NO ESTUDO
TÉCNICO SOBRE PRODUÇÃO DE CELULOSE SOLÚVEL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários para aprovação na disciplina Trabalho de Conclusão de Curso da Faculdade de Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Adilson José de Assis

Uberlândia

2025

BRENNO BANDEIRA ROCHA

APLICAÇÃO DE INTELIGÊNCIAS ARTIFICIAIS GENERATIVAS NO ESTUDO
TÉCNICO SOBRE PRODUÇÃO DE CELULOSE SOLÚVEL

Monografia de Trabalho de Conclusão de
Curso apresentado ao curso de Engenharia
Química da Universidade Federal de
Uberlândia Campus Santa Mônica.

Orientador: Prof. Dr. Adilson José de Assis

Uberlândia, 05 de setembro de 2025

Banca examinadora:

Prof. Dr. Adilson José de Assis

Orientador

Engenharia Química / FEQUI – UFU

Prof.^a. Dr.^a Sarah Arvelos Altino

Engenharia Química / FEQUI – UFU

Prof.^a. Dr.^a Alice Medeiros de Lima

Engenharia Química / FEQUI - UFU

AGRADECIMENTOS

A Deus, em primeiro lugar, por me conceder a vida, a saúde e a perseverança que sustentaram cada passo desta jornada acadêmica. Minha gratidão pela família e pelos amigos que iluminaram meu caminho.

À minha família, meu alicerce. Em especial aos meus pais, Carlos Alberto e Eliany, e aos meus irmãos, Kaio e Emanuely, por todo o amor, apoio incondicional e compreensão. Esta conquista não seria possível sem vocês.

À minha namorada, Bárbara, pela companhia e pelo amor que foram meu refúgio nos momentos de maior desafio. Agradeço por seu carinho, seus conselhos e por estar sempre ao meu lado, tornando a caminhada mais leve e significativa.

Aos meus amigos, que a graduação me presenteou, em especial João Vitor Chrusciak, João Vitor Topasso e Paulo César. Pela amizade, pelas risadas que aliviaram a pressão e pela parceria nos estudos e na vida.

Aos meus colegas de trabalho da LD Celulose, em especial Pedro Cardoso e Arsênio Quirino. Agradeço pelos ensinamentos, pelo auxílio com os desafios diários, pelos conselhos e pelo incentivo constante que recebi de vocês.

Ao meu orientador, professor Adilson José de Assis, pela paciência, pelo direcionamento exemplar e pelas valiosas contribuições que foram essenciais para a concretização deste trabalho. Sua orientação segura e seu conhecimento profundo foram o alicerce desta pesquisa.

Aos professores da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia, cujos ensinamentos transcenderam as salas de aula e moldaram minha formação como profissional e cidadão.

À Universidade Federal de Uberlândia, pela excelência e pela oportunidade de uma educação pública de qualidade, oferecendo a estrutura necessária para o meu desenvolvimento.

A todo o corpo técnico-administrativo da Faculdade de Engenharia Química, sempre prestativos e essenciais para o bom funcionamento de nossa instituição.

Finalmente, a todos que, de forma direta ou indireta, contribuíram para que este ciclo se encerrasse com sucesso. Minha mais profunda gratidão.

“A persistência é o caminho do êxito. ”

- Charles Chaplin

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise abrangente dos processos de produção de celulose solúvel destinada à fabricação de fibras têxteis sustentáveis, com apoio de ferramentas de Inteligência Artificial na condução da pesquisa. Por meio de revisão bibliográfica sistemática, foram descritos e analisados os processos convencionais e alternativos de produção, com ênfase no processo Kraft modificado com pré-hidrólise (PHK), que domina 95% da produção mundial. O estudo detalhou as operações unitárias envolvidas, desde o preparo da matéria-prima até a obtenção do produto final, incluindo as etapas de pátio de madeira, cozimento, linha de fibras, secagem, recuperação química e tratamento de utilidades. A análise comparativa revelou que a celulose solúvel requer teor de α -celulose superior a 90% e baixos níveis de hemiceluloses, exigindo controle rigoroso dos parâmetros de processo. As ferramentas de IA (ChatGPT, Claude e Gemini) demonstraram-se eficazes no auxílio à pesquisa, otimizando estratégias de busca bibliográfica, organizando informações temáticas e gerando insights preliminares, embora requeiram validação crítica constante. O trabalho evidenciou que a produção de celulose solúvel representa uma alternativa promissora às fibras sintéticas, com menor demanda hídrica que o algodão e potencial de biodegradabilidade. Os resultados confirmam a viabilidade técnica e ambiental da celulose solúvel como matéria-prima para fibras têxteis sustentáveis, destacando a importância da integração entre inovação tecnológica, sustentabilidade e eficiência operacional no contexto da indústria química moderna.

Palavras-chave: celulose solúvel; processos industriais; inteligência artificial; produção sustentável; fibras têxteis; pré-hidrólise kraft.

ABSTRACT

This work presents a comprehensive analysis of dissolving pulp production processes for sustainable textile fiber manufacturing, supported by Artificial Intelligence tools in conducting the research. Through systematic literature review, conventional and alternative production processes were described and analyzed, with emphasis on the pre-hydrolysis Kraft (PHK) modified process, which dominates 95% of world production. The study detailed the unit operations involved, from raw material preparation to final product obtainment, including wood yard operations, cooking, fiber line, drying, chemical recovery, and utilities treatment stages. Comparative analysis revealed that dissolving pulp requires α -cellulose content above 90% and low hemicellulose levels, demanding strict control of process parameters. AI tools (ChatGPT, Claude, and Gemini) proved effective in research assistance, optimizing bibliographic search strategies, organizing thematic information, and generating preliminary insights, although requiring constant critical validation. The work demonstrated that dissolving pulp production represents a promising alternative to synthetic fibers, with lower water demand than cotton and biodegradability potential. Results confirm the technical and environmental feasibility of dissolving pulp as raw material for sustainable textile fibers, highlighting the importance of integration between technological innovation, sustainability, and operational efficiency in the context of modern chemical industry.

Keywords: dissolving pulp; industrial processes; artificial intelligence; sustainable production; textile fibers; pre-hydrolysis kraft.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Litros de água necessários à produção de uma tonelada de fibra.	11
Figura 2: Hectares plantados necessários à produção de uma tonelada de fibra por ano.	11
Figura 3: Demanda global de celulose solúvel (em milhões de t).....	12
Figura 4: Representação do ciclo produtivo de celulose solúvel.....	21
Figura 5: Fluxograma de operações de preparação de madeira.....	23
Figura 6: Cavaco picado.	24
Figura 7: Silo de cavacos.....	26
Figura 8: Digestor descontínuo.	28
Figura 9: Planta de deslignificação com oxigênio.....	30
Figura 10: Polpa durante a etapa de depuração e pré-branqueamento.	30
Figura 11: Celulose branqueada.	31
Figura 12: Máquina de secagem.....	32
Figura 13: Folhas de celulose.....	33
Figura 14: Exemplo de evaporador de múltiplos efeitos.....	34
Figura 15: Caldeiras aquatubulares e flamotubulares.....	35
Figura 16: Caldeira de recuperação de licor negro.....	36
Figura 17: Diagrama de ciclo entre plantas de licor branco e forno de cal.	37
Figura 18: Ciclo de caustificação.	38
Figura 19: Processos de tratamento de água e efluentes em uma planta de celulose e papel...40	
Figura 20: Água para caldeira e parâmetros de qualidade.....	41
Figura 21: Resíduos da indústria de celulose: dregs (A) e grits (B).....	42
Figura 22: Cinzas da combustão de cascas de eucalipto na caldeira de biomassa.	43

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
1.1. Contextualização.....	10
1.2. Objetivo geral do trabalho	14
1.2.1. Objetivos específicos.....	14
2. METODOLOGIA.....	16
2.1. Procedimentos metodológicos	16
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
3.1. Fundamentos da Produção de Celulose	20
3.2. Processos de Produção de Celulose.....	21
3.2.1. Matéria-prima	21
3.2.2. Pátio de Madeira	22
3.2.3. Cozimento	26
3.2.4. Linha de Fibras.....	29
3.2.5. Secagem	32
3.2.6. Recuperação Química.....	33
3.2.7. Utilidades.....	38
3.2.8. Compostagem	41
3.3. Benefícios e sustentabilidade.....	44
4. ANÁLISE DO USO DE INTELIGÊNCIAS ARTIFICIAIS	46
4.1. Vantagens.....	46
4.2. Pontos de atenção	47

5. CONCLUSÃO	49
REFERÊNCIAS	51
APÊNDICE A – Exemplo de prompt utilizado no ChatGPT	57
APÊNDICE B – Exemplo de prompt utilizado no Claude	63
APÊNDICE C – Exemplo de prompt utilizado no Gemini.....	67

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização

Ao longo do século XX, o mundo assistiu a um notável crescimento econômico, impulsionado por processos de urbanização acelerada, aumento populacional, industrialização em larga escala e modernização das práticas agrícolas. Embora fundamentais para suprir as necessidades da sociedade contemporânea, esses avanços vieram acompanhados de significativas pressões ambientais. A dependência crescente dos recursos naturais para sustentar o desenvolvimento humano tem intensificado preocupações sobre os impactos ambientais gerados por esse modelo de progresso (PINHEIRO, 2008).

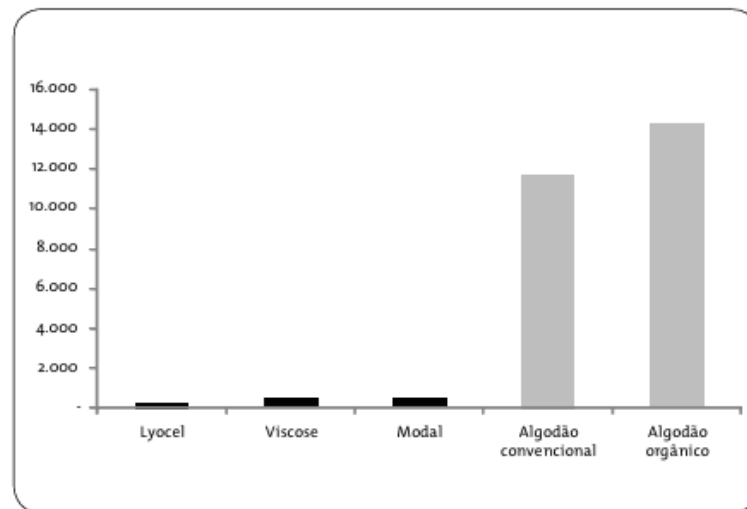
Nesse cenário, a indústria têxtil vem sendo cada vez mais cobrada a adotar práticas ambientalmente responsáveis, diante dos danos provocados pelo seu modelo produtivo tradicional. A elevada demanda por água e energia, a emissão de poluentes químicos e a geração de resíduos sólidos posicionam esse setor entre os principais vetores da degradação ambiental global (FLETCHER, 2014). Em 2019, cerca de 63% das fibras têxteis produzidas mundialmente eram sintéticas, em contraste com apenas 23% de fibras naturais. Essa dominância das fibras artificiais deve-se à ampla utilização de derivados do petróleo na fabricação de poliéster (52%) e outras fibras sintéticas (11%). No entanto, esses materiais apresentam baixa biodegradabilidade e estão associados a elevados níveis de emissão de carbono (QUINTANA; VALLS; RONCERO, 2024).

A crescente pressão por sustentabilidade na indústria têxtil tem fomentado a busca por alternativas renováveis para substituir as fibras sintéticas. Nesse cenário, as fibras naturais, como o algodão, são historicamente relevantes por seu alto teor de celulose e adequação à produção de tecidos de alta qualidade. Contudo, apesar de um volume de produção expressivo, estimado em 26,7 milhões de toneladas em 2024 — um modesto crescimento de 1,5% sobre o ano anterior —, sua expansão é limitada por gargalos como a elevada dependência de recursos hídricos e as restrições no uso de terras cultiváveis (BORREGA et al., 2018).

Como resposta a esses desafios, a celulose solúvel, obtida industrialmente a partir de biomassa vegetal, emerge como uma alternativa promissora (QUINTANA; VALLS; RONCERO, 2024). As fibras geradas a partir da madeira apresentam bom desempenho

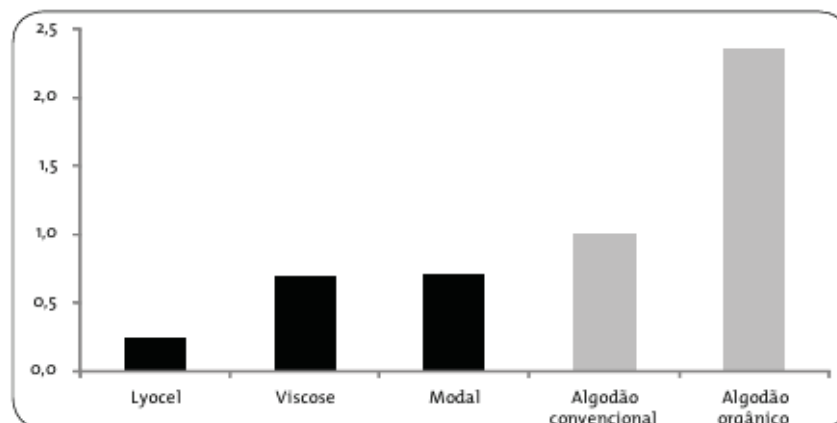
estrutural e vantagens ambientais ligadas ao manejo florestal e às características do produto (SIXTA, 2006). De forma crucial, sua produção requer menor área de plantio e, conseqüentemente, menor consumo de água quando comparada ao algodão, posicionando-a como uma solução direta para as limitações da fibra tradicional (HAEMMERLE, 2011). A Figura 1 e a Figura 2 ilustram essa vantagem comparativa, detalhando, respectivamente, a menor necessidade de água e de área plantada.

Figura 1: Litros de água necessários à produção de uma tonelada de fibra.



Fonte: HAEMMERLE (2011).

Figura 2: Hectares plantados necessários à produção de uma tonelada de fibra por ano.



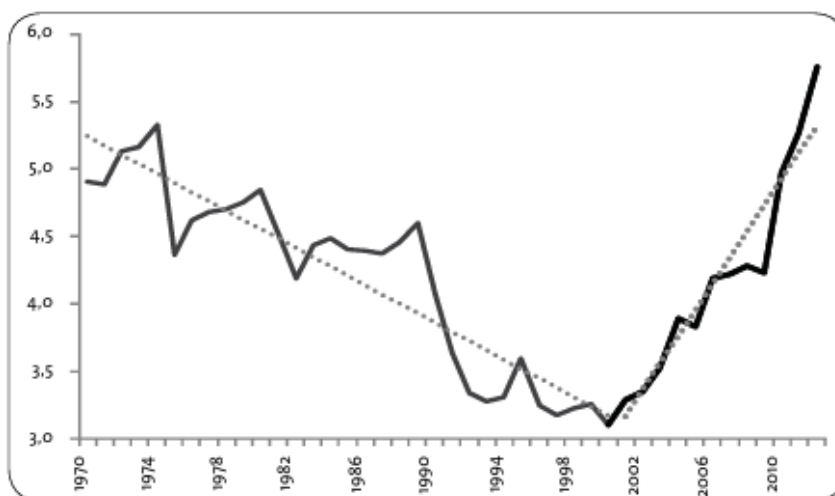
Fonte: HAEMMERLE (2011).

A indústria global de celulose movimenta anualmente bilhões de dólares, impulsionada pela necessidade crescente de insumos mais eficientes e menos poluentes (STATISTA, 2024).

No Brasil, o setor tem se consolidado como um dos principais pilares das exportações, acumulando um superávit de US\$ 4,9 bilhões em 2010 e cerca de US\$ 12 bilhões em investimentos nos últimos dez anos. Cada posto de trabalho direto na indústria gera, em média, cinco empregos indiretos, evidenciando seu impacto socioeconômico (MONTEBELLO; BACHA, 2011). Entre 2000 e 2014, a produção mundial de celulose solúvel mais que dobrou, atingindo 6,1 milhões de toneladas por ano. Nesse período, empresas como Sappi, Aditya Birla, Lenzing, Bracell e Rayonier concentravam 53% da produção global, sendo a Sappi responsável por 19% desse total (BALKISSOON; ANDREW; SITHOLE, 2022). Além disso, observou-se um crescimento de 78% na produção de celulose solúvel à base de madeira entre 2012 e 2017, e de 51% para materiais como bambu e bagaço (CHEN et al., 2019).

Em 2012, a produção de papel representava o destino principal da celulose global, consumindo aproximadamente 97% do total. A fração minoritária, denominada celulose para dissolução ou celulose solúvel, era historicamente um mercado em retração, com demanda decrescente desde a década de 1970. No entanto, o período entre 2000 e 2012 marcou uma inflexão significativa, com a demanda por celulose solúvel exibindo uma taxa média de crescimento anual (CAGR) de 5,3%. Este índice de crescimento não apenas contrastou com a estagnação do consumo de celulose para papel no mesmo intervalo, mas também excedeu o CAGR de 4,3% do segmento de celulose kraft branqueada de fibra curta (BHKP), o de maior crescimento no mercado de celulose (BNDES, 2013).

Figura 3: Demanda global de celulose solúvel (em milhões de t)



Fonte: BNDES (2013).

Esse “renascimento” do mercado, impulsionado pela demanda por fibras têxteis sustentáveis, impõe uma pressão direta sobre a eficiência e a sustentabilidade dos processos produtivos. Para atender a essa demanda crescente de forma competitiva, não basta apenas expandir a capacidade produtiva; é fundamental otimizar as operações existentes e inovar. É neste ponto que a Engenharia Química se torna central. Uma análise aprofundada das operações unitárias – como a pré-hidrólise, o cozimento, o branqueamento e a recuperação química – permite identificar gargalos, otimizar balanços de massa e energia, reduzir o consumo de insumos e minimizar os impactos ambientais. Portanto, justifica-se a necessidade deste trabalho de dissecar tecnicamente os processos de produção de celulose solúvel, a fim de consolidar o conhecimento necessário para que a indústria possa responder a essa oportunidade de mercado de forma técnica, econômica e ambientalmente viável.

A celulose solúvel distingue-se da celulose convencional por apresentar alto teor de α -celulose (acima de 90%) e baixos níveis de constituintes secundários. O termo “solúvel” refere-se à necessidade de dissolução da polpa por meio de processos industriais específicos, os quais viabilizam a formação de fibras têxteis. Essa transformação compreende operações físico-químicas que resultam em uma estrutura altamente celulósica, adequada às exigências do setor têxtil (QUINTANA; VALLS; RONCERO, 2024). Produtos como viscose, modal e lyocell, derivados dessa celulose, apresentam menor impacto ambiental se comparados às fibras sintéticas (HEINZE; KOSAN, 2000). Além disso, quando obtida de madeira ou resíduos agrícolas, e associada a processos produtivos limpos, a celulose solúvel alia desempenho técnico ao potencial de circularidade (CHEN et al., 2021). Entre as propriedades que condicionam sua aplicação destacam-se o teor de celulose, o nível de hemiceluloses e a presença de impurezas (SIXTA, 2006).

Fatores como a genética das espécies florestais e os métodos de polpação influenciam diretamente a qualidade do produto. Etapas posteriores, como a purificação e a preparação da polpa para dissolução, impactam significativamente o desempenho da fibra obtida. A busca por eficiência envolve desde o planejamento florestal até o balanço energético e químico da produção industrial (BALKISSOON; ANDREW; SITHOLE, 2022).

No Brasil, o setor de celulose e papel é formado por 220 empresas distribuídas em 540 municípios de 18 estados, gerando aproximadamente 128 mil empregos diretos e 640 mil indiretos. O país ocupa o quarto lugar no ranking mundial de produção e mantém forte

competitividade internacional (ABTCP, 2024). No entanto, suas atividades ainda geram impactos ambientais relevantes, tanto na etapa agrícola — com a substituição de florestas nativas por monoculturas — quanto nos processos industriais, marcados pelo alto consumo de água e uso intensivo de produtos químicos (BASTOS; CRUZ, 2017).

Apesar do avanço das tecnologias sustentáveis, a implementação da celulose solúvel em escala industrial ainda enfrenta obstáculos. A complexidade dos processos envolvidos, os altos custos de produção e a necessidade de elevados padrões de pureza limitam sua adoção ampla (SANTOS; MELO, 2019; CHEN et al., 2021). A viabilidade do uso dessa matéria-prima exige uma avaliação integrada de fatores técnicos, econômicos e ambientais. Nesse contexto, variáveis como rendimento industrial, consumo energético, custo operacional e investimento em tecnologias limpas tornam-se essenciais para a tomada de decisão (ZHANG et al., 2022).

Além do setor têxtil, a celulose solúvel é aplicada na formulação de aditivos alimentares, produtos farmacêuticos, éteres e nitratos (STRUNK et al., 2012; BORREGA et al., 2017). Da mesma maneira, o percentual de alfacelulose também determina o tipo de produto final a ser desenvolvido. Por exemplo, derivados como celofane e rayon requerem um teor de alfacelulose de 90% a 92%, acetato de celulose de 95% a 97% e nitrocelulose 98% (COSTA, COLODETTE e FOEKEL, 1998). No entanto, este estudo foca na produção voltada especificamente à fabricação de fibras têxteis sustentáveis, priorizando rotas produtivas que contribuam para a redução de impactos ambientais e da dependência de recursos não renováveis.

1.2. Objetivo geral do trabalho

- Avaliar, por meio de uma revisão bibliográfica, os diferentes processos produtivos de celulose (tradicional e solúvel), analisando seus aspectos técnicos, econômicos e ambientais, bem como refletir sobre a aplicação de ferramentas de Inteligência Artificial no suporte à produção científica e geração de insights na área de engenharia química.

1.2.1. Objetivos específicos

- Descrever os processos convencionais e alternativos de produção de celulose, destacando suas características operacionais, vantagens e limitações;
- Analisar comparativamente os processos de celulose tradicional e solúvel, considerando critérios técnicos, econômicos e ambientais;

- Investigar como ferramentas de Inteligência Artificial podem apoiar atividades acadêmicas, como levantamento bibliográfico, organização de informações e geração de conteúdo científico;
- Avaliar criticamente as oportunidades e limitações do uso da IA na pesquisa acadêmica em engenharia química.

2. METODOLOGIA

Este trabalho caracteriza-se como uma pesquisa de natureza qualitativa, do tipo bibliográfica, com abordagem descritiva e analítica, voltada para a consolidação e análise crítica do conhecimento existente sobre os processos produtivos de celulose — convencional (Kraft), celulose solúvel e processos emergentes — bem como sobre a aplicação de ferramentas de Inteligência Artificial (IA) no suporte à elaboração de pesquisas científicas na área de engenharia química.

2.1. Procedimentos metodológicos

A pesquisa bibliográfica foi conduzida a partir de levantamento de dados secundários em fontes científicas e técnicas, abrangendo artigos de periódicos, livros, teses, dissertações, relatórios institucionais e documentos técnicos relevantes.

Foram consideradas publicações dos últimos quinze anos (2010 a 2025), priorizando materiais atualizados que refletissem os avanços recentes na indústria de celulose e nas aplicações de IA. Contudo, documentos clássicos, considerados fundamentais para a compreensão dos processos industriais, também foram incluídos, independentemente do ano de publicação.

As buscas foram realizadas nas seguintes bases de dados: Web of Science, Scopus, SciELO, Google Scholar, Portal de Periódicos da CAPES, documentos técnicos e relatórios de entidades setoriais (ex.: IBÁ – Indústria Brasileira de Árvores, ABTCP – Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel, e empresas do setor de celulose).

Foram definidos conjuntos de palavras-chave e seus respectivos termos associados, combinados por meio de operadores booleanos (AND, OR), nas buscas realizadas nas bases de dados. Exemplos dos termos utilizados incluem (em português e inglês): “Produção de celulose” OR “Celulose Kraft” OR “Celulose solúvel” OR “Nanocelulose” OR “Biorefinaria de celulose”, “Pulp production” OR “Dissolving pulp” OR “Kraft process” OR “Nanocellulose” OR “Cellulose biorefinery”, “Inteligência Artificial na indústria” OR “IA aplicada à pesquisa científica” OR “Artificial Intelligence in scientific research” OR “AI in pulp industry”.

Ferramentas de Inteligência Artificial foram utilizadas de forma auxiliar durante as etapas de desenvolvimento da pesquisa, especificamente para: sugerir palavras-chave e aprimorar estratégias de busca bibliográfica; organizar informações temáticas, por meio da geração de mapas conceituais, agrupamento de tópicos e categorização dos dados; apoiar na síntese de informações, com sugestões de estrutura textual preliminar e na identificação de lacunas temáticas na literatura revisada; gerar insights sobre a inter-relação dos processos produtivos e as tendências tecnológicas no setor de celulose.

As ferramentas utilizadas incluíram sistemas de IA generativa, como ChatGPT versão GPT-4o, Claude 3.5 Sonnet, e Gemini 2.5 Pro. A escolha por IAs generativas de amplo acesso, como ChatGPT, Claude e Gemini, foi intencional. O objetivo deste trabalho era explorar o potencial e as limitações das ferramentas mais populares e acessíveis a estudantes e profissionais, que constituem a porta de entrada para o uso dessa tecnologia na pesquisa. Embora existam plataformas especializadas no meio acadêmico (e.g., Elicit, Scholar.io), a análise crítica sobre o uso das IAs de uso geral se mostrou mais pertinente ao escopo de avaliar a aplicação prática e os desafios enfrentados pela maioria dos pesquisadores iniciantes na área.

A fase inicial de levantamento bibliográfico foi estrategicamente potencializada pelo uso do ChatGPT, com foco na otimização das estratégias de busca e seleção preliminar de literatura. A ferramenta demonstrou ser particularmente eficaz nessa função por sua capacidade de gerar, a partir de descrições gerais do tema, listas extensas e contextualizadas de palavras-chave em múltiplos idiomas, incluindo variações técnicas e sinônimos frequentemente utilizados na literatura científica.

Por exemplo, a partir da expressão inicial “produção de celulose solúvel”, o ChatGPT sugeriu termos e combinações como “dissolving pulp production”, “viscose grade pulp”, “lyocell process pulp”, “pre-hydrolysis kraft”, “acid sulfite process”, “cellulose dissolution properties” e “chemical pulping for textile fibers”. Essas sugestões, incluindo traduções e termos técnicos consagrados, possibilitaram aumentar a abrangência das pesquisas em bases como Scopus, Web of Science, ScienceDirect e Google Scholar, evitando a limitação a palavras-chave estritamente literais.

Além disso, o ChatGPT foi utilizado para identificar descritores específicos relacionados a etapas do processo, como “oxy-delignification”, “bleaching sequence”,

“hemicellulose removal” e “alpha-cellulose content”, que auxiliaram na recuperação de estudos mais técnicos e direcionados.

Para impor uma ordem lógica ao vasto volume de dados e informações extraídas, a ferramenta Claude foi utilizada para classificação e categorização temática da literatura revisada, papel no qual se mostrou adequado por sua habilidade de lidar com textos extensos e produzir resumos sintéticos de alta coesão. Os artigos selecionados foram analisados pela ferramenta e agrupados em categorias, como:

- Tecnologias de produção – por exemplo, pré-hidrólise kraft, processo sulfito ácido, processo biotecnológico assistido por enzimas;
- Etapas de pré-tratamento e deslignificação – incluindo pré-hidrólise, deslignificação com oxigênio, branqueamento ECF/TCF;
- Propriedades físico-químicas da polpa – teor de alfa-celulose, viscosidade, pureza e remoção de hemiceluloses;
- Impactos ambientais e eficiência energética – emissões, efluentes, recuperação química;
- Aplicações e desempenho em fibras têxteis – viscose, lyocell, acetato de celulose.

Dentro de cada categoria, o Claude produziu resumos estruturados contendo: (i) breve descrição do estudo, (ii) principais resultados, e (iii) limitações e recomendações dos autores. Essa organização facilitou a construção de quadros comparativos e a identificação de tendências tecnológicas, permitindo uma visão panorâmica e ao mesmo tempo segmentada da literatura.

Após a seleção de um portfólio de artigos de alta relevância, o Gemini foi empregado como a principal ferramenta para a fase de análise de conteúdo. Sua capacidade de processar grandes volumes de texto e responder a instruções complexas foi explorada para acelerar a extração de informações e para a geração de insights intertextuais. O uso se deu através de comandos específicos (prompts) aplicados aos textos dos artigos, tais como: síntese dirigida, em vez de um resumo genérico; identificação de desafios e soluções nos artigos selecionados e geração de insights e análises comparativas. As respostas serviram como pontos de partida para a reflexão do autor, que então buscava aprofundar e validar essas conexões nos textos originais, constituindo uma forma de análise intertextual assistida.

Exemplos de prompts utilizados estão presentes nos Apêndices (A, B e C) desse trabalho. É importante destacar que, embora a IA tenha sido utilizada como instrumento de apoio, todas as informações, interpretações e análises presentes neste trabalho foram devidamente confrontadas, validadas e fundamentadas na literatura científica e técnica, de acordo com os princípios de rigor acadêmico e ética na pesquisa.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Fundamentos da Produção de Celulose

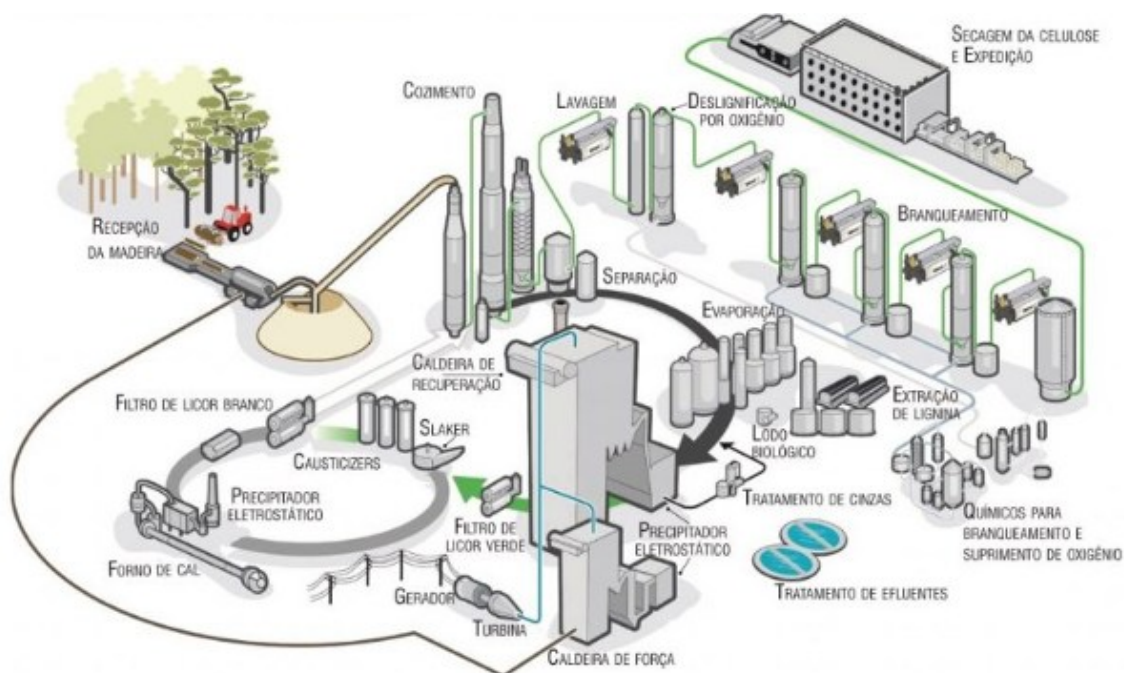
A celulose solúvel é uma forma altamente purificada de celulose, caracterizada por baixo teor de hemiceluloses e lignina, sendo amplamente utilizada como matéria-prima na fabricação de fibras têxteis regeneradas, como viscose e lyocell (SIXTA, 2006). A produção dessa celulose requer um tratamento químico rigoroso que inclui processos de pré-tratamento, branqueamento e purificação, geralmente a partir de fontes lignocelulósicas como madeira de eucalipto ou bétula (EBRINGEROVÁ; THOMAS, 2005). Sua estrutura química favorece a dissolução em solventes específicos, condição essencial para aplicações industriais que exigem alta reatividade.

A diferença fundamental entre a celulose solúvel e a celulose comum para papel está no grau de pureza e na necessidade de padronização das propriedades físico-químicas. Enquanto a celulose para papel pode conter frações significativas de hemiceluloses, a versão solúvel deve apresentar altos teores de α -celulose e viscosidade controlada, o que exige condições de processamento mais estritas (SIXTA, 2006). A compreensão desses fundamentos é essencial para avaliar criticamente os desafios e oportunidades no uso dessa matéria-prima em fibras têxteis sustentáveis.

Assim como no caso da celulose para papel, a celulose solúvel pode ser fabricada tanto a partir de madeira, seja folhosa (como o eucalipto) ou conífera (como o pinus), assim como outros vegetais (nonwood), em especial os línteres de algodão. Porém, ao contrário da celulose destinada à produção de papéis, na solúvel, não é o comprimento das fibras a principal característica da polpa, mas sim suas propriedades moleculares (SIXTA, 2006).

Todos os processos químicos tradicionais da produção de celulose para papel (kraft a sulfito, kraft a soda e sulfito) também podem ser utilizados na fabricação de celulose solúvel, porém, na fabricação deste último, é utilizado o processo por bateladas e não o contínuo. Se, por um lado, esse tipo de processo reduz a escala e aumenta os custos de produção, por outro, permite a maior variabilidade no teor de alfa das unidades produzidas, de forma a atender às especificações técnicas requeridas pelos diversos clientes (SIXTA, 2006). A Figura 4 representa esquematicamente o ciclo produtivo da celulose solúvel desde a recepção da matéria-prima até a expedição do produto final, passando por um complexo sistema de recuperação química.

Figura 4: Representação do ciclo produtivo de celulose solúvel.



Fonte: TIMMER (2020).

3.2. Processos de Produção de Celulose

3.2.1. Matéria-prima

A extração de celulose envolve a transformação da madeira em uma massa fibrosa conhecida como polpa celulósica (REIS, 2021). A madeira, principal matéria-prima utilizada nesse processo, é a principal fonte vegetal de fibras aplicadas à fabricação de papel (MINE et al., 2013; PHILIPP, 1998; SOUZA, 2008). A performance industrial da celulose está diretamente relacionada à qualidade da madeira. Fatores como as condições ambientais, o manejo silvicultural e o suprimento de nutrientes influenciam a estrutura da madeira e, por consequência, o seu aproveitamento na indústria. A composição dessa biomassa interfere nos processos de extração e purificação, tornando essencial a escolha adequada da espécie e o monitoramento de seu desenvolvimento ao longo do ciclo produtivo. Essa integração entre o setor florestal e o industrial é decisiva para assegurar um material final que atenda às exigências técnicas com mínimas perdas operacionais (SIXTA, 2006; QUINTANA; VALLS; RONCERO, 2024).

A madeira, por sua vez, é um material lignocelulósico heterogêneo, composto por diferentes tipos celulares que desempenham funções estruturais e fisiológicas específicas. Suas características variam conforme a espécie, sendo influenciadas por aspectos genéticos, ambientais e pela idade do vegetal (KLOCK et al., 2005; TRUGILHO; LIMA; MENDES,

2009). No contexto brasileiro, essa matéria-prima é geralmente proveniente de florestas plantadas, cultivadas sob critérios técnicos que garantem produtividade, uniformidade e sanidade das árvores (SOUZA, 2008). E predominam espécies de coníferas e folhosas como matéria-prima para a celulose, sendo o eucalipto amplamente utilizado na produção de fibra curta, com comprimentos entre 0,5 e 2 mm (BATISTA, 2018; MINE et al., 2013).

Do ponto de vista químico, a madeira contém aproximadamente 50% de celulose, 20% de hemiceluloses, de 15% a 35% de lignina e até 10% de outros constituintes em menor proporção (PHILIPP, 1998). A celulose está distribuída por diversas partes da planta — tronco, raízes, folhas e frutos — e representa um dos principais componentes estruturais das células vegetais. Devido à sua forma alongada e diâmetro reduzido, essas estruturas são comumente chamadas de “fibras” (MINE et al., 2013).

A obtenção da polpa celulósica requer a separação das fibras da madeira dos demais constituintes vegetais, em especial da lignina, substância que atua como elemento de coesão entre as células, conferindo rigidez ao tecido lenhoso, cuja remoção eficiente é fundamental para garantir uma polpa com as propriedades desejadas e adequadas às diversas aplicações industriais, como na produção de papéis, viscose, nitrocelulose, entre outros (MINE et al., 2013).

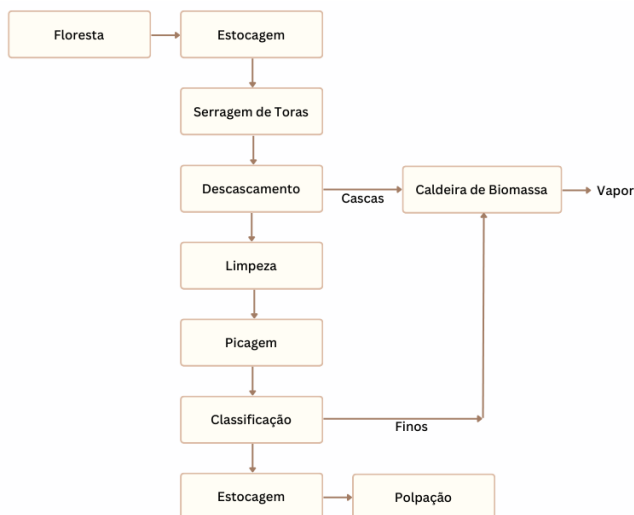
3.2.2. Pátio de Madeira

Após a etapa de extração nas áreas florestais, a madeira é transportada para pátios industriais localizados nas imediações das unidades de processamento. Esses pátios desempenham função estratégica na cadeia produtiva, concentrando as atividades de recebimento, manuseio e preparação da matéria-prima, desde sua chegada à planta industrial até seu encaminhamento à área de polpação. A madeira pode ser recebida sob diferentes formas: em toras inteiras, com ou sem casca, ou já fragmentada em cavacos. O transporte até a indústria é realizado por meio de diferentes modais logísticos — incluindo vias rodoviárias, ferroviárias e fluviais — sendo o transporte rodoviário o mais utilizado (PHILIPP, 1998).

Uma vez entregue na fábrica, a madeira pode seguir diretamente para o processamento ou ser armazenada temporariamente em pilhas organizadas para uso futuro, conforme a demanda da linha de produção. Antes de ser conduzida ao processo de obtenção da polpa, no entanto, ela passa por diversas operações preliminares. Essas etapas são fundamentais para garantir que a madeira seja fornecida em condições adequadas de forma, pureza e volume, assegurando regularidade no abastecimento e eficiência nos estágios subsequentes de

processamento (PHILIPP, 1998). A sequência dessas operações no pátio de madeira é demonstrada no fluxograma da Figura 5.

Figura 5: Fluxograma de operações de preparação de madeira.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Atualmente, após a colheita, é comum que a maior parte das toras seja empilhada e armazenada diretamente nas áreas florestais antes de ser transportada para as unidades industriais. O tempo médio de permanência dessas toras no pátio de madeira da fábrica pode variar significativamente, e suas condições de armazenamento exercem influência direta sobre o desempenho dos processos subsequentes de polpação e branqueamento (SIXTA, 2006). Estudos demonstram que a umidade da madeira tem papel determinante na eficiência do branqueamento: toras com baixo teor de umidade exigiram um aumento considerável — entre 60% e 300% — na dosagem de produtos químicos para atingir os padrões de qualidade estabelecidos, quando comparadas àquelas com maior teor de umidade (SIXTA et al., 2004).

Nos casos em que as toras chegam à fábrica com casca, torna-se necessário aplicar processos de descascamento. Entre os equipamentos mais utilizados para essa finalidade, destacam-se os descascadores do tipo tambor, que funcionam por meio de atrito gerado entre a madeira e superfícies metálicas internas, denominadas insertos. Esse sistema utiliza movimentos vibratórios e rotacionais para garantir a remoção uniforme da casca. A eficácia do descascamento é fortemente influenciada pela umidade da madeira e pela composição anatômica da casca (SIXTA, 2006; KÄRKKÄINEN; SIXTA, 2021).

A casca, que representa aproximadamente 10% a 20% do volume da madeira, contém altas concentrações de extrativos e, se não for adequadamente removida, pode comprometer a qualidade da celulose. Isso ocorre devido à formação de pitch coloidal — substância pegajosa

que tende a se depositar em tubulações durante os processos industriais (KÄRKKÄINEN; SIXTA, 2021; QUINTANA; VALLS; RONCERO, 2024). Quando o descascamento é realizado dentro da própria fábrica, a casca retirada pode ser reaproveitada como biomassa para geração de vapor, mediante combustão em caldeiras.

Outras operações complementares são conduzidas para garantir o desempenho adequado dos equipamentos de processamento. Dentre elas, destaca-se a lavagem das toras, geralmente realizada por meio de chuveiros posicionados sobre esteiras transportadoras. Esse procedimento pode ocorrer antes ou depois do descascamento e tem como principal objetivo remover areia, terra e outras impurezas acumuladas durante o manuseio nas etapas florestais e no pátio (SENAI, 2013; ZANELLA, 2024).

A etapa seguinte, denominada picagem, consiste na fragmentação das toras em cavacos de madeira com dimensões controladas (ver Figura 6). Esses fragmentos devem permitir a penetração uniforme do licor de cozimento, fator essencial para os processos químicos e semiquímicos de polpação, e influenciam diretamente o tempo e a eficiência do cozimento. O tamanho ideal dos cavacos varia conforme a espécie de madeira empregada. Além disso, o formato obtido deve facilitar o transporte do material, seja por correias transportadoras, seja por sistemas pneumáticos. A qualidade dos cavacos está relacionada a fatores como a velocidade e a direção de entrada da tora no picador, os ângulos de corte das facas, a velocidade de rotação (com velocidades mais altas gerando mais produção e maior formação de partículas finas), bem como à necessidade de manutenção e substituição periódica das lâminas (PHILIPP, 1998; SENAI, 2013; SIXTA, 2006).

Figura 6: Cavaco picado.



Fonte: BRASIL (2024).

Os picadores utilizados na indústria de celulose classificam-se, de forma geral, em dois tipos principais: os modelos de disco com múltiplas facas — os mais amplamente empregados — e os picadores de tambor (PHILIPP, 1998). A fragmentação das toras em cavacos ocorre pelo impacto da madeira contra as facas fixadas no disco rotativo. Após o corte, os cavacos são ejetados por aberturas posicionadas na parte posterior do disco. Devido ao desgaste provocado pelo contato contínuo com a madeira, as facas exigem afiação periódica, cuja frequência varia conforme a espécie e as características anatômicas da madeira processada (SENAI, 2013).

Os cavacos produzidos apresentam variações consideráveis de tamanho e espessura, o que pode comprometer a eficiência e a uniformidade do processo de polpação. A padronização dimensional dos cavacos é fundamental para garantir uma penetração homogênea do licor de cozimento, promovendo reações químicas consistentes ao longo de toda a massa processada. Para isso, os cavacos passam por um processo de classificação, que pode ser realizado com base no comprimento ou na espessura, sendo o critério por comprimento o mais comumente adotado na prática industrial (SENAI, 2013).

A classificação por comprimento é realizada por meio de um conjunto de peneiras vibratórias dispostas em três níveis, cada uma equipada com aberturas de dimensões distintas. Os cavacos que ficam retidos na primeira peneira são considerados superdimensionados (*over size*) e necessitam passar por um repicador para ajuste de tamanho ou, alternativamente, podem ser encaminhados a um processo separado sob condições operacionais específicas. Aqueles que permanecem na segunda peneira são classificados como cavacos aceitos (*medium size*), com dimensões ideais para o processo de polpação, e são direcionados à estocagem ou diretamente à linha de produção. Já os cavacos que passam pelas duas primeiras peneiras e ficam retidos na terceira — denominados finos (*under size*) — são geralmente separados da cadeia principal e, em muitos casos, utilizados como biomassa para geração de energia térmica.

O armazenamento de cavacos, por sua vez, proporciona uma importante vantagem operacional: garante o abastecimento contínuo da linha de produção, mesmo em situações de parada dos equipamentos de preparação de madeira, como descascadores e picadores (PHILIPP, 1998; SENAI, 2013). Esse armazenamento é realizado em grandes silos, como o ilustrado na Figura 7, que servem como pulmão do processo.

Figura 7: Silo de cavacos.



Fonte: LIPPEL (2024).

3.2.3. Cozimento

A etapa de cozimento, também chamada de polpação, corresponde ao processo no qual as fibras da madeira — ou de outra matéria-prima lignocelulósica — são separadas para obtenção da polpa celulósica. Os métodos de polpação são, em geral, classificados com base na forma de energia empregada ou no rendimento do processo, sendo agrupados principalmente em processos mecânicos e químicos (KLOCK; ANDRADE; HERNANDES, 2013; SENAI, 2013; SOUZA, 2008).

Embora os métodos mecânicos apresentem elevados rendimentos em massa, é nos métodos químicos que se concentra a maior parte da produção de celulose solúvel — em especial, pelo processo Kraft, que corresponde a cerca de 95% das plantas industriais voltadas a esse tipo de produto no mundo (SIXTA, 2006). Essa predominância se justifica pela alta qualidade da celulose obtida, além de outras vantagens do processo Kraft: maior flexibilidade quanto às espécies de madeira utilizadas, tempos de cozimento mais curtos, possibilidade de atingir altos níveis de alvura, menor degradação das fibras e eficiência na recuperação do licor residual (REIS, 2013).

Diferentemente da celulose convencional, a produção de celulose solúvel exige a obtenção de um produto com reduzido teor de hemiceluloses. Esse requisito é atendido, principalmente, na etapa de cozimento, por meio de modificações específicas no processo.

Nesse contexto, destaca-se a técnica denominada pré-hidrólise Kraft (PHK), voltada à remoção seletiva de hemiceluloses da matriz lignocelulósica (KUMAR; CHRISTOPHER, 2017).

A PHK é aplicada previamente à impregnação e tem como objetivo preparar os cavacos para as etapas seguintes de processamento. Trata-se de uma etapa crucial na qual ocorre a ruptura das ligações entre hemiceluloses e a matriz de celulose (SIXTA, 2006; KÄRKKÄINEN; SIXTA, 2021). Em muitas plantas industriais, os cavacos são inseridos em vasos de reação onde são expostos sequencialmente a vapor de baixa e média pressão. Esse tratamento promove a liberação de um hidrolisado rico em oligossacarídeos e ácidos orgânicos, os quais provocam uma redução natural do pH do meio (KOISTINEN et al., 2023; SIXTA, 2006).

Durante a pré-hidrólise, a elevação da temperatura desencadeia a desacetilação das hemiceluloses, resultando na liberação de ácido acético. Esse ambiente ácido favorece tanto a clivagem das ligações entre hemiceluloses e lignina quanto a quebra parcial das ligações glicosídicas da própria celulose, reduzindo seu grau de polimerização. Como consequência, as hemiceluloses são convertidas em oligossacarídeos e monossacarídeos (MARTINO et al., 2017; KÄRKKÄINEN; SIXTA, 2021). Os produtos da hidrólise, por sua vez, podem ser valorizados industrialmente: oligossacarídeos são potenciais prebióticos; açúcares monoméricos podem servir como substratos para a produção de bioetanol e ácidos orgânicos como o lático; e compostos como o furfural possuem aplicações nas indústrias farmacêutica, química, alimentícia e de materiais (BORREGA et al., 2018).

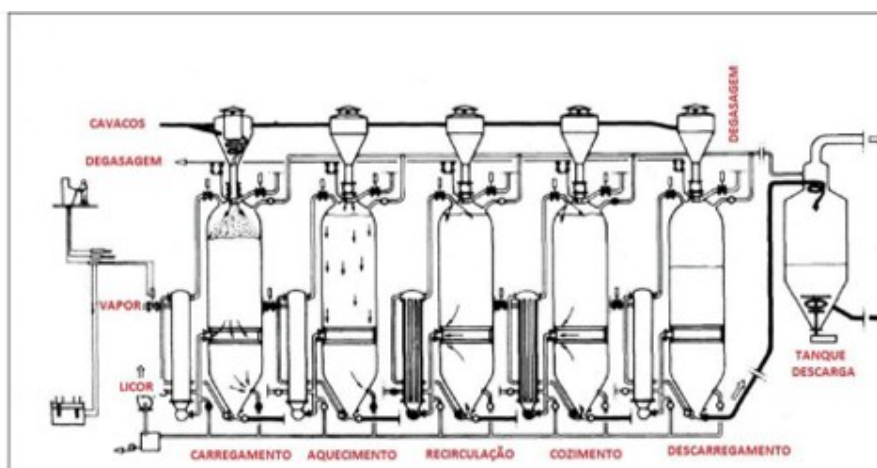
Além de requerer uma etapa posterior de deslignificação, a PHK normalmente demanda a neutralização do meio ao final do processo. Para isso, realiza-se a adição de uma base alcalina com o objetivo de estabilizar o pH e evitar a precipitação de resíduos hemicelulósicos. Após essa neutralização, inicia-se a fase de impregnação, com a introdução do licor branco (SIXTA, 2006).

A seguir, os cavacos são submetidos ao cozimento propriamente dito, no qual são desintegrados e transformados em polpa marrom. Esse processo visa promover a separação dos componentes da madeira por meio de reações químicas que ocorrem sob condições controladas de temperatura e pressão em digestores (CHEN et al., 2016; SIXTA, 2006). O modo de operação desses equipamentos influencia diretamente o rendimento e o desempenho das etapas subsequentes da produção.

Nos digestores do tipo batelada, é comum compactar os cavacos com vapor, reduzindo os espaços vazios no leito e aumentando a eficiência do enchimento. Dispositivos específicos permitem a introdução de vapor por orifícios estrategicamente posicionados, favorecendo a

homogeneização do material. A Figura 8 demonstra um esquema típico de um sistema de digestores descontínuos. O licor branco — composto principalmente por hidróxido de sódio (NaOH) e sulfeto de sódio (Na₂S) — é então introduzido. A etapa de impregnação corresponde ao momento em que esse licor penetra nos interstícios dos cavacos, iniciando a quebra seletiva das ligações entre lignina, hemiceluloses e celulose, viabilizando a formação da polpa celulósica (SIXTA, 2006; KÄRKKÄINEN; SIXTA, 2021).

Figura 8: Digestor descontínuo.



Fonte: REIS (2013).

Durante o processo de cozimento, a lignina é o principal componente removido da estrutura da madeira. Para mensurar a extensão da deslignificação, utiliza-se amplamente o número Kappa (NK), um indicador que reflete o teor residual de lignina na polpa celulósica. Valores elevados de NK sinalizam uma menor remoção de lignina, enquanto valores mais baixos indicam polpas com menor teor lignínico, o que resulta, por exemplo, em menor consumo de reagentes nas etapas subsequentes de branqueamento. Assim, alcançar baixos índices de NK é desejável quando se busca produzir polpas com maior acessibilidade e solubilidade para a fabricação de derivados específicos (SIXTA, 2006).

Ao término das reações de cozimento, dois produtos principais são gerados: a polpa marrom e o licor negro. Por meio de operações de deslocamento e lavagem, a polpa é separada do licor residual, resfriada com o auxílio de trocadores de calor e descarregada com determinada consistência (teor de sólidos) em um tanque de estocagem conhecido como blow tank. Nesse estágio, além da consistência, parâmetros como viscosidade, teor de rejeitos e número Kappa são monitorados para controle de qualidade (SIXTA, 2006).

O licor negro, resultante da lavagem da polpa, é um fluido rico em lignina dissolvida, hemiceluloses e outros constituintes extraídos da madeira durante o cozimento. Após sua coleta,

é armazenado em tanques específicos e, posteriormente, encaminhado para o processo de evaporação, com vistas à recuperação de seus componentes químicos. Nessa etapa, sua composição orgânica e inorgânica, bem como o teor de sólidos, é criteriosamente avaliada para garantir a eficiência das operações de reaproveitamento (SIXTA, 2006; KÄRKKÄINEN; SIXTA, 2021; KUMAR; CHRISTOPHER, 2017).

3.2.4. Linha de Fibras

A polpa marrom armazenada no blow tank é mantida sob condições controladas até ser direcionada às etapas subsequentes do processo. Uma das primeiras fases que se seguem é a depuração, cujo principal objetivo é a remoção de materiais não reagidos no cozimento e de contaminantes de diferentes naturezas, como metais, resíduos minerais e impurezas orgânicas não fibrosas (SIXTA, 2006).

Nesse estágio inicial, os constituintes indesejáveis presentes na polpa podem ser classificados em dois grandes grupos: fibrosos e não fibrosos. Entre os contaminantes de natureza fibrosa encontram-se cavacos não cozidos, feixes compactados de fibras, pequenos pedaços de madeira (palitos) e nós. Já os materiais não fibrosos englobam contaminantes metálicos — como parafusos, porcas, grampos, fragmentos de chapas metálicas e ferrugem proveniente de tubulações — e não metálicos, incluindo pedras, areia, vidros, plásticos, abrasivos, cascas residuais, argamassa, azulejos e outros detritos sólidos (SIXTA, 2006; CAMPOS, 2011).

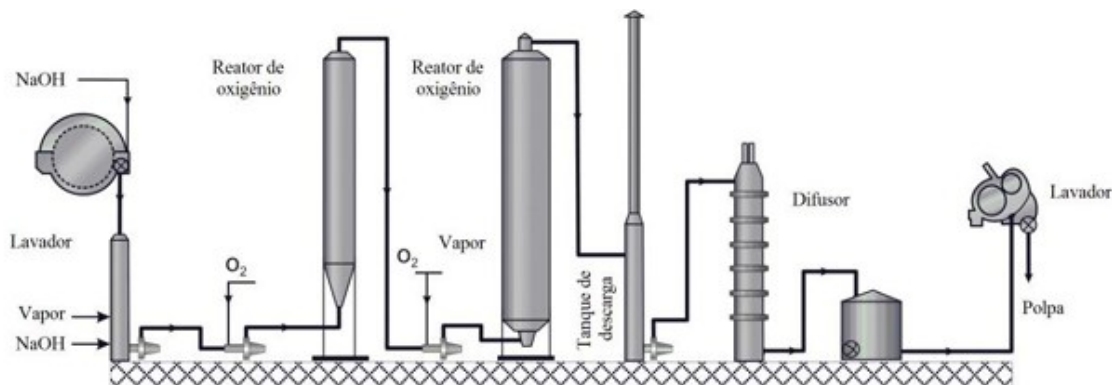
Estudos apontam que aproximadamente 50% a 80% dessas impurezas possuem dimensões superiores às das fibras celulósicas; cerca de 1% a 2% são menores que as fibras, enquanto o restante apresenta tamanho intermediário. O conhecimento preciso dessas proporções e granulometrias é essencial para a escolha adequada dos equipamentos de separação — os depuradores —, que variam conforme o tipo, densidade e tamanho das impurezas a serem removidas. (SENAI, 2013).

Após a etapa de depuração, a polpa celulósica é submetida a um processo de lavagem, que tem por finalidade a remoção de resíduos solúveis e o preparo do material para a fase seguinte: a deslignificação com oxigênio. Também denominada pré-branqueamento, essa etapa é considerada uma extensão do cozimento e tem como principal objetivo reduzir a quantidade de reagentes mais dispendiosos nas fases subsequentes do branqueamento químico (SIXTA, 2006).

Durante a deslignificação com oxigênio, é possível remover entre 30% e 50% da lignina residual presente na polpa marrom oriunda dos digestores. O processo ocorre sob condições

alcalinas controladas, mantidas pela adição de hidróxido de sódio (NaOH) ou, alternativamente, por meio da aplicação de licor branco previamente oxidado, garantindo o pH ideal para a reação (REIS, 2013). A Figura 9 exibe o fluxograma de uma planta de deslignificação com oxigênio, mostrando os reatores e lavadores envolvidos no processo.

Figura 9: Planta de deslignificação com oxigênio.



Fonte: COLODETTE; MARTINO (2012).

Posteriormente, a polpa submetida ao processo de deslignificação é direcionada ao estágio de lavagem, cujo objetivo é remover os compostos químicos solubilizados durante o cozimento e o tratamento com oxigênio, empregando o mínimo de água necessário. Para tanto, utilizam-se diversos equipamentos, tais como filtros rotativos a vácuo, filtros pressurizados e mesas de lavagem. Após essa operação, a polpa apresenta cerca de 1,6 % de lignina residual e segue para o setor de branqueamento. O licor negro gerado nos processos de cozimento, lavagem e pré-branqueamento é armazenado e encaminhado ao ciclo de recuperação de químicos, onde é utilizado como combustível na caldeira de recuperação (REIS, 2013). A Figura 10 ilustra o percurso da polpa desde sua saída do digestor, passando pela primeira etapa de lavagem, até o pré-branqueamento com oxigênio.

Figura 10: Polpa durante a etapa de depuração e pré-branqueamento.



Fonte: REIS (2013).

O branqueamento é um tratamento físico-químico aplicado à polpa celulósica com a finalidade de aumentar sua pureza e melhorar suas propriedades ópticas, resultando em um produto de alta alvura (DENCE; REEVE, 1996). Para preservar a integridade e a resistência das fibras, o processo é conduzido em múltiplos estágios, o que permite otimizar o uso dos reagentes químicos. A necessidade deste tratamento se deve à coloração da polpa, que é causada por derivados de lignina residuais do processo de polpação. Essa cor pode se intensificar com o tempo devido à degradação por oxigênio e luz ultravioleta, além de ser influenciada por outras impurezas como íons metálicos e resinas (CAMPOS, 2011).

Existe uma interdependência crucial entre a polpação e o branqueamento: quanto mais eficiente for a remoção de lignina na etapa de polpação, menor será a quantidade de produtos químicos necessária para o branqueamento, gerando vantagens econômicas e reduzindo o impacto ambiental. Para ser eficaz, uma unidade de branqueamento utiliza uma combinação de reagentes em estágios específicos. A estratégia de processo tipicamente envolve uma sequência alternada de etapas oxidativas e de extração com substâncias alcalinas, frequentemente com a reciclagem dos filtrados de lavagem para aumentar a eficiência (REDKO, 1999).

As sequências de branqueamento modernas são conhecidas como ECF (Elemental Chlorine Free) e TCF (Totally Chlorine Free), refletindo a eliminação de cloro gasoso do processo. Os principais produtos químicos utilizados nessas sequências incluem o dióxido de cloro (ClO_2), a soda cáustica (NaOH), o peróxido de hidrogênio (H_2O_2) e o ozônio (O_3). A função desses reagentes é remover ou modificar quimicamente os grupos cromóforos, que são as estruturas moleculares responsáveis pela absorção de luz e, consequentemente, pela cor da polpa (REIS, 2013). O resultado desse tratamento é uma celulose de alta alvura, como pode ser visto na Figura 11.

Figura 11: Celulose branqueada.



Fonte: TISSUE (2020).

3.2.5. Secagem

O tratamento final da polpa branqueada, seja para desaguamento ou secagem completa, é determinado pelas especificações do cliente e por fatores logísticos. Em certas unidades industriais, antes da secagem, a polpa pode passar por uma etapa adicional de depuração para a remoção de contaminantes residuais. Para essa tarefa, são comumente empregados separadores centrífugos, que operam com base em um diferencial de pressão para gerar um vórtice. Esse movimento separa as partículas de menor massa molar, que saem pelo topo (overflow), das mais pesadas, que são coletadas na parte inferior (underflow) (SIXTA, 2006; KUMAR; CHRISTOPHER, 2017). O processo de acabamento inicia-se com a formação da folha de celulose em uma mesa formadora, que também define a sua gramatura. A remoção de água ocorre em fases: primeiramente, um desaguamento inicial é realizado por gravidade ou vácuo; em seguida, a folha passa por prensas de rolos que elevam sua consistência para a faixa de 40-60%. Para que o material seja transportado em fardos, é necessária uma etapa de secagem final, na qual a folha é exposta a vapor quente em um secador para reduzir a umidade a um nível entre 5% e 10%. Após ser resfriada, cortada e embalada, a celulose é organizada em fardos para otimizar o transporte. No caso específico da celulose solúvel, esses fardos são tipicamente destinados a plantas têxteis, onde servirão de matéria-prima para os processos de dissolução e fiação de novas fibras (KÄRKKÄINEN; SIXTA, 2021; BALKISSOON; ANDREW; SITHOLE, 2022). Na Figura 12 apresenta uma imagem real de uma máquina de secagem industrial. E a Figura 13 mostra as folhas de celulose já cortadas e empilhadas, prontas para serem embaladas.

Figura 12: Máquina de secagem.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 13: Folhas de celulose.



Fonte: VERACEL (2022).

3.2.6. Recuperação Química

O licor gerado após a lavagem da polpa na linha de fibras e no cozimento é conhecido como licor negro fraco. Sua composição consiste em uma fração orgânica, majoritariamente composta por lignina e hemiceluloses dissolvidas, uma fração inorgânica, que inclui resíduos químicos do licor branco, e água. A primeira etapa do seu tratamento é a concentração, realizada em evaporadores onde o licor troca calor com vapor de alta temperatura. Este processo resulta na obtenção de um licor mais concentrado e um vapor de menor temperatura, enquanto a energia do sistema é balanceada pela formação de condensados (SIXTA, 2006; KÄRKKÄINEN; SIXTA, 2021).

Embora existam diversas tecnologias de evaporação disponíveis no mercado, a prática industrial mais comum é a utilização de sistemas de múltiplos efeitos. O principal objetivo de engenharia ao dimensionar esses sistemas é maximizar a economia de vapor, definida como a razão entre a massa de água evaporada e a massa de vapor consumida, o que influencia o número de efeitos e o modo de operação. A configuração dos circuitos de licor e de vapor, assim como o design construtivo dos evaporadores, são também questões cruciais para a eficiência do processo (SIXTA, 2006). A estrutura robusta de um sistema de evaporadores de múltiplos efeitos em uma planta industrial pode ser observada na Figura 14.

Figura 14: Exemplo de evaporador de múltiplos efeitos.



Fonte: VALMET (2023).

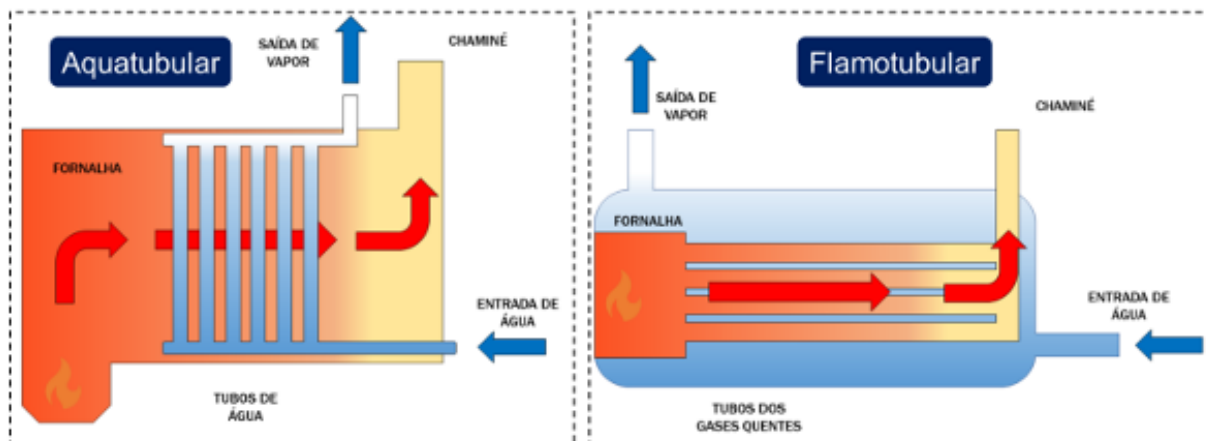
O projeto dos evaporadores deve considerar o fluxo do licor, pois configurações onde ele passa pelo interior dos tubos são mais vulneráveis à formação de incrustações, o que pode comprometer a operabilidade, sendo, portanto, mais adequadas para licores com baixo teor de sólidos. O processo de evaporação eleva a concentração de sólidos do licor negro fraco, que inicialmente está na faixa de 10-20%, para um licor forte com 65-80% de sólidos, que é então armazenado em tanques pressurizados. Atingir esse elevado teor de sólidos é um requisito fundamental para garantir a eficiência das reações químicas e o desempenho adequado da caldeira de recuperação (KÄRKKÄINEN; SIXTA, 2021).

Para garantir a disponibilidade dos equipamentos à medida que a concentração do licor aumenta, existem tecnologias alternativas, como evaporadores onde o licor escoar pela parte externa dos tubos, enquanto o vapor circula internamente. Contudo, independentemente da tecnologia adotada, a limpeza periódica dos trocadores de calor é uma prática de manutenção indispensável para assegurar a eficiência do funcionamento e a qualidade do produto final (KÄRKKÄINEN; SIXTA, 2021).

O licor negro concentrado é utilizado como biocombustível em uma caldeira, onde sua queima favorece reações químicas de recuperação e gera energia. As caldeiras são equipamentos projetados para produzir vapor a pressões superiores à atmosférica, operando com base no princípio da troca térmica entre a água e os gases quentes de uma fornalha. Existem duas classificações principais: nas caldeiras flamotubulares, os gases de combustão passam por dentro dos tubos, aquecendo a água que os envolve; inversamente, nas caldeiras aquatubulares,

a água circula no interior dos tubos, sendo aquecida pelos gases que passam por fora (CHEN et al., 2016). A Figura 15 ilustra os fluxos de calor e de água para ambos os tipos de caldeira.

Figura 15: Caldeiras aquatubulares e flamotubulares.

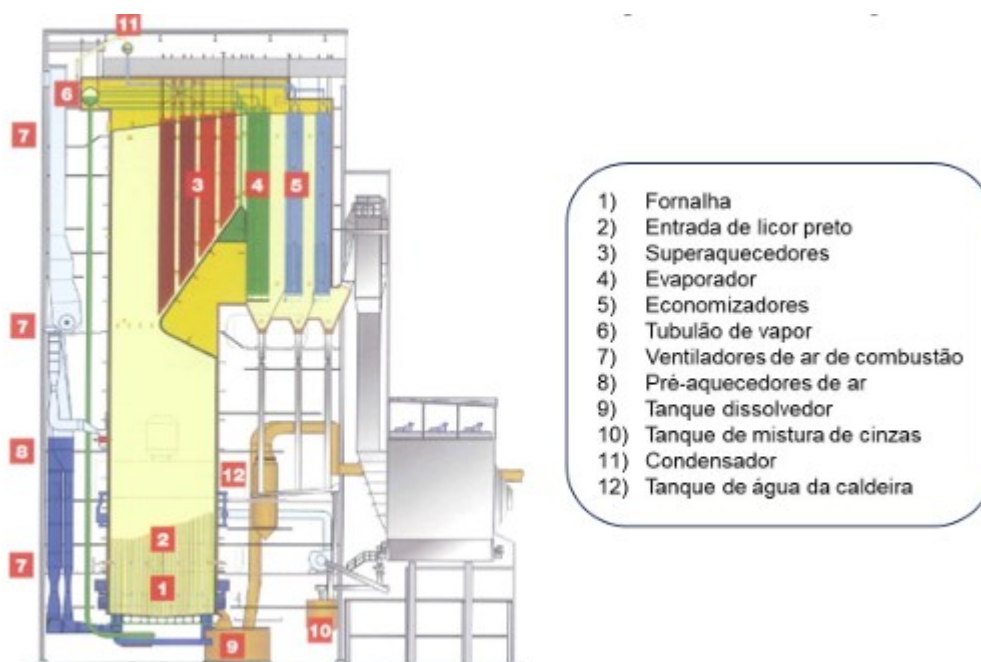


Fonte: Adaptado de Togawa (2020).

O licor negro concentrado é injetado na fornalha da caldeira de recuperação através de bicos aspersores, onde suas gotículas passam por uma sequência de etapas térmicas: secagem, pirólise, que envolve a expansão de volume e a queima de carbono, e, por fim, a combustão dos componentes inorgânicos. É nesta última fase, sob um ambiente redutor, que ocorre a reação química fundamental do processo: a conversão do sulfato de sódio em sulfeto de sódio, um reagente essencial para a produção do licor branco. O material inorgânico fundido que se acumula na base da fornalha, denominado smelt, é então removido para as etapas subsequentes de recuperação química, como a caustificação (CHEN et al., 2016).

Conforme exemplificado na Figura 16, a combustão na fornalha (itens 1 e 2) é sustentada pela injeção de correntes de ar pré-aquecido (itens 7 e 8), que atuam como comburente e auxiliam no controle de emissões e da camada ativa de queima. A energia térmica liberada pelos gases é transferida para a água, gerando vapor que é posteriormente superaquecido e enviado a turbogeradores para a produção de eletricidade. Para maximizar a eficiência energética, plantas no Brasil costumam implementar equipamentos adicionais como economizadores (item 5), evaporadores (item 4) e superaquecedores (item 3) para melhor aproveitamento do calor na caldeira (SIXTA, 2006; KÄRKKÄINEN; SIXTA, 2021).

Figura 16: Caldeira de recuperação de licor negro.



Fonte: Adaptado de Oliveira (2016).

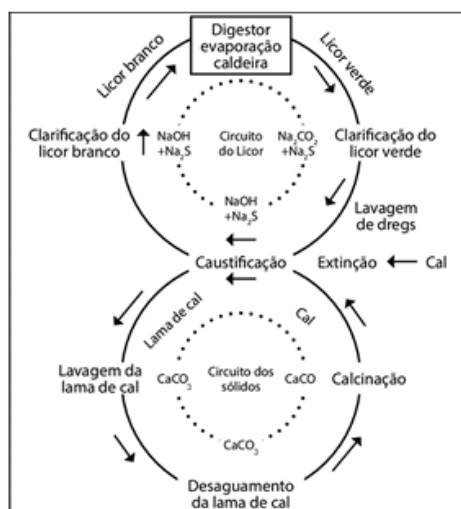
As reações que ocorrem na caldeira apresentam um alto potencial para a formação de incrustações, o que torna necessária a realização de limpezas frequentes com o uso de sopradores. A composição química desses depósitos, principalmente as frações de cloretos, potássio e sódio, influencia diretamente a aderência das cinzas em diferentes superfícies e equipamentos internos. Por essa razão, mesmo com a existência de sistemas de ar para minimizar o arraste de partículas, uma parte dos sólidos inevitavelmente se deposita nas paredes, tornando a sopragem com vapor uma operação essencial para prevenir o avanço da incrustação. A limpeza pode ser otimizada por meio de sopragens planejadas em regiões críticas, com ajustes na pressão e na frequência para maior eficácia (SIXTA, 2006; KÄRKKÄINEN; SIXTA, 2021). Após a troca térmica, os gases de combustão residuais passam por precipitadores eletrostáticos, onde um campo elétrico aglutina as partículas de pó em placas metálicas. Essas cinzas são então removidas por meio de martelos, coletadas em tremonhas e, em parte, podem ser reintroduzidas no processo em um tanque de mistura (item 10) para enriquecer a recuperação de químicos (KÄRKKÄINEN; SIXTA, 2021; BALKISSOON; ANDREW; SITHOLE, 2022).

O smelt coletado da caldeira é direcionado para um tanque dissolvedor (item 9 da Figura 16), onde é solubilizado sob agitação com o licor branco fraco, proveniente do ciclo de caustificação. O produto dessa dissolução é o licor verde, cuja composição principal é de sulfeto de sódio e carbonato de sódio. Subsequentemente, este licor passa por um processo de

clarificação, que envolve agitação e decantação, resultando na separação do licor clarificado (sobrenadante) da fração sólida inferior, composta pelos dregs — resíduos não reagidos na caldeira. Para otimizar a separação, polímeros podem ser adicionados para melhorar a coagulação, e os dregs são posteriormente centrifugados para recuperar o álcali e reduzir sua umidade (SIXTA, 2006).

Na etapa seguinte, a cal é adicionada ao licor verde clarificado, dando início à reação de caustificação que regenera o hidróxido de sódio (NaOH), formando assim o licor branco. Trata-se de uma reação exotérmica que começa com a hidratação da cal para formar hidróxido de cálcio, o qual reage com o carbonato de sódio para produzir NaOH e um subproduto, o carbonato de cálcio, também conhecido como lama de cal. Para finalizar, o licor branco precisa ser filtrado para ser separado dessa lama, um processo eficientemente realizado por filtros de tecido que utilizam um diferencial de pressão para separar o licor (coletado internamente) da lama de cal (removida externamente) (SIXTA, 2006). A Figura 17 ilustra a interconexão entre o ciclo do licor (branco e verde) e o ciclo dos sólidos (lama de cal e cal).

Figura 17: Diagrama de ciclo entre plantas de licor branco e forno de cal.

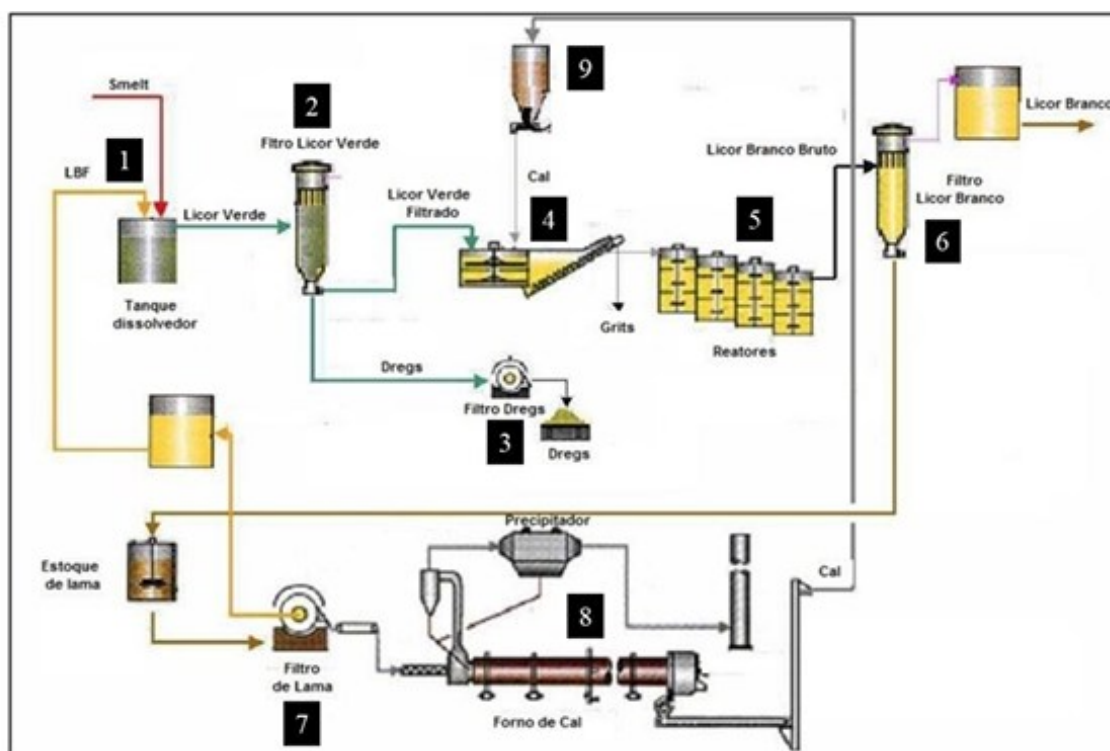


Fonte: SOUZA (2024).

A lama de cal, após ser filtrada, é submetida a um processo de secagem e calcinação em um forno de cal, um equipamento de grande comprimento alimentado por combustível. Dentro do forno, o material passa por distintas zonas térmicas, aquecimento, calcinação e queima, onde a eliminação de dióxido de carbono (CO_2) a partir do carbonato de cálcio resulta na obtenção de óxido de cálcio (cal) de alta qualidade, que é então resfriado para ser reutilizado na caustificação. Para otimizar a eficiência, os gases quentes da combustão são frequentemente aproveitados para pré-secar a lama de cal ou como ar de combustão. Como a eficiência da

calcinação não é total, a reposição com cal virgem é necessária para manter o balanço do ciclo. De forma análoga à caldeira, os gases de exaustão do forno passam por sistemas de tratamento, como precipitadores eletrostáticos, antes de serem liberados. Além disso, o controle de elementos não processuais, muitos oriundos da madeira, é crucial para a qualidade do ciclo de recuperação e é mantido por meio de purgas no processo (SIXTA, 2006; KÄRKKÄINEN; SIXTA, 2021). A Figura 18 detalha o fluxograma completo do ciclo de caustificação, desde o tanque dissolvidor (1) até o filtro de licor branco (6).

Figura 18: Ciclo de caustificação.



Fonte: REIS (2013).

3.2.7. Utilidades

A geração de energia elétrica na planta é realizada por turbogeradores, que são alimentados pelo vapor de alta pressão proveniente tanto da caldeira de recuperação quanto de caldeiras auxiliares, como as de queima de biomassa. O princípio de funcionamento consiste na conversão da energia térmica e cinética do vapor em trabalho mecânico nas turbinas. Essa energia mecânica, por sua vez, é convertida em energia elétrica por um gerador acoplado. A rotação do rotor da turbina é impulsionada pelo fluxo de vapor, cuja velocidade é controlada por um arranjo de palhetas fixas e móveis, componentes metálicos essenciais que otimizam a fluidodinâmica do processo (SIXTA, 2006; KÄRKKÄINEN; SIXTA, 2021).

Para garantir a integridade dos componentes do turbogerador, como as palhetas, é preferível a utilização de vapor superaquecido, que possui baixo teor de umidade e minimiza os riscos de danos por erosão. A qualidade do vapor está diretamente ligada à qualidade da água de alimentação da caldeira; portanto, o monitoramento rigoroso de parâmetros como pH e condutividade é fundamental para assegurar a alta disponibilidade operacional das máquinas (SIXTA, 2006; KÄRKKÄINEN; SIXTA, 2021).

Na indústria de celulose, são comuns duas classes de turbinas: de contrapressão e de condensação. As turbinas de contrapressão são utilizadas em sistemas de cogeração, onde além de gerar eletricidade, fornecem vapor de média e baixa pressão para outras etapas do processo. Já as turbinas de condensação são projetadas para maximizar a produção de energia elétrica, e seu vapor de exaustão é convertido em um condensado de alta pureza, que pode ser reutilizado na alimentação da caldeira. Este último sistema opera segundo os princípios do ciclo de Rankine, composto pelos elementos caldeira, turbogerador, condensador e bomba (SIXTA, 2006; KÄRKKÄINEN; SIXTA, 2021).

Devido à elevada demanda hídrica do processo, as fábricas de celulose são estrategicamente localizadas próximas a fontes de água, como rios ou lagos. A água bruta captada passa por um tratamento que inclui sanitização com cloro e a dosagem de outros reagentes, como alcalinizantes, acidificantes e aglutinantes, para preparar a água para as etapas subsequentes. Processos como filtração, decantação e floculação são empregados para garantir que a água tratada atenda às especificações de qualidade necessárias, como baixos níveis de turbidez, DBO, DQO e sólidos suspensos, antes de ser utilizada na fábrica (SIXTA, 2006; KÄRKKÄINEN; SIXTA, 2021).

As tecnologias de tratamento de água são selecionadas com base nas características da fonte de captação. Para a remoção de sólidos suspensos, por exemplo, podem ser utilizados desde métodos convencionais, como filtros de areia, até tecnologias mais avançadas, como sistemas de ultrafiltração. A água tratada é então distribuída para uso geral na indústria, sendo que frações podem ser destinadas a tanques de emergência, à produção de água potável ou a tratamentos adicionais para usos especializados que exigem alta pureza, como a produção de água desmineralizada e abrandada (SIXTA, 2006; KÄRKKÄINEN; SIXTA, 2021). A Figura 19 apresenta um esquema geral dos processos de tratamento de água e de efluentes em uma planta industrial.

Figura 19: Processos de tratamento de água e efluentes em uma planta de celulose e papel.



Fonte: Adaptado de CDC (2022) e SafeRack (2023).

Para o controle adequado dos efluentes líquidos gerados no processo produtivo da celulose, a implementação de uma estação de tratamento é uma etapa essencial. O sistema de tratamento é tipicamente estruturado em fases sequenciais, que geralmente incluem o pré-tratamento, o tratamento primário e o tratamento secundário (CHEN et al., 2016).

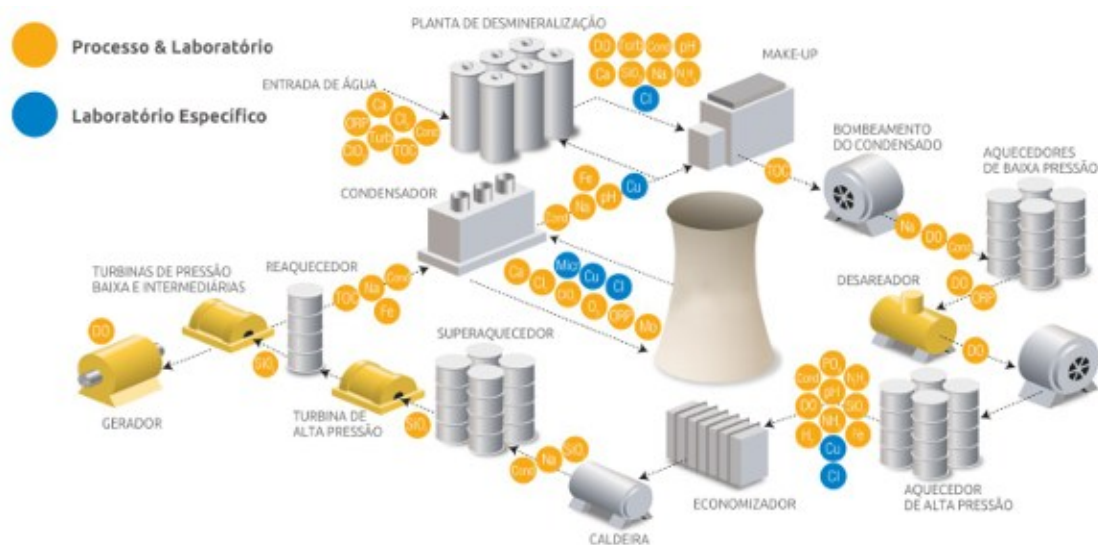
A fase de pré-tratamento inicia-se com o gradeamento (ponto 2 da Figura 19), uma etapa mecânica que visa remover os sólidos grosseiros do efluente. Em seguida, realiza-se a neutralização do pH e a preparação química para as etapas posteriores de coagulação e floculação. O tratamento primário, por sua vez, foca na remoção de lodo através da decantação em tanques equipados com raspadores de fundo (item 4). Nesta fase, também ocorre a adição de nutrientes para assegurar o bom desempenho da etapa biológica subsequente (CHEN et al., 2016).

O tratamento secundário utiliza sistemas biológicos aeróbios para reduzir a Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO). Após a adição de nutrientes, como compostos de nitrogênio e fósforo, o efluente segue para lagoas aeradas (item 5) ou tanques de lodos ativados, onde a matéria orgânica é consumida por microrganismos. Ao final do tempo de retenção necessário, o efluente passa por um processo de desgaseificação para remover o nitrogênio residual e é enviado a decantadores secundários (item 6) para a separação do lodo biológico. Algumas plantas podem incluir um tratamento terciário, que envolve coagulação, flotação e decantação para remover sólidos suspensos residuais. O efluente tratado é então comumente descarregado em um corpo receptor através de um emissário (SIXTA, 2006).

A água de alimentação da caldeira, por sua vez, requer um tratamento de alta pureza para ter um teor mínimo de sais dissolvidos. Para isso, o método mais comum é a desmineralização por meio de resinas de troca iônica, que utilizam colunas catiônicas e

aniônicas para remover os íons da água e são periodicamente regeneradas com ácido e base. Dependendo da planta, o processo pode incluir etapas adicionais como filtros de carvão ativado e leitos mistos de polimento, ou ainda, o uso de osmose reversa. É importante ressaltar que os condensados de alta pureza, provenientes dos turbogeradores e de outros pontos de uso de vapor, podem ser tratados e reaproveitados como água de alimentação para a caldeira (KÄRKKÄINEN; SIXTA, 2021). O ciclo completo de água para caldeira, com os respectivos equipamentos e pontos de controle, é detalhado na Figura 20.

Figura 20: Água para caldeira e parâmetros de qualidade.



Fonte: HEXIS (2024).

3.2.8. Compostagem

O crescimento da produção na indústria de celulose, impulsionado pela alta demanda de mercado, resulta em um aumento proporcional na geração de resíduos sólidos. Estima-se que, em média, a fabricação de cada tonelada de celulose gera aproximadamente 800 kg de resíduos sólidos (GUERRA, 2007).

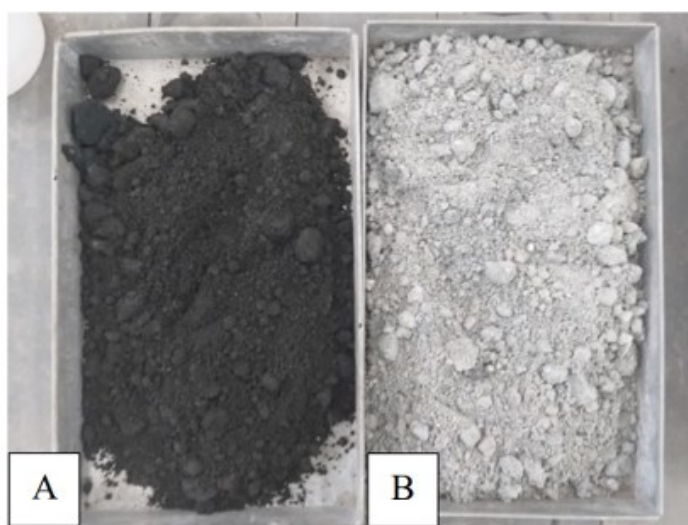
Os resíduos industriais são definidos como os subprodutos do processo de fabricação que não são incorporados ao produto final. No contexto da produção de celulose, os principais resíduos sólidos incluem a casca da madeira, a lama de cal do processo de caustificação, o lodo ativado do tratamento de efluentes e as cinzas da queima de biomassa (BELLÓTE et al., 1998).

Os dregs, um dos resíduos característicos, são uma escória escura e sedimentada removida durante a clarificação do licor verde, onde impurezas como carbono não queimado, sílica e compostos metálicos são separados por decantação. Originados da combustão do licor preto na caldeira de recuperação, os dregs são compostos por óxidos de cálcio, matéria orgânica,

compostos de enxofre e sódio, e podem conter metais traço do desgaste de equipamentos ou da própria madeira (ALBUQUERQUE et al., 2002; MAEDA; EPITÁGORAS; HELTON, 2010). Após a separação, são lavados e filtrados a vácuo para maximizar a recuperação de álcalis, podendo ser destinados a aterros, sistemas de compostagem ou reaproveitados como aditivos em outros produtos (REIS, 2021).

Outro resíduo sólido, os grits, são materiais granulados de cor amarelada, com odor reduzido e baixa solubilidade, gerados no processo de calcinação da lama de cal no forno de cal (TEDESCO; ZANOTO, 1978). Sua composição principal é de óxidos de cálcio, magnésio e potássio, e apresentam teores de metais inferiores aos encontrados nos dregs (MAEDA; EPITÁGORAS; HELTON, 2010). Devido ao seu baixo custo, os grits são frequentemente utilizados por agricultores locais como um corretivo para a acidez do solo (ALBUQUERQUE et al., 2002). A aparência característica dos dregs (A) e grits (B) pode ser observada na Figura 21.

Figura 21: Resíduos da indústria de celulose: dregs (A) e grits (B).



Fonte: OLIVEIRA (2022).

O lodo primário é o resíduo orgânico gerado nos decantadores primários do tratamento de efluentes, sendo composto majoritariamente por fibras de celulose não aproveitadas no processo. Este material se caracteriza por ser pobre em nutrientes e apresentar uma elevada relação carbono/nitrogênio (C/N), que varia entre 150 e 250. Na etapa seguinte, o tratamento secundário, este lodo é transformado em lodo ativado (ou secundário) através de um processo biológico aeróbio, que envolve a adição de nitrogênio, fósforo e oxigênio. Essa ativação resulta em um material com uma relação C/N muito mais baixa, entre 5 e 30. Ao final, o lodo passa por um processo de floculação com sulfato de alumínio e polieletrólitos, seguido de decantação

e correção de pH, para reduzir a turbidez antes de sua destinação final (GUERRINI, 2003; MAEDA; EPITÁGORAS; HELTON, 2010).

O volume de lodo celulósico gerado na indústria de papel e celulose é significativo, podendo corresponder a mais de 50% da massa total de resíduos sólidos. O material resultante é pastoso, de coloração marrom-escuro, com odor característico e um elevado teor de umidade, em torno de 80%. Por razões de custo-eficiência, os lodos de diferentes etapas do tratamento de efluentes são geralmente combinados para os processos de prensagem e desaguamento. Para ilustrar a escala de geração, uma planta com produção anual de 300 mil toneladas de celulose pode gerar aproximadamente 60 mil toneladas de lodo (GUERRINI, 2003; MAEDA; EPITÁGORAS; HELTON, 2010).

Uma das práticas de gerenciamento mais comuns para o lodo é a sua aplicação no solo, seja para fins agrícolas, silviculturais (em florestas) ou para a recuperação de áreas degradadas. Esta aplicação contribui para a melhoria da qualidade e da fertilidade do solo. A mistura dos lodos primário e secundário resulta em um composto com nitrogênio disponível, o que o torna uma alternativa viável aos fertilizantes minerais comerciais (FAUBERT et al., 2016; RODRIGUEZ et al., 2018).

As cinzas, ilustradas na Figura 22, são subprodutos da combustão de rejeitos de madeira em caldeiras de biomassa auxiliares, consistindo em uma mistura de areia e cinzas. A geração diária desse resíduo pode chegar a 80 toneladas em uma planta que produz 1000 toneladas de celulose por dia. Seu valor para a fertilização do solo reside em sua composição química e na capacidade de liberar macro e micronutrientes de forma gradual. De maneira aproximada, sua composição nutricional pode ser comparada a uma fórmula NPK de (1:3:7), enriquecida com cálcio, magnésio e outros micronutrientes (NOLASCO; GUERRINI; BENEDETTI, 2000).

Figura 22: Cinzas da combustão de cascas de eucalipto na caldeira de biomassa.



Fonte: PRODUTIVA FERT (2024).

A aplicação de resíduos industriais em plantações florestais é considerada uma prática viável, especialmente porque os solos destinados a esses cultivos costumam apresentar baixa fertilidade natural, o que resulta em menor produtividade. Esses materiais possuem características que favorecem os atributos físicos, químicos e biológicos do solo. A composição rica em nutrientes das cinzas, por exemplo, permite seu uso como fertilizante e como corretivo de acidez. Portanto, o reaproveitamento desses subprodutos contribui para minimizar os custos e os impactos ambientais associados ao seu descarte final, transformando um passivo em um recurso valioso para o ciclo produtivo (TRIGUEIRO, 2006).

3.3. Benefícios e sustentabilidade

Os processos de obtenção de celulose solúvel envolvem etapas semelhantes à produção de celulose para papel, porém com maiores exigências quanto à remoção de componentes não celulósicos. Entre os principais métodos utilizados destacam-se o processo ácido sulfito e o kraft modificado (prehydrolysis kraft – PHK), que permitem alcançar alta pureza e viscosidade controlada (SIXTA, 2006; CHEN et al., 2016). O conceito central desses processos está na capacidade de modificar a estrutura da parede celular vegetal de forma seletiva, removendo lignina e hemiceluloses sem degradar a celulose alfa.

Recentemente, técnicas avançadas como o uso de solventes orgânicos, tratamentos enzimáticos e pré-tratamentos com ácido diluído têm sido investigadas como alternativas mais sustentáveis e eficientes. Essas abordagens buscam aumentar o rendimento do processo e melhorar a qualidade do produto final, ao mesmo tempo em que reduzem os impactos ambientais da produção (CHEN et al., 2016).

Dentre os benefícios da produção de celulose solúvel, destacam-se a geração de produtos biodegradáveis, a substituição de derivados petroquímicos e a contribuição para cadeias produtivas sustentáveis. No entanto, o processo é altamente intensivo em energia e reagentes químicos, o que impõe desafios técnicos e econômicos, sobretudo em contextos industriais de larga escala (KUMAR; CHRISTOPHER, 2017).

A disponibilidade e custo da biomassa de origem, as exigências ambientais e a eficiência dos sistemas de recuperação também influenciam diretamente a viabilidade desses processos. Por isso, avanços em tecnologias de baixo impacto e uso de coprodutos têm sido cada vez mais priorizados nas pesquisas recentes (JIANG et al., 2020).

O impacto ambiental da produção de fibras têxteis sintéticas ou tradicionais (como o algodão) tem motivado a busca por fontes alternativas, e a celulose solúvel surge como uma das mais promissoras. As fibras regeneradas a partir dessa matéria-prima apresentam menor demanda hídrica, são biodegradáveis e podem ser produzidas com menor emissão de CO₂, desde que o processo seja bem gerido (QUINTANA; VALLS; RONCERO, 2024).

A eficiência ambiental, no entanto, depende da origem da biomassa, do tipo de processo utilizado e do aproveitamento dos coprodutos gerados. Avaliações de ciclo de vida têm demonstrado que tecnologias limpas aplicadas à produção de celulose solúvel podem reduzir significativamente os impactos ambientais da indústria têxtil (EBRINGEROVÁ; THOMAS, 2005; KUMAR; CHRISTOPHER, 2017).

Estudos recentes também têm enfatizado a importância da integração entre sustentabilidade ambiental e desempenho econômico. A produção eficiente de fibras regeneradas pode contribuir para cadeias produtivas circulares, promover o uso racional de recursos naturais e atender às novas exigências de legislações ambientais e consumidores mais conscientes (SOUZA, 2019; JIANG et al., 2020).

4. ANÁLISE DO USO DE INTELIGÊNCIAS ARTIFICIAIS

4.1. Vantagens

Conforme detalhado no Capítulo 2 (Metodologia) e demonstrado nos exemplos práticos dos Apêndices (A, B e C), a aplicação da Inteligência Artificial neste trabalho permitiu uma aceleração notável das etapas de levantamento bibliográfico e organização temática. Essa experiência prática ilustra diretamente as vantagens de produtividade e eficiência que serão discutidas a seguir.

O avanço acelerado das tecnologias de Inteligência Artificial (IA) tem impactado de forma significativa diversos setores da sociedade, incluindo a indústria, os serviços e, mais recentemente, o meio acadêmico e científico (FARIAS, 2024). Entre as inovações mais relevantes, destacam-se os modelos de linguagem natural e os sistemas de IA generativa, como o ChatGPT e ferramentas similares, capazes de processar grandes volumes de informações, identificar padrões, organizar dados e, inclusive, auxiliar na produção de conteúdos textuais acadêmicos (OPENAI, 2023).

No ambiente científico, essas ferramentas vêm sendo progressivamente incorporadas às etapas de pesquisa, especialmente como suporte na elaboração de artigos científicos, revisões bibliográficas e textos técnicos. Suas principais aplicações incluem a definição e o refinamento de estratégias de busca, a organização temática das referências, a elaboração de resumos, a geração de mapas conceituais, o auxílio na síntese de informações e, em determinados casos, até a sugestão de estruturas textuais preliminares (ALJUAID, 2024).

A integração da Inteligência Artificial (IA) no ecossistema científico representa mais do que uma melhoria incremental; é uma mudança de paradigma fundamental. A IA está a emergir não apenas como uma ferramenta, mas como um agente ativo que está a remodelar profundamente as metodologias, a ética e a cultura da investigação. Desde a concepção de ideias e revisão de literatura até à análise de dados, redação de manuscritos e revisão por pares, as tecnologias de IA estão a redefinir o que significa conduzir investigação científica no século XXI. Por meio de algoritmos avançados, é possível identificar rapidamente artigos relevantes, reconhecer padrões e tendências na literatura, além de otimizar o processo de revisão, tornando a pesquisa mais eficiente e favorecendo a geração de novos conhecimentos. Esta transformação promete acelerar o ritmo da descoberta a uma velocidade sem precedentes, automatizando

tarefas morosas e revelando conhecimentos complexos que antes estavam fora do alcance humano (CEVHER; YILDIRIM, 2023).

A influência da IA transcendeu a mera organização de artigos. Um exemplo claro dessa integração mais profunda no processo de descoberta ocorreu durante a fase de levantamento bibliográfico com o ChatGPT (detalhado no Apêndice A). Inicialmente, as buscas focavam nos aspectos técnicos dos processos. A ferramenta, em sua resposta, sugeriu ativamente a utilização de termos específicos para o pilar da sustentabilidade, como "life cycle assessment" OR LCA OR "environmental impact".

Essa sugestão direcionou a pesquisa para uma nova leva de artigos, que não apenas descreviam o processo produtivo, mas que também o avaliavam quantitativamente do ponto de vista ambiental. Isso foi fundamental para a construção da seção 3.3 (Benefícios e sustentabilidade) e da seção 3.2.8 (Compostagem), permitindo fundamentar, por exemplo, a afirmação de que 'Avaliações de ciclo de vida têm demonstrado que tecnologias limpas aplicadas à produção de celulose solúvel podem reduzir significativamente os impactos ambientais da indústria têxtil'.

Dessa forma, a IA não só otimizou a busca por referências, mas efetivamente refinou o escopo da pesquisa, dando maior ênfase à análise crítica da sustentabilidade dos processos, um aspecto que, sem essa provocação, poderia ter sido tratado de forma mais superficial

Além disso, a IA pode ser utilizada na elaboração de rascunhos de artigos, resumos, figuras e tabelas. A automação de tarefas repetitivas e operacionais permite que os pesquisadores direcionem seus esforços para atividades de maior valor intelectual, como a análise de dados e a interpretação de resultados. Esse processo não apenas proporciona ganhos em tempo, mas também contribui para o aumento da produtividade, da eficiência e da agilidade na produção científica (ALMEIDA; SANTOS, 2021).

4.2. Pontos de atenção

Apesar dos benefícios associados ao aumento da produtividade, à otimização do tempo e à ampliação do acesso a informações, o uso da Inteligência Artificial (IA) na pesquisa acadêmica exige uma análise crítica rigorosa. As informações geradas por esses sistemas não

substituem o rigor metodológico, a curadoria intelectual e a análise técnica, que são elementos essenciais e inerentes ao trabalho do pesquisador (BISEN; CÓRDOVA, 2018).

A ascensão da Inteligência Artificial na ciência apresenta uma natureza ambivalente. Por um lado, ela proporciona ganhos de eficiência sem precedentes, acelerando a inovação em áreas críticas como a ciência dos materiais ao permitir que pesquisadores processem vastos volumes de literatura em tempo recorde. Essa capacidade também democratiza o acesso ao conhecimento e auxilia pesquisadores não nativos de inglês a comunicarem seus resultados com maior eficácia (MACHADO; DAVID; MORGON, 2024).

Em contrapartida, a mesma tecnologia impõe desafios significativos aos pilares da integridade e transparência científica. As limitações intrínsecas dos modelos de IA — como a tendência a gerar informações falsas ("alucinações"), a perpetuação de vieses algorítmicos e a dependência da qualidade dos dados de treinamento, representam uma ameaça direta à validade e à confiabilidade dos registros científicos (BISEN; CÓRDOVA, 2018).

A utilização de ferramentas de IA de forma inadequada ou indiscriminada pode resultar na produção de pesquisas com notável falta de rigor científico, metodologias frágeis e resultados inconsistentes. Embora esses sistemas representem avanços significativos, impulsionados por algoritmos de machine learning e processamento de linguagem natural, é fundamental reconhecer que sua aplicação vai além da simples automação. As operações que realizam são intrinsecamente complexas, muitas vezes apresentando desafios que são difíceis até mesmo para especialistas humanos, o que demanda uma abordagem de uso mais cautelosa e supervisionada (BISEN; CÓRDOVA, 2018).

Diante desse cenário, a utilização da IA deve ser compreendida como uma ferramenta de apoio ao processo de pesquisa científica, e não como um substituto das atividades intelectuais que caracterizam o fazer científico. Quando aplicada de forma ética e responsável, a IA pode atuar como um recurso valioso, especialmente no auxílio à organização de dados, na exploração da literatura científica e na geração de insights preliminares, contribuindo para a qualificação, agilidade e eficiência dos processos acadêmicos (FARIAS, 2024).

5. CONCLUSÃO

Ao término deste trabalho, constata-se que os objetivos propostos foram integralmente alcançados, resultando em uma análise aprofundada dos processos de produção de celulose solúvel e uma reflexão crítica sobre o uso da Inteligência Artificial como ferramenta de apoio à pesquisa em engenharia química.

Os objetivos de descrever e analisar comparativamente os processos de celulose tradicional e solúvel foram cumpridos por meio da detalhada revisão bibliográfica (Capítulo 3). O estudo descreveu as múltiplas operações unitárias interdependentes, desde o preparo da madeira até a recuperação química. Evidenciou-se que o processo Kraft com pré-hidrólise (PHK) é a tecnologia dominante, respondendo por cerca de 95% da produção mundial de celulose solúvel, cuja principal distinção técnica reside na necessidade de alta pureza, com teores de α -celulose superiores a 90%. A análise ambiental confirmou a celulose solúvel como alternativa sustentável, com menor demanda hídrica que o algodão e potencial de biodegradabilidade.

A investigação e a avaliação crítica do uso da Inteligência Artificial, propostas nos objetivos subsequentes, foram sistematicamente abordadas. A metodologia (Capítulo 2) e os Apêndices (A, B e C) documentaram a aplicação prática de ferramentas como ChatGPT, Claude e Gemini em tarefas como otimização de buscas bibliográficas, organização temática e síntese de conteúdo. A análise (Capítulo 4) pondera as vantagens, como o ganho de agilidade, e as limitações, como o risco de informações imprecisas e a necessidade de validação crítica constante, atendendo plenamente ao objetivo de avaliar criticamente a tecnologia.

Em termos de implicações práticas, este trabalho serve como um guia consolidado para um (a) engenheiro (a) químico (a) atuante na indústria. As informações detalhadas sobre as operações unitárias, como o controle de parâmetros no cozimento PHK para atingir o teor de α -celulose desejado, ou as diferentes sequências de branqueamento, podem ser diretamente utilizadas para otimizar processos existentes, identificar causas de desvios de qualidade e avaliar pontos para redução de consumo de água e reagentes. A análise do ciclo de recuperação química, por exemplo, oferece uma base para projetos de eficiência energética na caldeira de recuperação e no forno de cal.

Para a continuidade da pesquisa, sugerem-se duas frentes principais. A primeira seria o desenvolvimento de uma análise técnico-econômica comparativa entre o processo PHK, dominante no mercado, e uma rota alternativa promissora, como o processo que utiliza solventes orgânicos, para quantificar os custos operacionais (OPEX) e de investimento (CAPEX) no cenário brasileiro. A segunda seria um estudo de caso em uma planta industrial para coletar dados reais de processo e, com eles, desenvolver um modelo de simulação computacional. Tal modelo permitiria testar cenários de otimização e validar as informações bibliográficas aqui consolidadas, aprofundando a aplicação prática dos conceitos revisados.

Deste modo, este trabalho contribui para o conhecimento na área ao integrar a análise de um processo industrial complexo com uma reflexão metodológica sobre o uso de tecnologias emergentes na pesquisa científica. A conclusão central reforça o duplo entendimento alcançado: a produção de celulose solúvel é uma rota tecnicamente viável e estratégica para a sustentabilidade da indústria têxtil, e a Inteligência Artificial, quando utilizada com ética e rigor, consolida-se como uma poderosa ferramenta de apoio, incapaz, contudo, de substituir a análise crítica, a responsabilidade e o discernimento intelectual que definem o pesquisador.

REFERÊNCIAS

ABTCP. O setor. [S. l.], 2024. Disponível em: <https://www.abtcp.org.br/o-setor>. Acesso em: 26 maio 2025.

ALBUQUERQUE, J. A. et al. Propriedades físicas e químicas de solos incubados com resíduo alcalino da indústria de celulose. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 26, p. 1065-1073, 2002.

ALJUAID, H. The Impact of Artificial Intelligence Tools on Academic Writing Instruction in Higher Education: A Systematic Review. *Arab World English Journal (AWEJ)*, Special Issue on ChatGPT, 2024. Disponível em: <https://ssrn.com/abstract=4814342>. Acesso em: 20 ago. 2025.

ALMEIDA, W. C.; SANTOS E. O. Dossiê: Digitalização e Datificação da Vida: Pervasividade, Ubiquidade e Hibridismos Contemporâneos. *Civitas, Rev. Ciênc. Soc.*, v. 21, n. 2, May-Aug 2021. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/civitas/a/sHzTPkNykNbJ7ThZS8PPDqw/>. Acesso em: 22 jun. 2025.

BALKISSOON, B.; ANDREW, J.; SITHOLE, B. A review of pretreatment methods for the production of dissolving pulp from sugarcane bagasse. In: BALKISSOON, B. et al. (ed.). *Cellulose*, 2022.

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL (BNDES). O renascimento de um mercado: o setor de celulose solúvel. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 38, 2013. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/2181/1/BS%2038_O%20renanscimento%20de%20um%20mercado_P.pdf. Acesso em: 22 jul. 2025.

BASTOS P.; CRUZ F. Controle ambiental em fábricas de papel e celulose. *Revista do Serviço Público*, 2017. Disponível em: <https://revista.ena.gov.br/index.php/RSP/article/view/2157>. Acesso em: 18 abr. 2025.

BATISTA, T. S. A indústria de papel e celulose no Brasil: produtividade, competitividade, meio ambiente e mercado consumidor. 2018. 51 f. TCC (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/26863>. Acesso em: 26 set. 2025.

BELLOTE, A. F. J. et al. Resíduos da indústria de celulose em plantios florestais. *Boletim de Pesquisa Florestal*, Colombo, n. 37, p. 99-106, 1998.

BISEN, A.; CÓRDOVA, Y. Minimize harmfulness of bots but don't ban them. *Policy Options*, 2018. Disponível em: <https://policyoptions.irpp.org/magazines/may-2018/minimize-harmfulness-bots-dont-ban/>. Acesso em: 22 jun. 2025.

BORREGA, M. et al. Pre-hydrolysis with acetic acid as a tool to valorise hemicelluloses from birch wood. In: BORREGA, M. et al. (ed.). *Green Chemistry*, 2018.

BORREGA, M. et al. Wood biorefinery for dissolving pulp and chemicals. In: BORREGA, M. et al. (ed.). Bioresource Technology, 2017.

BRASIL. Qualidade dos cavacos para combustão. Lippel, 2014. Disponível em: <https://www.lippel.com.br/Assets/Downloads/05-05-2014-10-36qualidade-dos-cavacos-para-combustao.pdf>. Acesso em: 24 mar. 2025.

CAMPOS, E. S. Curso básico de fabricação de celulose e papel. Suzano, SP, 2011. 233 p.

CDC. Water treatment. 2022. Disponível em: https://www.cdc.gov/healthywater/drinking/public/water_treatment.html. Acesso em: 10 jun. 2025.

CEVHER, A. Y.; YILDIRIM, S. Design and Use of Chatbots for Educational Purposes: A Study on Student Opinions. Journal of Studies in Advanced Technologies, v. 1, n. 2, 2023. Disponível em: <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/3477622>. Acesso em: 22 jun. 2025.

CHEN, C. et al. A review of the pretreatment of lignocellulose for dissolving pulp*. In: CHEN, C. et al. (ed.). Bioresource Technology, 2016.

CHEN, C. et al. An overview of the production of dissolving pulp from different raw materials. In: CHEN, C. et al. (ed.). Cellulose, 2021.

CHEN, X. et al. Dissolving pulp from bamboo and bagasse. In: CHEN, X. et al. (ed.). Cellulose, 2019.

COLODETTE, J.; MARTINO, D. O Estado da Arte do Branqueamento de Polpa Celulósica com Oxigênio. [s.l: s.n.]. 2012.

COSTA, M. M.; COLODETTE, J. L.; FOEKEL, C. E. B. The impact of kappa number composition on eucalyptus kraft pulp bleachability. In: Tappi Pulping Conference, 1998.

DENCE, C. W.; REEVE, D. W. Pulping Cleanchinh: Principles and Prattice. Atlanta: TAPPI, 1996.

EBRINGEROVÁ, A.; THOMAS, H. Xylans from birch wood. In: EBRINGEROVÁ, A.; THOMAS, H. (ed.). Wood Science and Technology, 2005.

FARIAS, A. A. Education, Science Publication Articles and AI: A comment on the pros and cons. Am. In. Mult. J., v. 15, n. 8, p. 42-46, 2024.

FAUBERT, P. et al. Pulp and paper mill sludge management practices: What are the challenges to assess the impacts on greenhouse gas emissions?. Resources, Conservation and Recycling, v. 108, p. 107-133, 2016.

FLETCHER, K. Sustainable Fashion and Textiles: Design Journeys. 2. ed. London: Routledge, 2014.

GUERRA, M. A. S. L. Avaliação de indicadores biológicos e físico-químicos no composto orgânico produzido a partir de resíduos da indústria de celulose. 2007. 70 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2007.

GUERRINI, I. A. Uso de resíduos industriais de fábrica de celulose e papel em plantios de eucalipto. 2003. 96 f. Tese (Livre Docência) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2003.

HAEMMERLE, F. The Lenzing Group: Driving sustainability in the fiber industry. In: Dornbirn Man-Made Fibers Congress, 2011.

HEINZE, T.; KOSAN, B. Cellulose ethers. In: HEINZE, T.; KOSAN, B. (ed.). Macromolecular Symposia, 2000.

HEXIS. Água para caldeira e parâmetros de qualidade. 2024.

JIANG, Z. et al. Circular economy in the pulp and paper industry. In: JIANG, Z. et al. (ed.). Bioresource Technology, 2020.

KÄRKKÄINEN, J.; SIXTA, H. Pre-hydrolysis Kraft pulping. In: KÄRKKÄINEN, J.; SIXTA, H. (ed.). Cellulose Chemistry and Technology, 2021.

KLOCK, U.; ANDRADE, A. S.; HERNANDES, J. A. Polpa e Papel. 3. ed. rev. Curitiba: UFPR, 2013.

KLOCK, U. et al. Química da Madeira. 3. ed. rev. Curitiba: UFPR, 2005.

KOISTINEN, O. et al. Release of hydrolysis products during pre-hydrolysis. In: KOISTINEN, O. et al. (ed.). Holzforschung, 2023.

KUMAR, V.; CHRISTOPHER, L. P. Recent trends and developments in dissolving pulp production and applications. Cellulose, 2017.

LIPPEL. Silo de cavacos. 2024.

MACHADO, G.; DAVID, J.; MORGON, N. Publicação de Artigos Científicos e IA: Uma Revolução em Curso. Química Nova, v. 47, n. 4, p. e20240039, 2024.

MAEDA, S.; EPITÁGORAS, R. O. C.; HELTON, D. S. Uso de resíduos da fabricação de celulose e papel e da reciclagem de papel. Colombo: Embrapa Florestas, 2010. (Documentos, 202). Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/24482/1/Doc202.pdf>. Acesso em: 3 mai. 2025.

MARTINO, A. et al. Hydrolysis of hemicelluloses during pre-hydrolysis. In: MARTINO, A. et al. (ed.). ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2017.

MINE, E. Y. et al. Produção Industrial de Celulose e Papel. 2013. Disponível em: <https://www.ebah.com.br/content/ABAAgoWYAK/celulose-papel>. Acesso em: 8 mai. 2025.

MONTEBELLO, A. E. S.; BACHA, C. J. C. O setor de celulose e papel na economia brasileira. O Papel, 2011. Disponível em: http://www.revistaopapel.org.br/noticia-anexos/1359376212_a6276749358ba36fa276b9509b02b478_901527006.pdf. Acesso em: 18 abr. 2025.

NOLASCO, A. M.; GUERRINI, I. A.; BENEDETTI, V. Uso de resíduos urbanos e industriais como fontes de nutrientes e condicionadores de solos florestais. In: GONÇALVES, J. L. M.; BENEDETTI, V. (ed.). Nutrição e fertilização florestal. Piracicaba: IPEF, 2000. p. 386-414.

OLIVEIRA, L. Caldeiras de Recuperação de Licor Negro. 2016. Disponível em: <https://www.linkedin.com/pulse/caldeiras-de-recuperação-licor-negro-luciano-r-oliveira/>. Acesso em: 14 jul. 2025.

OLIVEIRA, Y. S. Uso de resíduos do processo Kraft de celulose - dregs e grits como adição mineral na produção de matrizes cimentícias. 2022. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2022.

OPENAI. GPT-4 Technical Report. 2023. Disponível em: <https://openai.com/research/gpt-4>. Acesso em: 22 jun. 2025.

PHILIPP, P. Celulose e papel: Tecnologia de fabricação da pasta celulósica. 2. ed. São Paulo: IPT, 1998. 559 p.

PINHEIRO, R. M. Reciclagem de Lodo Primário da Estação de Tratamento de Efluentes da Indústria de Papel em Cerâmica Vermelha. 2008. 120 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2008.

PRODUTIVA FERT. Cinzas de biomassa TL. 2024. Disponível em: <https://www.produtivafert.com.br/produto/cinza-de-biomassa-tl/>. Acesso em: 8 abr. 2025.

QUINTANA, G.; VALLS, C.; RONCERO, M. B. Advances in the production of dissolving pulp. In: QUINTANA, G.; VALLS, C.; RONCERO, M. B. (ed.). Cellulose, 2024.

REDKO, B. V. P. Aspecto do branqueamento da celulose. Rio Grande do Sul, 1999. Disponível em: http://celsofoelkel.com.br/artigos/outros/08_Branqueamento.pdf. Acesso em: 10 abr. 2025.

REIS, H. M. Análise Exergética e Ambiental do Processo de Obtenção do Licor de Cozimento Kraft para Extração de Celulose. 159 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá-MG, 2013.

REIS, H. M. Processo de extração de celulose Kraft: ciclo de recuperação química. São Paulo: Fontenele Publicações, 2021. 612 p.

RODRIGUEZ, D. R. O. et al. Effect of pulp and paper mill sludge on the development of 17-year-old loblolly pine (*Pinus taeda* L.) trees in Southern Brazil. Forest Ecology and Management, v. 422, p. 179-189, 2018.

SAFERACK. Steps of a Wastewater Treatment Plant. 2023. Disponível em: <<https://www.saferack.com/wastewater-treatment-plant/wastewater-treatment-processillustrationv2/>>. Acesso em: 10 jun. 2025.

SANTOS, V.; MELO, C. Challenges in dissolving pulp production. In: SANTOS, V.; MELO, C. (ed.). Cellulose, 2019.

SENAI. Celulose. São Paulo: SENAI-SP Editora, 2013. 352 p.

SIXTA, H. Handbook of Pulp. Lenzing: Wiley-Vch Verlag Gmbh & Co., 2006. 1352 p.

SIXTA H. et al. Influence of beech wood quality on bisulfite dissolving pulp manufacture. Part 1: Influence of log storage on pulping and bleaching. *Holzforschung*, v. 58, 2004.

SOUZA, A. H. C. B. Guia técnico ambiental da indústria de celulose e papel. São Paulo: CETESB, 2008.

SOUZA, L. F. Circular economy in the pulp and paper industry. In: SOUZA, L. F. (ed.). Sustainable Production and Consumption, 2019.

SOUZA, S. R. Diagrama de ciclo entre plantas de licor branco e forno de cal. 2024.

STATISTA. Global pulp market size. 2024.

STRUNK, P. et al. Dissolving pulp applications. In: STRUNK, P. et al. (ed.). Cellulose, 2012.

TEDESCO, M. J.; ZANOTTO, D. L. Utilização de resíduo alcalino da indústria de celulose na correção da acidez do solo. *Agronomia sulriograndense*, Porto Alegre, v. 14, n. 2, p. 329-336, 1978.

TIMMER, M. Representação do ciclo produtivo de celulose solúvel. 2020.

TISSUE. O que é celulose?. 2020. Disponível em: <https://tissueonline.com.br/o-que-e-celulose/>. Acesso em: 24 mar. 2025.

TOGAWA, R. Caldeiras aquatubulares e flamotubulares. 2020.

TRIGUEIRO, R. M. Efeitos de "dregs e grits" nos atributos de um Neossolo Quartzarênico e na produção volumétrica de eucalipto. 2006. 73 f. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2006.

TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; MENDES, L. M. Influência da idade nas características físico-químicas e anatômicas características da madeira de *Eucalyptus saligna*. *Revista Cerne*, Viçosa, v. 34, n. 2, 2009.

VALMET. Nova fábrica da LD Celulose atende às demandas de celulose solúvel sustentável. 2023. Disponível em: <https://www.valmet.com/pt/insights/artigos/pulping-andfiber/nova-fabrica-da-LD-Celulose-atende-as-demandas-de-celulose-soluvel-sustentavel/>. Acesso em: 6 mar. 2025.

VERACEL. O que é celulose? Saiba para que serve e qual a sua importância. 2022. Disponível em: <https://www.veracel.com.br/entenda-a-celulose-descubra-o-que-e-para-que-serve-e-sua-importancia/>. Acesso em: 24 mar. 2025.

ZANELLA. Produtos - Pátios de madeira e biomassa. 2024. Disponível em: <https://www.zanellamaquinas.com.br/pt/energia/mesa-de-rolos-crivados.htm>. Acesso em: 25 mar. 2025.

ZHANG, H. et al. Techno-economic analysis of dissolving pulp production. In: ZHANG, H. et al. (ed.). Bioresource Technology, 2022.

APÊNDICE A – Exemplo de prompt utilizado no ChatGPT

Prompt: “Você é um acadêmico especializado em engenharia química e tecnologia de celulose. Estou realizando um TCC sobre a produção de celulose solúvel para fibras têxteis, com foco em processos como pré-hidrólise kraft, processo sulfito ácido e métodos alternativos. Sua tarefa é me ajudar a otimizar estratégias de busca científica para encontrar artigos relevantes. Sugira uma lista detalhada de palavras-chave e combinações de termos técnicos em português e inglês que eu possa utilizar para pesquisas em bases científicas como Scopus, Web of Science e ScienceDirect. Inclua sinônimos, termos relacionados às etapas do processo (pré-tratamento, deslignificação, branqueamento, remoção de hemicelulose) e expressões específicas utilizadas na literatura internacional. Forneça também variações que combinem processo, produto e aplicação final”.

A.1. Resposta gerada pelo ChatGPT

Resposta da IA: “Ótimo tema — muito relevante e com terminologia técnica bem específica. Abaixo coloquei uma lista organizada de palavras-chave em português e inglês, sinônimos e termos de processo/qualidade, além de combinações sugeridas (ex.: buscas booleanas / proximidade) que funcionam bem em Scopus, Web of Science e ScienceDirect. Também incluí variações que combinam processo + produto + aplicação final e sugestões de operadores e curingas para ampliar ou refinar resultados.

1) Palavras-chave principais (português → inglês)

Use estas como pontos de partida individuais ou em combinação.

Celulose dissolúvel → Dissolving pulp / Dissolving cellulose / Dissoluble cellulose

Pré-hidrólise kraft → Pre-hydrolysis kraft (PHK / PHK pulp)

Processo sulfito ácido → Acid sulfite process / Sulfite pulping / Sulphite process

Polpa sulfito → Sulfite pulp

Solventes orgânicos (organosolv) → Organosolv process / Organosolv pulp

NMMO / Lyocell → N-methylmorpholine N-oxide (NMMO) / Lyocell process

Viscose → Viscose process / Rayon / Viscose rayon

Cupramoniacal → Cuprammonium rayon / Cuprammonium process

Ionic liquids → Ionic liquid pretreatment / Ionic liquids for cellulose

Deep eutectic solvents → Deep eutectic solvents (DES)

Extratos enzimáticos → Enzymatic pretreatment / Enzymatic hydrolysis

Deslignificação → Delignification / Oxygen delignification / O-delignification

Branqueamento → Bleaching (ECF / TCF / elemental chlorine-free / totally chlorine-free)
 Remoção de hemicelulose → Hemicellulose removal / Hemicellulose extraction
 Pré-tratamento → Pretreatment / Pre-treatment (acid, alkaline, steam explosion)
 Cozimento / polpação → Pulping / Kraft pulping / Sulfite pulping / Acid hydrolysis pulping
 Polpa para fibras têxteis → Textile pulp / Pulp for textile fibers
 Celulose alfa → Alpha-cellulose
 Índice Kappa → Kappa number / Kappa value
 Grau de polimerização (DP) → Degree of polymerization (DP) / Intrinsic viscosity
 Brilho / brightness → Brightness (ISO)
 Cinzas → Ash content
 Rendimentos de polpa → Pulp yield / Yield of pulp
 Purificação de polpa → Purification / Pulp purification / Solikraft? (não usar sem checar contexto)
 Xantatação / viscose chemistry → Xanthation / CS₂ / Carbon disulfide / Causticization
 Celulose regenerada → Regenerated cellulose / Regenerated fibers (Lyocell, Viscose, Modal)
 Fibras têxteis → Textile fibres / Textile fibers / Cellulosic fibres

2) Sinônimos / termos relacionados (úteis para ampliar busca)

dissolving pulp = dissolvable pulp = high-purity pulp
 kraft dissolving = prehydrolysis kraft = PHK
 sulphite = sulfite = bisulfite = neutral sulfite
 DP_{vis} = intrinsic viscosity = molecular weight = polymerization degree
 bleaching sequences = O-DEop (oxygen, delignification, extraction) = ECF / TCF
 pretreatment methods = steam explosion, autohydrolysis, acid hydrolysis, alkaline extraction
 post-treatments = mercerization (para fibras), cellulose activation, purification

3) Termos das etapas do processo (pt ↔ en)

Pré-hidrólise / pre-hydrolysis
 Cozimento kraft / kraft cooking
 Deslignificação por oxigênio / oxygen delignification
 Branqueamento sequência O-D-E / O-D-E bleaching sequence
 Lavagem / washing / washing stage
 Purificação / purification (e.g., hot caustic extraction)

Xantatação / xanthation

Viscoelasticidade / rheology (quando avaliar solução de celulose)

Viscosidade intrínseca / intrinsic viscosity

4) Parâmetros de qualidade e medições (úteis para filtros / termos em métodos)

Kappa number / número Kappa

Alpha-cellulose content / teor de alfa-celulose

Pentosan content / conteúdo de pentosanas

Intrinsic viscosity / viscosidade intrínseca

Degree of polymerization (DP) / grau de polimerização

Brightness (ISO) / brilho

Ash / teor de cinzas

Solubility / solubilidade

Purity / pureza (cellulose purity)

Molecular weight distribution

5) Termos de aplicação final (fibras têxteis / produtos)

Regenerated cellulose fibers / regenerated fibers (Lyocell, Modal, Viscose)

Cellulose acetate (quando for relevante)

Textile fibers from dissolving pulp / pulp-to-fiber conversion

Sustainable textile fibers / bio-based fibers / eco-friendly fibres

Filament spinning / wet spinning / dry jet-wet spinning / solvent spinning

6) Combinações úteis (Booleanas e com curingas)

Use curingas: cellul* cobre cellulose e cellulosic; fibra* cobre fibra/fibras.

Exemplos prontos para copiar/colar e adaptar:

Português (busca ampla)

("celulose dissolúvel" OR "polpa dissolvível" OR "polpa para fibras têxteis") AND ("pré-hidrólise kraft" OR "sulfito" OR "organosolv" OR "NMMO" OR "ilícidos")

(Substitua "ilícidos" por ionic liquids — só exemplo para ilustrar)

Inglês (busca ampla)

("dissolving pulp" OR "dissolving cellulose" OR "textile pulp") AND ("prehydrolysis kraft" OR "acid sulfite" OR "organosolv" OR "NMMO" OR "ionic liquid" OR "DES")

Foco em características químicas / qualidade

("dissolving pulp") AND ("alpha-cellulose" OR "kappa number" OR "intrinsic viscosity" OR "degree of polymerization")

Remoção de hemicelulose e rendimento

("hemicellulose" OR "pentosan") AND ("removal" OR "extraction" OR "wash*") AND ("yield" OR "pulp yield")

Processos modernos / solventes alternativos

("ionic liquid" OR "deep eutectic solvent" OR "organosolv" OR "NMMO") AND ("dissolving pulp" OR "regenerated cellulose" OR "Lyocell")

Variação com curingas (útil em Scopus/ScienceDirect):

(cellul* W/3 (dissolv* OR dissolvable OR "dissolving pulp")) AND (kraft* OR sulfite OR organosolv OR "ionic liquid" OR NMMO)

Observação: em Scopus use W/n (e.g. W/3), em Web of Science use NEAR/n (e.g. NEAR/3), em ScienceDirect o operador PRE/n ou W/n pode não funcionar — lá prefira frases entre aspas e combinações AND/OR.

7) Strings avançadas (exemplos práticos para Scopus / WoS)

Scopus (proximidade):

TITLE-ABS-KEY(cellul* W/3 (dissolv* OR "dissolving pulp")) AND TITLE-ABS-KEY("prehydrolysis kraft" OR "acid sulfite" OR organosolv OR "ionic liquid")

Web of Science (proximidade NEAR):

TS=(cellul* NEAR/3 (dissolv* OR "dissolving pulp")) AND TS=("prehydrolysis kraft" OR "acid sulfite" OR organosolv OR "ionic liquid")

ScienceDirect (frase + campos):

("dissolving pulp" OR "dissolving cellulose") AND ("prehydrolysis kraft" OR "acid sulfite" OR "organosolv" OR "NMMO" OR "ionic liquid")

(Buscar em título/abstract/keywords; usar filtros de área: Chemical Engineering, Materials Science, Environmental Science, Polymer Science, Textile Research)

8) Combinações processo + produto + aplicação (exemplos diretos)

"pré-hidrólise kraft" + "celulose dissolúvel" + "fibras têxteis"

"pre-hydrolysis kraft" + "dissolving pulp" + "Lyocell"

"acid sulfite" + "dissolving pulp" + "viscose"

"organosolv" + "high-purity pulp" + "regenerated cellulose fibers"

"ionic liquid" + "cellulose dissolution" + "wet spinning"

"NMMO" + "Lyocell" + "environmental impact"

"hemicellulose removal" + "pulp yield" + "textile pulp quality"

9) Dicas práticas para pesquisar nas bases

Use cellul* para captar cellulose, cellulosic, celluloses. Use fibra*/fiber* conforme idioma.

Combine termos técnicos (kappa number, DP, alpha-cellulose) com o processo para achar artigos que relacionam qualidade × processo.

Teste sinônimos: acid sulfite vs sulfite pulping vs sulphite (ortografia UK).

Use filtros por área (Engineering, Materials, Chemistry, Environmental Science, Textile Research) e por tipo (review, article, patent).

Para métodos alternativos (ionic liquids, DES, organosolv, NMMO) busque também por economic assessment, techno-economic analysis, LCA (life cycle assessment) se quiser avaliar sustentabilidade.

Em buscas muito amplas, combine com ("viscose" OR "Lyocell" OR "regenerated cellulose") para centrar na aplicação têxtil.

Inclua termos de processo downstream como xanthation, CS₂, carbon disulfide, causticization se for estudar rotas químicas da viscose.

10) Exemplos de filtros/keywords para revisão bibliográfica

Sustentabilidade: ("life cycle assessment" OR LCA OR "environmental impact") AND ("dissolving pulp" OR "Lyocell" OR "viscose")

Economy / technoeconomics: ("techno-economic" OR "economic assessment" OR "cost analysis") AND ("dissolving pulp" OR "prehydrolysis kraft" OR organosolv)

Patentes: buscar em Espacenet / Google Patents por "dissolving pulp" AND (process OR method) e por "prehydrolysis kraft" patent".

A.2. Considerações sobre a resposta gerada

O uso do ChatGPT para a definição das palavras-chave foi bastante proveitoso na etapa inicial da pesquisa. A ferramenta forneceu uma lista abrangente de termos técnicos em português e inglês, incluindo sinônimos, expressões específicas da literatura e combinações voltadas para diferentes etapas do processo de produção de celulose solúvel. Além disso, apresentou sugestões de operadores booleanos, curingas e formas de organização que

facilitaram a criação de estratégias de busca mais completas e adaptáveis a diferentes bases científicas.

No entanto, algumas limitações foram identificadas. A resposta exigiu ajustes e adaptações manuais para cada base de dados e a verificação prévia de certos termos, a fim de evitar resultados irrelevantes. Também não foi possível validar automaticamente a frequência ou relevância de cada palavra-chave na literatura recente, tornando necessária uma etapa adicional de triagem. Porém, algumas dessas limitações, parecem derivar mais da construção dos prompts do que de uma falha de raciocínio da ferramenta em si. A resposta, por exemplo, não proveu as fontes primárias para os termos sugeridos, uma vez que o comando inicial não solicitou explicitamente essa informação. Isso reforça que a qualidade da saída da IA está diretamente ligada à precisão e ao detalhamento dos comandos fornecidos pelo pesquisador, exigindo uma etapa adicional de triagem e validação crítica para garantir a relevância dos resultados. Assim, o ChatGPT mostrou-se útil como ponto de partida, mas seu uso requer complementação com análise crítica e testes práticos nas bases de dados.

APÊNDICE B – Exemplo de prompt utilizado no Claude

Prompt: “Analise o artigo intitulado 'The impact of kappa number composition on eucalyptus kraft pulp bleachability'. Classifique-o em uma das seguintes categorias temáticas: (1) Tecnologias de produção, (2) Etapas de pré-tratamento e deslignificação, (3) Propriedades físico-químicas da polpa, (4) Impactos ambientais e eficiência energética ou (5) Aplicações e desempenho em fibras têxteis. Em seguida, elabore um resumo estruturado de até 150 palavras contendo: (i) objetivo do estudo, (ii) metodologia utilizada, (iii) principais resultados e (iv) limitações indicadas pelos autores. Justifique a escolha da categoria com base no conteúdo do artigo e indique se há relação secundária com outras categorias. Apresente a resposta de forma organizada, preferencialmente em tabela, para facilitar a comparação com outros artigos analisados”.

B.1. Resposta gerada pelo Claude

Resposta: “A análise do artigo "The impact of kappa number composition on eucalyptus kraft pulp bleachability" de Costa & Colodette mostra que se trata de um estudo fundamental sobre etapas de pré-tratamento e deslignificação, especificamente focado no comportamento das diferentes frações químicas da polpa durante o branqueamento ECF.

O trabalho se destaca por sua abordagem metodológica inovadora de separar e quantificar individualmente as principais frações que contribuem para o número kappa: lignina residual, ácidos hexenurônicos (HexAs), extrativos, grupos carbonila e complexos lignina-carboidrato.

Os resultados mais significativos incluem a descoberta de que os ácidos hexenurônicos representam a maior fração do número kappa (66,7%) em polpas kraft-O₂ de eucalipto, mas paradoxalmente apresentam melhor branqueabilidade que a lignina residual, e que o dióxido de cloro não reage diretamente com os HexAs, sendo necessária a formação in situ de HOCl e Cl₂ para sua remoção.

Este estudo fornece bases científicas importantes para otimização de processos de branqueamento ECF e implementação de estágios ácidos a quente (Ahot) para remoção seletiva de HexAs em plantas industriais”.

Classificação Temática

Categoria Principal	Categoria 2: Etapas de pré-tratamento e deslignificação
Justificativa	O artigo foca no processo de branqueamento ECF (Elemental Chlorine Free) da polpa kraft de eucalipto, analisando especificamente como diferentes componentes do número kappa (lignina residual, ácidos hexenurônicos, extrativos, grupos carbonila) influenciam a branqueabilidade durante a sequência DEDD com dióxido de cloro.
Relações Secundárias	Categoria 3 (Propriedades físico-químicas) - análise detalhada das frações químicas da polpa; Categoria 4 (Impactos ambientais) - estudo da formação de compostos organoclorados (OX/AOX)

Resumo Estruturado

Componente	Descrição
Objetivo	Separar e quantificar as principais frações que contribuem para o número kappa em polpas kraft de eucalipto deslignificadas com oxigênio, avaliando como essas frações se comportam durante o branqueamento ECF usando dióxido de cloro como único oxidante na sequência DEDD.
Metodologia	Utilizaram-se duas amostras de polpa kraft-O ₂ de eucalipto obtidas por cozimento Kobudomari modificado. Aplicou-se procedimento de fracionamento sequencial para quantificar: carry-over, extrativos, ácidos hexenurônicos (HexAs), grupos carbonila e lignina residual + complexos lignina-carboidrato (LCC). Análises por HPLC, cromatografia iônica e métodos padrões TAPPI/ISO.
Principais Resultados	HexAs + LCC representaram 66,7% do número kappa, seguidos pela lignina residual (18,6%). A branqueabilidade dos HexAs foi superior à da lignina residual + LCC. O dióxido de cloro por si só não reage efetivamente com HexAs - a remoção ocorre via HOCl e Cl ₂ gerados in situ. Remoção de extrativos e grupos carbonila teve impacto mínimo na branqueabilidade. HexAs foram principais responsáveis pela formação de AOX nos efluentes.
Limitações	Estudo limitado a duas amostras de polpa kraft-O ₂ de eucalipto de fonte específica (cozimento Kobudomari). Não foram avaliados outros tipos de branqueamento ECF além da sequência DEDD. Metodologia de fracionamento por diferença pode introduzir erros cumulativos. Não foram estudadas variações sazonais ou de diferentes clones de eucalipto.

Parâmetro	Valor
Equivalências	1 unidade kappa = 8,44 mmol lignina residual/kg polpa
	1 unidade kappa = 9,94 mmol HexAs/kg polpa
Eficiência Remoção	Estágio D remove apenas 25,6% dos HexAs
	Estágio D remove ~71% da lignina Klason
Formação Compostos Organoclorados	Frações C (HexAs) e E (LCC+lignina) responsáveis por 84% do consumo ClO_2
	HexAs contribuem com 44,3% da formação de AOX

B.2. Considerações sobre a resposta gerada

A análise estruturada fornecida pelo Claude demonstrou-se extremamente valiosa para a compreensão dos aspectos técnicos e metodológicos do artigo de Costa & Colodette sobre branqueabilidade de polpa kraft de eucalipto. A classificação temática clara e a organização tabular facilitaram significativamente a identificação dos pontos-chave do estudo, especialmente a quantificação das diferentes frações do número kappa e seus comportamentos durante o branqueamento ECF. A apresentação dos dados técnicos complementares, incluindo as equivalências específicas (1 unidade kappa = 8,44 mmol lignina residual/kg polpa e 9,94 mmol HexAs/kg polpa) e eficiências de remoção, forneceu informações precisas que podem ser diretamente utilizadas em cálculos de processo e comparações com outros estudos da literatura. Além disso, a identificação das relações secundárias com outras categorias temáticas ajudou a contextualizar o trabalho dentro do panorama mais amplo da pesquisa em celulose e papel.

Entretanto, a análise poderia ter sido aprimorada com uma discussão mais aprofundada sobre as implicações práticas dos resultados para a indústria, bem como uma contextualização histórica sobre a evolução dos processos de branqueamento ECF. Embora as limitações do estudo tenham sido adequadamente identificadas, seria interessante uma análise crítica mais elaborada sobre como essas limitações podem afetar a aplicabilidade dos resultados em diferentes condições operacionais industriais. Adicionalmente, a ausência de uma discussão sobre trabalhos posteriores que citaram este artigo ou sobre desenvolvimentos mais recentes na área deixou uma lacuna na compreensão da relevância atual dos achados. Uma comparação mais detalhada com metodologias alternativas de

fracionamento do número kappa também enriqueceria a análise, fornecendo uma perspectiva mais ampla sobre as abordagens experimentais disponíveis na literatura.

APÊNDICE C – Exemplo de prompt utilizado no Gemini

Prompt: “Analise o texto presente em: ‘BS 38 o renascimento de um mercado_.pdf’, que corresponde ao conteúdo de um estudo sobre o mercado de celulose solúvel para fibras têxteis. Resuma de forma estruturada: (i) objetivo do estudo, (ii) metodologia utilizada, (iii) principais resultados, (iv) conclusões e (v) desafios técnicos mencionados. Em seguida, sugira pelo menos três insights ou reflexões que possam ser úteis para a discussão do meu TCC (Análise dos processos de produção de celulose solúvel para fibras têxteis), como tendências tecnológicas, possíveis otimizações de processo ou lacunas na literatura. Sempre mantenha o foco em aspectos que possam influenciar o desempenho final das fibras têxteis e a sustentabilidade do processo”.

C.1. Resposta gerada pelo Gemini

Resposta: “Com certeza! Com base na análise do estudo e no novo foco do seu TCC, que se concentra na análise dos processos de produção, apresento a síntese estruturada e os insights solicitados, direcionados para aspectos de tecnologia de processo, otimização e sustentabilidade.

Análise do Estudo: ‘O Renascimento de um Mercado: O Setor de Celulose Solúvel’

(i) Objetivo do Estudo:

O objetivo principal do estudo é analisar a revitalização do mercado de celulose solúvel, que, após décadas de declínio, voltou a apresentar um crescimento robusto. A análise busca compreender os vetores de demanda, a estrutura do mercado e as perspectivas futuras, com um foco particular na sua aplicação para a produção de fibras têxteis celulósicas (viscose).

(ii) Metodologia Utilizada:

O estudo emprega uma metodologia de análise de mercado, baseada na compilação e interpretação de dados secundários de fontes especializadas como a RISI (consultoria de mercado para produtos florestais) e dados econômicos gerais (como o PIB). A análise é quantitativa, utilizando taxas de crescimento (CAGR) e correlações (como a demanda por fibras e o crescimento do PIB) para fundamentar as projeções e conclusões.

(iii) Principais Resultados:

-Retomada do Crescimento: O mercado de celulose solúvel, que estava em declínio desde os anos 1970, experimentou uma forte retomada a partir dos anos 2000.

-Hegemonia da Viscose: Em 2012, a produção de viscose representava 74% da demanda global por celulose solúvel, consolidando-se como o principal motor do mercado.

-Substituição do Algodão: A principal força impulsionando a demanda por viscose é sua capacidade de substituir o algodão no mercado de fibras têxteis, oferecendo uma alternativa competitiva.

-Correlação com o PIB: O crescimento do mercado de fibras têxteis demonstra uma forte correlação com o crescimento do PIB global, indicando uma demanda crescente à medida que a economia mundial se expande.

(iv) Conclusões:

O estudo conclui que o mercado de celulose solúvel vive um "renascimento" impulsionado pela demanda da indústria têxtil por fibras celulósicas, como a viscose. Essa tendência é sustentada por fatores econômicos globais e pela necessidade de alternativas mais sustentáveis e economicamente viáveis ao algodão e às fibras sintéticas. O potencial de crescimento é significativo.

(v) Desafios Técnicos Mencionados:

Embora o foco do estudo seja mercadológico, ele aponta para o desafio técnico central da indústria: a qualidade e a pureza da celulose. O texto distingue a celulose solúvel do tipo "viscose ou padrão" (com teor de alfacelulose entre 90% e 92%) da celulose "alto-alfa". A capacidade de produzir consistentemente a especificação de pureza exigida para as diferentes aplicações têxteis é um desafio técnico e um fator de competitividade crucial.

Insights e Reflexões para seu TCC (Foco em Análise de Processos)

Com base na análise do estudo e nas tendências atuais do setor, aqui estão três reflexões que podem enriquecer a discussão do seu trabalho:

1. Tendência Tecnológica: Rumo a Processos de Dissolução Mais Verdes (Além da Viscose Tradicional)

Reflexão: O estudo foca no mercado da viscose, que é o processo dominante, mas conhecido por seu impacto ambiental devido ao uso de dissulfeto de carbono (CS_2), um composto tóxico e de difícil manuseio. Uma análise de processo aprofundada deve obrigatoriamente discutir as alternativas.

2. Otimização de Processo: O Papel dos Pré-Tratamentos da Biomassa na Qualidade da Celulose Solúvel

Reflexão: O estudo destaca a importância do teor de alfacelulose ($\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5$)_n. Atingir alta pureza com alto rendimento é um grande desafio de processo. A otimização não está apenas na etapa de cozimento (polpação), mas criticamente nos pré-tratamentos da madeira.

3. Lacuna na Literatura: Bioeconomia Circular e a Valorização de Coprodutos

Reflexão: A produção de celulose solúvel de alta pureza gera, por definição, fluxos de coprodutos, como o licor da pré-hidrólise (rico em hemiceluloses) e o licor preto do cozimento Kraft (rico em lignina). Tradicionalmente, estes são queimados apenas para recuperação de energia e químicos”.

C.2. Considerações sobre a resposta gerada

A utilização da ferramenta de inteligência artificial Gemini foi de grande valia como ponto de partida para a estruturação deste Trabalho de Conclusão de Curso. A análise sintetizada do estudo do BNDES ("BS 38 o renascimento de um mercado") em uma estrutura clara, separando objetivo, metodologia, resultados e desafios, permitiu uma rápida contextualização do cenário mercadológico e a identificação do principal gargalo técnico implícito: a necessidade de controle rigoroso da pureza da celulose. Mais importante, os *insights* sugeridos foram cruciais para nortear a pesquisa, transformando um tema amplo em três vertentes de análise específicas e alinhadas às fronteiras da engenharia química: a comparação de processos de dissolução com foco em sustentabilidade (Viscose vs. Lyocell), a otimização de etapas de pré-tratamento para maximizar a qualidade da fibra, e a aplicação do conceito de biorrefinaria para a valorização de coprodutos, inserindo o trabalho no contexto da economia circular.

Apesar da excelente orientação estratégica, a contribuição da IA apresentou limitações inerentes à sua natureza. A resposta, por ser conceitual, naturalmente não forneceu os dados quantitativos indispensáveis para uma análise de engenharia, como diagramas de fluxo de processo (PFDs), balanços de massa e energia detalhados, condições operacionais específicas (temperatura, pressão, concentrações), ou dados cinéticos das reações. Além disso, a ferramenta não proveu as fontes primárias (artigos científicos, patentes) que sustentam as sugestões, demandando um trabalho subsequente de pesquisa aprofundada na literatura para encontrar as referências necessárias para fundamentar tecnicamente cada capítulo. Portanto, a IA atuou como um roteirizador que acelerou a fase de planejamento e definição de escopo, mas a responsabilidade pela busca, validação e aplicação rigorosa do conhecimento técnico-científico permaneceu, como esperado, a cargo do autor.