



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



**NATÁLIA DOS REIS FILIPIN**

**PROCESSO DE PRODUÇÃO DE CELULOSE: UMA REVISÃO**

**UBERLÂNDIA  
2024**

**NATÁLIA DOS REIS FILIPIN**

**PROCESSO DE PRODUÇÃO DE CELULOSE: UMA REVISÃO**

Monografia de Trabalho de Conclusão de  
Curso apresentado ao curso de Engenharia  
Química da Universidade Federal de  
Uberlândia *Campus* Santa Mônica.  
Orientador: Prof. Dr. Neiton Carlos da Silva

**UBERLÂNDIA**

**2024**

**NATÁLIA DOS REIS FILPIN**

**PROCESSO DE PRODUÇÃO DE CELULOSE: UMA REVISÃO**

Monografia de Trabalho de Conclusão de  
Curso apresentado ao curso de Engenharia  
Química da Universidade Federal de  
Uberlândia *Campus* Santa Mônica.  
Orientador: Prof. Dr. Neiton Carlos da Silva

Uberlândia, 06 de maio de 2024

Banca examinadora:

Prof. Dr. Neiton Carlos da Silva

Orientador

Engenharia Química / FEQUI – UFU

Prof. Dr. Sérgio Mauro da Silva Neiro

Engenharia Química / FEQUI – UFU

Prof. Dr. Danylo de Oliveira Silva

Engenharia Química / FEQUI - UFU

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha gratidão a todos que compartilharam comigo esta jornada acadêmica. Em primeiro lugar, quero agradecer a Deus por Sua orientação constante e por me fortalecer em cada etapa deste caminho. Sou imensamente grata por cada oportunidade, conquista e até mesmo pelos desafios que enfrentei, pois sei que foram oportunidades de crescimento. Sua presença foi a luz que iluminou o caminho em cada desafio enfrentado.

Aos meus amados pais, Sueli e Edgar, meu eterno porto seguro, agradeço por todo amor, apoio e sacrifício dedicados a mim. Vocês são minha fonte de inspiração e motivação para alcançar meus sonhos. Agradeço por compreenderem minha ausência em alguns momentos e por estarem ao meu lado, celebrando cada conquista e me impulsionando nos momentos de dificuldade.

Aos meus queridos avós, em especial Antonieta e Celso (em memória), pelo carinho, sabedoria e incentivo constantes, agradeço por serem minha fonte de conforto e inspiração. Seu legado permanece vivo em mim, sendo uma fonte de força e determinação.

Às minhas irmãs, Maria Eduarda, Sandy e Liliane, obrigada por caminharem ao meu lado nesta jornada chamada vida. Agradeço por estarem sempre presentes, mesmo quando a distância parecia insuperável. Nos planos divinos, não fui agraciada com irmãos de sangue, mas sim com irmãs de coração, um presente que guardarei para toda a eternidade. Obrigada por serem meu suporte, minha alegria e minha família.

Aos meus amigos, em especial Bruna, Yohanna, Bruno, Ana Karoline, Patrick, Sara, Matheus, João Vicente, Adrielle e Ruth, que se tornaram minha segunda família e compartilharam comigo risos, lágrimas e conquistas, agradeço por todo apoio, incentivo e companheirismo ao longo destes anos.

Ao AICHe-UFU que tive o privilégio de fazer parte, expresso minha gratidão por proporcionar uma experiência enriquecedora e desafiadora, que contribuiu significativamente para o meu crescimento pessoal e profissional.

Aos professores, em especial, Neiton, Marcos, Sérgio, Fábio e Danylo que me guiaram, inspiraram e desafiaram ao longo desta jornada acadêmica, agradeço por compartilharem seu conhecimento, experiência e sabedoria, e por acreditarem em meu potencial.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho. Sua presença e apoio foram fundamentais para tornar este sonho realidade. Que possamos continuar compartilhando momentos de sucesso e superação juntos. Muito obrigada.

“O que eu faço é uma gota no meio do oceano. Mas sem ela, o oceano será  
menor.”

(Madre Teresa de Calcutá)

## RESUMO

Este estudo propõe uma revisão bibliográfica sobre o processo de produção de celulose, destacando sua importância na fabricação de uma variedade de produtos, desde papel até itens químicos e têxteis. O Brasil se destaca como o principal produtor global de celulose de fibra curta, aproveitando seu clima favorável para o cultivo em grande escala de eucaliptos, o que resulta em custos mínimos e na presença de grandes indústrias. Esta pesquisa analisou as técnicas empregadas nas fábricas brasileiras, que predominantemente seguem o processo Kraft, envolvendo etapas como descascamento, picagem, cozimento, depuração, branqueamento e recuperação do licor preto. Identificou-se a importância de manter um controle rigoroso de parâmetros como pH, qualidade da madeira, temperatura e concentração de produtos químicos para assegurar a eficácia e qualidade do processo. Além disso, as indústrias de celulose enfrentam desafios relacionados a emissões atmosféricas, resíduos sólidos e poluentes líquidos, demandando tratamento adequado para minimizar os impactos ambientais. A adoção de tecnologias avançadas e práticas sustentáveis é fundamental para mitigar esses desafios e promover o uso responsável dos recursos naturais. Conclui-se que a busca por processos mais eficientes, com redução do consumo de água e energia, bem como a minimização da geração de resíduos e poluentes, é essencial para o desenvolvimento sustentável da indústria de celulose. Por fim, ressalta-se a necessidade contínua de pesquisa e inovação nesse campo, visando o aprimoramento das técnicas existentes e o desenvolvimento de soluções inovadoras, garantindo a viabilidade econômica e ecológica do processo de produção de celulose no futuro.

**Palavras-chaves:** Processo Kraft; resíduos; indústria de celulose; polpa celulósica.

## ABSTRACT

This study proposes a literature review on the cellulose production process, highlighting its importance in the manufacturing of a variety of products ranging from paper to chemical and textile items. Brazil stands out as the leading global producer of short-fiber cellulose, capitalizing on its favorable climate for large-scale cultivation of eucalyptus, resulting in minimal costs and the presence of major industries. This research analyzed the techniques utilized in Brazilian factories, predominantly following the Kraft process, involving stages such as debarking, chipping, cooking, pulping, bleaching, and black liquor recovery. It was identified the importance of maintaining strict control over parameters such as pH, wood quality, temperature, and chemical concentration to ensure process efficacy and quality. Additionally, cellulose industries face challenges related to atmospheric emissions, solid waste, and liquid pollutants, demanding proper treatment to minimize environmental impacts. The adoption of advanced technologies and sustainable practices is crucial to mitigate these challenges and promote responsible use of natural resources. It is concluded that the pursuit of more efficient processes, reducing water and energy consumption, as well as minimizing waste and pollutant generation, is essential for the sustainable development of the cellulose industry. Therefore, the continuous need for research and innovation in this field is emphasized, aiming to enhance existing techniques and develop innovative solutions, ensuring the economic and ecological viability of the cellulose production process in the future.

**Keywords:** Kraft process; waste; cellulose industry; pulp.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Espécies de árvores para extração de fibras.....	6
Figura 2 – Fibras curtas e longas.....	6
Figura 3 – Principais constituintes da madeira.....	7
Figura 4 – Fluxograma de operações de preparação da madeira antes da polpação. ....	8
Figura 5 – Descascador de tambor. ....	10
Figura 6 – Mesa de rolos crivados e sistema de lavagem de toras. ....	11
Figura 7 – Cavaco após passar pelo picador. ....	13
Figura 8 – Picador de disco de múltiplas facas. ....	14
Figura 9 – Ilustração de uma peneira vibratória inclinada. ....	15
Figura 10 – Peneira vibratória. ....	15
Figura 11 – Silo de estocagem de cavacos. ....	16
Figura 12 – Visão geral do processo Kraft de produção de celulose. ....	19
Figura 13 – Digestor contínuo.....	21
Figura 14 – Digestor do tipo batelada (descontínuo). ....	22
Figura 15 – Depurador centrífugo. ....	23
Figura 16 – Polpa durante as etapas de depuração e pré-branqueamento. ....	25
Figura 17 – Celulose branqueada. ....	26
Figura 18 – Desaguamento mecânico da polpa de celulose. ....	27
Figura 19 – Folhas de celulose. ....	27
Figura 20 – Etapas do setor de recuperação química e utilidades ....	28
Figura 21 – Sistema de Evaporação de múltiplos efeitos.....	29
Figura 22 – Caldeira de recuperação química utilizada em indústrias de celulose. ....	30
Figura 23 – Ciclo de caustificação. ....	32
Figura 24 – Tecidos filtrantes utilizados nos filtros de licor. ....	33
Figura 25 – Forno de Cal.....	34
Figura 26 – Ilustração do sistema de vapor. ....	35
Figura 27 – Esquema de um gradeamento manual.....	37
Figura 28 – Ilustração decantador primário circular. ....	38
Figura 29 – Tanque de aeração.....	39
Figura 30 – Resíduos <i>in natura</i> da indústria de celulose (a) <i>dregs</i> e (b) <i>grits</i> . ....	40
Figura 31 – Ilustração do tratamento de lodo.....	41



Figura 32 – Cinzas oriundas da combustão de cascas de eucalipto em caldeira de biomassa de indústria de celulose. .... 42

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>2</b>	<b>OBJETIVO GERAL</b> .....	3
<b>2.1</b>	<b>Objetivos Específicos</b> .....	3
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	3
<b>4</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	4
<b>4.1</b>	<b>História da indústria de celulose</b> .....	4
<b>4.2</b>	<b>Matéria prima e celulose</b> .....	5
<b>4.3</b>	<b>Processo industrial</b> .....	8
4.3.1	Preparação da matéria-prima .....	8
4.3.1.1	Descascamento .....	9
4.3.1.2	Lavagem .....	12
4.3.1.3	Picagem.....	12
4.3.1.4	Classificação e Estocagem.....	14
4.3.2	Polpação.....	16
4.3.2.1	Processo Kraft.....	18
4.3.3	Cozimento .....	19
4.3.4	Depuração .....	22
4.3.5	Branqueamento .....	25
4.3.6	Secagem.....	26
4.3.7	Recuperação Química.....	27
4.3.7.1	Evaporadores de Múltiplos Efeitos.....	29
4.3.7.2	Caldeira de Recuperação Química.....	29
4.3.7.3	Caustificação.....	32
4.3.8	Utilidades.....	34
4.3.8.1	Distribuição de Vapor.....	34
4.3.8.2	Tratamento de Água .....	35
4.3.8.3	Tratamento de Água para Caldeiras .....	36
4.3.8.4	Tratamento de Efluentes .....	36
4.3.9	Resíduos.....	39
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	43
	REFERÊNCIAS .....	44

## 1 INTRODUÇÃO

O século XX testemunhou um intenso desenvolvimento econômico global, impulsionado pela urbanização, crescimento populacional, industrialização e modernização agrícola. Embora esse progresso seja vital para atender às necessidades da sociedade, também trouxe consigo grandes desafios ambientais. Os avanços humanos estão ligados aos recursos fornecidos pelo ambiente natural, o que destaca preocupações crescentes sobre os impactos ambientais resultantes (PINHEIRO, 2008).

Entre as décadas de 1930 e 1970, o processo industrial firmou-se como o principal impulsionador do crescimento econômico no Brasil, consolidando-se diante dos avanços das forças produtivas. Nesse período, a indústria tornou-se o setor primordial da economia nacional. Diante desse cenário, as indústrias demonstram um interesse crescente em desenvolver metodologias alternativas para reduzir seu impacto no meio ambiente (ALCANTARA; LUCENA, 2013).

Entre 1996 e 2008, houve um aumento significativo no valor bruto da produção do setor de celulose e papel no Brasil, passando de R\$ 36,5 bilhões para R\$ 48 bilhões. Durante esse período, a participação da indústria de celulose cresceu em relação à de artefatos de papel, refletindo o foco crescente na produção de celulose voltada para o mercado externo (MONTEBELLO; BACHA, 2011).

Nos últimos, o setor brasileiro de celulose e papel assumiu um papel importante nas exportações do país, impulsionando suas operações de comércio exterior para conquistar novos mercados. Em 2010, esse setor registrou um saldo comercial positivo de US\$ 4,9 bilhões. Além disso, nos últimos dez anos, foram investidos aproximadamente US\$ 12 bilhões no setor. Além disso, cada emprego direto gerado na indústria de celulose está associado à criação de cinco empregos indiretos em atividades relacionadas a esses produtos (MONTEBELLO; BACHA, 2011).

O setor de celulose e papel no Brasil é composto por 220 empresas distribuídas em 540 municípios, presentes em 18 estados do país. Essas empresas geram 128 mil empregos diretos e aproximadamente 640 mil empregos indiretos. Além disso, a indústria de celulose brasileira ocupa o 4º lugar no ranking mundial de fabricantes em termos de volume de produção (ABTCP, 2024).

O método predominante na fabricação de celulose é o processo Kraft, em que cavacos de madeira são digeridos em uma solução alcalina chamada licor branco. Esse processo possibilita a recuperação dos reagentes químicos e a produção de energia a partir do licor preto remanescente. Uma das principais vantagens desse método é sua capacidade de reduzir as perdas químicas e otimizar a eficiência energética (FOELKEL, 2011; REIS, 2013; WENZL, 2012).

A indústria de papel e celulose representa uma das maiores vertentes do setor industrial do país, contribuindo de forma significativa para o crescimento econômico nacional e mantendo uma forte competitividade no mercado internacional (PINHEIRO, 2008; IMAI, 2010). No entanto, as indústrias brasileiras de celulose exercem uma influência no meio ambiente, tanto durante a fase agrícola, caracterizada pela substituição de extensas áreas de floresta nativa por plantações de eucalipto ou pinus, quanto durante os processos industriais, que envolvem alto consumo de água e utilização de produtos químicos. Avaliar o impacto global dessas indústrias no meio ambiente é uma tarefa complexa, principalmente devido aos resíduos resultantes de sua produção (BASTOS; CRUZ, 2017).

Os resíduos gerados pela fabricação de celulose e papel consistem em uma ampla variedade de compostos com diferentes pesos moleculares e características. A composição química desses resíduos é complexa e heterogênea, e as espécies químicas presentes nessa mistura são difíceis de serem definidas devido à sua alta reatividade. Essa reatividade resulta na contínua transformação dos compostos ao longo do tempo (BASTOS; CRUZ, 2017).

Com base no exposto, na sequência apresentam-se os objetivos deste trabalho, relacionados à revisão bibliográfica sobre o processo de produção de celulose e potenciais métodos de tratamento para os resíduos gerados.

## 2 OBJETIVO GERAL

O principal objetivo deste trabalho de conclusão de curso é apresentar, através de uma revisão da literatura de caráter descritivo, o processo industrial de fabricação de polpa celulósica a partir da madeira.

### 2.1 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos, destacam-se:

- investigar as etapas do processo industrial de fabricação de polpa celulósica, desde a matéria-prima até o produto final;
- apresentar o processo produtivo das indústrias de celulose sob a ótica da engenharia química, com foco em equipamentos e tratamento e recuperação de seus resíduos;
- analisar os principais parâmetros que influenciam a qualidade do processo industrial de produção de polpa celulósica, abrangendo características da matéria-prima, como tipo de madeira e umidade, bem como fatores operacionais, como temperatura, tempo de cozimento, visando compreender sua influência na qualidade do produto final.

## 3 METODOLOGIA

Para desenvolver este trabalho, foi realizada uma pesquisa bibliográfica utilizando materiais já disponíveis em plataformas online como Repositório UFU, Google Scholar, Science Direct, entre outras, com o objetivo de compreender tanto a história quanto os aspectos contemporâneos da produção de celulose. Durante essa pesquisa, foram utilizadas palavras-chave relevantes ao tema, tais como "*processo Kraft*" e "*resíduos da indústria de celulose*", bem como termos em inglês, como "*pulp production*" e "*cellulose production waste*", para ampliar o alcance da pesquisa. Consultaram-se artigos científicos, livros e pesquisas a fim de obter uma visão abrangente do processo empregado na indústria de celulose, como serão apresentados nos próximos tópicos.

## 4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 4.1 História da indústria de celulose

A história da celulose começa em 105 d.C., na China, quando o papel foi inventado por T'sai Lun, embora na época sua verdadeira natureza não fosse compreendida. Foi somente em 1838 que o químico francês Anselme Payen descobriu a celulose e determinou sua fórmula química ( $C_6H_{10}O_5$ ). A partir dessa descoberta, iniciou-se um aprimoramento na manipulação da celulose, levando ao desenvolvimento de diversas tecnologias e usos (KLABIN, 2023; VERACEL, 2022).

Um marco importante ocorreu em 1870, com a produção do primeiro termoplástico à base de celulose, que eventualmente deu origem ao *rayon* em 1885 e ao celofane em 1912. O *rayon*, um dos primeiros tecidos artificiais, foi derivado da polpa da madeira e compartilhava características semelhantes ao algodão, como resistência, maleabilidade, suavidade e boa capacidade de absorção, além de ser facilmente tingível (KLABIN, 2023).

Em 1938, outro subproduto da celulose foi descoberto: a lignina. Este componente, que compõe a maior parte da madeira das árvores e arbustos, confere rigidez à parede celular vegetal, unindo-se à celulose. Somente em 1992, cientistas alcançaram um marco significativo ao sintetizar celulose artificialmente, sem depender de enzimas biológicas. Desde então, têm ocorrido extensas pesquisas sobre a celulose, incluindo sua extração de diversos organismos, bem como estudos sobre o reaproveitamento de resíduos sólidos da cadeia agrícola, todos com um foco crescente na sustentabilidade da produção (KLABIN, 2023).

A primeira fábrica de papel no Brasil foi estabelecida em 1852, e durante mais de cem anos, a celulose utilizada nas fábricas de papel foi importada. Com o aumento na produção de papel, surgiram mais instalações fabris de celulose. No entanto, devido às condições desfavoráveis para o desenvolvimento de coníferas, que eram a fonte de celulose de fibra longa, no Brasil, as fábricas tiveram que buscar alternativas. Em 1954, uma solução emergiu com a utilização de 100% de eucalipto para a produção de celulose de fibra curta, que se mostrou altamente adaptável e produtiva no país (LOPES; CONTADOR; 1998).

Graças à sua atividade florestal, o Brasil se tornou o maior produtor e exportador de celulose do mundo em 2022, alcançando marcos históricos que o solidificaram como líder no mercado global. Essa conquista resultou em uma receita anual de R\$ 250 bilhões. A produção de fibra de madeira do país atingiu a marca de 25 milhões de toneladas, representando um

aumento de 10,9% em relação ao ano anterior. Paralelamente, as exportações registraram um crescimento de 22%, totalizando 19,1 milhões de toneladas. Esses dados são fornecidos pela Indústria Brasileira de Árvores (Ibá) (PORTAL CELULOSE, 2023).

O Brasil mantém atualmente cerca de 10 milhões de hectares de áreas cultivadas e conserva 6 milhões de hectares de florestas nativas. Esse desempenho permitiu ao país ampliar sua vantagem em relação ao Canadá, que ocupa a segunda posição no ranking dos maiores exportadores de celulose, conforme relatório da *Food and Agriculture Organization* (FAO). José Carlos Fonseca, diretor-executivo da Ibá, atribui esses avanços a décadas de investimentos em produção, pesquisa e tecnologia (PORTAL CELULOSE, 2023).

## 4.2 Matéria-prima e celulose

O processo de extração de celulose é caracterizado pela conversão da madeira em uma substância fibrosa conhecida como pasta ou polpa celulósica (REIS, 2021). A fonte primária de fibras para a produção de papel vem do reino vegetal. A madeira, é a principal fonte de matéria-prima para a produção de pasta celulósica (MINE *et al.*, 2013; PHILIPP, 1998; SOUZA, 2008). A madeira utilizada nesse processo é obtida de florestas plantadas, seguindo padrões de qualidade que garantem a saúde das árvores, seu crescimento, uniformidade e produtividade (SOUZA, 2008).

A madeira é um material heterogêneo, constituído por uma variedade de células com funções específicas em sua estrutura. Sua composição química, física e anatômica varia de acordo com a espécie, sendo suscetível a modificações influenciadas por fatores genéticos, ambientais e idade (KLOCK *et al.* 2005; TRUGILHO; LIMA; MENDES, 2009). No Brasil, as principais madeiras utilizadas como matéria-prima para a extração da celulose são provenientes das coníferas e das folhosas (BATISTA, 2018; SOUZA, 2008).

As coníferas são espécies vegetais utilizadas no processo de extração de celulose, originárias de regiões de clima frio, como Europa e EUA. No Brasil, as principais espécies são o Pinus e a Araucária. Por outro lado, as folhosas são as principais espécies utilizadas no país, sendo o gênero *Eucalyptus* o mais significativo, originário da Austrália e Tasmânia (IPT, 1988). Na Figura 1 ilustram-se as espécies de madeira mais comuns para produção de celulose no Brasil.

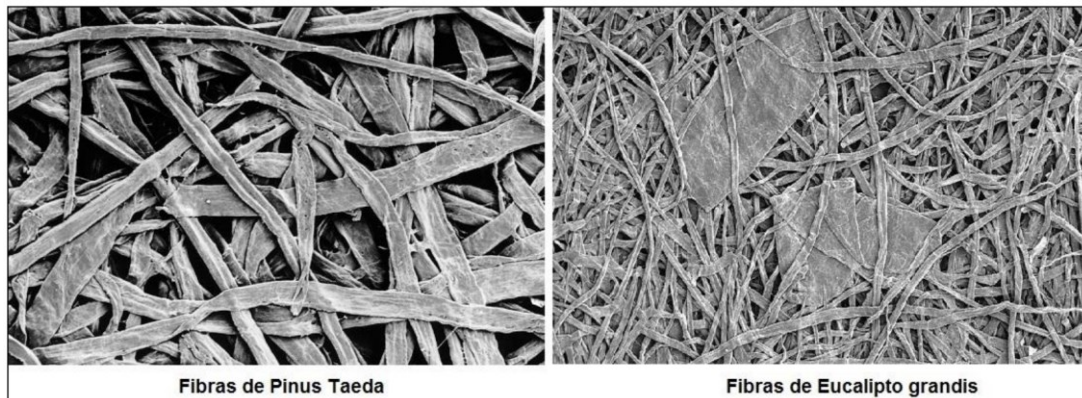
Figura 1 – Espécies de árvores para extração de fibras.



Fonte: REIS (2013).

A celulose de fibra longa, proveniente de espécies coníferas como o pinus, que é cultivado no Brasil, possui um comprimento variando entre 2 e 5 milímetros. Por outro lado, a celulose de fibra curta, com comprimento de 0,5 a 2 milímetros, é principalmente derivada do eucalipto (Figura 2) (MINE *et al.*, 2013).

Figura 2 – Fibras curtas e longas.

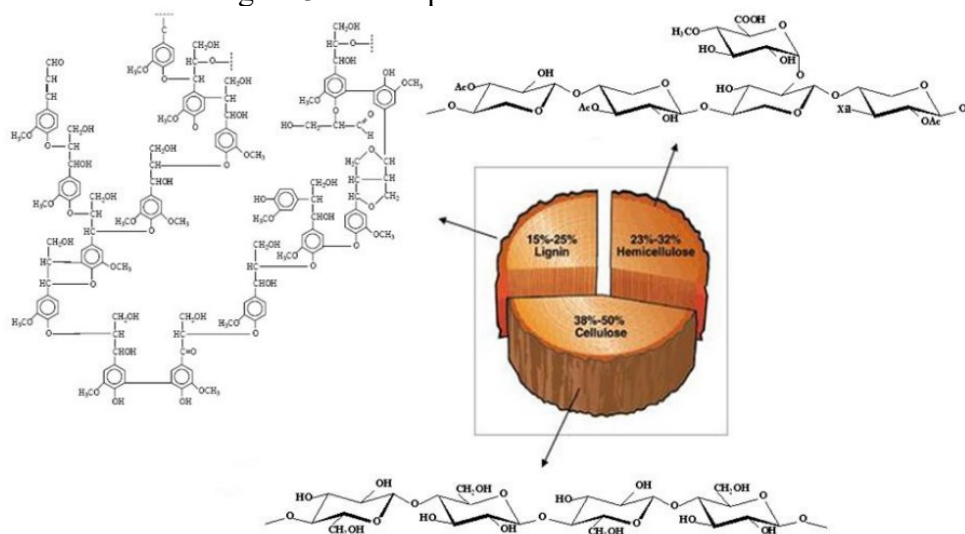


Fonte: REIS (2013).

A madeira, material lignocelulósico, possui uma composição química aproximada de 50% de celulose, 20% de hemiceluloses, de 15 a 35% de lignina e até 10% de constituintes menores (PHILIPP, 1998), como ilustrado na Figura 3.



Figura 3 – Principais constituintes da madeira.



Fonte: MAGATON (2010).

A celulose está distribuída nas raízes, troncos, folhas, frutos e sementes das árvores. Este é um dos elementos principais das células vegetais, frequentemente referidas como "fibras" devido à sua forma alongada e pequeno diâmetro (MINE *et al.*, 2013). A celulose é o principal componente da parte celular da fibra, constituindo-se como um polissacarídeo linear composto por unidades de açúcar do tipo  $\beta$ -D-glicopirranose, caracterizado por alta massa molecular, elevada cristalinidade e baixa solubilidade (FENGEL; WEGENER, 1984).

As hemiceluloses, por outro lado, são polissacarídeos formados por diversos tipos de unidades de açúcar, com estrutura de cadeia ramificada, massa molecular reduzida e falta de cristalinidade, sendo solúveis em soluções aquosas. Já a lignina, um polímero amorfo com composição química complexa, proporciona firmeza e rigidez à matriz de celulose (IPT, 1988).

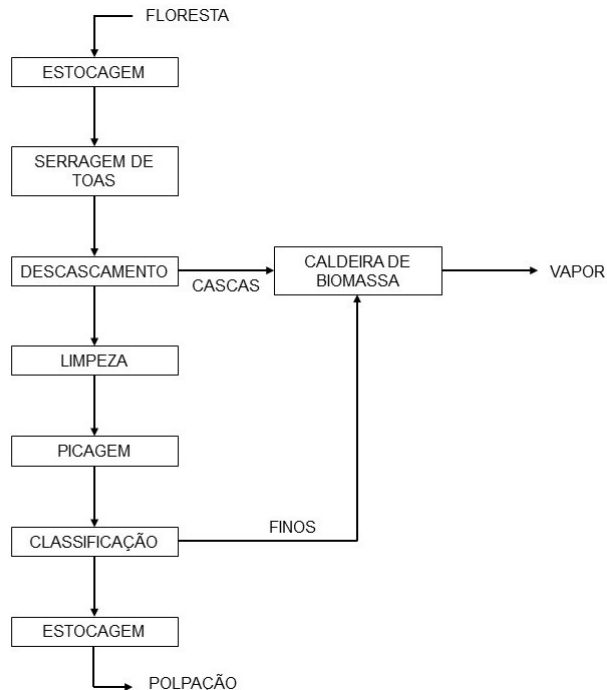
A produção da pasta celulósica para a fabricação de papéis ou outros usos envolve a separação das fibras dos demais constituintes presentes nos organismos vegetais, especialmente a lignina. A lignina atua como um agente cimentador, unindo as células e conferindo rigidez à madeira. A pasta celulósica resultante do processo é então utilizada na fabricação de papel, viscose (fios), nitrocelulose, entre outros produtos (MINE *et al.*, 2013).

### 4.3 Processo industrial

#### 4.3.1 Preparação da matéria-prima

O pátio de madeiras engloba as etapas de manuseio e preparação da madeira, desde o momento em que ela chega à fábrica até o instante em que é encaminhada para a área de polpação. A madeira pode ser recebida na fábrica tanto na forma de cavacos quanto de toras, com ou sem casca. O transporte da região florestal até a fábrica é realizado por meio de diversos modos, como transporte ferroviário, fluvial e, principalmente, rodoviário. Após a chegada à fábrica, a madeira pode ser processada imediatamente ou, então, armazenada em estoque para uso futuro. No entanto, antes de ser encaminhada ao processo de polpação, passa por uma série de suboperações com o objetivo de fornecer a madeira na forma e pureza almejadas, em quantidade constante e suficiente, como mostrado na Figura 4 (PHILIPP, 1998).

Figura 4 – Fluxograma de operações de preparação da madeira antes da polpação.



Fonte: Adaptado de Phillip (1998).

Nesse contexto, as matérias-primas entregues, incluindo caules, toras e cavacos, devem ser armazenadas de maneira distinta. Durante o período de estocagem, medidas específicas são fundamentais para minimizar as perdas ocasionadas pela deterioração, a qual está diretamente relacionada ao tempo de armazenamento e às condições climáticas. A

deterioração microbiológica pode acarretar perdas significativas na madeira, comprometendo suas propriedades de resistência das fibras e causando descoloração, resultando em desvantagens no processamento subsequente e perdas econômicas (SIXTA, 2006).

Atualmente, após a colheita, é comum empilhar e armazenar a maioria das toras nas florestas. Essas toras são posteriormente transportadas para a fábrica, e a duração média de armazenamento no pátio de madeiras de uma fábrica de celulose pode variar. As condições de armazenamento das toras têm um impacto direto na capacidade de processamento dos materiais de madeira durante as fases de polpação e branqueamento (SIXTA, 2006), que serão explicados posteriormente. Foram registradas diferenças significativas na necessidade de produtos químicos de branqueamento entre toras com teores distintos de umidade. A produção de celulose a partir de toras com baixa umidade exigiu um acréscimo considerável, variando entre 60% e 300%, na quantidade de produtos químicos de branqueamento para atender aos padrões estabelecidos, quando comparada à polpa derivada de toras com maior umidade (SIXTA *et al.*, 2004).

#### 4.3.1.1 Descascamento

A madeira destinada à produção de celulose é comumente submetida ao processo de descascamento. Isso se deve ao fato de que a casca, apesar de conter fibras utilizáveis em quantidades relativamente reduzidas, apresenta desvantagens significativas. Um teor elevado de casca nos cavacos resulta em menor rendimento, períodos prolongados de cozimento, aumento do consumo de produtos químicos durante a etapa de branqueamento e, por fim, compromete as propriedades da polpa (PHILIPP, 1998; SIXTA, 2006).

A facilidade para remover a casca da madeira está ligada à sua forma ou geometria superficial. Em casos em que a madeira apresenta uma configuração tortuosa, superfície rachada ou tocos resultantes de galhos, o processo de descascamento torna-se difícil. Isso ocorre porque a técnica comumente utilizada para remover a casca envolve o atrito entre as toras e superfícies metálicas. A quantidade de energia necessária para separar a casca das partes internas da madeira varia conforme a espécie de madeira, a estação do ano e as condições de armazenamento antes do descascamento. Toras excessivamente secas podem dificultar a operação. Em geral, não há normas predefinidas que estabeleçam a eficácia do processo de descascamento. Cada fábrica define seus próprios padrões, influenciados pelas necessidades específicas do produto e pelos equipamentos disponíveis (PHILIPP, 1998).

Foram desenvolvidas várias abordagens para remover a casca da madeira, originando diferentes tipos de equipamentos. Dentre essas opções, é essencial considerar os seguintes fatores: o volume de madeira a ser descascado, as espécies utilizadas, as condições climáticas, a disponibilidade de mão de obra e energia, os custos relacionados aos equipamentos e à instalação, os custos operacionais e a eficiência no processo de descascamento. O objetivo consiste em remover a casca por completo, preservando as fibras e a integridade da madeira, minimizando danos nas extremidades da tora causados por pressão excessiva do equipamento e garantindo um elevado rendimento (GOLDIE, 2003; PHILIPP, 1998).

O equipamento descascador mais utilizado é o descascador de tambor, como mostrado na Figura 5. Nele, a madeira é continuamente introduzida em um tambor cilíndrico rotativo com ranhuras. Esses descascadores são normalmente inclinados e giram de forma lenta, promovendo impactos das toras entre si e entre elas e as paredes do tambor, resultando na remoção da casca. A dimensão desses tambores pode variar, sendo o diâmetro escolhido de acordo com o comprimento das toras a serem descascadas (SENAI, 2013).

Figura 5 – Descascador de tambor.



Fonte: DEMUTH (2024a).

Embora o descascamento úmido proporcione uma limpeza mais eficaz, o descascamento a seco é mais prevalente na indústria devido aos seus custos mais baixos por metro cúbico descascado. O processo de descascamento úmido demanda tambores mais longos, com maior diâmetro, além de exigir equipamentos adicionais para o tratamento de

efluentes, assim como a geração de água quente ou vapor. O descascamento a seco, por sua vez, evita os desafios de poluição inerentes ao sistema úmido (KOCH, 1982).

A morfologia da casca de cada variedade de madeira também requer um tratamento de descascamento distinto. No processo de descascamento do eucalipto, aproximadamente 20-30% da casca é removida no descascador do tipo tambor, enquanto o restante, que permanece aderido às toras, é retirado pelo sistema chamado mesa de rolos crivados (Figura 6). Esse transportador de saída elimina a casca remanescente por meio de espaçamentos entre os rolos. As toras descascadas são deslocadas lateralmente por rolos reversos e vibratórios, possibilitando que a casca solta do eucalipto se desprenda pelas aberturas (ANDRITZ, 2004).

Figura 6 – Mesa de rolos crivados e sistema de lavagem de toras.



Fonte: ZANELLA (2024).

Se a madeira passa pelo processo de descascamento na floresta, a casca permanece no local, enriquecendo o solo por meio da formação de húmus. No entanto, as indústrias de celulose que realizam o descascamento em suas instalações enfrentam um desafio adicional: lidar com o volume de casca gerado, que representa de 10 a 20% do total de madeira processada. Atualmente, as fábricas utilizam essa casca como combustível em suas caldeiras para gerar o vapor necessário no processo. O poder calorífico desse combustível é logicamente influenciado pelo teor de umidade (PHILIPP, 1998).

#### 4.3.1.2 Lavagem

Algumas atividades são realizadas com o intuito de adaptar as toras aos equipamentos que as receberão ou garantir o eficiente desempenho destes. Entre essas operações, destaca-se a lavagem, executada por chuveiros acoplados às esteiras transportadoras (Figura 6), antes e/ou após o processo de descascamento, com a finalidade de eliminar a maior quantidade possível de areia ou terra que tenha se acumulado durante a manipulação das toras na floresta ou no pátio (SENAI, 2013; ZANELLA, 2024).

A areia, por ser um material abrasivo, tem o potencial de causar desgaste ou até mesmo danificar as facas do picador, daí a necessidade de sua remoção durante a lavagem. Além disso, é feita a identificação e remoção de materiais metálicos que possam estar presentes junto das toras. A detecção de metais é realizada por meio de dispositivos acoplados às esteiras transportadoras, sendo os mais comuns aqueles que interrompem o sistema de transporte até que o metal seja removido. A remoção pode ocorrer de forma manual ou por meio de eletroímãs, que retêm os metais. A presença de metais apresenta um risco potencial de desgaste ou danos às facas do picador utilizado no processamento das toras de madeira (SENAI, 2013).

#### 4.3.1.3 Picagem

O procedimento de picagem consiste em reduzir as toras de madeira em fragmentos (Figura 7) com dimensões que favorecem a penetração do licor de cozimento empregado em processos químicos e semiquímicos e afeta o processo de polpação, influenciando diretamente o tempo de cozimento. O tamanho ideal pode variar conforme a espécie de madeira em questão. Simultaneamente, os cavacos resultantes são um material facilmente transportável, seja por correias ou através de sistemas pneumáticos. A qualidade do cavaco é influenciada por diversos fatores essenciais, tais como a direção e velocidade da entrada da tora no picador, os ângulos de corte das facas, a velocidade de corte (com alta velocidade resultando em maior produção e quantidade significativa de finos) e a necessidade de uma troca regular das facas (PHILIPP, 1998; SENAI, 2013; SIXTA, 2006).

Figura 7 – Cavaco após passar pelo picador.



Fonte: BRASIL (2024a).

Em lotes contendo cavacos de tamanhos diversos, a absorção excessiva e reações colaterais nos cavacos menores podem atrasar o processo de deslignificação dos cavacos maiores, levando ao esgotamento dos produtos químicos presentes no licor que penetra os cavacos. Durante a etapa de picagem, é importante minimizar os danos tanto à madeira quanto às fibras. A extensão dos cavacos deve ser adaptada às características específicas do comprimento da fibra de cada espécie, visando alcançar propriedades ideais. O tamanho dos cavacos representa um equilíbrio entre o dano mecânico causado pelo processo de corte e a eficácia da impregnação do licor (KOCH, 1982).

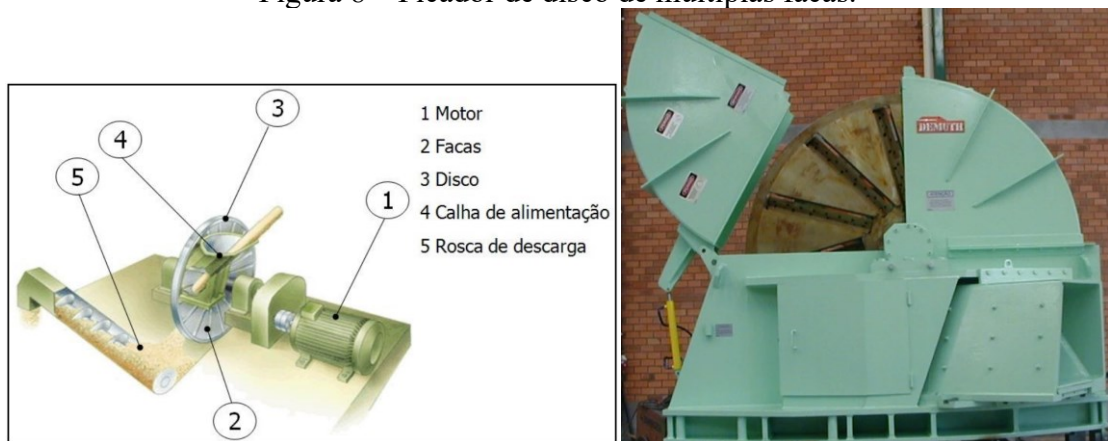
A produção de cavacos pode ser feita por meio de máquinas especialmente projetadas, cujo consumo de energia está diretamente vinculado à direção de corte escolhida, à geometria da faca (especialmente o ângulo de inclinação), à afiação da faca e às características da madeira, como teor de umidade e temperatura. É inevitável que o processo de picagem ocasione danos nas fibras da madeira. Os cavacos de alta qualidade apresentam uma superfície nitidamente cortada, sem fibras arrancadas ou cortadas. Superfícies ásperas e fraturas resultam de forças como cisalhamento, compressão e flambagem, podendo ocorrer tanto na lamela média entre fibras adjacentes quanto dentro da parede celular, entre camadas específicas. Essas falhas podem proporcionar vias adicionais para a penetração de líquidos químicos durante a polpação, resultando em aumento do inchaço da parede celular, hidrólise substancial e, por fim, na diminuição da resistência da fibra (PATT, 1998).

A madeira colhida precocemente, com paredes mais finas, é mais suscetível a esses danos do que a madeira colhida tardiamente, que possui paredes mais espessas. Para otimizar

os resultados, é essencial controlar rigorosamente o processo de picagem, substituir regularmente as facas desgastadas do picador e manter todo o maquinário em excelente estado de conservação (PATT, 1998).

Existem basicamente dois tipos de picadores: os de disco com múltiplas facas (mais comuns) e os de tambor (PHILIPP, 1998). A obtenção dos cavacos ocorre por meio do impacto das toras nas facas do disco, sendo estes posteriormente removidos por fendas localizadas atrás do disco. As facas necessitam de trocas frequentes para afiação, sendo que a periodicidade pode variar de acordo com a espécie de madeira e suas características específicas que estão sendo processadas (SENAI, 2013). Na Figura 8 representa-se um picador de disco.

Figura 8 – Picador de disco de múltiplas facas.



Fonte: REIS (2013) e DEMUTH (2024b).

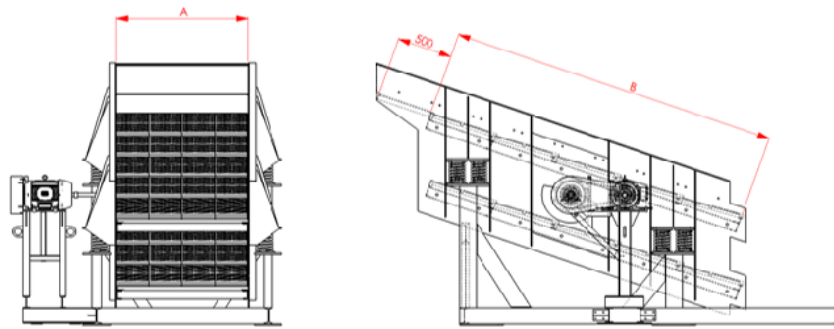
#### 4.3.1.4 Classificação e Estocagem

Os cavacos provenientes dos picadores apresentam uma diversidade de tamanhos e espessuras, o que pode acarretar problemas de qualidade e eficiência econômica no processo de polpação. A obtenção de um tamanho uniforme dos cavacos é importante para assegurar a homogeneidade do processo. O processo de classificação pode ser realizado pela espessura ou pelo comprimento dos cavacos, sendo o último a forma mais comum (SENAI, 2013).

A classificação por comprimento é feita através de peneiras (Figura 9 e Figura 10) e consiste em um conjunto de três peneiras vibratórias sobrepostas, cada uma com aberturas diferentes. Os cavacos retidos na primeira peneira, considerados superdimensionados ou grandes (*over size*), precisam passar por um repicador antes de retornarem ao processo, ou podem ser processados separadamente em condições especiais (SENAI, 2013).



Figura 9 – Ilustração de uma peneira vibratória inclinada.



Fonte: METAMEC (2024).

Figura 10 – Peneira vibratória.



Fonte: BRASIL (2024b).

Os cavacos retidos na segunda peneira, denominados de *aceite* e considerados ideais (*medium size*), são encaminhados para o setor de estocagem ou diretamente para o processo de polpação. Aqueles retidos na terceira peneira, caracterizados como finos (*under size*), são processados de forma separada ou direcionados para a cadeia de biomassa, onde serão utilizados como combustível. Os cavacos *medium size*, devidamente classificados, podem ser conduzidos para o sistema de estocagem ou encaminhados diretamente ao processo de polpação por meio de correias transportadoras, sendo estas de modelos abertos ou fechados. Para retirar esses cavacos do sistema de estocagem e transportá-los até o processo de polpação, são empregadas roscas extratoras (SENAI, 2013).

O objetivo do sistema de estocagem é assegurar um fluxo contínuo de matéria-prima para o setor de polpação. A armazenagem dos cavacos pode ser realizada por meio da

formação de pilhas ou por intermédio de silos, como mostrado na Figura 11. O armazenamento oferece a vantagem de disponibilidade contínua de cavacos, independentemente do funcionamento dos equipamentos, como descascadores, picadores, entre outros. (PHILIPP, 1998; SENAI, 2013).

Figura 11 – Silo de estocagem de cavacos.



Fonte: LIPPEL (2024).

#### 4.3.2 Polpação

A polpação refere-se ao processo de separação das fibras presentes na matéria-prima, geralmente madeira, para obter a pasta ou polpa celulósica. Esses processos podem ser categorizados com base na energia utilizada para a separação das fibras ou no rendimento do processo, dividindo-se principalmente em processos mecânicos e químicos (KLOCK; ANDRADE; HERNANDES, 2013; SENAI, 2013; SOUZA, 2008).

Os processos de alto rendimento envolvem a extração da polpa por meio do uso predominante de energia mecânica, com mínima ou nenhuma intervenção de energia química. Esses processos geralmente alcançam rendimentos superiores a 80%. Exemplos tradicionais incluem o processo mecânico convencional, o processo termomecânico e o processo termoquímico-mecânico. Os processos semiquímicos consistem em tratar a matéria-prima inicialmente com produtos químicos, seguido por um tratamento mecânico subsequente. Já os processos químicos são empregados exclusivamente para a obtenção de pasta ou polpa celulósica, sendo que a matéria-prima é tratada apenas com soluções ácidas ou alcalinas (KLOCK; ANDRADE; HERNANDES, 2013; SENAI, 2013; SOUZA, 2008).

O método mecânico é o mais antigo, desenvolvido por volta de 1840, e envolve a obtenção da fibra a partir da madeira, que pode ser descascada e desintegrada por aparelhos especiais conhecidos como *grinders*, no caso de toras, ou transformada em cavacos para posterior processamento em moinhos ou refinadores de disco. Contudo, esse método apresenta problemas em relação à qualidade do produto final, chamado pasta mecânica, pois a maioria das fibras é danificada, resultando em um produto de baixa qualidade. Uma vantagem é o rendimento elevado, atingindo cerca de 95%, e sua aplicação pode ser direcionada para a produção de papéis que não exigem brilho, tais como papel de jornal, revistas, papelão, catálogos e papel absorvente (guardanapos, toalhas etc.). Caso seja necessário produzir papéis com essa fibra, é preciso submetê-los a um processo de branqueamento (BARRICHELO; BRITO, 1979; SOUZA, 2008).

Os processos termomecânicos e termoquímico-mecânicos são semelhantes ao processo mecânico, diferindo na combinação de temperatura com compostos químicos, visando reduzir a necessidade de energia mecânica ao final dos procedimentos. No método termomecânico, é usado a vaporização na madeira com a intenção de amolecê-la com temperaturas de até 130 °C, sendo posteriormente desfibrada por meio de energia mecânica. No processo termoquímico-mecânico, a madeira é submetida a compostos químicos, como a soda cáustica (NaOH), por algumas horas, seguido por tratamento térmico, a temperaturas entre 100 e 130 °C, para amolecimento, sendo então desfibrada mecanicamente. Nesses processos, o rendimento varia entre 80% e 90%, e, assim como no processo mecânico, a fibra precisa passar por um processo de branqueamento para ser utilizada na fabricação de papel (BARRICHELO; BRITO, 1979; KLOCK; ANDRADE; HERNANDES, 2013; SOUZA, 2008).

O processo semiquímico combina tanto energia mecânica quanto energia química, sendo que o consumo de energia mecânica é ainda menor do que nos métodos termomecânicos e termoquímico-mecânicos. Nesse processo, os cavacos de madeira são impregnados com compostos de sulfito de sódio ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ) a uma temperatura de aproximadamente 170 °C, mantendo um pH próximo da neutralidade. Essa abordagem resulta na dissolução da lignina e dos carboidratos, facilitando a separação das fibras por meio da aplicação de energia mecânica (KLOCK; ANDRADE; HERNANDES, 2013).

No Brasil, a maioria das empresas opta por processos químicos na fabricação de produtos celulósicos, sendo o método Kraft adotado em cerca de 90% das unidades fabris. Em escala global, o método Kraft é extraordinariamente popular, respondendo por

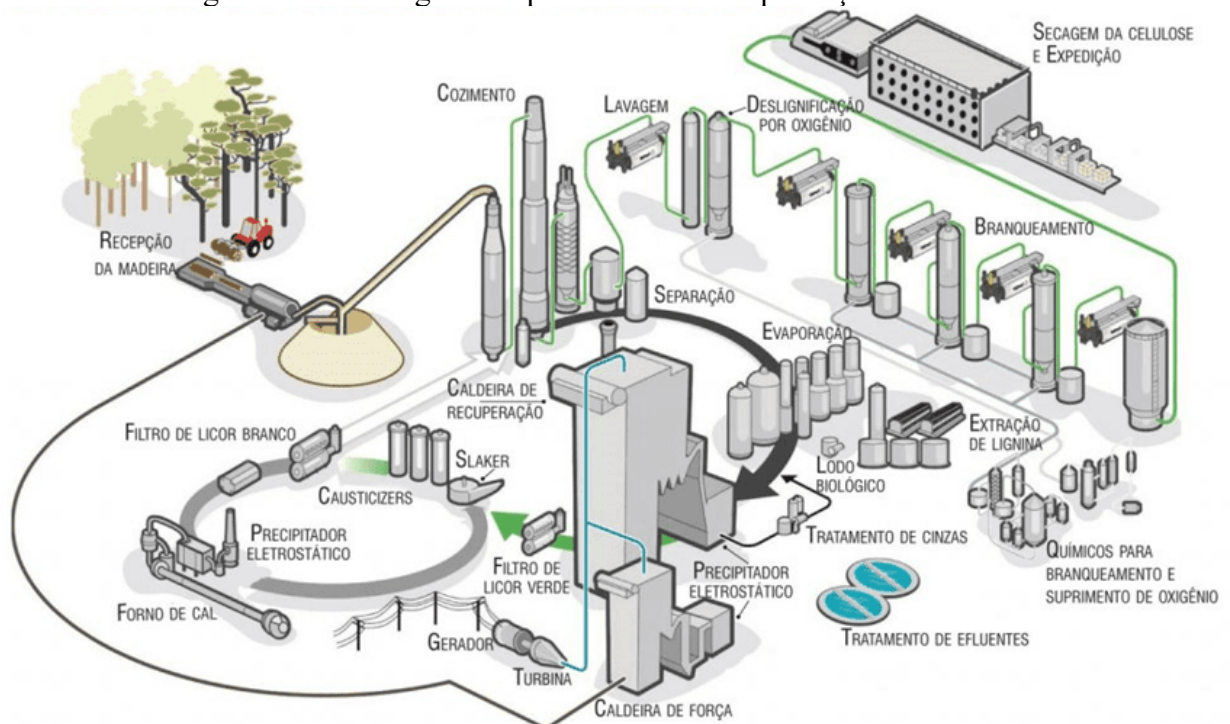
aproximadamente 95% da produção mundial de celulose química. A preferência da indústria por esse método é atribuída ao fato de que, embora o método mecânico apresente um rendimento superior (90-95%), ele resulta em uma fibra de qualidade consideravelmente inferior em comparação ao método Kraft, que oferece uma alta qualidade (FOELKEL, 2006; KAMALI; KHODAPARAST, 2015; MAEDA; EPITÁGORAS; HELTON, 2010).

#### 4.3.2.1 Processo Kraft

Como citado anteriormente, o método mais amplamente adotado nas indústrias de papel e celulose no Brasil é o processo sulfato, conhecido como "Kraft". Esse processo envolve a separação das fibras de celulose dos demais componentes da madeira, como lignina, polissacarídeos, carboidratos, entre outros, em um ambiente alcalino. Em resumo, os cavacos de madeira preparados anteriormente são continuamente introduzidos em um digestor, onde são aquecidos com o licor de cozimento. O licor de cozimento é composto principalmente por uma solução aquosa de hidróxido de sódio (NaOH) e sulfeto de sódio (Na<sub>2</sub>S), numa proporção molar aproximada de 5 para 2. (CARDOSO, 1998).

O processo Kraft oferece diversas vantagens, como flexibilidade em relação às espécies de madeira utilizadas, tempos de cozimento mais curtos, possibilidade de alcançar altos níveis de alvura em polpas branqueadas, menor degradação das fibras e recuperação eficiente do licor resultante do cozimento, tornando-o economicamente viável. No entanto, apresenta desvantagens, como elevados custos de investimento na construção da fábrica, odor desagradável dos gases produzidos, baixa alvura na polpa não branqueada, baixo rendimento no processo de cozimento e custos elevados no branqueamento da polpa (SENAI, 2013). Representa-se na Figura 12, de forma geral, o processo Kraft.

Figura 12 – Visão geral do processo Kraft de produção de celulose.



Fonte: TERMOBLOG (2023).

#### 4.3.3 Cozimento

Os cavacos de madeira são aquecidos em um vaso de pressão conhecido como digestor, conforme citado anteriormente. Nesse processo, os cavacos passam por uma etapa de solubilização, na qual a lignina é removida através da aplicação de produtos químicos, conhecidos como licor de cozimento. Esse licor é uma solução aquosa composta por hidróxido de sódio e sulfeto de sódio. O controle preciso da quantidade de licor, sua concentração, a umidade dos cavacos, bem como a temperatura e pressão dentro do digestor, são fundamentais para assegurar a eficácia do processo (SENAI, 2013). O digestor representa o componente central na fábrica de papel e celulose. A etapa de cozimento pode apresentar uma variação de 30 minutos a mais de 3 horas e pode ser conduzida tanto em batelada quanto de forma contínua (MATOS, 2018).

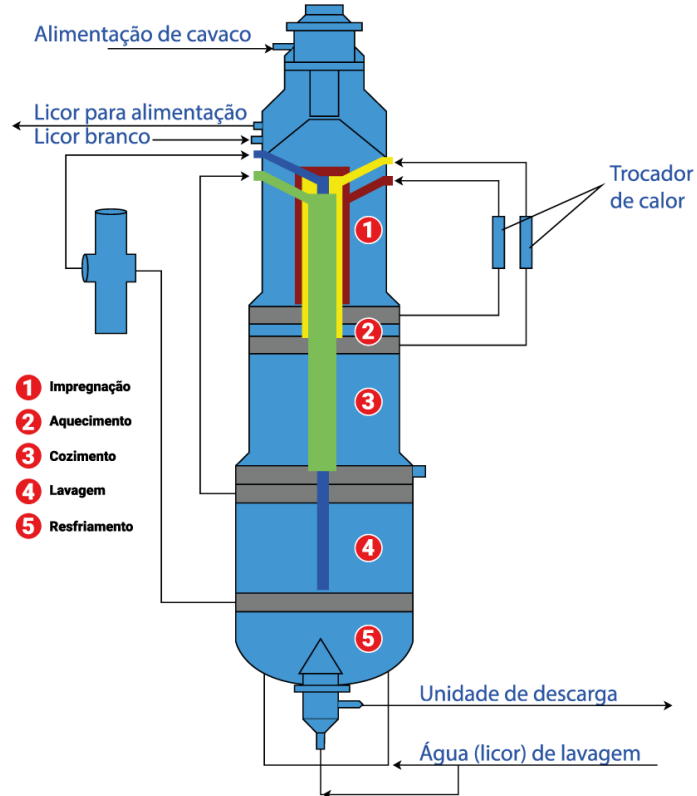
O tempo de cozimento é determinado com base no grau de deslignificação, medido pelo número Kappa (NK). Este número indica o nível de deslignificação alcançado durante o processo de cozimento, sendo que valores mais altos indicam maior quantidade de lignina residual na polpa marrom extraída pelo digestor. Um controle eficaz do número Kappa (NK) durante a polpação tem impacto na redução do uso de produtos químicos no processo de branqueamento da polpa e na produção de licor preto. Geralmente, a polpa extraída dos

digestores contém cerca de 2-3% de lignina residual, correspondendo a um NK entre 13 e 20. Esta quantidade é suficiente para conferir à polpa celulósica obtida uma coloração marrom característica (MACEDO, 2006).

O digestor contínuo é um reator tubular vertical onde acontecem as reações de deslignificação nos cavacos de madeira, operando em condições de alta temperatura e pressão. Os cavacos movem-se em um fluxo descendente, passando por uma deslignificação gradual, resultando na saída do equipamento na forma de polpa. Dentro do digestor, coexistem as fases sólida, líquida e vapor. A produção de papel e celulose está relacionada aos fenômenos de transferência de calor e massa, além da evolução das reações químicas (BATISTA, 2018). O processo de cozimento nos digestores contínuos é subdividido em cinco etapas: impregnação, aquecimento, cozimento, lavagem e resfriamento, como mostrado na Figura 13. Durante a etapa de impregnação, há a introdução do licor nos interstícios do cavaco, otimizando a eficiência do cozimento. No processo de aquecimento, a temperatura é gradualmente elevada por meio de um sistema de circulação forçada com um trocador de calor, até alcançar a temperatura necessária para o cozimento, podendo variar de 150 a 170 °C. A fase de cozimento é uma reação exotérmica na qual ocorre a deslignificação, e variáveis como tempo de cozimento, temperatura, sulfidez do licor, composição química da madeira e concentração podem influenciar significativamente (BATISTA, 2018; MACEDO, 2006).

A etapa de lavagem tem como objetivo retirar o licor preto por meio de lavagem e filtragem, enquanto o resfriamento atua na redução da temperatura da polpa, além de ajustar a diluição na saída do digestor (BATISTA, 2018). Após cozimento, resfriamento e diluição, os cavacos são descarregados uniformemente pelo fundo do digestor (MATOS, 2018).

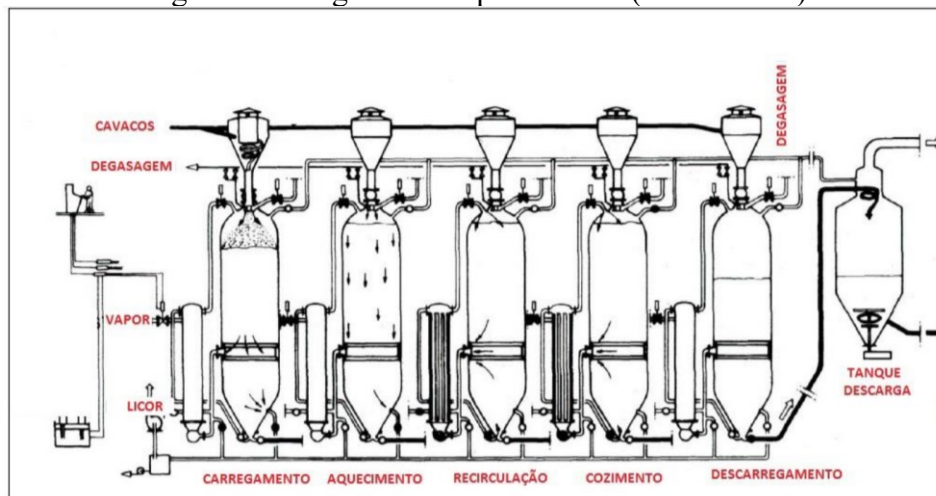
Figura 13 – Digestor contínuo.



Fonte: BRASIL (2024c).

Nos digestores descontínuos (Figura 14) o processo de cozimento é realizado em bateladas e divide-se nas seguintes etapas: introdução de cavacos pela parte superior do digestor, adição de licor, aquecimento, liberação de gases e descarga. No entanto, a etapa de aquecimento pode ser subdividida em duas abordagens: aquecimento direto ou indireto. No digestor com aquecimento direto, o vapor é introduzido na base do equipamento. Já no digestor com aquecimento indireto, o processo consiste em retirar o licor do digestor por meio de uma bomba de circulação, aquecê-lo em um trocador de calor e devolvê-lo ao digestor (BATISTA, 2018).

Figura 14 – Digestor do tipo batelada (descontínuo).



Fonte: REIS (2013).

É fundamental realizar a homogeneização do sistema, que pode ocorrer com ou sem circulação forçada. Na circulação forçada, o licor é retirado por sucção, geralmente a partir do ponto médio do digestor, e reintroduzido no sistema pelos pontos superior e inferior do equipamento. A vantagem desse método é a uniformidade que proporciona ao produto, resultando em uma maior qualidade. Por outro lado, no digestor sem circulação forçada, a circulação do licor ocorre apenas por convecção natural (BATISTA, 2018).

Após o cozimento, a polpa é descarregada para o “*blow tank*” ou tanque de estocagem sob pressão atmosférica. Essa etapa permite o armazenamento temporário da polpa antes de proceder para as etapas seguintes. O *blow tank* é responsável por manter a polpa em condições adequadas para o próximo estágio do processo (SANTOS, 2005).

A polpa, após a separação do licor de cozimento, passa por um processo de lavagem. O licor de cozimento utilizado, conhecido como licor preto, é direcionado para o armazenamento, onde aguarda a recuperação das substâncias dissolvidas através do processo de recuperação química, possibilitando sua reutilização no processo (SHREVE; BRINK Jr., 2008).

#### 4.3.4 Depuração

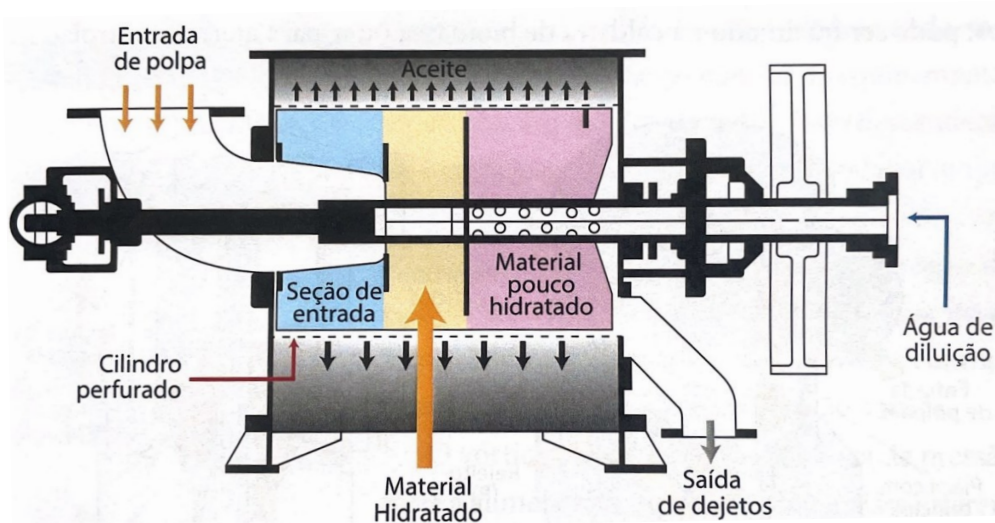
A polpa, produzida no digestor contínuo ou em processo batelada, é caracterizada por uma coloração marrom e contém constituintes indesejáveis que podem causar danos a equipamentos ou comprometer a qualidade do produto final. Por esse motivo, é essencial realizar a separação mecânica dessas impurezas por meio de sistemas de depuração e limpeza da polpa, adequados ao tipo de produto desejado (CAMPOS, 2011).



Os constituintes indesejáveis presentes na polpa, nessa fase inicial do processo, podem ser basicamente de natureza fibrosa e não fibrosa. Os constituintes de natureza fibrosa incluem cavacos não cozidos, feixes de fibras, palitos e nós. Já os constituintes de natureza não fibrosa abrangem os metálicos, como porcas, parafusos, grampos, pedaços de chapas, ferrugem de encanamentos, entre outros, e os não metálicos, como pedras, areia, abrasivos, vidros, plásticos, cascas, argamassa dos tanques, azulejos, entre outros (CAMPOS, 2011). Geralmente, entre 50% e 80% das impurezas mencionadas possuem dimensões maiores que as fibras, enquanto 1% a 2% são menores; o restante compreende impurezas com dimensões intermediárias ao tamanho das fibras. O conhecimento dessas dimensões é importante para a seleção adequada do tipo e das características dos equipamentos necessários para a separação dos contaminantes, conhecidos como depuradores, como ilustrado na Figura 15 (SENAI, 2013).

Os processos de depuração podem ser categorizados em depuração grossa e depuração fina, dependendo das dimensões dos contaminantes. A depuração grossa é responsável por remover contaminantes evidentes e grandes, geralmente de fácil remoção. Por outro lado, a depuração fina é destinada a retirar contaminantes menores, garantindo que o produto alcance o grau desejado de pureza, sem perdas significativas de fibras. Geralmente, esse processo de depuração fina é conduzido em vários estágios para otimizar a qualidade final do produto (SENAI, 2013).

Figura 15 – Depurador centrífugo.



Fonte: SENAI (2013).

Existem dois principais tipos de depuradores, sendo caracterizados pelos métodos de separação de partículas: aqueles que as separam com base em tamanho e forma, e aqueles que as separam pelo peso específico. O primeiro tipo inclui as peneiras, que podem ser atmosféricas ou pressurizadas, equipadas com chapas perfuradas contendo furos redondos ou ranhuras. Já o segundo tipo compreende os separadores centrífugos em formato de cone, nos quais as impurezas (como areia e partículas metálicas) geralmente possuem peso específico maior do que o da matéria-prima fibrosa. No caso dos depuradores tipo peneira, a eficiência do processo depende de parâmetros relacionados à operação (como tipo de polpa, velocidade através dos furos ou ranhuras, tipo e quantidade de impurezas, taxa de rejeito, consistência da polpa, pressão diferencial, temperatura etc.), e ao equipamento (*design* do rotor, espaçamento entre "foil" e cesto, potência instalada, perfil da superfície do cesto, tamanho da ranhura, diâmetro do furo etc.) (CAMPOS, 2011).

A polpa depurada passa por um processo de lavagem antes de ser encaminhada para a etapa de deslignificação com oxigênio. A deslignificação com oxigênio, também conhecida como pré-branqueamento, é uma extensão do processo de cozimento, visando reduzir o consumo de reagentes mais caros nas fases subsequentes de branqueamento. Nesse estágio, aproximadamente 30-50% da lignina residual da polpa marrom, proveniente dos digestores, é removida. O pH alcalino é mantido através da adição de uma solução de hidróxido de sódio (NaOH) ou do uso de licor branco oxidado (REIS, 2013).

Posteriormente, a polpa deslignificada passa por uma lavagem para remover os produtos químicos solubilizados durante o processo de cozimento e o tratamento com oxigênio. Esse procedimento de lavagem visa utilizar a quantidade mínima de água possível e envolve diversos equipamentos, como filtros rotativos a vácuo, filtros pressurizados e mesas de lavagem. Após essa etapa, a polpa apresenta aproximadamente 1,6% de lignina residual e é encaminhada para o setor de branqueamento. O licor preto gerado durante os processos de cozimento, lavagem e pré-branqueamento é armazenado e direcionado para o ciclo de recuperação de produtos químicos, onde será utilizado como combustível na caldeira de recuperação (REIS, 2013). Na Figura 16 ilustra-se a progressão da polpa desde sua saída do processo de digestão, passando pela primeira etapa de lavagem e até o pré-branqueamento com oxigênio.

Figura 16 – Polpa durante as etapas de depuração e pré-branqueamento.



Fonte: REIS (2013).

#### 4.3.5 Branqueamento

O branqueamento da polpa celulósica constitui um tratamento físico-químico com o objetivo de aprimorar a pureza e as propriedades ópticas da polpa. Esse processo é conduzido em estágios múltiplos, visando otimizar a utilização dos reagentes químicos e preservar ao máximo as propriedades de resistência da polpa, obtendo níveis excelentes de “alvura” para a polpa branqueada (DENCE; REEVE, 1996).

A coloração das pastas de celulose é atribuída aos derivados de lignina formados durante o processo de polpação e que permanecem na polpa. A intensidade da cor pode também aumentar posteriormente devido a reações de degradação com o oxigênio do ar e à exposição à radiação ultravioleta da luz solar. Além disso, a presença de íons metálicos, resinas ou outras impurezas também contribui para a coloração da polpa (CAMPOS, 2011).

O processo de polpação e o branqueamento da polpa estão interligados, uma vez que uma polpa eficientemente deslignificada demanda uma menor quantidade de reagentes químicos no branqueamento. Isso resulta em maior eficiência econômica e menor impacto ambiental. Para atingir os objetivos de uma unidade de branqueamento, é essencial a utilização de uma combinação adequada de reagentes químicos em estágios específicos. Esse processo envolve a alternância entre etapas oxidativas e de solubilização em substâncias alcalinas, além de reciclar os filtrados obtidos durante as fases de lavagem da polpa (REDKO, 1999).

As seqüências de branqueamento são conhecidas como ECF (*Elemental Chlorine Free*) e TCF (*Totally Chlorine Free*). Entre os produtos químicos mais empregados nesse processo estão o dióxido de cloro ( $\text{ClO}_2$ ), soda cáustica ( $\text{NaOH}$ ), peróxido de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) e ozônio ( $\text{O}_3$ ). Na etapa de branqueamento, a polpa celulósica é submetida à ação desses produtos químicos, que atuam na remoção e modificação dos grupos cromóforos,

responsáveis pela absorção de luz e coloração da polpa. A sequência de branqueamento do tipo ECF envolve a adição de produtos químicos em três estágios, cada um com um pH de trabalho diferente: dióxido de cloro com pH ácido (3-4); peróxido de hidrogênio com pH alcalino (10-12); dióxido de cloro, seguido por lavagens entre os estágios utilizando prensas. Ao final de cada estágio de branqueamento, a "alvura" da polpa é incrementada até atingir o nível desejado (REIS, 2013). Na Figura 17 mostra-se a polpa após o branqueamento.

Figura 17 – Celulose branqueada.



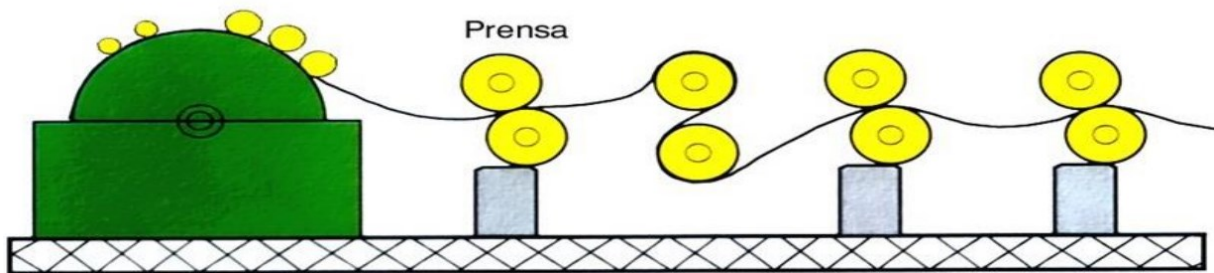
Fonte: TISSUE (2020).

#### 4.3.6 Secagem

A polpa celulósica pode ser utilizada em fábricas integradas ou comercializada. Nas fábricas integradas, a polpa é armazenada em um tanque e bombeada para a máquina de papel. Para facilitar o transporte, a polpa destinada ao mercado geralmente é desaguada (com 40 a 60% de água) ou seca (com 5 a 10% de água), sendo enfardada e embalada conforme necessário para atender às especificações de cada empresa (REIS, 2013).

O desaguamento é um processo mecânico que visa aumentar a consistência da mistura água/polpa por meio de técnicas como filtração e prensagem, como ilustrado na figura a seguir. A polpa com baixa consistência é formada em uma mesa formadora. Após o processo de drenagem por sucção, a folha resultante é submetida à prensagem para remover o máximo de água possível. As mantas celulósicas produzidas geralmente contêm entre 40% e 50% de umidade (REIS, 2013).

Figura 18 – Desaguamento mecânico da polpa de celulose.  
Forma Redonda



Fonte: REIS (2013).

No sistema de secagem em túnel ou máquina secadora, a folha celulósica, formada após a filtração e a prensagem, é conduzida para o secador, onde flutua sobre o ar aquecido. A folha é introduzida pela parte superior da máquina, percorrendo vários estágios, passando por rolos nas extremidades e saindo do secador. Ao final do processo, as folhas saem com um teor de umidade em torno de 5 a 10%. (REIS, 2013).

Após essas etapas, as folhas de celulose são cortadas conforme ilustrado na Figura 19, em seguida são embaladas e agrupadas em fardos para serem carregadas em caminhões, trens ou navios de carga, visando o transporte até o destino (CROPLIFE, 2020).

Figura 19 – Folhas de celulose.



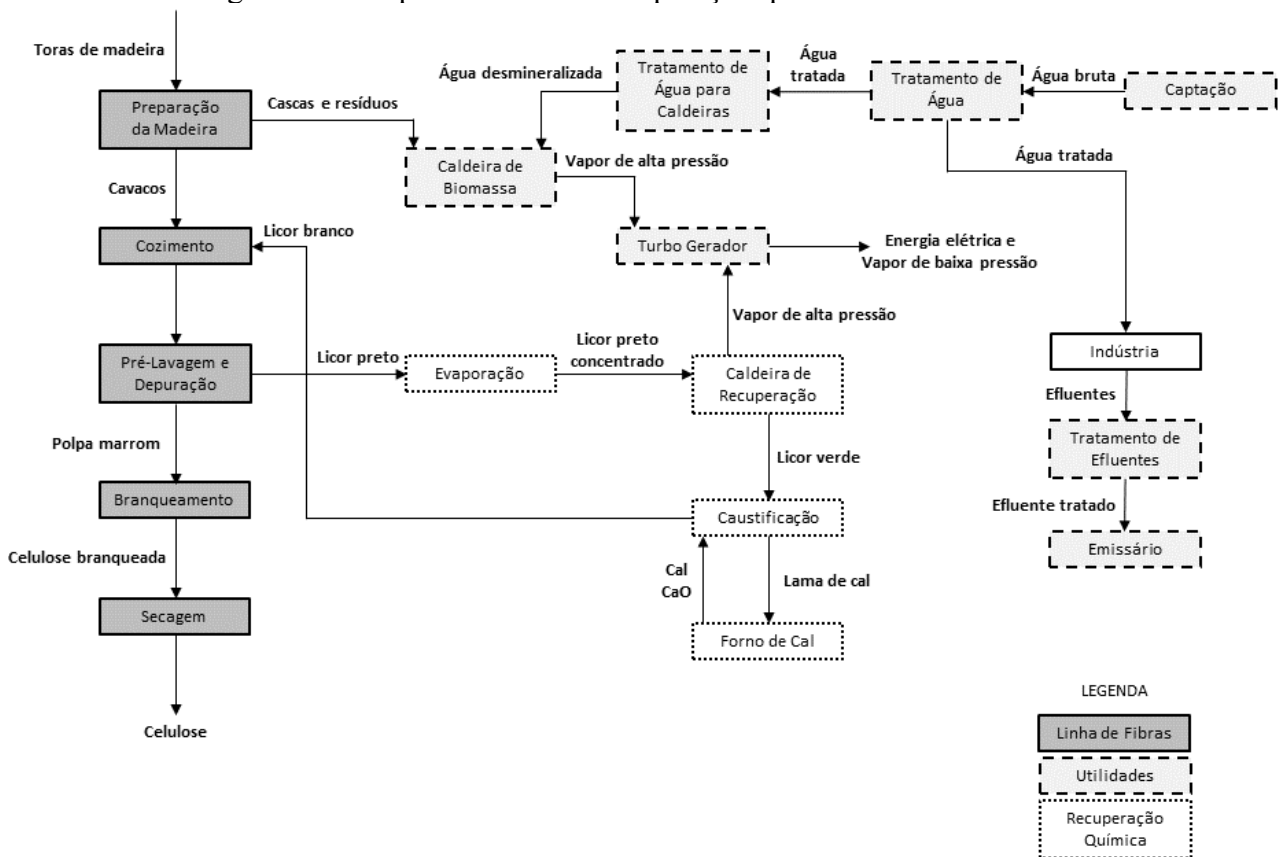
Fonte: VERACEL (2022).

#### 4.3.7 Recuperação Química

O setor de recuperação e utilidades desempenha um papel importante na viabilização ambiental e econômica do processo químico Kraft, ao processar o licor preto gerado na linha de fibras. A recuperação eficiente desses produtos químicos é de extrema importância para

assegurar a sustentabilidade de uma planta fabril, tanto por motivos econômicos quanto ambientais. Além disso, a utilização da energia proveniente da combustão do licor é fundamental para gerar vapor, o qual é posteriormente convertido em energia mecânica, elétrica e térmica, sendo empregado em todas as fases do processo de extração de celulose. Assim, os principais objetivos do setor de recuperação química no processo Kraft incluem a recuperação contínua, com concentração apropriada, dos produtos químicos essenciais na preparação do licor de cozimento, bem como a geração adequada de vapor para suprir as exigências de produção de energia elétrica nas turbinas a vapor (BONIFACE, 1992). A Figura 20 apresenta as etapas do setor de recuperação química e utilidades.

Figura 20 – Etapas do setor de recuperação química e utilidades.



Fonte: Adaptado de Moraes (2011).

O licor preto consiste em uma solução aquosa contendo produtos químicos residuais, extrativos e compostos derivados da madeira, os quais são gerados ou solubilizados durante o processo de cozimento, incluindo componentes como a lignina. Entre os compostos presentes nesse licor, destacam-se carbonato de sódio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), hidróxido de sódio ( $\text{NaOH}$ ), sulfeto de sódio ( $\text{Na}_2\text{S}$ ), sulfato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), sílica ( $\text{SiO}$ ), óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), cloreto de sódio ( $\text{NaCl}$ ), hidróxido de potássio ( $\text{KOH}$ ), entre outros. O tipo

e as quantidades específicas desses compostos variam consideravelmente em função das características do processo de cozimento, da matéria-prima utilizada, dos insumos empregados, entre outros fatores (SENAI, 2013; VENKATESH, 1992).

#### 4.3.7.1 Evaporadores de Múltiplos Efeitos

A evaporação do licor preto nas indústrias de extração de celulose é uma operação física desprovida de transformação química, sendo seu principal propósito a remoção de água para aumentar a concentração de sólidos presentes no licor. Denominado Evaporação de Múltiplos Efeitos (EME), esse processo envolve a utilização de seis ou mais trocadores de calor (Figura 21) que aplicam os princípios de evaporação e condensação para remover a água contida no licor preto (SENAI, 2013).

Figura 201 – Sistema de Evaporação de múltiplos efeitos.



Fonte: VALMET (2023).

O licor preto fraco apresenta uma concentração de sólidos entre 10% e 20% antes de ser encaminhado para o processo de evaporação de múltiplos efeitos, onde é concentrado a uma faixa de 65% a 80% de sólidos totais. Essa concentração visa preparar o licor para ser pulverizado na caldeira de recuperação, facilitando a combustão eficiente da matéria orgânica durante esse estágio (CARDOSO, 1998).

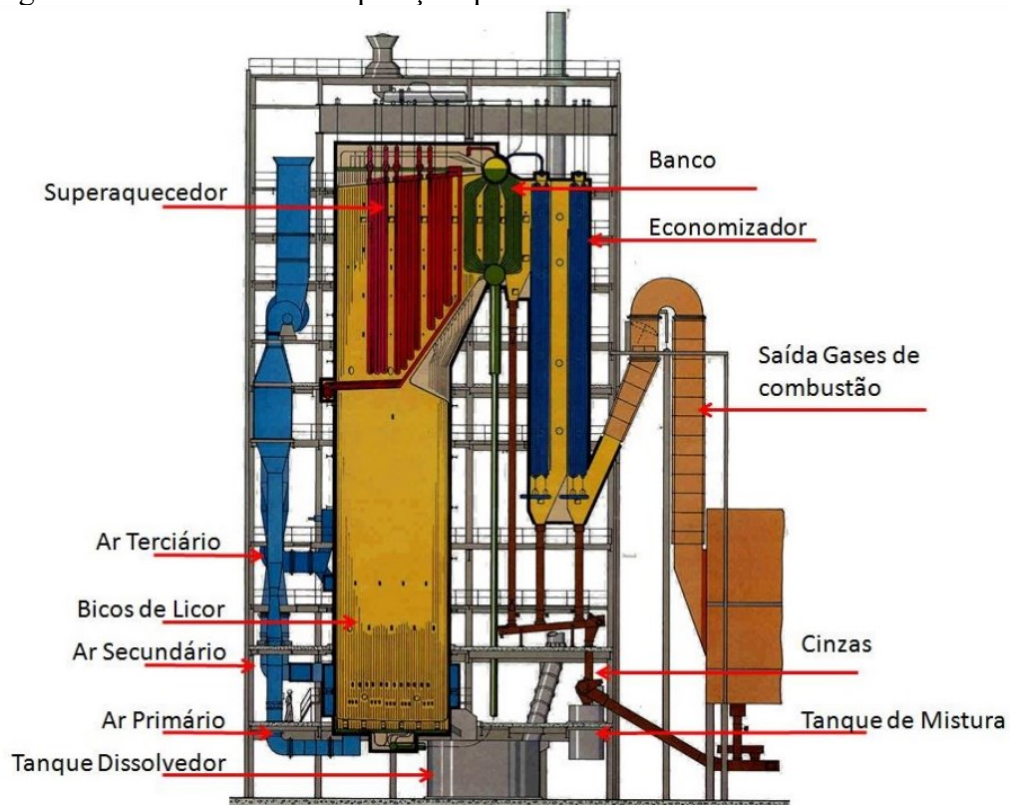
#### 4.3.7.2 Caldeira de Recuperação Química

Caldeiras são dispositivos projetados para gerar e acumular vapor com pressão superior à atmosférica, utilizando uma fonte de energia. Sua classificação pode ser feita com

base na categoria de pressão, nível de automação, tipo de energia empregada e método de troca térmica. Quanto à classificação mais comum de caldeiras de combustão, ela está relacionada à disposição dos componentes água/gases de combustão, dividindo-se principalmente em dois tipos: flamotubulares e aquatubulares. As caldeiras flamotubulares têm os gases quentes circulando dentro dos tubos, com a água fora. Já nas caldeiras aquatubulares, os gases da combustão passam fora dos tubos, enquanto a água a ser aquecida flui no interior deles (SENAI, 2013).

Na Figura 22 ilustram-se os principais componentes de uma caldeira de recuperação química do tipo aquatubular.

Figura 21 – Caldeira de recuperação química utilizada em indústrias de celulose.



Como citado anteriormente, o combustível que é comumente utilizado nas caldeiras de recuperação química é o licor preto concentrado. Este licor contém água, material orgânico e material inorgânico, e sua proporção mássica, assim como composição química, varia conforme a qualidade da madeira e as condições do processo de polpação. O licor possui um poder calorífico relativamente baixo, situando-se entre 2500 e 3500 kcal/kg, devido à sua composição que abrange aproximadamente um terço de material inorgânico, além de um teor de água que varia entre 20% e 35% (GRACE, 1992).



A caldeira de recuperação química desempenha simultaneamente o papel de reator químico e gerador de vapor. Sua principal atribuição é converter o sulfato de sódio presente no licor preto em sulfeto de sódio por meio de uma reação de redução química. Esse processo de recuperação é realizado mediante a combustão do licor preto, que, antes de ser queimado, é enriquecido com cinzas provenientes da combustão gerada na própria caldeira. Esse enriquecimento visa repor a sulfidez no licor de cozimento. Além disso, na função de gerador de vapor, a caldeira gera vapor para o processo, aproveitando o calor liberado durante a combustão da fração orgânica do licor preto (ADAMS, 1997).

Na caldeira de recuperação, o licor preto concentrado é pulverizado por meio de bicos injetores. As gotículas resultantes entram em contato com o ar de combustão, passando pelo processo de secagem e combustão. Nesta fase, uma considerável quantidade da água contida no licor é evaporada (SOSA, 2007). A queima do licor preto na fornalha da caldeira ocorre em uma atmosfera com deficiência de oxigênio para possibilitar a reação de redução química, convertendo sulfato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) em sulfeto de sódio ( $\text{Na}_2\text{S}$ ). O material inorgânico fundido resultante, conhecido como "*smelt*", é direcionado do fundo da fornalha para o tanque de dissolução, onde é diluído com licor branco fraco, passando a ser denominado licor verde. Esta solução, composta principalmente por carbonato de sódio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) e sulfeto de sódio ( $\text{Na}_2\text{S}$ ), tem sua concentração alcalina controlada para ser utilizada no processo de caustificação (HUPA, 1997).

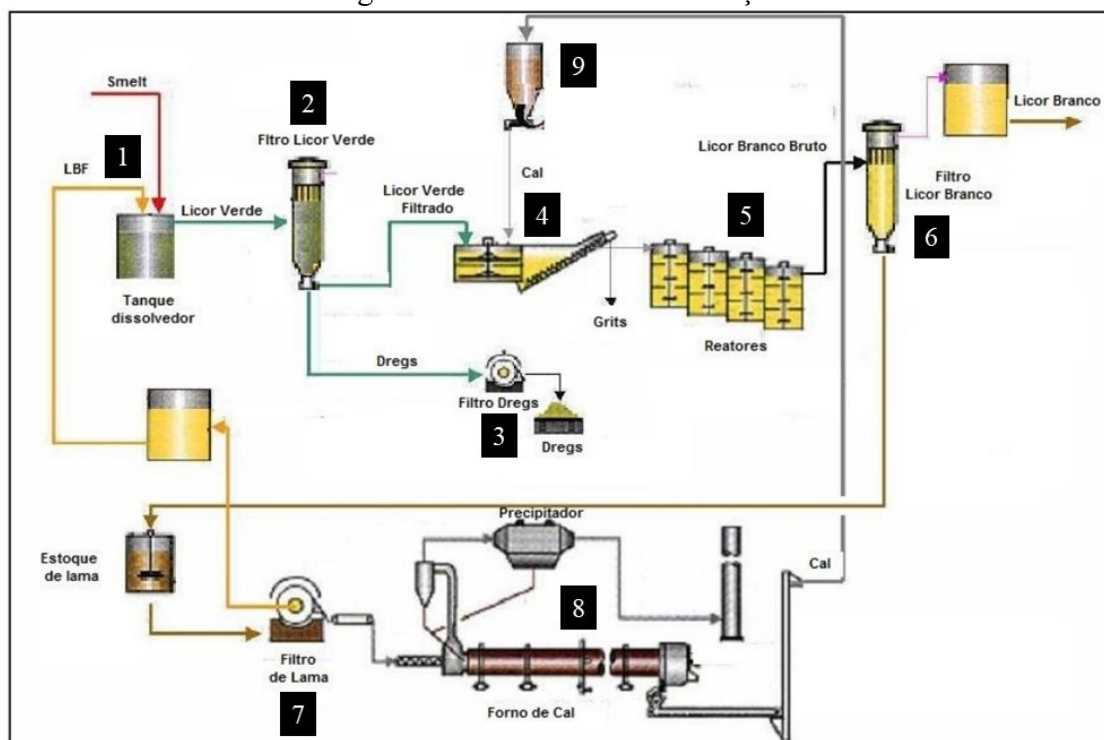
A energia térmica resultante da queima da matéria orgânica no licor é transferida para a água, gerando vapor superaquecido utilizado para acionar turbinas a vapor. Durante a combustão, os gases liberados transferem calor para os tubos da fornalha, continuando o processo de troca de calor na caldeira até sua saída pelo economizador. No entanto, a combustão gera material particulado que pode causar incrustações nos tubos da caldeira, especialmente nos superaquecedores e economizador (REIS, 2013).

Para minimizar essas incrustações, são empregados sopradores de fuligem que removem parcialmente o material. As incrustações removidas são então direcionadas para o tanque de licor preto, onde contribuem para a reposição do sulfato no processo. Os gases de combustão, carregando material particulado, passam por precipitadores eletrostáticos na saída da caldeira, onde são capturados em placas por um campo magnético gerado. O material retido nas placas é posteriormente removido e adicionado ao tanque de mistura de licor preto, também como parte do processo de reposição de sulfato. Esse controle ambiental visa evitar a liberação de particulados na atmosfera (REIS, 2013).

#### 4.3.7.3 Caustificação

A caustificação é a primeira etapa do ciclo de cálcio para o licor verde proveniente da caldeira de recuperação. Nessa fase, o licor verde é transformado em licor branco, retornando para a etapa de cozimento (BONOMI *et al.*, 1985; LEE *et al.*, 2019). Na Figura 23 representa-se o ciclo de caustificação e calcinação utilizado pelas empresas que realizam a extração de celulose pelo método químico Kraft.

Figura 223 – Ciclo de caustificação.



Fonte: REIS (2013).

No setor de caustificação, o licor verde bruto é submetido inicialmente à remoção de impurezas insolúveis presentes, conhecidas como *dregs*. Essa operação de limpeza pode ser feita por meio de decantadores ou tecidos filtrantes (2) (Figura 24). Os *dregs* removidos são então encaminhados para o sistema de filtração (3), onde passam por lavagem para remover resíduos de licor e ajustar o pH (REIS, 2021).

Figura 234 – Tecidos filtrantes utilizados nos filtros de licor.



Fonte: VALMET (2024).

Em seguida, o licor verde filtrado é submetido ao tratamento (4) com uma suspensão concentrada de hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), o que resulta na conversão do carbonato de sódio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) em hidróxido de sódio ( $\text{NaOH}$ ). O licor branco bruto produzido nos caustificadores (5) contém o precipitado de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), conhecido como lama de cal. Devido a isso, o licor não pode ser encaminhado diretamente ao cozimento. Antes disso, deve ser enviado ao sistema de clarificação (6) para remover a lama de cal, utilizando processos de decantação ou filtração (ALI *et al.*, 2023; REIS, 2021).

Após a filtração, o licor branco é encaminhado para o setor de polpação, enquanto a lama de cal é direcionada para o filtro de lama (7). Nesse filtro, ela é lavada para remover o licor branco residual, prevenindo potenciais problemas como a formação de anéis ou pedras no forno de cal. O licor resultante da lavagem da lama é reutilizado para dissolver o *smelt* no tanque dissolvedor da caldeira de recuperação (1) (REIS, 2021).

A lama de cal lavada é introduzida no forno rotativo de cal (8), onde, mediante fornecimento de calor, ocorre a reação de calcinação do  $\text{CaCO}_3$ , resultando na recuperação do óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ). Após sair do forno (Figura 25), a cal é triturada em um moinho de martelo para uniformizar os aglomerados formados. A cal processada é então armazenada nos silos (9). Devido à eficiência do processo de calcinação, que geralmente varia entre 85% e 95%, é necessária a reposição com cal virgem para manter a reação de caustificação. Essa cal virgem pode ser armazenada em silos separados ou misturada com a cal processada, dependendo das necessidades específicas do processo (REIS, 2021).

Figura 245 – Forno de Cal.



Fonte: BRASIL (2024d).

#### 4.3.8 Utilidades

##### 4.3.8.1 Distribuição de Vapor

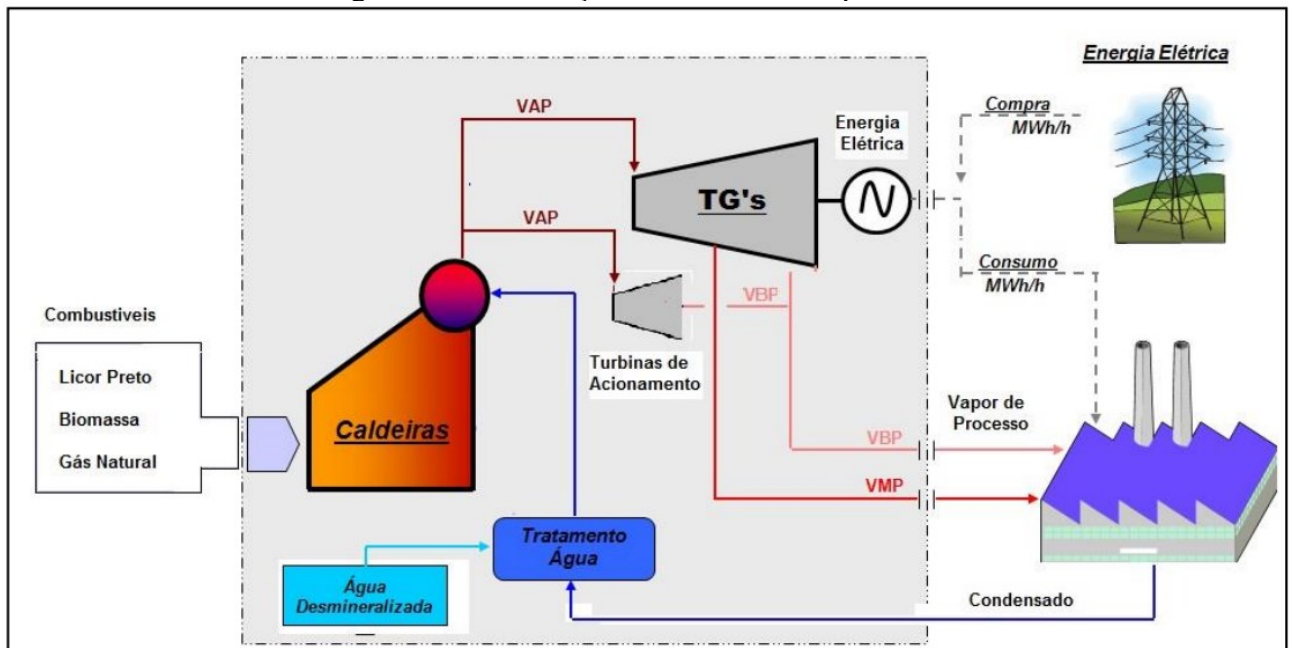
Empresas de extração de celulose geralmente geram eletricidade usando turbinas a vapor, principalmente através da cogeração. Além das caldeiras de recuperação, utilizam caldeiras auxiliares com combustíveis como gás natural, biomassa ou óleo combustível. As turbinas podem ser conectadas a geradores elétricos para transformar energia mecânica em energia elétrica (REIS, 2013).

O vapor retirado das turbinas é distribuído e empregado para o aquecimento em várias áreas, incluindo evaporação, aquecedores de ar das caldeiras, aquecimento dos digestores, e em outras aplicações. As turbinas a vapor são máquinas que funcionam com vapor de alta pressão na entrada, expandindo-se para pressões menores ao longo do processo (REIS, 2013).

Todo o vapor de média e baixa pressão retirado das turbinas é direcionado para coletores de vapor para ser distribuído pelo processo. Se necessário, podem-se utilizar válvulas redutoras de pressão para ajustar as condições conforme a demanda térmica da empresa. É importante manter a relação entre pressão e temperatura do vapor de entrada na turbina estável, priorizando o fornecimento de vapor superaquecido para evitar danos às palhetas da turbina, pois uma gota de água pode causar sérios danos (REIS, 2013).

Na Figura 26 descreve-se o sistema de geração e distribuição de vapor de uma indústria de celulose.

Figura 256 – Ilustração do sistema de vapor.



Fonte: REIS (2013).

#### 4.3.8.2 Tratamento de Água

A água industrial utilizada nas empresas de extração de celulose geralmente é proveniente da captação frequentemente realizada em rios próximos à empresa, e o tratamento varia de acordo com a qualidade da água disponível. Inicialmente, na canaleta de captação da água bruta, é adicionado hidróxido de sódio (NaOH) para correção do pH, preparando a água para as etapas subsequentes de coagulação e cloração. Em seguida, é dosado sulfato férrico ( $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ) para promover a aglutinação das impurezas, formando flocos que facilitam a decantação devido à sua maior densidade. A água passa então pela etapa de cloração, em que o cloro ( $\text{Cl}_2$ ) reage com a água, formando ácido hipocloroso (HClO), responsável pela desinfecção da água (REIS, 2013).

A formação de ácido hipocloroso e íons hipoclorito ( $\text{ClO}^-$ ) é considerada como cloro residual livre, sendo a água idealmente mantida próxima a um pH de 6,0. A cloração pode ser realizada com cloro gasoso ( $\text{Cl}_2$ ), hipoclorito de sódio (NaClO) ou dióxido de cloro ( $\text{ClO}_2$ ). Após a etapa de cloração, a água passa pelo processo de floculação em floculadores, sendo os produtos químicos misturados lentamente à água bruta, evitando a fragmentação dos flocos formados (REIS, 2013).

Posteriormente, a água é direcionada para tanques de decantação, onde ocorre a sedimentação das impurezas. Uma boa decantação é importante para uma filtragem eficaz da

água. O lodo decantado é removido por raspadores e armazenado em tanques específicos. Em seguida, a água passa pela etapa de filtração em filtros de areia e pedregulhos, que retêm as partículas sólidas remanescentes, resultando em uma água com turbidez abaixo de 1 ppm. Em algumas empresas, a água industrial tratada é purificada para tornar-se potável (REIS, 2013).

#### 4.3.8.3 Tratamento de Água para Caldeiras

O tratamento de desmineralização, geralmente realizado por meio de resinas de troca iônica, visa remover sais dissolvidos na água. Este processo é essencial para alimentar caldeiras, evitando a formação de depósitos e corrosão, além de garantir a pureza do vapor produzido. Após a desmineralização, as resinas catiônica e aniônica são regeneradas por retrolavagem com ácido clorídrico e hidróxido de sódio, respectivamente. A água desmineralizada é então enviada para a remoção de oxigênio dissolvido por desaeração mecânica, em que vapor de baixa pressão é adicionado para diminuir a solubilidade do oxigênio. Para remover o residual de oxigênio, são dosados produtos como hidrazina, carboidrazida e sulfitos, que reagem com o oxigênio para formar nitrogênio e água, evitando a corrosão (REIS, 2013).

Devido ao alto custo do processo de desmineralização da água, é necessário o retorno do condensado de vapor utilizado nas trocas térmicas nos equipamentos, como cilindros secadores das máquinas de papel, trocadores de calor de contato indireto, sistema de aquecimento de ar de combustão das caldeiras e evaporadores de licor preto, entre outros. Esse condensado é filtrado e misturado com a água desmineralizada antes da entrada nos desaeradores (REIS, 2013).

A água desmineralizada resultante possui um pH entre 9,0 e 9,5 e uma condutividade abaixo de 1  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , adequada para uso em caldeiras e outros fins industriais. Parâmetros como pH, dureza, ferro, dióxido de carbono, oxigênio dissolvido e cloreto devem ser controlados para garantir a eficiência do processo e a integridade dos equipamentos. A adição de amina e fosfato trissódico é comum para manter o pH e prevenir a corrosão (REIS, 2013).

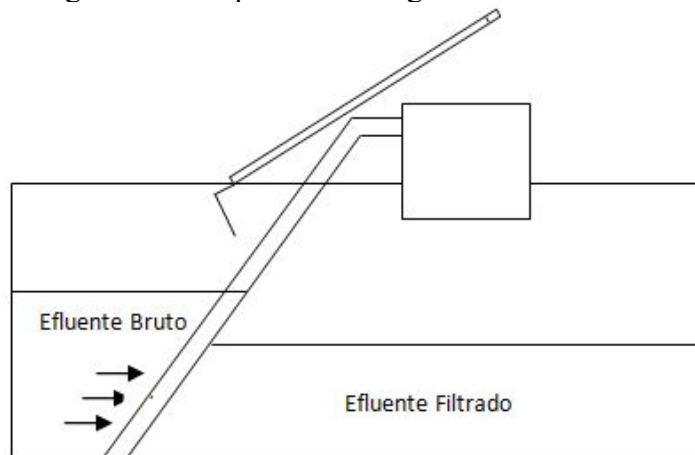
#### 4.3.8.4 Tratamento de Efluentes

O tratamento de efluentes para a indústria de papel e celulose tipicamente é composto por uma unidade de Pré-Tratamento, Tratamento Primário e Tratamento Secundário, com algumas unidades eventualmente incluindo também o Tratamento Terciário. Além disso, o

sistema de tratamento é complementado pelo sistema de manuseio e condicionamento de lodo (LIMA, 2024).

O pré-tratamento tem como objetivo principal a remoção de sólidos grosseiros e inorgânicos suspensos, como fibras de celulose e areia, por meio do gradeamento (Figura 27). Essas grades retêm esses materiais, protegendo os equipamentos de transporte e as unidades de tratamento, o que contribui para a eficácia global do processo (LIMA, 2024; MIELI, 2007). Também é nessa etapa que ocorre a neutralização do efluente, sendo importante manter o pH dentro da faixa de 7 a 9, ideal para as etapas subsequentes de coagulação e floculação. Para tanto, um ácido ou base é adicionado a um tanque equipado com agitação rápida, conhecido como tanque de neutralização/coagulação (LIMA, 2024).

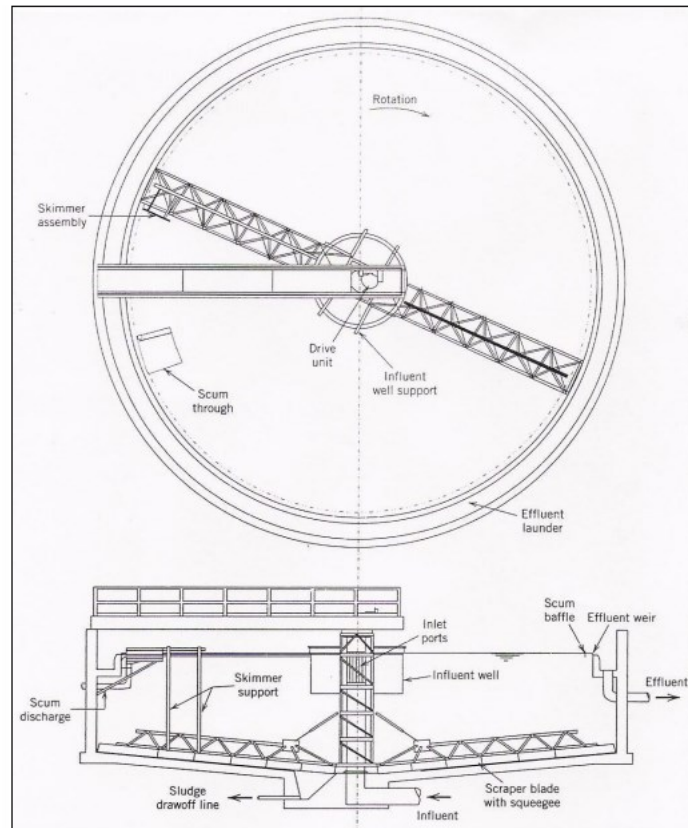
Figura 26 – Esquema de um gradeamento manual.



Fonte: H2TEC (2024).

No tratamento primário, ocorre a remoção de uma grande quantidade de sólidos suspensos presentes no efluente por meio de processos de decantação, como ilustrado na Figura 28. Especificamente no tratamento de efluentes da indústria de papel e celulose, é necessário adicionar certos macronutrientes e micronutrientes ao efluente bruto antes do tratamento biológico, uma vez que este geralmente apresenta baixos teores de nitrogênio e fósforo (NETO, 2014). Além disso, no tratamento primário ocorre o resfriamento do efluente, já que pode chegar à estação com temperaturas superiores a 45°C, enquanto a temperatura ideal para o tratamento secundário biológico é de 35°C (MIELI, 2007).

Figura 278 – Ilustração do decantador primário circular.



Fonte: GEHLING (2017).

O Tratamento Secundário destina-se a reduzir a Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO). A remoção de sólidos e matéria orgânica é realizada principalmente por sistemas biológicos aeróbios, os quais requerem oxigênio para seu desenvolvimento, como lagoas aeradas (Figura 29) ou lodos ativados, sendo desaconselhado o uso de sistemas anaeróbios devido à baixa carga orgânica e à dificuldade de digestão, devido à presença de compostos como a lignina. O Tratamento Terciário realiza remoções adicionais de poluentes em águas residuais antes de sua descarga no emissário, também conhecida como "polimento". Os processos de tratamento terciário incluem precipitação e coagulação (MIELI, 2007).



Figura 29 – Tanque de aeração.



Fonte: BRASIL (2022).

#### 4.3.9 Resíduos

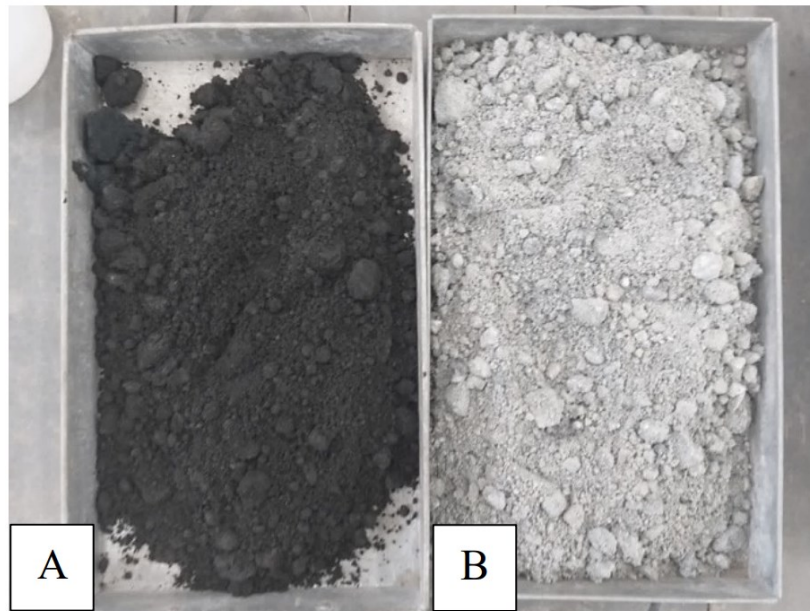
O aumento na procura por produtos da indústria de celulose impulsiona o aumento na produção, o que, por sua vez, resulta em uma maior quantidade de resíduos sólidos gerados durante o processo de fabricação. Em média, a produção de uma tonelada de celulose gera aproximadamente 800 kg de resíduos sólidos (GUERRA, 2007).

Os resíduos industriais são os subprodutos que resultam do processo de fabricação e não são utilizados no produto final. Na indústria de produção de celulose, incluem-se como resíduos a casca, a lama de cal, o lodo ativado e a cinza proveniente da queima de biomassa em caldeiras (BELLOTE *et al.*, 1998).

*Dregs*, como comentado anteriormente, são uma escória escura e sedimentada com odor característico, e é um material sólido removido durante a clarificação do licor verde. Durante esse processo, impurezas como carbono não queimado, ferro, sílica, cálcio, alumina, magnésio e sulfetos são separadas por sedimentação. Após a remoção, o resíduo passa por lavagem e processamento em filtro a vácuo para extrair o máximo de álcalis e água possível. Originado como subproduto do processo de combustão do licor preto concentrado na caldeira de recuperação do licor de cozimento, o *dregs* é composto principalmente por óxidos de cálcio, matéria orgânica e compostos de enxofre, sódio e magnésio. Além disso, pode conter metais provenientes tanto do desgaste dos equipamentos quanto da matéria-prima utilizada na extração de celulose. (ALBUQUERQUE *et al.*, 2002; MAEDA; EPITÁGORAS; HELTON, 2010). Os *dregs* podem ser destinados a aterros, sistemas de compostagem ou podem ser utilizados como aditivos na fabricação de outros produtos (REIS, 2021).

*Grits* são resíduos sólidos e granulados de cor amarelada, com pouco odor e solubilidade limitada, provenientes do processo de calcinação da lama de cal e do calcário em fornos de cal (TEDESCO; ZANOTO, 1978). Esses materiais são compostos principalmente por óxidos de cálcio, magnésio e potássio, resultantes da sinterização da lama de cal. Em comparação com os *dregs*, os *grits* apresentam teores menores de metais (MAEDA; EPITÁGORAS; HELTON, 2010). Nas proximidades das indústrias de celulose, os agricultores frequentemente utilizam esses resíduos alcalinos como corretivos de acidez do solo, devido ao seu baixo custo de aquisição (ALBUQUERQUE *et al.*, 2002). Na figura a seguir apresentam-se imagens dos resíduos supracitados.

Figura 30 – Resíduos *in natura* da indústria de celulose (A) *dregs* e (B) *grits*.



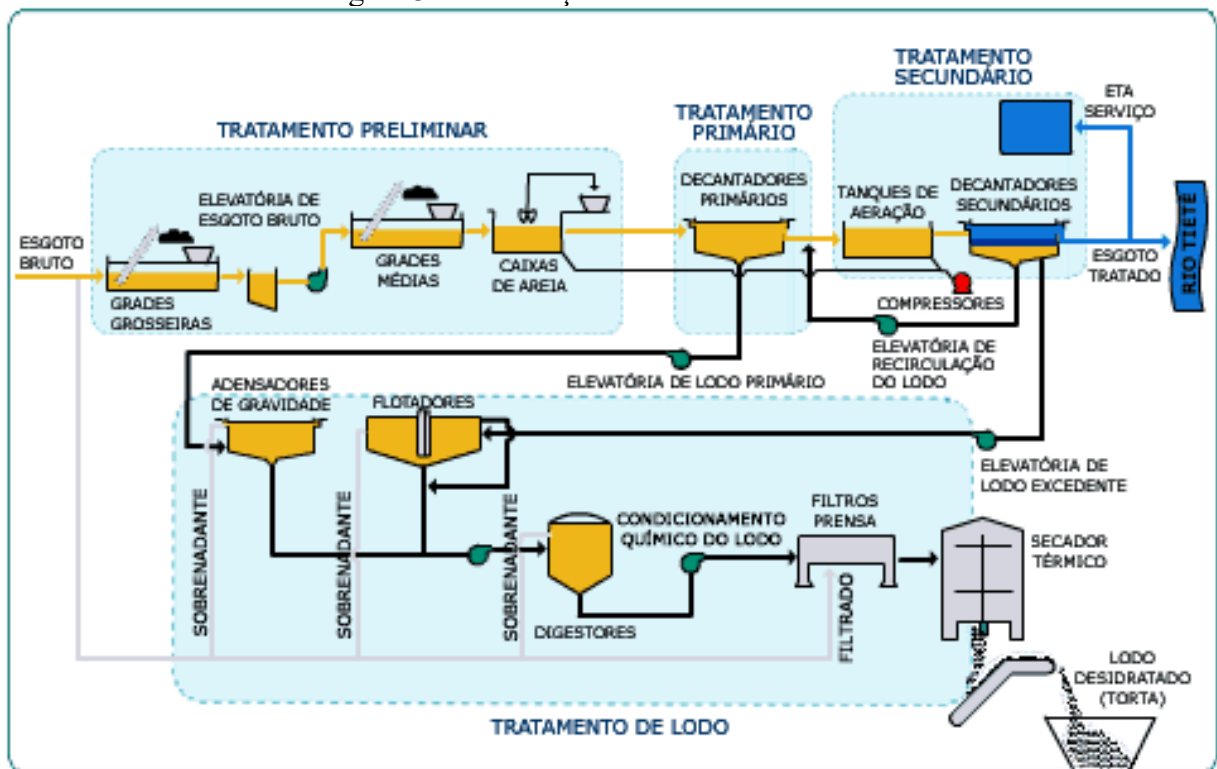
Fonte: OLIVEIRA (2022).

O lodo orgânico, resultante da passagem pelos decantadores primários do sistema de tratamento de efluentes, é denominado lodo primário. Composto principalmente por resíduos de fibras não utilizadas na produção de papel, esse lodo é caracterizado por sua baixa quantidade de nutrientes e alta relação entre carbono e nitrogênio, variando entre 150 e 250. No estágio seguinte do tratamento, conhecido como tratamento secundário, o lodo é ativado por microrganismos aeróbicos, com adição de nitrogênio, fósforo e oxigênio, transformando-se em lodo ativado ou secundário, com uma relação carbono/nitrogênio mais baixa, variando entre 5 e 30. Após essa etapa, o lodo é floculado por meio de tratamento com sulfato de alumínio e polieletrólitos, seguido de decantação e correção do pH com calcário, para reduzir

a turbidez do efluente antes de ser encaminhado para a área de depósito (GUERRINI, 2003; MAEDA; EPITÁGORAS; HELTON, 2010).

Na indústria de celulose e papel, os lodos orgânicos ou celulósicos podem representar mais de 50% da massa total de resíduos. O lodo celulósico resultante é um material pastoso, de cor marrom escura, com odor característico e alto teor de umidade, aproximadamente 80%. Apesar de os efluentes serem submetidos a múltiplas etapas de tratamento, como ilustrado na Figura 31, os lodos geralmente são prensados e desaguados conjuntamente, devido a considerações financeiras. Em uma produção anual de 300 mil toneladas de celulose, podem ser geradas cerca de 60 mil toneladas de lodo (GUERRINI, 2003; MAEDA; EPITÁGORAS; HELTON, 2010).

Figura 31 – Ilustração do tratamento de lodo.



Fonte: ACQUASOLUTION (2024).

Uma prática comum para gerenciar o lodo produzido nas indústrias de celulose e papel é sua aplicação no solo para diversos fins, incluindo uso agrícola, silvicultural ou para recuperação de áreas degradadas. Essa aplicação do lodo no solo tende a melhorar sua qualidade e fertilidade. A combinação de lodo primário e secundário geralmente contém nitrogênio disponível, o que a torna uma alternativa viável aos fertilizantes minerais convencionais (FAUBERT *et al.*, 2016; RODRIGUEZ *et al.*, 2018).

As cinzas (Figura 32) são os subprodutos gerados nas caldeiras auxiliares de energia, resultantes da combustão dos rejeitos do processamento da madeira. Elas consistem em uma mistura homogênea de frações de areia e cinzas. Em indústrias com capacidade de produção de 1000 toneladas de celulose por dia, aproximadamente 80 toneladas de cinzas são geradas diariamente. O efeito positivo das cinzas na fertilização do solo se deve à sua composição química e à liberação gradual de macro e micronutrientes. Elas podem ser comparadas de forma grosseira a uma fórmula NPK com uma relação de (1:3:7), acrescida de cálcio, magnésio e micronutrientes (NOLASCO; GUERRINI; BENEDETTI ,2000).

Figura 28 – Cinzas oriundas da combustão de cascas de eucalipto em caldeira de biomassa de indústria de celulose.



Fonte: PRODUTIVA FERT (2024).

Portanto, a aplicação desses resíduos em plantações florestais é considerada viável, pois apresentam características que favorecem os atributos físicos, químicos e biológicos do solo. Além disso, os solos destinados a plantios florestais geralmente possuem baixa fertilidade natural, resultando em baixas produtividades. A presença de nutrientes na composição das cinzas permite o seu uso como fertilizantes, além de serem reaproveitadas como corretivos de acidez do solo. O reaproveitamento desses resíduos também contribui para minimizar os impactos econômicos e ambientais da disposição final de seus componentes (TRIGUEIRO, 2006).

## 5 CONCLUSÃO

Após revisar a literatura sobre o processo de produção de celulose, fica evidente que se trata de uma atividade complexa, envolvendo diversas etapas, desde a matéria-prima até o produto final. A análise detalhada das etapas de produção permitiu identificar os principais fatores que influenciam a eficiência e a qualidade do processo, ressaltando a importância da escolha adequada da matéria-prima, como o tipo de madeira e seu teor de umidade.

Ao longo do estudo, foi possível descrever o processo produtivo das indústrias de celulose sob a perspectiva da engenharia química, enfatizando os equipamentos utilizados e as práticas de tratamento e recuperação de resíduos. Além disso, foram examinados os principais parâmetros que influenciam a qualidade da polpa celulósica, como a temperatura e o tempo de cozimento. Esses fatores operacionais mostraram-se essenciais para obter um produto final de alta qualidade, destacando a necessidade de um controle preciso e otimizado das condições de produção.

Este trabalho contribuiu para uma compreensão mais ampla e detalhada do processo industrial de produção de polpa celulósica, evidenciando a importância da integração entre a escolha da matéria-prima, o controle dos parâmetros operacionais e as práticas de engenharia química na obtenção de um produto de qualidade superior. Por fim, destaca-se a importância contínua da pesquisa e inovação neste campo, visando melhorar as técnicas existentes e desenvolver novas soluções que otimizem o processo de produção de celulose, alinhando-se aos princípios de sustentabilidade ambiental e econômica.

## REFERÊNCIAS

- ABTCP. **Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel**. Disponível em: <<https://www.abtcp.org.br/o-setor>>. Acesso em: 18 abr. 2024.
- ACQUASOLUTION. **Conheça as Etapas do Processo de Tratamento de Efluentes**. Disponível em: <<https://acquablog.acquasolution.com/etapas-do-processo-de-tratamento-de-efluentes/>>. Acesso em: 30 mar. 2024.
- ADAMS, T.N. **General Characteristics of Kraft Black Liquor Recovery Boilers** In: Chapter 1 in Kraft Recovery Boilers. 1rd Edition. USA:Tappi-Press 1997. Chapter 1. p. 3-37.
- ALBUQUERQUE, J. A.; ARGENTON, J.; FONTANA, E. C.; COSTA, F. S.; RECH, T. D. **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.
- ALCANTARA, J. S. LUCENA, C.A. **O Processo Histórico da Industrialização Brasileira e a Educação Profissional: As Inovações Tecnológicas e a Formação do Trabalhador**. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia - MG. p. 20, 2013.
- ALI, R. H.; SAMEE, A. A. A.; ATTALLA, M.; MAGHRABIE, H. M. **Energy-exergy approach of a cogeneration system in pulp and paper industry with a chemical recovery of black liquor and soda**, Case Studies in Thermal Engineering, Volume 42, 2023.
- ANDRITZ AG. 2004. Disponível em: <<https://www.andritz.com/group-en>>. Acesso em: 20 dez. 2023.
- BARRICHELO, L. E. G.; BRITO, J. O. **A utilização de madeira na produção de celulose**. Circular Técnica N° 68, 1979.
- BASTOS P.; CRUZ F. **Controle ambiental em fábricas de papel e celulose**, 2017. Disponível em: <<https://revista.enap.gov.br/index.php/RSP/article/view/2157>>. Acesso em 18 abr. 2024.
- BATISTA, T. S. **A indústria de papel e celulose no Brasil: produtividade, competitividade, meio ambiente e mercado consumidor**. 2018. 51 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/26863>>. Acesso em: 26 out. 2023.
- BRASIL. LIPPEL. Disponível em: <<https://www.lippel.com.br/Assets/Downloads/05-05-2014-10-36qualidade-dos-cavacos-para-combustao.pdf>>. Acesso em: 24 mar. 2024a.
- BRASIL. HENAN PINGYUAN. Disponível em: <<https://pt.pk-en.com/Peneira-vibrat%C3%B3ria-inclinada-de-movimento-circular-de-cavaco-de-madeira-pd47299500.html>>. Acesso em: 25 fev. 2024b.

BRASIL. Disponível em: <<https://www.linkedin.com/pulse/medi%C3%A7%C3%A3o-de-n%C3%ADvel-digestor-na-ind%C3%BAstria-papel-e-marcel-de-roure/?originalSubdomain=pt>>. Acesso em: 05 mar. 2024c.

BRASIL. Disponível em: <<https://www.passeidireto.com/arquivo/100479353/apresentacao-caustificacao>>. Acesso em: 09 mar. 2024d.

BRASIL. G1. **Produção de celulose solúvel na LD Celulose em Indianópolis será destinada ao mercado externo**, 2022 Disponível em: <<https://g1.globo.com/mg/triangulo-mineiro/noticia/2022/04/22/producao-de-celulose-soluvel-na-ld-celulose-em-indianopolis-sera-destinada-ao-mercado-externo.ghtml>>. Acesso em: 29 mar. 2024e.

BELLOTE, A. F. J.; SILVA, H. D.; FERREIRA, C. A.; ANDRADE, G. C. **Resíduos da indústria de celulose em plantios florestais**. Boletim de Pesquisa Florestal, Colombo, n. 37, p. 99-106. 1998.

BONIFACE, A. **Introduction and principals of chemical recovery** In: GREEN, R. P., HOUGH, G. Chemical Recovery in The Alkaline Pulping Processes, 3rd Edition., chapter 1, TAPPI Press, Atlanta, USA, 1992.

BONOMI, A.; LIMA, A. F.; PINTO, J. H. F.; SANT'ANNA, R. J.; HOCHGRED, S.; PARK, S. W. **Conservação de energia na indústria de celulose e papel**. São Paulo - Sp: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 1985. 381 p.

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

CARDOSO, M. **Análise da unidade de recuperação do licor negro de eucalipto no processo “Kraft”, avaliando alternativas de processamento**. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, 1998.

CROPLIFE. **O que é celulose? Da extração à produção de papel**, 2020. Disponível em: <<https://croplifebrasil.org/noticias/da-celulose-ao-papel-como-funciona-essa-cadeia-productiva/>>. Acesso em: 29 mar. 2024.

DEMUTH. **DDT – Descascador a tambor**. Disponível em: <<https://www.demuth.com.br/c%C3%B3pia-ddr>>. Acesso em: 25 fev. 2024a.

DEMUTH. **DPD – Picador a disco**. Disponível em: <<https://www.demuth.com.br/dpd>>. Acesso em: 25 fev. 2024b.

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

FAUBERT, P.; BARNABÉ, S.; BOUCHARD, S.; CÔTÉ, R.; VILLENEUVE, C. **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. DOI: 10.1016/j.resconrec.2016.01.007.

FENGEL, D.; WEGENER, G. **Wood Chemistry, Ultrastructure, Reactions**, Berlin and New York, Walter de Gruyter & Co, 613 p., 1984.

FOELKEL, C. **Casca da árvore do eucalipto: aspectos morfológicos, fisiológicos, florestais, ecológicos e industriais, visando à produção de celulose e papel**. 2006.

FOELKEL, C. **Resíduos sólidos industriais do processo de fabricação de celulose KRAFT de eucalipto**. Parte 05: Resíduos Minerais. Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel: Eucalyptus Online Book & Newsletter, 2011.

GEHLING, Gino Roberto. **IPH 02058: tratamento de água e esgoto**. Porto Alegre - RS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2017. 20 p.

GOLDIE S. **Tech Updates - Debarkers**. 2003. Disponível em: <[https://forestnet.com/LSJissues/Feb\\_04/tech\\_update.htm](https://forestnet.com/LSJissues/Feb_04/tech_update.htm)>. Acesso em: 18 dez. 2023.

GRACE, T.M. **Chemical recovery process chemistry**. In: GREEN, R., HOUGH, G. **Chemical Recovery In: the Alkaline Pulping Processes**. 3rd Edition. USA: TAPPI, 1992. Chapter 3. p.58-78.

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 Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2003.

H2TEC. **Grade Manual**. Disponível em: <<https://www.h2tec.pt/produtos/grade-manual/>>. Acesso em: 29 mar. 2024.

HUPA, M. **Recovery boiler chemistry** In: Chapter 1 in **Kraft Recovery Boilers**. 1rd Edition. USA:Tappi-Press 1997. Chapter 1. p. 41-57.

IMAI, M. H. **Aproveitamento energético de lodo de ETEI de indústria de papel no município de Correia Pinto/SC**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC. p. 8, 2010.

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológica do Estado de São Paulo; Escola SENAI “Theonbaldo De Nigris” – Departamento Regional de São Paulo. **Celulose e Papel – Tecnologia de fabricação da pasta celulósica**. Vol 1. 2ed. São Paulo: 1988.

KAMALI, M.; KHODAPARAST, Z. **Review on recent developments on pulp and paper mill wastewater treatment. Ecotoxicology and Environmental Safety**. Vol 114, 2015.

KLABIN. **Como Brasil se tornou líder em celulose no mundo**, 2023. Disponível em: <<https://blog.klabin.com.br/-/brasil-lider-em-celulose-no-mundo>>. Acesso em: 24 mar. 2024.



KLOCK, U.; ANDRADE, A. S.; HERNANDES, J. A. **Polpa e Papel**. 3ª ed. Revisada. UFPR - Curitiba, PR, 2013.

KLOCK, U.; MUÑIZ, G. I. B.; HERNANDES, J.A.; ANDRADE, A. S. **Química da Madeira**. 3ª ed. Revisada. UFPR – Curitiba, PR, 2005.

KOCH P. **Utilization of hardwoods growing on Southern Pine sites**. Washington D.C., U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, Agriculture Handbook No. 1982. 605p.

LEE, J. Y.; KIM, C. H.; MOON, S. O; PARK, S. H. **Global trends and prospects of black liquor as bioenergy**. Palpu Chongi Gisul/J. Korea Tech. Assoc. Pulp Pap. Ind. 51 (5). 3–15, 2019.

LIMA, N. R. **Curso de Atualização para Operadores de Estações de Tratamento de Efluentes**. ABTCP - Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel, -. 38 p. Disponível em: [https://www.celso-foelkel.com.br/artigos/outros/84\\_Apostila%20Curso%20Operadores%20de%20ETE.pdf](https://www.celso-foelkel.com.br/artigos/outros/84_Apostila%20Curso%20Operadores%20de%20ETE.pdf). Acesso em: 29 mar. 2024.

LIPPEL. **Pátio de cavacos**. Disponível em: <https://www.lippel.com.br/-1/patio-de-cavacos/>. Acesso em: 25 fev. 2024.

LOPES, C. R A.; CONTADOR, C.R. **Análise da indústria de papel e celulose no Brasil**, 1998.

MACEDO, J.C.F. **Análise Térmica e ambiental da queima do lodo primário da fabricação de papel e celulose em caldeira de biomassa à grelha**. 2006. 216 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Instituto de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Itajubá, Itajubá.

MAEDA, S.; EPITÁGORAS, R. O. C.; HELTON, D. S. Documento 202: **Uso de resíduos da fabricação de celulose e papel e da reciclagem de papel**. Embrapa Florestas. 2010. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/24482/1/Doc202.pdf>. Acesso em: 03 jan. 2024.

MAGATON A.S. **Disciplina de Química da Madeira**. Viçosa, MG, 2010. Apresentação em Power Point, slide número 2. Curso de Pós-Graduação Lato Sensu em Tecnologia de Celulose e Papel - Departamento de Engenharia Florestal / Laboratório de Celulose e Papel, Universidade Federal de Viçosa.

MATOS, E. **Medição de Nível no Digestor na Indústria de Papel e Celulose**. 2018. Disponível em: <https://instrumentacaoecontrole.com.br/medicao-de-nivel-no-digestor-na-industria-de-papel-e-celulose/>. Acesso em: 09 jan. 2024.

METAMEC. **Peneiras vibratórias**. Disponível em: <https://metamec.com.br/produtos/equipamentos-para-mineracao/peneiras-vibratorias/>. Acesso em: 24 mar. 2024.

MIELI, J. C. A. **Sistema de Avaliação Ambiental na Indústria de celulose e Papel**. Tese (Mestrado em Engenharia Química). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.

MINE, E. Y.; CARVALHO, G. O.; TEIXEIRA, I. G.; BRANDANI, J.; ALBURQUERQUE, J.; BARBOSA, L.; TOLEDO, T. **Produção Industrial de Celulose e Papel**. 2013. Disponível em: <<https://www.ebah.com.br/content/ABAAAGoWYAK/celulose-papel>>. Acesso em: 08 jan. 2023.

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](http://www.revistaopapel.org.br/noticia-anexos/1359376212_a6276749358ba36fa276b9509b02b478_901527006.pdf)>. Acesso em: 18 abr. 2024.

MORAES, F. A. B. **Modelo para avaliação do consumo específico de madeira e insumos energéticos no processo de produção de celulose e papel**. 2011. 212 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Centro Universitário de Araraquara, Araraquara, 2011.

NETO, H. M. Revista TAE. **Tratamento de efluentes na indústria de papel e celulose**, 2014. Disponível em: <<https://www.revistatae.com.br/Artigo/592/tratamento-de-efluentes-na-industria-de-papel-e-celulose>>. Acesso em 29 mar. 2024

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: Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais, 2000. p. 386-414.

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

PATT, R. **Lecture Handout "Chemische Holztechnologie"**. University of Hamburg, Department of Wood Science, Wood Chemical Technology Section. 1998.

PHILIPP, Paul. **Celulose e papel: Tecnologia de fabricação da pasta celulósica**. 2. ed. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de 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 apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia. Universidade Estadual do Norte Fluminense. Campos dos Goytacazes – RJ. 2008.

PORTAL CELULOSE. **Brasil lidera produção e exportação de celulose mundial**, 2023. Disponível em: <<https://portalcelulose.com.br/brasil-lidera-producao-e-exportacao-de-celulose-mundial/>>. Acesso em: 24 mar. 2024.

- PRODUTIVA FERT. Cinzas de biomassa TL. Disponível em: <<https://www.produtivafert.com.br/produto/cinza-de-biomassa-tl/>>. Acesso em: 08 abr. 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](http://celsofoelkel.com.br/artigos/outros/08_Branqueamento.pdf)>. Acesso em: 10 jan. 2024.
- 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.; ANDRADE, G. de C.; BELLOTE, A. F. J.; TOMAZELLO-FILHO, M. **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. DOI: 10.1016/j.foreco.2018.04.016.
- SANTOS, S.R. **Influência da qualidade da madeira de híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e do processo Kraft de polpação na qualidade da polpa branqueada**. 2005. 160 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais). Engenharia Florestal. Piracicaba, SP: ESALQ/USP.
- SENAI. **Celulose**. São Paulo: SENAI-SP Editora, 2013. 352 p.
- SIXTA, Herbert. **Handbook of Pulp**. Lenzing: Wiley-Vch Verlag Gmbh & Co., 2006. 1352 p.
- SIXTA H., PROMBERGER A., KOCH G., GRADINGER C., MESSNER K. **Influence of beech wood quality on bisulfite dissolving pulp manufacture**. Part 1: Influence of log storage on pulping and bleaching. Holzforschung, 2004. 58p.
- SHREVE, R. N.; BRINK Jr., A. J. **Indústria de processos químicos**. Editora Guanabara Koogan S.A, Rio de Janeiro - RJ, 2008.
- SOSA, I. R. H. **Sistemas multiagentes para controle inteligente da caldeira de recuperação**. 168 p. Tese (Mestrado em Engenharia) - Universidade de São Paulo, São Paulo. 2007.
- SOUZA, A. H. C. B. **Guia técnico ambiental da indústria de celulose e papel**. CETESB. São Paulo, 2008.
- TERMOBLOG. **Produção de Celulose e Sistema Kraft**, 2023. Disponível em: <<https://termoblog.com.br/producao-de-celulose-e-sistema-kraft/>>. Acesso em: 28 abr. 2024.
- TISSUE. **O que é celulose?**, 2020. Disponível em: <<https://tissueonline.com.br/o-que-e-celulose/>>. Acesso em: 24 mar. 2024.

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.

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, 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-and-fiber/nova-fabrica-da-LD-Celulose-atende-as-demandas-de-celulose-soluvel-sustentavel/>>. Acesso em: 06 mar. 2024.

VALMET. **Tecidos filtrantes para indústria de celulose, fibra e papel.** Disponível em: <<https://www.valmet.com/pt/outras-industrias/filtragem/tecidos-filtrantes-para-industrias-de-celulose-fibra-e-papel/>>. Acesso em: 09 mar. 2024.

VENKATESH, V. **Lime Reburning: The Rotary Lime Kiln,** Chapter 8 in Chemical Recovery in the AlkaLine , Pulping Processes, 3rd Edition, Edited by Green, R.P.and Hough, G., TAPPI-Press, 1992. p.153-279.

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. 2024.

WENZL, H. **The Chemical Technology of Wood.** Elsevier: Academic Press, p. 270, 2012.

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