

Introdução ao Processo de Produção de Celulose

Área: Industrial | **Nível:** Essencial | **Carga Horária:** 2h

Público-alvo: Técnicos, Operadores, Pessoas interessadas no setor

Objetivos: Compreender as etapas macro da produção de celulose bem como sua referência macroeconômica no setor a nível global

Sumário

1	**Módulo 1 — Introdução à Celulose** 1.1 O que é a Celulose? — Estrutura molecular, composição e abundância na natureza 1.2 Propriedades e Aplicações — Resistência mecânica, biodegradabilidade e usos industriais
2	**Módulo 2 — Etapas do Processo de Produção** 2.1 Fluxograma Geral do Processo — Visão integrada das etapas do processo Kraft 2.2 Pátio de Madeira — Recepção, descascamento, picagem e classificação dos cavacos 2.3 Cozimento Kraft — Variáveis, reagentes e controle do digestor 2.4 Lavagem e Branqueamento — Remoção de impurezas e alvejamento ECF/TCF 2.5 Secagem e Enfardamento — Formação de folhas, prensagem e embalagem dos fardos 2.6 Recuperação Química — Ciclo do licor negro, caustificação e reuso de reagentes
3	**Módulo 3 — Questões Econômicas do Setor** 3.1 Brasil no Mercado Global — Produção, exportações e vantagens competitivas 3.2 Tendências e Desafios — Bioeconomia, digitalização e sustentabilidade
4	**Encerramento** Glossário — Termos técnicos essenciais do setor de celulose Referências Bibliográficas — Fontes utilizadas na elaboração do material

Objetivos de Aprendizagem e Estrutura do Curso

Objetivos de Aprendizagem

O curso Introdução ao Processo de Produção de Celulose tem como objetivo capacitar os participantes a entenderem as principais etapas do processo de produção de celulose, desde a preparação da madeira até as questões econômicas do setor. Entre os objetivos específicos, estão: compreender as propriedades da celulose; reconhecer a importância da escolha da madeira; entender as variáveis do cozimento; saber sobre os processos de lavagem e branqueamento; e discutir a recuperação química e sua relevância econômica.

Compreender as propriedades da celulose

Reconhecer a importância da escolha da madeira

Entender as variáveis do cozimento

Saber sobre lavagem e branqueamento

Discutir a recuperação química e sua relevância econômica

Estrutura do Curso

1

Módulo 1: Introdução à Celulose

- O que é a celulose?
- Características e aplicabilidade da celulose

2

Módulo 2: Etapas do Processo de Produção

- Pátio de madeira: preparos e picagem
- Cozimento da madeira e suas variáveis
- Lavagem e branqueamento: conceitos fundamentais
- Secagem da celulose e sua importância

3

Módulo 3: Questões Econômicas do Setor

- Visão geral do mercado de celulose no Brasil
- Impacto econômico da produção de celulose global
- Tendências e desafios do setor

01

Módulo 1: Introdução à Celulose

O que é celulose, suas propriedades e aplicações industriais

ESTRUTURA MOLECULAR | PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS | APLICAÇÕES INDUSTRIAIS

1.1 — O que é a Celulose?

A celulose é o polímero orgânico mais abundante da Terra, compondo cerca de 33% da biomassa vegetal. É formada por cadeias lineares de moléculas de glicose unidas por ligações β-1,4-glicosídicas.

Composição

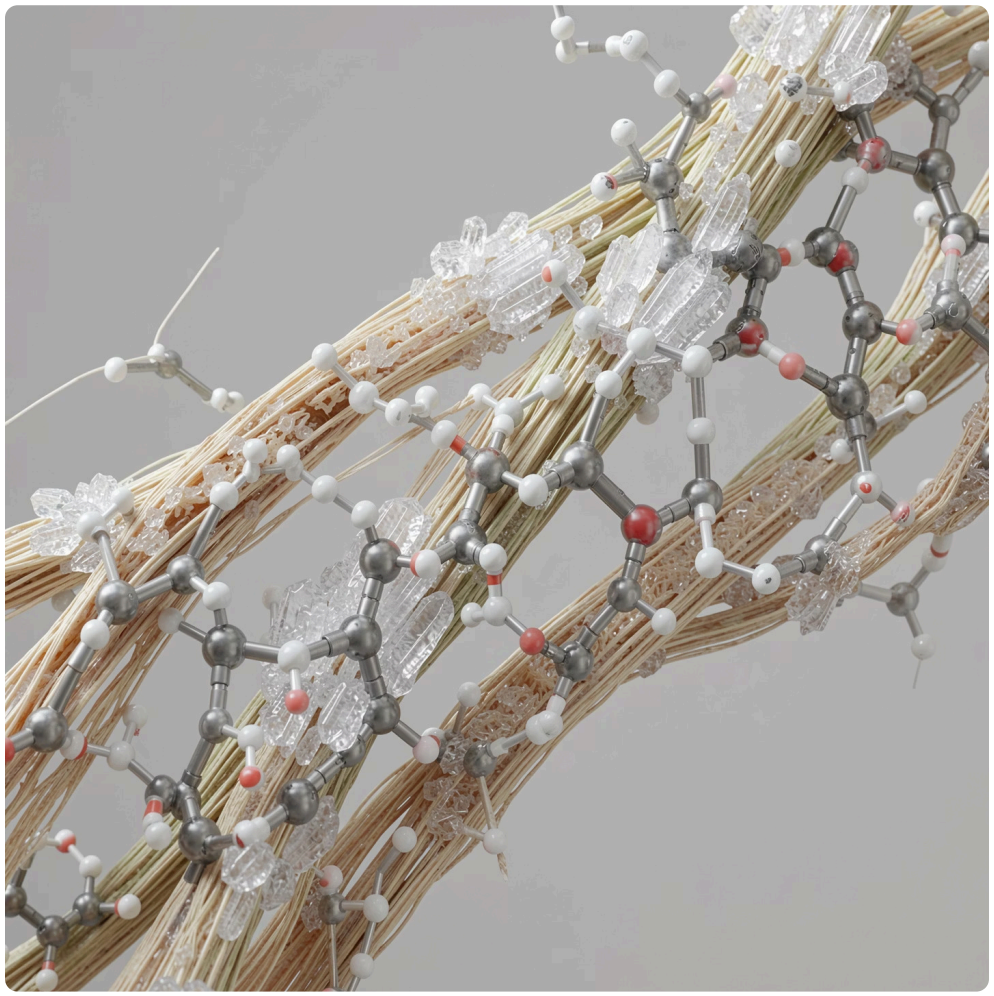
Cadeias de glicose $(C_6H_{10}O_5)_n$ unidas por ligações glicosídicas

Abundância

~33% da biomassa terrestre; biomolécula mais abundante do planeta

Estrutura

Fibras cristalinas e amorfas que conferem resistência mecânica



1.2 — Propriedades e Aplicações da Celulose

As propriedades únicas da celulose — resistência mecânica, biodegradabilidade e versatilidade — a tornam indispensável em múltiplos setores industriais.

Resistência Mecânica

Alta resistência à tração, ideal para papéis e embalagens

Biodegradabilidade

Decomposição natural, alternativa sustentável ao plástico

Absorção de Água

Alta capacidade de absorção, essencial em produtos higiênicos

Resistência Térmica

Estável até ~200°C antes de degradação

Insolubilidade

Insolúvel em água, solúvel apenas em solventes específicos

Renovabilidade

Fonte 100% renovável proveniente de florestas plantadas

Papel & Embalagem

Principal uso; papéis de impressão, cartões, embalagens

Têxteis

Viscose, lyocell e outras fibras celulósicas

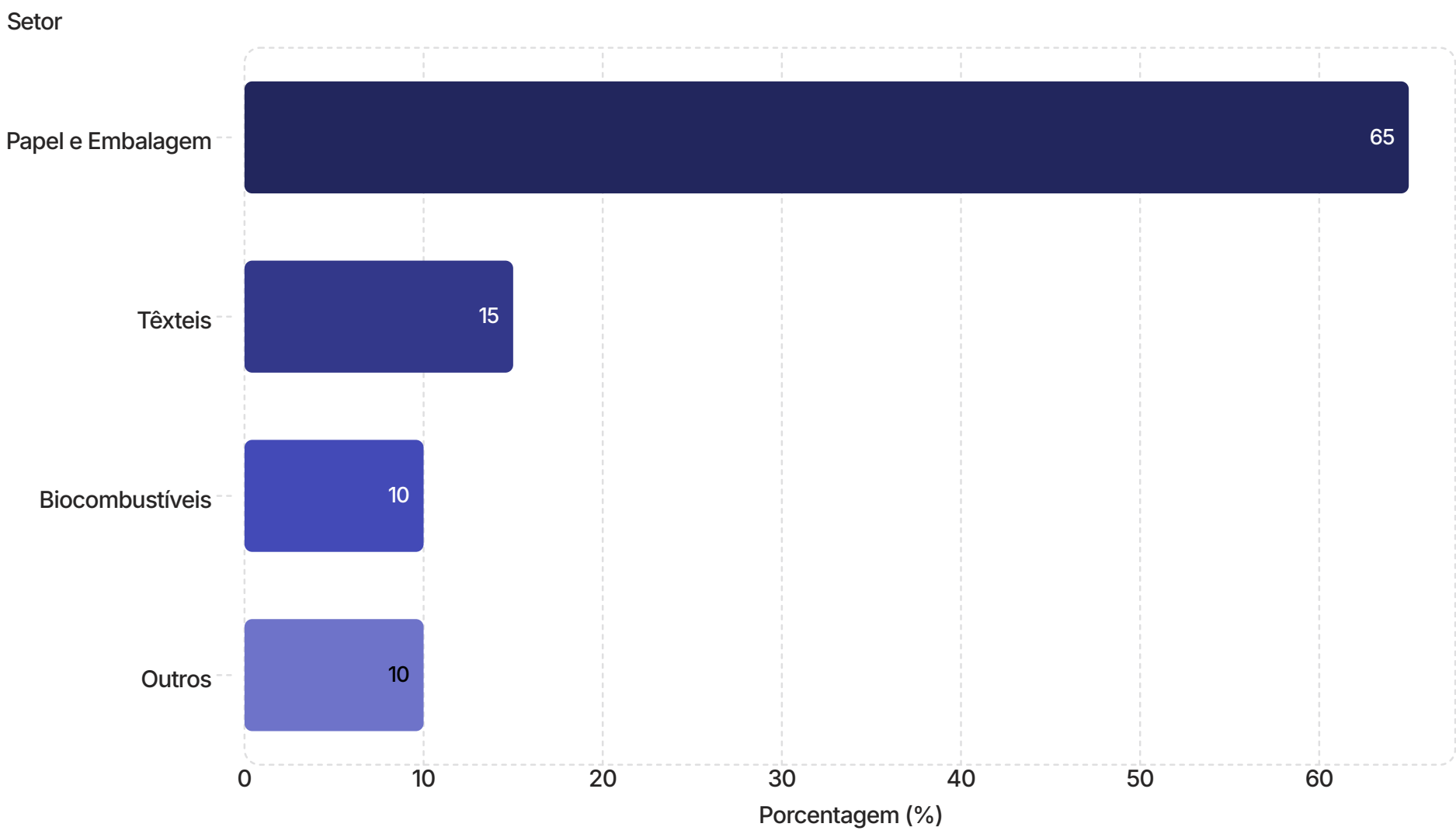
Biocombustíveis

Etanol celulósico de segunda geração

Bioplásticos

Alternativa sustentável ao plástico convencional

Distribuição do Uso da Celulose por Setor



Este gráfico ilustra a distribuição percentual do uso da celulose em diferentes setores industriais, destacando o papel e a embalagem como os principais consumidores.

Capítulo 1: Introdução à Celulose

A celulose é um polímero orgânico complexo que forma a base estrutural das paredes celulares das plantas, sendo a biomolécula mais abundante na Terra. Composta predominantemente por cadeias de glicose, a celulose fornece não apenas suporte estrutural às plantas, mas também desempenha um papel crucial na biosfera, sendo um dos principais componentes das indústrias de papel e celulose, biocombustíveis e materiais compostos. Tornou-se fundamental na atualidade, não apenas por sua abundância, mas também por suas propriedades versáteis que a tornam adequada para uma variedade de aplicações industriais, como embalagens, têxteis e fibras sintéticas.



O processo de produção da celulose envolve etapas complexas e delicadas que transformam madeira em polpas adequadas para processos industriais. Desde a seleção da madeira, etapas de cozimento, filtração até o branqueamento, cada uma dessas fases tem um impacto direto na qualidade da celulose produzida. A compreensão dessas etapas é essencial não apenas para a eficiência do processo industrial, mas também para garantir a sustentabilidade e a qualidade do produto final.

O que é a Celulose?

A celulose é um polímero orgânico natural, predominantemente encontrado nas paredes celulares das plantas. Formada por longas cadeias de moléculas de glicose, a celulose é a principal responsável pela estrutura e rigidez das células vegetais. Este biopolímero não é apenas abundante—representando cerca de 30% da biomassa terrestre—mas também é essencial na produção de diversos produtos, incluindo papel, têxteis e biocombustíveis. A estrutura química da celulose, composta por unidades repetitivas de anidro-glicose, confere a ela características de resistência e biocompatibilidade, fazendo dela um composto altamente valorizado na indústria.

As propriedades da celulose, como a sua alta absorção de água e biodegradabilidade, a tornam ideal para uma variedade de aplicações. No setor de celulose e papel, a celulose é o componente fundamental que define as características do produto final. As empresas investem continuamente em tecnologias para melhorar a qualidade da celulose obtida e otimizar o processo de fabricação. Com a demanda crescente por produtos sustentáveis, a celulose também se destaca como uma alternativa na produção de materiais biodegradáveis e renováveis, alinhando-se com as diretrizes globais de sustentabilidade.

No Brasil, a produção de celulose é uma atividade econômica significativa, com o país se posicionando como um dos maiores exportadores mundiais desse produto. Em 2021, segundo dados da IBA, o Brasil respondeu por cerca de 25% da produção global de celulose, o que resulta sua importância na economia. Empresas como Suzano e Klabin são protagonistas nesse setor, adotando práticas inovadoras para maximizar a eficiência produtiva e a qualidade do produto final.

Processos como a digestão química, que transforma a madeira em celulose, são fundamentais para a indústria. Este processo envolve a quebra das ligações que mantêm as moléculas de celulose unidas às ligninas e hemiceluloses, resultando em uma polpa de celulose que pode ser transformada em papel ou outros produtos. O uso do processo Kraft, um dos métodos predominantes para a produção de celulose, não só maximiza o rendimento do material como também permite a recuperação dos produtos químicos utilizados, tornando o processo mais sustentável.

A qualidade da celulose é criteriosamente avaliada em relação a características como alvura, viscosidade e resistência. A alvura, por exemplo, é um aspecto crucial na produção de papéis de impressão, onde níveis altos alvuras são desejadas para garantir legibilidade e a fidelidade das cores. A viscosidade, por sua vez, é um indicador da integridade das cadeias de celulose e está diretamente relacionada à resistência do papel produzido.

O impacto econômico da produção de celulose é substancial, contribuindo para a geração de empregos, desenvolvimento regional e exportações. A indústria de celulose é responsável por milhares de empregos diretos e indiretos no Brasil, e empresas têm investido em pesquisa e desenvolvimento para aumentar sua competitividade no mercado global.

A celulose também é um componente-chave na viabilidade e políticas de uso sustentável da terra. Com a crescente pressão para diversificar as fontes de matéria-prima, projetos que envolvem cultivo de plantios de eucalipto e pinus têm mostrado não apenas a viabilidade econômica, mas também um impacto ambiental reduzido, uma vez que a celulose reciclável é um dos principais componentes de materiais de papel.

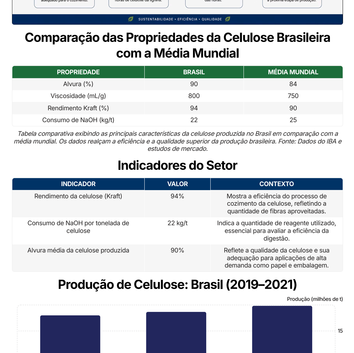
Além disso, a celulose apresenta-se como fundamental na transição global em direção a uma economia circular. Iniciativas para a reciclagem da celulose têm ganhado um impulso significativo. O ciclo de vida do papel e da celulose está sendo analisado sob uma nova ótica, onde a reutilização é tão importante quanto a produção inicial, promovendo assim a redução dos resíduos e melhor aproveitamento dos recursos.

> **Aplicação Prática:** A compreensão da natureza e propriedades da celulose tem implicações profundas para a operação e a administração da indústria de celulose e papel. Os operadores devem estar bem informados sobre as características da celulose, uma vez que isso influencia diretamente o processo de fabricação. Por exemplo, o tratamento da madeira antes da digestão química, incluindo a pesagem e o controle de umidade, pode afetar significativamente a eficiência do processo de cozimento e a qualidade da celulose produzida.

POLÍMERO NATURAL | PROCESSO KRAFT | ALVURA | RECUPERAÇÃO QUÍMICA | CICLO DE VIDA DA CELULOSE

Fluxo do Processo de Produção de Celulose

Este fluxograma apresenta as etapas principais desde a preparação da madeira até a obtenção da celulose.



Comparação das Propriedades da Celulose Brasileira com a Média Mundial

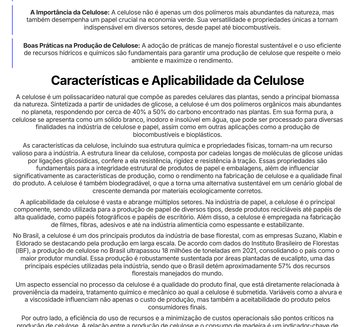
PROPRIEDADE	BRASIL	MÉDIA MUNDIAL
Alvura (%)	90	84
Viscosidade (mL/g)	800	750
Rendimento Kraft (%)	94	90
Consumo de NaOH (kg/t)	22	25

Tabela comparativa exibindo as principais características da celulose produzida no Brasil em comparação com a média mundial. Os dados realçam a eficiência e a qualidade superior da produção brasileira. Fonte: Dados do IBÁ e estudos de mercado.

Indicadores do Setor

INDICADOR	VALOR	CONTEXTO
Rendimento da celulose (Kraft)	94%	Mostra a eficiência do processo de cozimento da celulose, refletindo a quantidade de fibras aproveitadas.
Consumo de NaOH por tonelada de celulose	22 kg/t	Indica a quantidade de reagente utilizado, essencial para avaliar a eficiência da digestão.
Alvura média da celulose produzida	90%	Reflete a qualidade da celulose e sua adequação para aplicações de alta demanda como papel e embalagem.

Produção de Celulose: Brasil (2019–2021)



Fonte: Relatório da FAO

Estudo de Caso: Produção de Celulose na Suzano

Cenário: A Suzano, uma das principais empresas do setor de celulose e papel do Brasil, implementou tecnologias avançadas de produção em sua planta na Bahia. A empresa investiu em processos sustentáveis e inovação tecnológica para melhorar a eficiência e a qualidade da sua celulose, desafiando o mercado nacional e internacional.

Análise Técnica: O processo de produção na fábrica da Suzano é um modelo de eficiência. Ele utiliza tecnologia de ponta para maximizar a recuperação de produtos químicos, reduzindo resíduos e otimizando recursos hídricos. Em 2021, a empresa alcançou um rendimento de 94% em seu processo Kraft, posicionando-se na vanguarda da eficiência setorial. Dados indicam que o investimento em processos de melhora continua proporcionou redução de 15% no consumo de NaOH por tonelada de celulose, demonstrando um compromisso com a sustentabilidade e redução de custos de produção.

Conclusões: O estudo de caso da Suzano ilustra que a inovação e a sustentabilidade não são apenas benéficas para o meio ambiente, mas também vitais economicamente. As iniciativas da empresa refletem a importância de integrar práticas sustentáveis na produção de celulose, garantindo que o Brasil permaneça como líder global no setor.

A Importância da Celulose: A celulose não é apenas um dos polímeros mais abundantes da natureza, mas também desempenha um papel crucial na economia verde. Sua versatilidade e propriedades únicas a tornam indispensável em diversos setores, desde papel até biocombustíveis.

Boas Práticas na Produção de Celulose: A adoção de práticas de manejo florestal sustentável e o uso eficiente de recursos hídricos e químicos são fundamentais para garantir uma produção de celulose que respeite o meio ambiente e maximize o rendimento.

Características e Aplicabilidade da Celulose

A celulose é um polissacarídeo natural que compõe as paredes celulares das plantas, sendo a principal biomassa da natureza. Sintetizada a partir de unidades de glicose, a celulose é um dos polímeros orgânicos mais abundantes no planeta, respondendo por cerca de 40% a 50% do carbono encontrado nas plantas. Em sua forma pura, a celulose se apresenta como um sólido branco, inodoro e insolúvel em água, que pode ser processada para diversas finalidades na indústria de celulose e papel, assim como em outras aplicações como a produção de biocombustíveis e bioplásticos.

As características da celulose, incluindo sua estrutura cristalina e propriedades físicas, tornam-na um recurso valioso para a indústria. A estrutura linear da celulose, composta por cadeias longas de moléculas de glicose unidas por ligações glicosídicas, confere a ela resistência, rigidez e resistência à tração. Essas propriedades são fundamentais para a integridade estrutural de produtos de papel e embalagens, além de influenciar significativamente as características de produção, como o rendimento e a fabricação de celulose e a qualidade final do produto. A celulose é também biodegradável, o que a torna uma alternativa sustentável em um cenário global de crescente demanda por materiais ecologicamente corretos.

A aplicabilidade da celulose é vasta e abrange várias indústrias setoriais. Na indústria de papel, a celulose é o principal componente, sendo utilizada para a produção de papel de diversos tipos, desde produtos recicláveis até papéis de alta qualidade, como papéis fotográficos e papéis de escritório. Além disso, a celulose é empregada na fabricação de fibras, fibras, adesivos e até na indústria alimentícia como espessante e estabilizante.

No Brasil, a celulose é um dos principais produtos da indústria de base florestal, com as empresas Suzano, Klabin e Eldorado se destacando pela produção em larga escala. De acordo com dados do Instituto Brasileiro de Florestas (IBF), a produção de celulose no Brasil ultrapassou 18 milhões de toneladas em 2021, consolidando o país como o maior produtor mundial. Essa produção é robustamente sustentada por áreas plantadas de eucalipto, uma das principais espécies utilizadas pela indústria, sendo que o Brasil detém aproximadamente 57% dos recursos florestais mundiais de eucalipto.

Um aspecto essencial no processo da celulose é a qualidade do produto final, que está diretamente relacionada à proveniência da madeira, tratamento químico e mecânico ao qual a celulose é submetida. Variáveis como a alvura e a viscosidade influenciam não apenas o custo de produção, mas também a acetabilidade do produto pelos consumidores finais.

Por outro lado, a eficiência do uso de recursos e a minimização de custos operacionais são pontos críticos na produção de celulose. A relação entre a produção de celulose e o consumo de madeira é um indicador-chave de performance (KPI) na indústria. O consumo típico de madeira é de aproximadamente 2,5 a 3,5 m³ de madeira para produzir uma tonelada de celulose, dependendo das especificidades do processo produtivo.

Outro fator importante a se considerar são os impactos ambientais associados à produção de celulose. A indústria tem investido em tecnologias que promovam a recuperação química e o uso eficiente de recursos hídricos e energéticos. No processo Kraft, por exemplo, ocorre a recuperação de produtos químicos, como o hidróxido de sódio, que podem ser reutilizados, reduzindo assim os custos operacionais e a geração de resíduos.

A inovação no uso da celulose está permitindo também o desenvolvimento de novas aplicações, como os bioplásticos, que são uma alternativa ao plástico convencional, e novos tipos de papel que incluem funcionalidades adicionais, como resistência a umidade e propriedades antibacterianas.

Tabela Comparativa: Características da Celulose e suas Aplicabilidades

CARACTERÍSTICA	APLICAÇÃO	IMPACTO ECONÔMICO
Resistência mecânica	Produção de papéis e embalagens	Redução de custos de transporte e armazenamento
Biodegradabilidade	Uso em produtos descartáveis	Menor impacto ambiental
Versatilidade	Fabricação de têxteis, biocombustíveis e bioplásticos	Diversificação de mercado

Fonte: Baseado no conhecimento extraído da Biblioteca Técnica da Academia Celulose 360°.

Indicadores do Setor — Características e Aplicabilidade

INDICADOR	VALOR	CONTEXTO
Produção de Celulose	18 milhões de toneladas	O Brasil lidera a produção mundial, respondendo por uma fatia significativa do mercado.
Área Plantada de Eucalipto	3 milhões de hectares	Essas áreas são fundamentais para garantir a oferta contínua de madeira.
Rendimento da Produção	3 m³/tonelada	Medida crucial para avaliar a eficiência do processo e a sustentabilidade.

Comparação de Alvura na Celulose Branqueada

TIPO DE CELULOSE	ALVURA (%)	CONSUMO DE QUÍMICOS (kg/t)
Celulose Kraft	90–95	50–80
Celulose ECF	85–90	30–50
Celulose TCF	80–85	60–90

Comparação dos níveis de alvura em diferentes tipos de celulose branqueada. Fonte: Dados extraídos do documento de "Pulp Bleaching".

Indicadores do Setor — Alvura e Qualidade

INDICADOR	VALOR	CONTEXTO
Alvura da Celulose Branqueada	90–95%	Importante para a qualidade do papel produzido, diretamente relacionado ao processo de branqueamento.
Consumo de NaOH na Produção	70–80 kg/t	Impacta diretamente os custos de produção e a eficiência do processo.
Rendimento Kraft	50–55%	Relação entre a quantidade de madeira utilizada e a celulose obtida.

Desafios Operacionais e Boas Práticas

Desafios Operacionais

Um dos principais desafios operacionais no processamento de celulose é a variabilidade da matéria-prima, que é a madeira. Diferentes espécies de árvores apresentam composições químicas e físicas distintas, afetando diretamente a eficiência do cozimento e a qualidade da celulose. Por exemplo, variações na lignina e hemicelulose podem resultar em diferentes níveis de resistência e alvura da polpa. Isso demanda um controle rigoroso durante a seleção da madeira e a preparação do material para o processamento.

Outro desafio significativo é a recuperação química dos subprodutos gerados durante a produção de celulose, especialmente no processo Kraft, onde o licor negro é uma preocupação central. A recuperação e reuso eficaz deste licor são fundamentais para reduzir os custos operacionais e mitigar os impactos ambientais da produção.

Boas Práticas

As melhores práticas no processo de produção de celulose começam com a criação de um controle rigoroso da qualidade da matéria-prima. Isso envolve a realização de testes de laboratório para determinar a composição química da madeira e assegurar que apenas as espécies de maior rendimento e qualidade sejam utilizadas no processamento.

Em termos de recuperação química, investir em tecnologias avançadas de destilação e purificação do licor negro pode não só melhorar a eficiência do processo, mas também contribuir para uma redução significativa dos custos operacionais. A realização de auditorias regulares pode ajudar as fábricas a identificar ineficiências e oportunidades de melhoria em seus sistemas.

Resumo do Capítulo: A celulose, por ser o polímero orgânico mais abundante, possui um papel central na indústria moderna. Este capítulo abordou os conceitos fundamentais associados à celulose, destacando suas características e aplicabilidades em um variado conjunto de produtos. Destacou-se a importância da matéria-prima e as variáveis envolvidas no processo de produção, que influenciam diretamente a qualidade da celulose final, refletindo na eficiência operacional das fábricas.

02

Módulo 2: Etapas do Processo de Produção

Do pátio de madeira à celulose seca — cada etapa do processo industrial

PÁTIO DE MADEIRA | COZIMENTO KRAFT | LAVAGEM & BRANQUEAMENTO | SECAGEM

2.1 — Fluxograma Geral do Processo de Produção de Celulose

O processo de produção de celulose Kraft envolve uma sequência integrada de etapas físicas e químicas. Compreender o fluxo completo é essencial para identificar pontos de controle e oportunidades de otimização.

Fluxograma: Processo de Obtenção da Celulose

1



Pátio de Madeira

Recepção, triagem e armazenamento da madeira para garantir a qualidade dos cavacos.

OBJETIVO:

Receber e armazenar a madeira adequadamente.

2



Picagem

Transformação da madeira em cavacos de espessura de até 8 cm para o cozimento.

OBJETIVO:

Preparar a madeira em cavacos para o processo de cozimento.

3



Cozimento Kraft

Digestão dos cavacos com NaOH e Na_2S a temperaturas de 160–180°C para a dissolução da lignina.

OBJETIVO:

Dissolver a lignina e obter celulose.

4



Lavagem

Remoção do licor negro e impurezas, assegurando a pureza da celulose obtida.

OBJETIVO:

Limpar a celulose para otimizar o branqueamento.

5



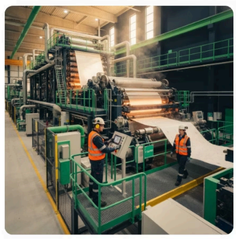
Branqueamento

Uso de métodos ECF ou TCF para alcançar alvura entre 88–95% na celulose.

OBJETIVO:

Branquear a celulose para os padrões de mercado.

6



Secagem

Remoção de umidade até alcançar níveis de 9–12% para a celulose final.

OBJETIVO:

Secar a celulose para garantir qualidade e conservação.

7



Celulose Final

Fardos de celulose prontos para exportação ou uso na fabricação de papel.

OBJETIVO:

Preparar a celulose para distribuição e mercado.

Um processo integrado e sustentável que promove a utilização consciente dos recursos florestais.

50%

Rendimento Kraft

Conversão de ma deira em celulose

160–180°C

Temp. de Cozimento

Faixa de temperatura para digestão

90–95%

Alvura Final

Brancura após branqueamento

9–12%

Teor de Umidade

Após o processo de secagem

Processo Kraft representa >90% da produção mundial de celulose química.

2.2 — Pátio de Madeira: Preparação e Picagem

O pátio de madeira é o ponto de entrada da matéria-prima. A qualidade da preparação impacta diretamente todas as etapas subsequentes do processo.

Etapas do Pátio de Madeira

01



Recepção da Madeira

Recebimento e pesagem dos troncos de eucalipto. Controle de qualidade e triagem por diâmetro e comprimento. Produtividade média: 22–25 ton/hora.

02



Descascamento

Remoção da casca dos troncos em tambores rotativos. Reduz impurezas e melhora a qualidade do cozimento. A casca removida é usada como biomassa energética.

03



Picagem

Corte dos troncos em cavacos de 1–5 cm em picadores de disco. Uniformidade é essencial para cozimento homogêneo. Produção de 20–25 ton/hora.

04



Classificação e Armazenamento

Peneiras vibratórias separam cavacos por tamanho. 80–90% devem estar dentro da especificação. Armazenamento em pátio coberto para controle de umidade (25–35%).

A uniformidade dos cavacos é fundamental — variações de tamanho resultam em cozimento desigual e perda de rendimento.

2.3 — Cozimento Kraft: Variáveis e Controle

O cozimento Kraft é o coração do processo de produção de celulose. Nesta etapa, a lignina é dissolvida por ação química, liberando as fibras de celulose puras.

NaOH (Soda Cáustica)

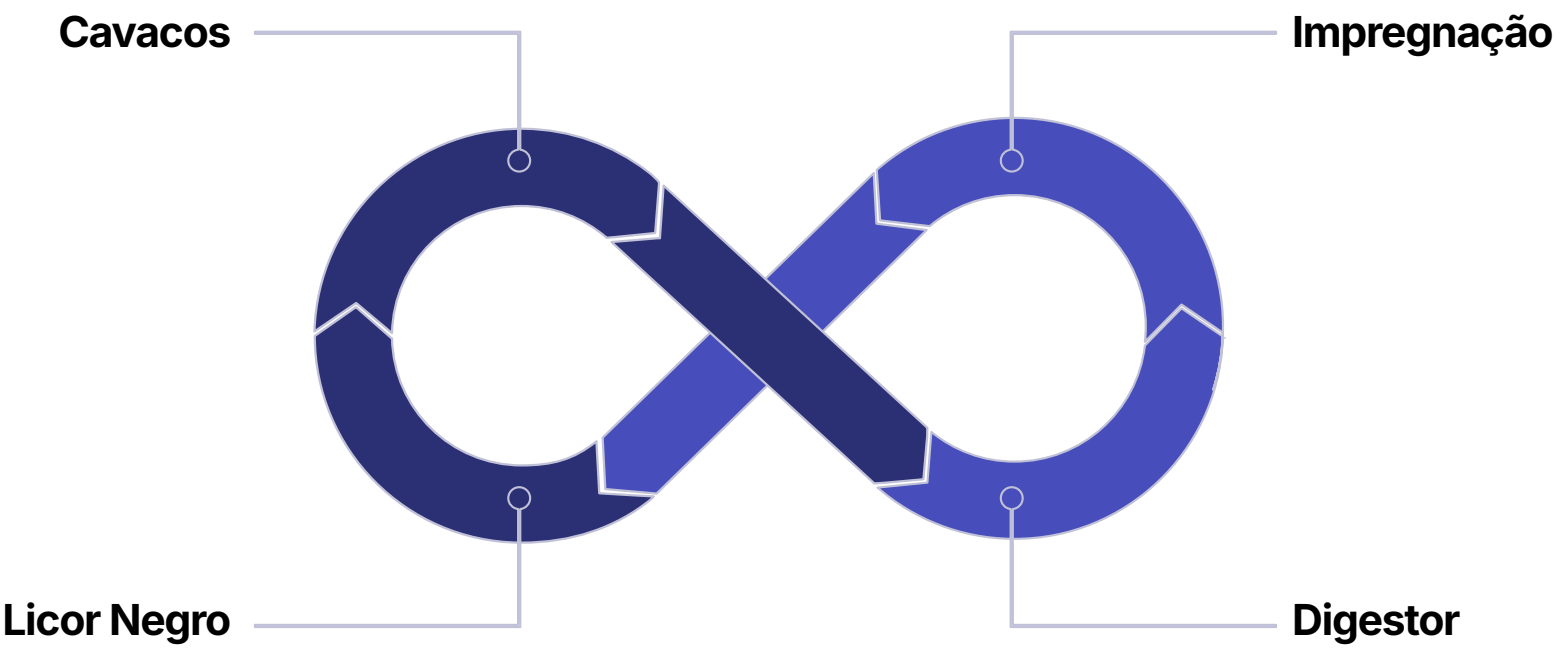
Concentração ideal: 18–20%. Dissolve a lignina e hemiceluloses

Na_2S (Sulfeto de Sódio)

Acelera a deslignificação e melhora o rendimento

Licor Branco

Mistura de NaOH + Na_2S; solução ativa do cozimento



Este diagrama ilustra o ciclo contínuo do processo de cozimento Kraft, destacando as transformações do material e dos reagentes químicos.



140	4,0	80	700
160	3,5	85	600
180	3,0	90	500

A tabela demonstra como a temperatura de cozimento afeta diretamente o rendimento, a alvura e a viscosidade da celulose.

18–20%

Concentração ideal de NaOH

50%

Rendimento Kraft médio

80%

Taxa de recuperação do NaOH

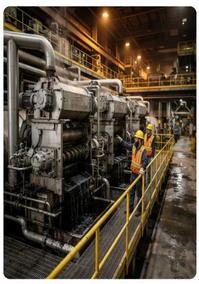
> **Estudo de Caso — Klabin Telêmaco Borba:** Controle preciso de temperatura resultou em melhoria de 10% na viscosidade e redução de 15% no consumo de NaOH.

2.4 — Lavagem e Branqueamento

Após o cozimento, a celulose passa por lavagem para remoção de impurezas, branqueamento para atingir a alvura desejada e secagem para garantir qualidade no armazenamento e transporte.

Fluxograma: Processo de Lavagem e Branqueamento de Celulose Kraft

1



Lavagem Primária de Licor Negro

Remoção inicial do licor negro concentrado da polpa de celulose após a digestão Kraft. Utiliza prensas de alta performance com rolos de compressão, que aplicam força mecânica para deslocar o licor. O licor residual é encaminhado para a recuperação química, conforme descrito em 'Chemical Recovery in the Alkaline Pulping Processes'.

OBJETIVO:
Separar o licor negro da fibra de celulose.

2

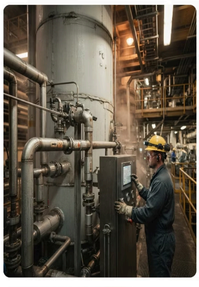


Lavagem Secundária (Prensas)

Etapa subsequente de lavagem da polpa para remover licor residual remanescente. Múltiplas prensas (frequentemente em série) são empregadas para maximizar a extração de sólidos dissolvidos e otimizar a eficiência da lavagem antes do branqueamento. A água de lavagem é adicionada para auxiliar na separação.

OBJETIVO:
Reduzir a concentração de licor residual na polpa.

3

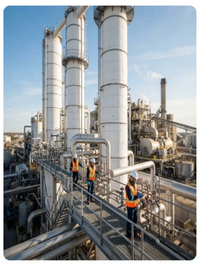


Adição de Reagentes de Branqueamento

Introdução de agentes químicos de branqueamento na polpa de celulose, tipicamente dióxido de cloro (ClO2) ou peróxido de hidrogênio (H2O2), em torres de reação. As dosagens são controladas para otimizar a deslignificação e minimizar a degradação da celulose, com base em princípios cinéticos de reações químicas.

OBJETIVO:
Iniciar a remoção da lignina residual com reagentes químicos.

4

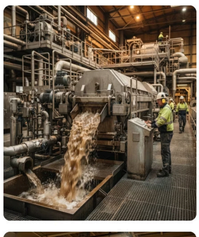


Reação de Branqueamento (Torre)

Tempo de residência controlado na torre de branqueamento vertical para permitir que os reagentes químicos reajam com a lignina residual, clareando a polpa. O controle de temperatura é mantido, embora dados específicos não estejam disponíveis, para otimizar a cinética da reação.

OBJETIVO:
Completar a reação química de branqueamento e deslignificação.

5

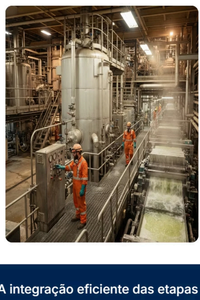


Lavagem Inter-Estágios

Após cada estágio de branqueamento, a polpa é lavada em prensas para remover os subprodutos da reação química e os reagentes residuais. Isso garante a eficiência dos estágios subsequentes de branqueamento e prepara a polpa para a próxima etapa.

OBJETIVO:
Remover reagentes e subprodutos após a reação de branqueamento.

6



Estágio Final de Branqueamento

A polpa passa por um último estágio de branqueamento (podendo envolver diferentes reagentes como ozônio ou peróxido, dependendo do grau de alvura desejado) seguido por lavagem final, garantindo que a polpa atinja as especificações de alvura e pureza exigidas.

OBJETIVO:
Alcançar o alvura e pureza final da celulose.

A integração eficiente das etapas de lavagem e branqueamento é crucial para maximizar a qualidade da celulose e a recuperação química, refletindo o compromisso com a sustentabilidade e a otimização de recursos na indústria de papel e celulose.

Fluxograma: Processo de Lavagem e Branqueamento de Celulose Kraft — etapas sequenciais do processo. Fonte: Acervo Celulose 360º

LAVAGEM	BRANQUEAMENTO
Remoção do licor negro e reagentes. Eficiência: 95%. Consumo de água: 30 m^3/ton	Aumento da alvura para 88–95%. Métodos: ECF (com ClO_2) ou TCF (sem cloro)

Comparação de Métodos de Branqueamento

ECF — Elementary Chlorine Free	Utiliza dióxido de cloro (ClO_2) em substituição ao cloro elementar. Processo mais comum na indústria moderna.	88–90% — Alvura elevada adequada para papéis de impressão e escrita de alta qualidade.	Baixo impacto. Reduz em até 90% a formação de organoclorados (AOX) em relação ao cloro puro. Aceito pelos principais mercados internacionais.
TCF — Totally Chlorine Free	Não utiliza nenhum composto clorado. Emprega ozônio (O_3), peróxido de hidrogênio (H_2O_2) e oxigênio como agentes branqueadores.	90–92% — Alvura superior, ideal para papéis especiais, tissue e mercados com rigorosas exigências ambientais.	Impacto mínimo. Zero emissão de compostos organoclorados. Preferido em mercados europeus e certificações ambientais como FSC e PEFC.
Cloro Total — Elemental Chlorine (EC)	Utiliza cloro elementar (Cl_2) diretamente no processo. Método em desuso na maioria dos países desenvolvidos.	85–88% — Alvura inferior aos métodos modernos. Pode apresentar amarelamento ao longo do tempo.	Alto impacto ambiental. Gera compostos organoclorados (dioxinas e furanos) altamente tóxicos. Proibido ou restrito em diversos mercados internacionais.

A Klabin implementou branqueamento TCF e reduziu 30% no consumo de químicos, alcançando alvura de 91% — vantagem competitiva em mercados sustentáveis.

2.5 — Secagem e Enfardamento da Celulose

A secagem e o enfardamento são as etapas finais do processo de produção antes da expedição. Determinam a qualidade final do produto, sua vida útil e adequação para transporte e armazenamento internacional.



Linha de secagem e enfardamento industrial — celulose prensada em fardos de ~250 kg para exportação. Fonte: Acervo Celulose 360º

Processo de Secagem e Enfardamento

01

Formação da Folha

A celulose úmida (~50% umidade) é formada em folhas contínuas na máquina de secagem (secador flash ou cilindros aquecidos). A espessura e uniformidade da folha são controladas por sensores automáticos.

02

Secagem Final

As folhas passam por cilindros aquecidos a 100–150°C, reduzindo a umidade para 9–12% (Norma ISO 638). O controle preciso evita degradação das fibras e garante alvura uniforme.

03

Corte e Prensagem

As folhas secas são cortadas em tamanho padrão e prensadas em fardos de ~250 kg por prensas hidráulicas de alta pressão. A densidade do fardo impacta diretamente nos custos logísticos.

04

Embalagem e Identificação

Os fardos são envoltos em filme plástico resistente à umidade, identificados com etiquetas de rastreabilidade (lote, data, alvura, umidade) e paletizados para expedição.

Métodos de Secagem

Método — Tecnologia de secagem utilizada	Eficiência (GJ/t) — Energia consumida por tonelada produzida	Umidade Final (%) — Teor de umidade residual da celulose	Custo (R$/t) — Custo operacional médio por tonelada	Tendência — Adoção atual no setor
Convencional (Cilindros)	4,5	9–12%	R$ 150/t	Consolidado
A Vapor (Flash Dryer)	3,8	6–9%	R$ 120/t	Em expansão
Micro-ondas	3,2	7–10%	R$ 100/t	Emergente

Parâmetros Técnicos do Enfardamento

Peso do fardo	~250 kg	Padrão internacional
Umidade final	9–12%	ISO 638
Dimensões (cm)	80×60×50	Padrão de exportação
Resistência à compressão	>2 ton	Requisito logístico
Temperatura de secagem	100–150°C	Controle operacional
Densidade do fardo	700–800 kg/m³	Eficiência de transporte

~250 kg

Peso padrão por fardo

9–12%

Umidade final (ISO 638)

50%

Participação da secagem no custo energético total

Desafios Operacionais

- Variação de umidade entre lotes pode comprometer a qualidade
- Alto consumo energético (~50% do total da fábrica)
- Manutenção dos cilindros de secagem exige paradas programadas
- Controle de temperatura crítico para evitar degradação das fibras

Boas Práticas

- Sensores de umidade em tempo real ao longo da linha
- Manutenção preditiva dos equipamentos de secagem
- Monitoramento contínuo da alvura e viscosidade pós-secagem
- Rastreabilidade completa por lote para mercados exigentes

Estudo de Caso — Suzano: A Suzano implementou sensores de umidade em tempo real na linha de secagem em sua planta na Bahia. O sistema permite ajustes automáticos nas condições operacionais, reduzindo o consumo de energia em 15% e garantindo uniformidade nos fardos — economia de R$ 1,2 milhão/ano e aumento de 8% na satisfação dos clientes exportadores.

2.6 — Recuperação Química: O Ciclo do Licor Negro

A recuperação química é um dos pilares da sustentabilidade e viabilidade econômica do processo Kraft. O licor negro gerado no cozimento contém lignina e reagentes que podem ser recuperados e reutilizados.



O que é o Licor Negro?

Composição

Lignina dissolvida, hemiceluloses e reagentes químicos (NaOH, Na_2S)

Valor Energético

Alto poder calorífico: 13–14 GJ/ton de sólidos secos

Recuperação

Até 80% do NaOH pode ser recuperado e reutilizado

Etapas da Recuperação

01

1. Concentração

Evaporação do licor negro até 65–85% de sólidos

02

2. Queima

Combustão na caldeira de recuperação (geração de energia)

03

3. Dissolução

Smelt dissolvido em água fraca → licor verde

04

4. Caustificação

Conversão do licor verde em licor branco (NaOH + Na_2S)

80%

NaOH recuperado e reutilizado

13–14 GJ/t

Poder calorífico do licor negro

65–70%

Concentração de sólidos antes da queima



03

Módulo 3: Questões Econômicas do Setor

Mercado global, impacto econômico e tendências da indústria de celulose.

MERCADO BRASILEIRO | IMPACTO GLOBAL | TENDÊNCIAS & DESAFIOS

Capítulo 3: Questões Econômicas do Setor de Celulose

O setor de celulose é uma das indústrias mais relevantes na economia brasileira, e sua importância vai além da geração de empregos e da movimentação de insumos. A celulose não é apenas um produto resultante da conversão de madeira; é uma commodity vital nas economias globais, cujo uso se estende a diversos produtos, desde papel até biocombustíveis e materiais compostos. O Brasil, sendo um dos maiores produtores e exportadores de celulose do mundo, desempenha um papel crucial no suprimento global e na definição dos preços desta commodity.

Visão Geral do Mercado de Celulose no Brasil

O mercado de celulose no Brasil é um dos mais robustos e dinâmicos do mundo, representando um setor estratégico para a economia nacional. O Brasil é o maior produtor de celulose do planeta, contribuindo significativamente para as exportações e gerando milhares de empregos diretos e indiretos. A produção de celulose no país é em grande parte sustentada por florestas plantadas de eucalipto, que são reconhecidas pela alta produtividade e qualidade da madeira.

As florestas plantadas estão localizadas principalmente em regiões como o Sul e o Sudeste do Brasil, onde o clima e o solo são favoráveis ao cultivo. De acordo com dados do IBA, cerca de 7,5 milhões de hectares estão dedicados à silvicultura, o que garante o suprimento de matéria-prima para as indústrias. Este cenário é impulsionado por práticas de manejo sustentável, que visam não apenas a rentabilidade econômica, mas também a preservação ambiental e a responsabilidade social das empresas.

O processo de produção de celulose envolve desde a colheita da madeira até a produção dos produtos finais, como papéis e celulose para usos industriais. Principais empresas do setor, como Suzano e Klabin, têm investido em tecnologias avançadas e práticas inovadoras na cadeia produtiva, otimização dos processos de cozimento e branqueamento, aumentando a eficiência energética e reduzindo o impacto ambiental.

Economicamente, a produção de celulose tem apresentado resultados expressivos. Em 2020, por exemplo, o Brasil exportou oficialmente cerca de 14,6 milhões de toneladas de celulose, o que representou receitas de aproximadamente US$ 5 bilhões. Esses números evidenciam a competitividade do setor no mercado global, colocando o Brasil em uma posição privilegiada frente a outros países.

Além disso, os preços internacionais da celulose têm mostrado tendências de crescimento, em resposta à alta demanda por produtos de papel e celulose em várias regiões do mundo, especialmente na Ásia e na América do Norte. Entre 2019 e 2021, os preços da celulose subiram significativamente, refletindo a recuperação das indústrias pós-pandemia.

Outro ponto importante é a relação entre a produção de celulose e a sustentabilidade. O Brasil tem se destacado por suas práticas de reflorestamento e uso racional da terra, com um dos mais altos índices de áreas replantadas. O compromisso com certificações como FSC e PEFC demonstra o compromisso do setor com a sustentabilidade.

Em termos de desafios, o setor enfrenta a necessidade de aumentar a eficiência no uso dos recursos hídricos e na gestão dos resíduos gerados no processo produtivo. A implementação de tecnologias de recuperação química e reuso de água tem sido uma prioridade.

Impacto Econômico da Produção de Celulose Global

A produção de celulose é um dos pilares da indústria de papel e celulose, sendo fundamental para muitas economias em escala global. A celulose é utilizada em uma ampla variedade de produtos, desde papel e embalagens até biocombustíveis e materiais compostos, o que reflete sua versatilidade e demanda crescente. Este cenário apresenta uma interligação direta entre a produção de celulose e o crescimento econômico, tanto a nível macroeconômico quanto microeconômico.

Primeiramente, a produção de celulose mobiliza uma vasta cadeia produtiva que inclui a silvicultura, a industrialização e a logística. No Brasil, cerca de 8,4 milhões de hectares são plantados com florestas cultivadas, representando uma importante fonte de matéria-prima. Segundo o IBA, em 2021, o Brasil produziu aproximadamente 19,6 milhões de toneladas de celulose, consolidando-se como o maior produtor mundial. Essa massiva produção não só atende a demanda interna, que tem crescido em paralelo ao aumento do consumo doméstico, mas também sustenta uma robusta exportação, alcançando valores superiores a 9 bilhões de dólares no mesmo ano.

Ademais, a produção de celulose tem um papel preponderante na geração de empregos. As fábricas de celulose e papel não apenas oferecem empregos diretos, mas também promovem a criação de postos de trabalho indiretos nas comunidades estaduais e locais. Um estudo recente indicou que a indústria de celulose e papel no Brasil gera aproximadamente 1 milhão de empregos diretos e indiretos. Esse número demonstra a importância econômica do setor, refletindo sua capacidade de estimular a economia local através da criação de oportunidades e renda para muitas famílias.

É essencial considerar que a produção de celulose não está isenta de desafios econômicos. O custo dos insumos, como madeira, produtos químicos e energia, pode afetar a viabilidade econômica das operações. A variação dos preços da celulose e das matérias-primas utilizadas no processo produtivo, como NaOH e Na2S, impacta diretamente a margem de lucro das empresas do setor.

A relação entre a produção de celulose e a sustentabilidade é um tema crescente na discussão econômica. As empresas estão cada vez mais sendo desafiadas a operar de forma ambientalmente responsável, integrando processos que minimizam a emissão de poluentes e promovem a recuperação de recursos.

A competitividade no mercado global de celulose também é uma questão crucial. Considerando as melhores práticas operacionais e tecnológicas utilizadas internacionalmente, o Brasil pode melhorar sua posição competitiva. Em um cenário em que o mercado de celulose global está em crescimento, as empresas brasileiras precisam trabalhar em direção à produtividade, não apenas pela eficiência operacional, mas também em termos de sustentabilidade e inovação.

O cenário global apresenta um aumento na demanda por produtos sustentáveis, o que está levando as indústrias de celulose a se adaptarem e inovarem. Iniciativas para melhor aproveitamento da biomassa e desenvolvimento de novos produtos à base de celulose são exemplos de como as empresas podem se integrar a essa transformação do mercado.

O direcionamento estratégico para a melhoria na qualidade da celulose é também um aspecto que se relaciona diretamente com a produtividade e impacto econômico. Indicadores como alvura e viscosidade são cruciais tanto na avaliação da qualidade da celulose quanto na otimização do processo produtivo.

Tendências e Desafios do Setor

A indústria de celulose no Brasil enfrenta uma série de desafios e oportunidades que se desenrolam em um contexto econômico dinâmico. O Brasil, sendo o maior produtor mundial de celulose, com uma capacidade de produção superior a 20 milhões de toneladas anuais, se beneficia de vastas áreas de plantação de eucalipto. De acordo com dados do IBA, a área plantada com florestas plantadas em 2020 era de aproximadamente 9 milhões de hectares.

Os investimentos em tecnologia são uma tendência significativa para o setor, com a incorporação de processos mais sustentáveis e eficientes. Por exemplo, a utilização da tecnologia de branqueamento sem cloro tem sido uma prática crescente nas fábricas, proporcionando um impacto ambiental reduzido. Estes investimentos não apenas melhoram a eficiência operacional, mas também atendem a demanda do mercado por produtos certificadamente sustentáveis.

Outro desafio que a indústria enfrenta é a flutuação nos preços das commodities, que afeta diretamente a margem de lucro das empresas. O custo da madeira, insumo crucial na produção de celulose, tem sofrido variações significativas. Para mitigar esse risco econômico, muitas empresas têm investido em estratégias de longo prazo para garantir o fornecimento sustentável de madeira.

As questões relacionadas à implementação de tecnologias inovadoras, como a automação e a digitalização, estão se tornando inevitáveis na busca por eficiência. Tecnologias como o Internet das Coisas (IoT) e a análise de big data têm sido aplicadas para otimizar processos na produção de celulose.

As práticas sustentáveis com foco na redução de emissões e no tratamento de efluentes também estendem o desafio do setor. Com a crescente pressão para a redução dos impactos ambientais, as fábricas têm buscado implementar tecnologias que minimizam a geração de resíduos e aumentam a eficiência no uso de água, eletricidade e outros insumos.

Além disso, a concorrência internacional está se tornando cada vez mais acirrada, com países como os Estados Unidos e a Suécia investindo em tecnologia e sustentabilidade. O fortalecimento da marca Brasil como líder em produção sustentável será um fator crucial para posicionar o país no mercado global.

O setor de celulose e papel vem se expandindo também com o advento de novas aplicações para a celulose além do papel, como embalagens sustentáveis e biocombustíveis. Essa diversificação é uma resposta às tendências de mercado que buscam soluções que atendam à demanda por produtos com menor impacto ambiental.

Tendências de mercado também indicam que a reciclagem e o reaproveitamento de celulose se tornam cada vez mais relevantes, com a demanda crescente por produtos reciclados. As empresas têm investido em tecnologias que garantem a qualidade do papel reciclado.

Indicadores Econômicos da Indústria de Celulose

INDICADOR	BRASIL	MÉDIA MUNDIAL
Produção de Celulose (milhões de toneladas)	20	29
Custo Médio da Madeira (R$/tonelada)	120	150
Emissões de CO2 (toneladas/ano)	4,1 milhões	6 milhões
Área Plantada (milhões de hectares)	9	7
Crescimento do Setor (%)	3,5%	2%

Fonte: Relatório da FAO 2021.

Indicadores do Setor — Tendências e Desafios

INDICADOR	VALOR	CONTEXTO
Produção de Celulose	20 milhões de ton/ano	O Brasil é o maior produtor mundial, representando 32% da produção global.
Custo Médio por Tonelada de Celulose	R$ 120/tonelada	Custo competitivo em relação ao mercado global.
Eficiência Energética	6 MWh/tonelada	O Brasil tem se esforçado para reduzir o consumo de energia por tonelada produzida.

> **Caso Prático — Inovação Sustentável na Klabin:** Em 2020, a Klabin implementou um projeto de fabricação de papel reciclado, aumentando sua capacidade de produção em 10% e reduzindo o uso de água em 15% em relação ao ano anterior. O uso da tecnologia de recuperação química também resultou em uma redução considerável das emissões de CO2. A empresa estabeleceu parcerias com ONGs locais para reflorestamento, o que não só melhora sua imagem, mas também a qualidade do fornecimento de madeira a longo prazo.

Desafios Operacionais e Boas Práticas — Capítulo 3

Desafios Operacionais

Um dos principais desafios que a indústria de celulose enfrenta é a volatilidade nos preços das matérias-primas e dos produtos acabados. A oscilação nos preços da madeira, influenciada por fatores como oferta, demanda e variações climáticas, pode impactar significativamente os custos operacionais e a competitividade das empresas brasileiras. Além disso, a necessidade de atender às crescentes demandas de sustentabilidade e certificações ambientais coloca pressão adicional sobre os produtores. A logística de transporte entre as florestas e as fábricas, que muitas vezes se encontram em locais remotos, pode ser um ponto crítico que afeta tanto os custos quanto a eficiência do processo produtivo.

Boas Práticas

Para mitigar esses desafios, o setor de celulose tem adotado boas práticas que visam aumentar a eficiência econômica e a sustentabilidade. O uso de tecnologias avançadas de monitoramento e gestão florestal permite uma melhor previsão e manejo das florestas, garantindo uma oferta estável de madeira com alto rendimento e menor impacto ambiental. Empresas como a Suzano e Klabin têm investido em certificações ambientais, o que não só melhora a imagem institucional, mas também propicia acesso a mercados que priorizam produtos sustentáveis. Além disso, a formação de parcerias estratégicas com sindicatos de produtores e instituições financeiras possibilita a mitigação dos riscos financeiros.

> **Resumo do Capítulo 3:** A análise do mercado de celulose no Brasil revela não apenas suas nuances econômicas, mas também os impactos sociais e ambientais de sua operação. A indústria se beneficia da vasta disponibilidade de recursos florestais, mas precisa superar obstáculos como os custos de logística e a necessidade de práticas sustentáveis. O fortalecimento de indicadores como produtividade, eficiência no uso de recursos e redução de emissões está alinhado com as expectativas do mercado global, que cada vez mais valoriza a sustentabilidade.

Glossário

Termos técnicos essenciais para a compreensão do processo de produção de celulose.

Celulose

Polímero natural em forma de fibra, que compõe a parede celular das plantas, fundamental para a produção de papel e derivados.

Processo Kraft

Método de fabricação de celulose onde a madeira é tratada com uma mistura de hidróxido de sódio e sulfeto de sódio, permitindo a recuperação e reuso dos produtos químicos.

Barra de Alvura

Métrica que indica a clareza do papel, importante para determinar a qualidade e a aceitação no mercado.

Rendimento

Porcentagem de celulose obtida em relação à quantidade de madeira utilizada, crucial para avaliar a eficiência do processo.

Cozimento

Etapa onde a madeira é submetida a calor e produtos químicos para separar a celulose da lignina e hemiceluloses.

Branqueamento

Processo químico ou físico que reduz a cor da celulose, aumentando a alvura e adequação para usos finais.

Pátio de Madeira

Área destinada ao armazenamento e preparação da madeira antes do processamento.

Hemicelulose

Polímero que, junto com a celulose e lignina, compõe a estrutura da parede celular das plantas.

Lignina

Complexo polimérico resistente encontrado na parede celular das plantas, que deve ser removido para produção de celulose.

Licor Negro

Solução resultante do cozimento da madeira, rica em compostos químicos que podem ser reciclados no processo químico.

Caustificação

Etapa do processo de recuperação química em que o licor negro é tratado para regenerar o hidróxido de sódio.

Secagem

Etapa final na produção de celulose onde a umidade é removida, essencial para garantir a qualidade do produto final.

Eficiência Energética

Métrica que mede a quantidade de energia utilizada em relação ao produto gerado, relevante para a sustentabilidade do processo.

KPIs

Key Performance Indicators — indicadores-chave de desempenho usados para medir a eficácia das operações.

Recuperação Química

Sistema implementado para recuperar reagentes utilizados no processo de produção de celulose.

Sustentabilidade

Capacidade de atender às necessidades atuais sem comprometer as gerações futuras, particularmente relevante no setor de celulose.

Referências Bibliográficas

Fontes bibliográficas utilizadas na elaboração desta apostila sobre o processo de produção de celulose.

1 **Pulp Bleaching**
Carlton, Douglas (1996)

2 **Wood Chemistry**
Eero Sjostrom (1993)

3 **Handbook of Pulp**
Herbert Sixta

4 **Handbook Pulp Paper Technologists Smook**
3rd edition by Gary A. Smook (1934)

5 **Wood Handbook**
Forest Products Laboratory (1974)

6 **Wood and Cellulosic Chemistry**
Edited by David and Nobou (2001)

7 **Chemical Recovery in the Alkaline Pulping Processes**
R.P. Green (2014)

Apostila: Introdução ao Processo de Produção de Celulose | Área: Industrial | Nível: Essencial | Carga Horária: 2h

Acervo Celulose 360º — Todos os direitos reservados.