

# Aula 20 – Branqueamento da Polpa Celulósica

## Desvendando o Branqueamento da Polpa: Da Floresta ao Papel de Alta Qualidade

Você já parou para pensar por que a maioria dos papéis que usamos no dia a dia é tão branca? Desde o papel sulfite que preenche sua impressora até as páginas de um livro, a cor branca é quase um padrão. Mas a celulose, a fibra principal da madeira, não nasce branca. Ela surge com uma tonalidade mais amarronzada, resultado da presença de uma substância fascinante e complexa: a lignina.

Nesta aula, vamos mergulhar no processo de **branqueamento da polpa celulósica**, uma etapa crucial na fabricação de papel e outros produtos à base de celulose. Entender o branqueamento não é apenas conhecer uma técnica industrial; é compreender como a ciência e a engenharia se unem para transformar um recurso natural em produtos de alto valor, ao mesmo tempo em que a indústria busca soluções cada vez mais sustentáveis.

### Ao final desta jornada, você será capaz de:

- Compreender os objetivos fundamentais do branqueamento da polpa
- Identificar os principais agentes químicos e sequências utilizadas no processo
- Distinguir as tecnologias ECF e TCF e seus impactos
- Analisar as tendências e os desafios ambientais associados ao branqueamento, conectando-os com a bioeconomia e a nanotecnologia

Prepare-se para desvendar os segredos por trás da alvura do papel, desde os métodos tradicionais até as inovações que moldam o futuro da indústria florestal. Se você já tem uma base sobre a produção de polpa, como vimos nas aulas anteriores, esta etapa será o complemento perfeito para entender como a matéria-prima bruta se refina para atender às nossas necessidades diárias.

# O Que é Branqueamento e Por Que Ele Importa?

Imagine que você está preparando uma receita, e um dos ingredientes principais, por mais saboroso que seja, tem uma cor muito forte que pode manchar o prato final. Para que o resultado seja visualmente agradável e tenha a textura desejada, você precisa remover ou neutralizar essa cor. No universo da celulose, a lignina é esse ingrediente "colorido" que, embora essencial na árvore, precisa ser removida ou modificada para que a polpa atinja a qualidade e a alvura desejadas.

O branqueamento da polpa celulósica é, em sua essência, um processo de tratamento químico que visa remover a lignina residual presente nas fibras após a etapa de cozimento (polpação). A polpa que sai do digestor, seja ela kraft ou sulfito, possui uma cor marrom característica, semelhante à cor da madeira ou de um papelão. Essa cor é conferida principalmente pela lignina, que, além de ser cromófora (absorve luz e confere cor), pode causar amarelamento do papel ao longo do tempo e dificultar a formação de folhas uniformes.

## **Remover a Lignina Residual**

Eliminar a lignina que não foi removida na polpação, garantindo fibras de celulose mais puras

## **Aumentar a Alvura**

Tornar a polpa mais branca e brilhante para produtos de alta qualidade

## **Melhorar a Estabilidade**

Contribuir para a estabilidade da cor do papel ao longo do tempo e aprimorar propriedades físicas

É como clarear uma roupa que saiu da máquina de lavar ainda com algumas manchas, para que ela fique impecável.

# A Lignina: O Desafio da Cor e da Qualidade

Para entender o branqueamento, precisamos primeiro conhecer a estrela (ou, neste caso, o "vilão" da cor): a lignina. Pense na madeira como um edifício complexo. A celulose seriam as vigas de aço, dando estrutura e resistência. As hemiceluloses seriam os blocos e paredes, preenchendo os espaços. E a lignina? A lignina é o "cimento" que une tudo, conferindo rigidez e impermeabilidade à estrutura da planta.

É um polímero complexo, amorfo e tridimensional, que preenche os espaços entre as fibras de celulose na parede celular da planta. Durante o processo de polpação, o objetivo é justamente dissolver a maior parte dessa lignina para liberar as fibras de celulose. No entanto, mesmo após um cozimento eficiente, uma porção significativa de lignina (geralmente entre 2% e 5% na polpa kraft) permanece aderida às fibras.

## Lignina Residual

Principal responsável pela cor escura da polpa não branqueada e pelo amarelamento do papel ao longo do tempo

Essa lignina residual é a principal responsável pela cor escura da polpa não branqueada. Além de conferir cor, a lignina é suscetível a reações de oxidação quando exposta à luz e ao ar, o que causa o amarelamento do papel ao longo do tempo – um problema conhecido como "reversão de alvura".

A remoção da lignina residual é, portanto, um passo crítico não só para a estética do produto final, mas também para sua durabilidade e funcionalidade. Se a lignina não for adequadamente removida, o papel pode não apenas ter uma cor indesejada, mas também ser mais frágil e menos resistente ao envelhecimento. É como tentar pintar uma parede sem lixar e remover as imperfeições anteriores; o resultado final não será tão liso e duradouro quanto o esperado.

# Primeiras Gerações de Branqueamento: O Papel do Cloro

Historicamente, a busca por papel branco levou à experimentação com diversos agentes químicos. No início do século XX, o cloro elementar ( $Cl_2$ ) emergiu como o principal agente de branqueamento. Sua eficácia era inegável: o cloro reage vigorosamente com a lignina residual, quebrando suas estruturas e tornando-a solúvel em água, facilitando sua remoção. Era um processo relativamente simples e muito eficiente para alcançar altos níveis de alvura.

Imagine o cloro como um "detergente superpotente" que, ao ser aplicado na polpa marrom, ataca e dissolve as manchas de lignina. As sequências de branqueamento daquela época frequentemente começavam com uma etapa de cloração (C), seguida por extração alcalina (E) para remover os produtos da reação, e depois outras etapas de hipoclorito (H) para aumentar ainda mais a alvura. Uma sequência comum era C-E-H.

## **Eficiência Inegável**

O cloro elementar era extremamente eficaz na remoção da lignina e no alcance de altos níveis de alvura

## **Custo Ambiental Significativo**

Geração de subprodutos clorados tóxicos, incluindo dioxinas e furanos altamente prejudiciais

## **Revolução Necessária**

A percepção dos impactos ambientais impulsionou a busca por alternativas mais limpas e seguras

No entanto, essa eficiência tinha um custo ambiental significativo. A reação do cloro elementar com a lignina e outros compostos orgânicos presentes na polpa gerava subprodutos clorados, muitos deles tóxicos e persistentes no ambiente. Entre os mais preocupantes estavam as dioxinas e os furanos, compostos organoclorados que se acumulam na cadeia alimentar e são altamente prejudiciais à saúde humana e à vida aquática. A percepção desses impactos ambientais, especialmente a partir da década de 1980, impulsionou uma revolução na indústria de celulose, buscando alternativas mais limpas e seguras para o branqueamento.

# Dióxido de Cloro e Oxigênio: Buscando Alternativas

Diante dos problemas ambientais causados pelo cloro elementar, a indústria de celulose iniciou uma corrida por alternativas mais sustentáveis. As primeiras e mais significativas inovações vieram com a introdução do **dióxido de cloro (ClO<sub>2</sub>)** e do **oxigênio (O<sub>2</sub>)** como agentes de branqueamento. Essas substâncias representaram um avanço enorme, pois permitiam alcançar alvuras elevadas com um impacto ambiental muito menor.



## Dióxido de Cloro (ClO<sub>2</sub>)

Agente oxidante poderoso que reage com a lignina de forma mais seletiva do que o cloro elementar, produzindo uma quantidade significativamente menor de compostos organoclorados indesejáveis, como as dioxinas. Pense no dióxido de cloro como um "detergente inteligente" que sabe onde agir.

Sua introdução marcou o início da era do branqueamento ECF (Elemental Chlorine Free), que veremos em detalhe mais adiante. Isso reduz drasticamente o consumo de químicos mais caros e potencialmente poluentes. É como fazer uma "pré-lavagem" na roupa muito suja, facilitando o trabalho do detergente principal e economizando recursos. A combinação desses novos agentes permitiu à indústria dar um salto gigantesco em direção a processos mais limpos e eficientes.



## Oxigênio (O<sub>2</sub>)

Um gás abundante e inofensivo que revolucionou o pré-branqueamento. Utilizado em uma etapa inicial, o oxigênio consegue remover uma grande parte da lignina residual antes mesmo que outros agentes sejam aplicados, reduzindo drasticamente a carga de lignina para as etapas subsequentes.

# Sequências de Branqueamento: A Orquestra Química

O branqueamento da polpa não é um processo de uma única etapa; é uma série de reações químicas cuidadosamente orquestradas, cada uma com um propósito específico. Pense em uma sequência de branqueamento como uma receita culinária complexa ou um concerto musical: cada ingrediente ou instrumento tem seu momento e função para que o resultado final seja perfeito. As sequências são representadas por letras, onde cada letra indica um agente de branqueamento ou uma etapa específica.



## O (Oxigênio)

Etapa inicial de deslignificação com oxigênio, reduzindo a carga de lignina



## D (Dióxido de Cloro)

Principal agente oxidante para remoção da lignina



## E (Extração Alcalina)

Etapa de lavagem com hidróxido de sódio (NaOH) para dissolver e remover os produtos da reação



## P (Peróxido de Hidrogênio)

Agente oxidante que contribui para a alvura e estabilidade da cor



## Z (Ozônio)

Agente oxidante forte, usado em algumas sequências TCF

Uma sequência típica pode ser O-D-E-D-P. Isso significa que a polpa passa por uma etapa de oxigênio, seguida por dióxido de cloro, depois uma extração alcalina, outra etapa de dióxido de cloro e, por fim, peróxido de hidrogênio. A escolha da sequência depende de fatores como o tipo de madeira, o grau de alvura desejado, os custos operacionais e, crucialmente, as regulamentações ambientais. O objetivo é sempre maximizar a remoção da lignina e a alvura, minimizando o consumo de químicos e a geração de efluentes. É um equilíbrio delicado entre eficiência e sustentabilidade.

# ECF (Elemental Chlorine Free): Um Salto para a Sustentabilidade

A crescente preocupação ambiental com os compostos organoclorados, especialmente as dioxinas, levou a indústria de celulose a buscar alternativas ao cloro elementar. Foi nesse contexto que surgiu a tecnologia **ECF (Elemental Chlorine Free)**, ou "Livre de Cloro Elementar". Esta abordagem representa um marco na sustentabilidade da produção de celulose e papel.

O conceito por trás do ECF é simples, mas poderoso: eliminar completamente o uso de cloro gasoso ( $Cl_2$ ) no processo de branqueamento. Em vez disso, o principal agente oxidante utilizado é o **dióxido de cloro ( $ClO_2$ )**. Como vimos, o dióxido de cloro é um oxidante mais seletivo e eficiente na remoção da lignina, e sua reação com os compostos orgânicos da polpa gera uma quantidade significativamente menor de subprodutos clorados tóxicos.


**Analogia:** Pense no ECF como a transição de um carro movido a gasolina comum para um híbrido: ele ainda usa um derivado de combustível fóssil (o cloro está presente no dióxido de cloro), mas de uma forma muito mais limpa e eficiente, reduzindo drasticamente as emissões nocivas.

Conceito	Âmbito/Aplicação	Exemplo de Agente Principal
Branqueamento Tradicional ( $Cl_2$ )	Antigo padrão, alto impacto ambiental	Cloro ( $Cl_2$ )
<b>ECF (Elemental Chlorine Free)</b>	Padrão global atual, menor impacto ambiental	Dióxido de Cloro ( $ClO_2$ )

A adoção do ECF se tornou um padrão global na indústria de celulose. A maioria das grandes fábricas modernas opera com processos ECF, atendendo a rigorosas regulamentações ambientais e às demandas de consumidores por produtos mais sustentáveis. Essa mudança não apenas reduziu a poluição da água, mas também melhorou a qualidade do efluente final, tornando-o menos tóxico para os ecossistemas aquáticos. É um exemplo claro de como a inovação tecnológica pode alinhar a produção industrial com a responsabilidade ambiental.

# TCF (Totally Chlorine Free): O Próximo Nível de Pureza

Se o ECF representou um grande avanço, a tecnologia **TCF (Totally Chlorine Free)**, ou "Totalmente Livre de Cloro", leva a sustentabilidade a um patamar ainda mais elevado. O objetivo do TCF é eliminar completamente o uso de *qualquer* composto clorado em todas as etapas do branqueamento, incluindo o dióxido de cloro. Isso significa que a polpa TCF é branqueada exclusivamente com agentes à base de oxigênio, como o próprio **oxigênio (O2)**, o **peróxido de hidrogênio (H2O2)** e o **ozônio (O3)**.

 **Analogia:** Pense no TCF como a transição para um carro totalmente elétrico: não há mais combustão interna, nem mesmo de forma híbrida. A dependência de qualquer derivado de cloro é eliminada, resultando em um efluente de branqueamento significativamente mais limpo e com menor carga de poluentes.

Conceito	Agentes Utilizados	Impacto Ambiental	Aplicação Típica
ECF	Dióxido de Cloro (ClO2), Oxigênio (O2), Peróxido (H2O2)	Redução drástica de organoclorados (dioxinas)	Padrão da indústria para papel de impressão, embalagens
TCF	Oxigênio (O2), Peróxido (H2O2), Ozônio (O3)	Ausência total de compostos clorados no efluente	Produtos de higiene, papel para alimentos, mercados premium

Essa abordagem é particularmente valorizada em mercados que exigem os mais altos padrões ambientais, como alguns segmentos de papel para alimentos ou produtos de higiene pessoal. Embora o TCF ofereça benefícios ambientais superiores, sua implementação pode apresentar desafios. Os agentes de branqueamento não clorados podem ser menos eficientes na remoção da lignina residual em comparação com o dióxido de cloro, o que pode exigir mais etapas ou condições de processo mais rigorosas para atingir os mesmos níveis de alvura. Além disso, os custos de produção podem ser ligeiramente mais elevados. No entanto, a pesquisa e o desenvolvimento contínuos estão aprimorando as tecnologias TCF, tornando-as cada vez mais competitivas e viáveis. A escolha entre ECF e TCF muitas vezes depende do balanço entre os objetivos de alvura, custos e o nível de compromisso ambiental da empresa e do mercado consumidor.

# Impactos Ambientais do Branqueamento: O Que Aprendemos?

A história do branqueamento da polpa é um espelho da evolução da consciência ambiental na indústria. No passado, os efluentes das fábricas de celulose, carregados de compostos clorados e matéria orgânica, eram lançados diretamente nos rios, causando sérios danos aos ecossistemas aquáticos. A poluição era visível: rios escuros, peixes mortos e odores desagradáveis. Essa era uma realidade insustentável que exigiu uma mudança radical.



## Compostos Organoclorados (AOX)

As reações do cloro com a lignina formavam uma série de compostos tóxicos, como as dioxinas e furanos, que são persistentes, bioacumulativos e carcinogênicos



## Consumo de Água

O processo de lavagem e diluição exige grandes volumes de água, o que pode impactar os recursos hídricos locais



## Carga Orgânica

A lignina dissolvida e outros compostos orgânicos nos efluentes aumentam a demanda bioquímica de oxigênio (DBO) nos corpos d'água



## Consumo de Energia

O aquecimento e bombeamento dos químicos e da polpa demandam energia, contribuindo para a pegada de carbono da fábrica

No entanto, a indústria tem feito progressos notáveis. A transição para processos ECF e TCF, o desenvolvimento de tecnologias de tratamento de efluentes mais eficientes (como estações de tratamento biológico avançadas) e a busca por sistemas de circuito fechado (onde a água é reutilizada) reduziram drasticamente esses impactos. Hoje, muitas fábricas operam com padrões ambientais rigorosos, monitorando constantemente seus efluentes e buscando a otimização contínua. É como aprender com os erros do passado para construir um futuro mais verde, onde a produção industrial e a proteção ambiental podem coexistir.

# Tendências e Inovações: Branqueamento no Século XXI

A indústria de celulose não parou de inovar. O branqueamento, em particular, está no centro de muitas pesquisas para torná-lo ainda mais eficiente, econômico e, acima de tudo, sustentável. As tendências atuais vão muito além da simples remoção da lignina, buscando otimizar cada etapa e integrar o processo a uma visão mais ampla de **bioeconomia** e **biorrefinaria**.



## Uso de Enzimas

Enzimas como as xilanases podem atuar sobre as hemiceluloses e a lignina, tornando-as mais acessíveis aos agentes químicos subsequentes. Isso permite reduzir o consumo de químicos de branqueamento e, conseqüentemente, a carga poluente dos efluentes. É como ter um "pré-tratamento biológico" que amolece as "manchas" antes da lavagem principal.



## Valorização da Lignina

Em vez de simplesmente descartá-la como resíduo, a lignina está sendo vista como uma matéria-prima valiosa para a produção de bioprodutos de alto valor agregado, como biocombustíveis, adesivos, plásticos e produtos químicos finos. Isso se encaixa perfeitamente no conceito de biorrefinaria.

Uma das tendências mais promissoras é o uso de enzimas no pré-branqueamento, tornando-a mais suave e eficaz. Outra grande tendência é a valorização da lignina. O branqueamento, nesse contexto, precisa ser otimizado para que a lignina removida possa ser recuperada e utilizada de forma mais eficiente. Essa é a essência da bioeconomia: transformar o que antes era resíduo em riqueza, fechando ciclos e agregando valor à cadeia produtiva.

# Nanotecnologia e Branqueamento: O Futuro é Minúsculo

A nanotecnologia, a ciência de manipular materiais em escala atômica e molecular, está abrindo novas fronteiras para a indústria de produtos florestais, e o branqueamento não fica de fora. A **nanocelulose**, um material derivado da celulose com dimensões nanométricas, possui propriedades extraordinárias de resistência, leveza e transparência, tornando-a um material promissor para diversas aplicações, desde embalagens e eletrônicos flexíveis até biomedicina e materiais compósitos.

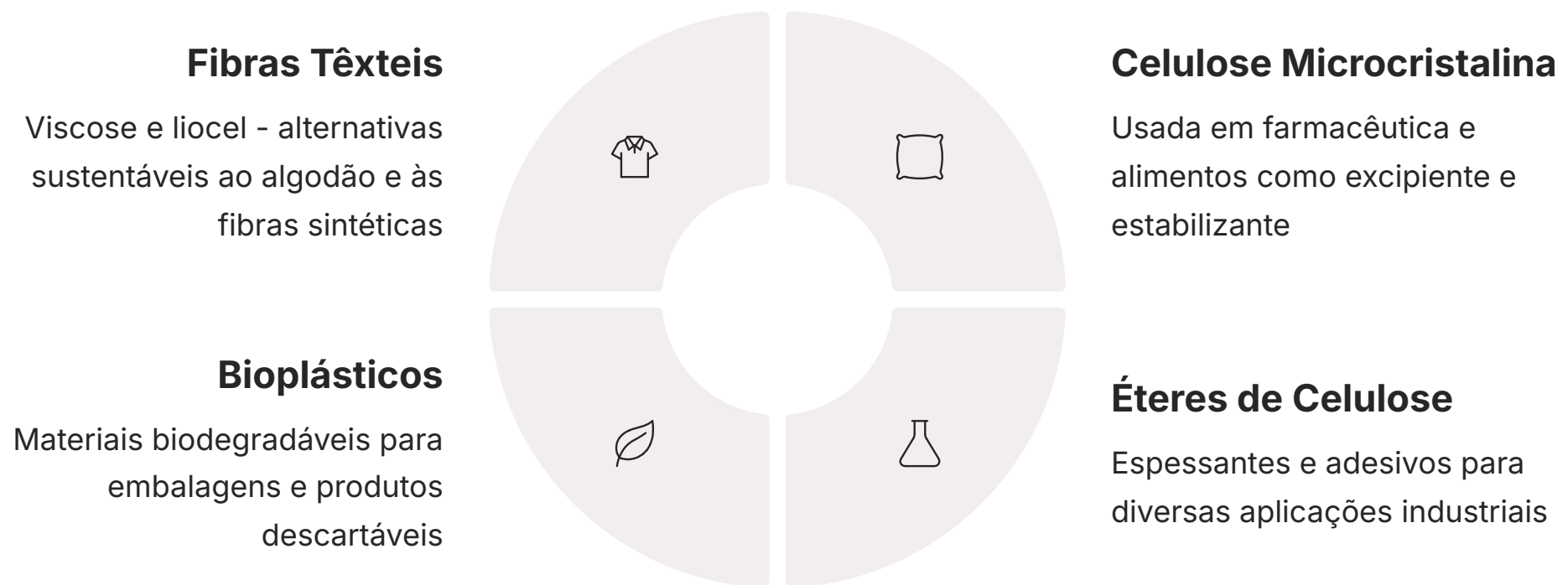
Para produzir nanocelulose de alta qualidade, a polpa de celulose precisa ser extremamente pura e, muitas vezes, branca. O processo de branqueamento, portanto, desempenha um papel crucial na preparação da matéria-prima para a produção de nanocelulose. Um branqueamento eficiente garante a remoção máxima da lignina e de outras impurezas, o que é essencial para as propriedades ópticas e mecânicas da nanocelulose.

📌 **Analogia:** Imagine que você está construindo um castelo de areia. Se a areia estiver cheia de pedras e galhos, o castelo não será tão firme e bonito. O branqueamento, nesse caso, é o processo de purificar a areia para que você possa construir estruturas mais complexas e resistentes, como a nanocelulose.

Além disso, a pesquisa está explorando como o próprio processo de branqueamento pode ser otimizado em escala nanométrica, talvez com o uso de catalisadores nanométricos ou métodos que preservem ainda mais a integridade das nanofibras de celulose. A nanotecnologia, ao permitir a criação de materiais com características tão específicas a partir da celulose, eleva o valor do branqueamento, transformando-o não apenas em um processo para fazer papel branco, mas em uma etapa fundamental para a criação de materiais de engenharia do futuro.

# Além do Papel: O Branqueamento e a Versatilidade da Celulose

Embora o papel seja o produto mais conhecido da celulose, o branqueamento abre portas para uma gama muito mais ampla de aplicações. A celulose branqueada, por sua alta pureza e alvura, é a matéria-prima ideal para a produção de diversos derivados e produtos de alto valor agregado. Pense na celulose como um "ingrediente coringa" que, uma vez purificado, pode ser transformado em inúmeras receitas diferentes.



Por exemplo, a celulose branqueada é fundamental na fabricação de fibras têxteis como a viscose e o liocel, que são alternativas sustentáveis ao algodão e às fibras sintéticas. Ela também é usada na produção de celulose microcristalina (usada em farmacêutica e alimentos), éteres de celulose (espessantes, adesivos) e até mesmo em bioplásticos. A pureza alcançada pelo branqueamento é crucial para garantir a qualidade e o desempenho desses materiais em suas aplicações específicas.

Além disso, a celulose branqueada pode ter um papel indireto em **construções sustentáveis com madeira**, como as estruturas em Wood Frame ou CLT (Cross-Laminated Timber). Embora a madeira estrutural não seja branqueada, a indústria florestal como um todo se beneficia da valorização de todos os seus subprodutos. A capacidade de produzir celulose de alta pureza para diversos fins aumenta a flexibilidade e a resiliência das empresas do setor, permitindo que a madeira seja vista não apenas como um material de construção, mas como uma fonte renovável para uma vasta gama de produtos. A **certificação florestal e a rastreabilidade** da polpa branqueada também são cruciais, garantindo que a matéria-prima venha de florestas manejadas de forma responsável, fechando o ciclo da sustentabilidade desde a origem até o produto final.

# Branqueamento da Polpa: Um Pilar da Indústria Sustentável

Chegamos ao fim de nossa jornada pelo mundo do branqueamento da polpa celulósica. Vimos que este processo, que transforma a polpa marrom em um material branco e puro, é muito mais do que uma simples etapa industrial. É um campo dinâmico, impulsionado pela inovação tecnológica e pela crescente demanda por sustentabilidade. Desde a remoção da lignina residual e o aumento da alvura até a evolução das tecnologias ECF e TCF, o branqueamento reflete o compromisso da indústria em minimizar seu impacto ambiental e maximizar o valor de seus produtos.

## Qualidade e Durabilidade

O branqueamento é essencial para a qualidade e durabilidade de produtos à base de celulose

## Impacto da Sequência

A escolha da sequência de branqueamento impacta diretamente a sustentabilidade e o custo

## Padrões ECF e TCF

As tecnologias ECF e TCF são padrões de mercado que visam reduzir o impacto ambiental

## Futuro Inovador

A pesquisa em nanotecnologia e bioeconomia está redefinindo o futuro do branqueamento e da celulose

## Autoavaliação

1. Qual é o principal objetivo do branqueamento da polpa celulósica? a) Aumentar a resistência mecânica da polpa. b) Remover a lignina residual e aumentar a alvura. c) Reduzir o consumo de água na fábrica. d) Diminuir o tempo de cozimento da polpa.
2. Qual das seguintes tecnologias de branqueamento elimina completamente o uso de cloro elementar, mas ainda pode utilizar dióxido de cloro? a) TCF (Totally Chlorine Free) b) FCF (Fully Chlorine Free) c) ECF (Elemental Chlorine Free) d) OCF (Oxygen Chlorine Free)
3. A lignina é um componente da madeira que: a) É a principal fibra utilizada na fabricação de papel. b) Confere rigidez à estrutura da planta e é responsável pela cor escura da polpa não branqueada. c) É um tipo de carboidrato simples, facilmente removível. d) É utilizada como principal agente de branqueamento.
4. O uso de enzimas no pré-branqueamento e a valorização da lignina para bioprodutos são exemplos de tendências que se alinham com qual conceito moderno? a) Industrialização 4.0 b) Economia Circular e Biorrefinaria c) Globalização de Mercados d) Automação Robótica de Processos
5. Explique a diferença fundamental entre as tecnologias ECF e TCF no contexto do branqueamento da polpa celulósica e mencione um benefício ambiental de cada uma.

# Gabarito

- 1** b) Remover a lignina residual e aumentar a alvura
- 2** c) ECF (Elemental Chlorine Free)
- 3** b) Confere rigidez à estrutura da planta e é responsável pela cor escura da polpa não branqueada
- 4** b) Economia Circular e Biorrefinaria

## **5** Resposta Dissertativa:

A tecnologia **ECF (Elemental Chlorine Free)** elimina o uso de cloro elementar ( $\text{Cl}_2$ ), substituindo-o principalmente por dióxido de cloro ( $\text{ClO}_2$ ). Seu principal benefício ambiental é a drástica redução na formação de compostos organoclorados tóxicos, como as dioxinas. Já a tecnologia **TCF (Totally Chlorine Free)** vai além, eliminando *todos* os compostos clorados do processo de branqueamento, utilizando apenas agentes à base de oxigênio ( $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{O}_3$ ). Seu benefício ambiental é a ausência total de efluentes clorados, resultando em um processo ainda mais limpo e com menor impacto ambiental.

# Conexão com a Próxima Aula

Na próxima aula, a **Aula 21 – Fabricação do Papel: Da Polpa à Folha**, vamos continuar nossa jornada, explorando como a polpa, agora branqueada e purificada, é transformada nas folhas de papel que usamos diariamente. Você verá as etapas de refino, formação da folha, prensagem, secagem e acabamento, compreendendo todo o ciclo de transformação da fibra em produto final.

## Recursos Adicionais

### Vídeos sobre Processos de Branqueamento


Para visualizar as etapas e equipamentos em operação

### Artigos Científicos Recentes sobre Nanocelulose

Para aprofundar-se nas aplicações e pesquisas de ponta

### Relatórios de Sustentabilidade de Empresas do Setor

Para entender como as empresas aplicam os conceitos de ECF/TCF e bioeconomia na prática

 **NOTA IMPORTANTE:** As informações regulatórias/legais/técnicas desta aula estão atualizadas até 2025. Consulte sempre fontes oficiais para verificar alterações.