

APLICAÇÃO DE ENZIMAS NA PRODUÇÃO DE CELULOSE BRANQUEADA

Suellen Barbosa Viana Cavalcane¹, Fernanda Vitória Vieira¹; Uilian Gabaldi Yonezawa^{2*}

¹ Engenheira Química – FITL/AEMS; ² Doutor em Ciências dos Materiais – UNESP, docente das Faculdades integradas de Três Lagoas, AEMS.

* autor correspondente: uilianyonezawa@gmail.com

RESUMO

A produção de celulose, é essencial para a obtenção de fibras vegetais para a fabricação de papel, bens de consumo, tecidos e outros. Uma vertente promissora para o setor é a utilização de enzimas como catalisadores biológicos fundamentais no ciclo produtivo, visto que as enzimas apresentam melhorias econômicas e sustentáveis. Portanto, o objetivo desse trabalho é descrever a utilização de enzimas nos processo de produção de celulose de forma economicamente viável. A estratégia de aplicação desses catalisadores biológicos não apenas visa potencializar o rendimento, mas também apresenta benefícios ambientais, de forma a reduzir a dependência de processos químicos agressivos tanto na produção, quanto na geração de efluentes, o que contribui para a otimização e eficiência do processo. Dois tipos de enzimas tem sido amplamente utilizadas na fabricação de celulose, são as celulases, que conferem melhor (i) força/tração; (ii) formação; (iii) opacidade; (iv) volume; (v) entrelaçamento das fibras e (vi) melhoria na drenagem e também as xilanases, que tem sido empregadas no processo de branqueamento para remover resíduos de xilano e contribuem no branqueamento da celulose, chamado de biobranqueamento. Ao aplicar as enzimas, contribuem também para uma menor aplicação de produtos químicos como por exemplo os derivados de cloro, auxiliam na remoção de impurezas e facilitam a separação das fibras de celulose. Dentro desse contexto, essa revisão discorre sobre as características das principais enzimas utilizadas no processo de produção de celulose, bem como os benefícios ambientais que são observados e o potencial que apresentam para uso futuro pelas indústrias celulose.

PALAVRAS-CHAVE: celulase; xilanase; branqueamento celulose; biotecnologia celulose; meio ambiente.

1 INTRODUÇÃO

À medida que o capital ambiental se torna cada vez mais relevante nas atividades produtivas, a sustentabilidade transforma-se em um tema amplamente discutido. Portanto, a necessidade, em alguns casos, de substituir processos químicos que dependem de matérias-primas não renováveis por processos bioquímicos que fazem uso de insumos renováveis é uma vertente crescente no atual cenário mundial. Isso abre novas

perspectivas para a utilização de enzimas que atuam como biocatalisadores, podem ser aplicadas em inúmeros setores industriais, como destacado por NEOPROSPECTA (2022).

Entre os principais segmentos identificados para a utilização de enzimas industriais, destacam-se a indústria de papel e celulose, alimentos, produção de biocombustíveis, fabricação de detergentes e processos envolvendo o tratamento enzimático de produtos agrícolas. Além disso, enzimas especiais

também têm aplicações significativas em fármacos, reações para diagnóstico e em inúmeras áreas de pesquisa básica (NEOPROSPECTA, 2022).

O desenvolvimento de tecnologias enzimáticas é de suma importância para o Brasil, para fomentar o avanço na área de biotecnologia. Considerando essa perspectiva, a indústria de papel e celulose tem direcionado investimentos crescentes para a adoção de novas tecnologias, com ênfase especial na biotecnologia, integrando enzimas nos processos de produção. Isso tem o propósito de aprimorar a eficiência produtiva e reduzir o consumo de produtos químicos, proporcionando benefícios adicionais, como a geração de efluentes que requerem um tratamento menos oneroso (NEOPROSPECTA, 2022). Sendo assim, empresas atuantes nas indústrias de celulose e papel têm investido em pesquisas voltadas ao desenvolvimento de produtos que se baseiem em tecnologias sustentáveis, como, por exemplo, a utilização de enzimas (BIOLUB, 2019).

As enzimas constituem proteínas catalíticas passíveis de aplicação em processos industriais para a aceleração de reações químicas, sem influenciar na composição do produto resultante dessas reações. Este efeito é alcançado pela redução da energia de ativação associada à reação, representando a energia mínima necessária para que a reação química ou biológica ocorra. Desta maneira, tais catalisadores biológicos simplificam o início das reações (BIOTEC, 2022).

A aplicação de enzimas em cada setor da indústria depende de diversos fatores, como a atividade enzimática a ser realizada, a forma de armazenamento, custos e facilidade de obtenção. A atividade de uma enzima é governada pela interação de diversos fatores, que inclui sua concentração e a do substrato correspondente, a presença e concentração de cofatores, concentração e

tipologia de inibidores, o potencial iônico, o pH, a temperatura e o tempo de reação. A análise do impacto de cada uma destas variáveis na atividade enzimática constitui o escopo da cinética enzimática (EMBRAPA, 2021).

O tratamento enzimático com xilanases no processo de produção de celulose branqueada melhora a eficiência dos estágios seguintes de branqueamento impulsionando o ganho de brancura final alcançada, melhorando a estabilidade da pasta e conseguindo um menor gasto de reagentes químicos (ESTEVES, 2018).

Um dos grandes benefícios da aplicação da xilanases no biobranqueamento da polpa é a redução do consumo de cloro, e a remoção do xilanoligado ao complexo lignina-carboidrato. Contribui também para a remoção do ácido hexenurônico, um componente encontrado no xilano que é formado durante a polpação alcalina, favorecendo assim os efeitos de branqueamentos observados (KMETZKI, 2018; BAJPAI; ANAND; BAJPAI, 2006).

Os aspectos mencionados anteriormente mostram que a utilização de enzimas na indústria de celulose é uma alternativa atraente e viável, logo o investimento no desenvolvimento de novas tecnologias nos processos de cozimento e branqueamento torna-se imprescindível (BIOLUB, 2019).

O objetivo desse trabalho é descrever a utilização de enzimas, de forma economicamente viável, nos processos de produção de celulose.

Este trabalho foi escrito baseado em livros, monografias, dissertações de mestrado, teses de doutorado e artigos científicos; os últimos indexados em plataformas especializadas, tais como Google Acadêmico e Scielo. Priorizar-se-ão artigos recentes, porém os mais antigos de relevância não serão descartados.

2 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE CELULOSE BRANQUEADA

No Brasil, o método mais comum utilizado para a obtenção da celulose branqueada nas indústrias de celulose e papel é o processo sulfato, também conhecido como “Kraft”.

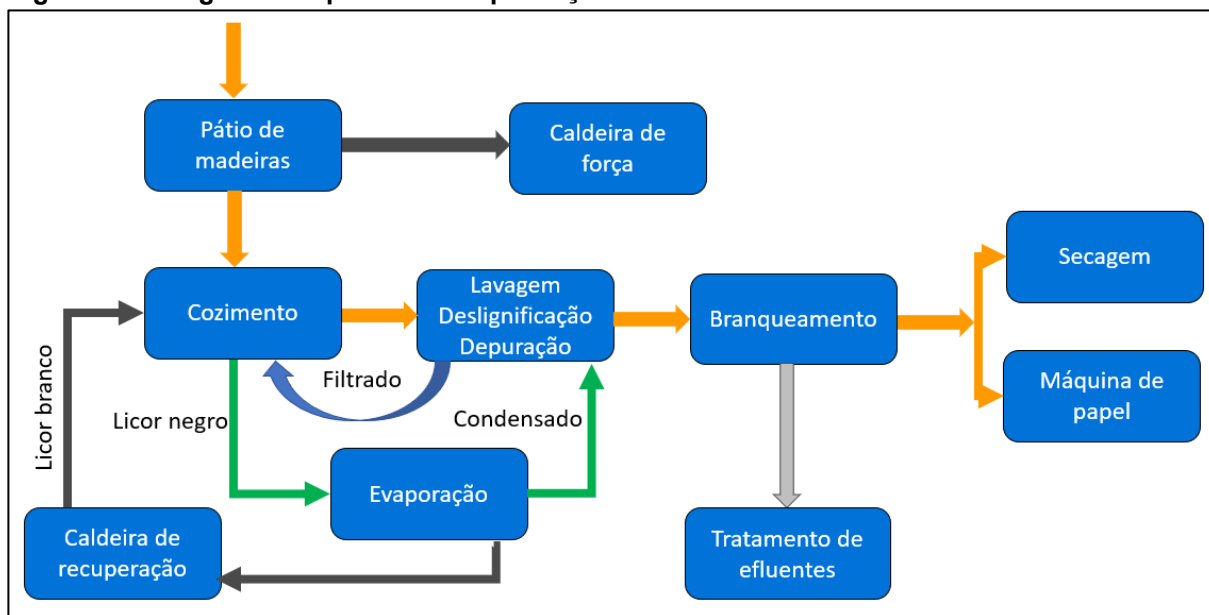
2.1 Processo Kraft

Este método implica na separação das fibras celulósicas dos outros componentes da madeira, como lignina, polisacarídeos, carboidratos e demais elementos, empregando uma solução alcalina. Nessa etapa, de forma resumida, os pedaços de madeira previamente preparados são alimentados continuamente em um equipamento chamado digestor, onde são aquecidos pelo licor de cozimento e vapor de média pressão. O licor de cozimento em questão é constituído por uma composição resultante da combinação do licor branco e

uma fração reduzida do licor negro obtido durante a fase de lavagem (BATISTA, 2022).

A predominante constituição do licor branco consiste primordialmente de sulfeto de sódio (Na_2S) e hidróxido de sódio (NaOH) em uma proporção molar de ~5:2. Adicionalmente, outros compostos de sódio estão presentes nesse licor com o carbonato de sódio (Na_2CO_3), sulfato de sódio (Na_2SO_4), e, em proporções inferiores, cloreto de sódio (NaCl), todos inertes, ou seja, não interferem em qualquer tipo de reações ocorridas dentro do digestor. O licor negro é adicionado à polpa com a função de diluir a mesma, o que assegura a circulação da polpa e dos reagentes dentro do digestor, sem que aja a introdução de uma grande quantidade de água (BATISTA, 2022). A Figura 1 apresenta o fluxograma do processo de produção de celulose.

Figura 1. Fluxograma do processo de produção de celulose.



Fonte: Elaborado pelos autores.

A biomassa vegetal (cavacos) usada para produção da celulose compreende predominantemente três polímeros (celulose, hemicelulose e lignina), além de quantidades menores de pectina, proteína, extrativos e cinzas.

A Figura 2 mostra a estrutura da biomassa vegetal (CHAVES, 2023).

2.2 Celulose

As plantas exercem processos de fotossíntese, nos quais as moléculas de

H₂O e de CO₂, na presença de energia solar capturada pela clorofila, convertem-se em O₂ e o monossacarídeo

glicose (C₆H₁₂O₆) (reação 1), um tipo de carboidrato (FOGAÇA, 2018).

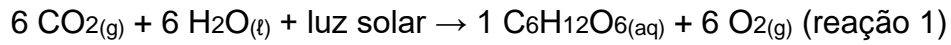
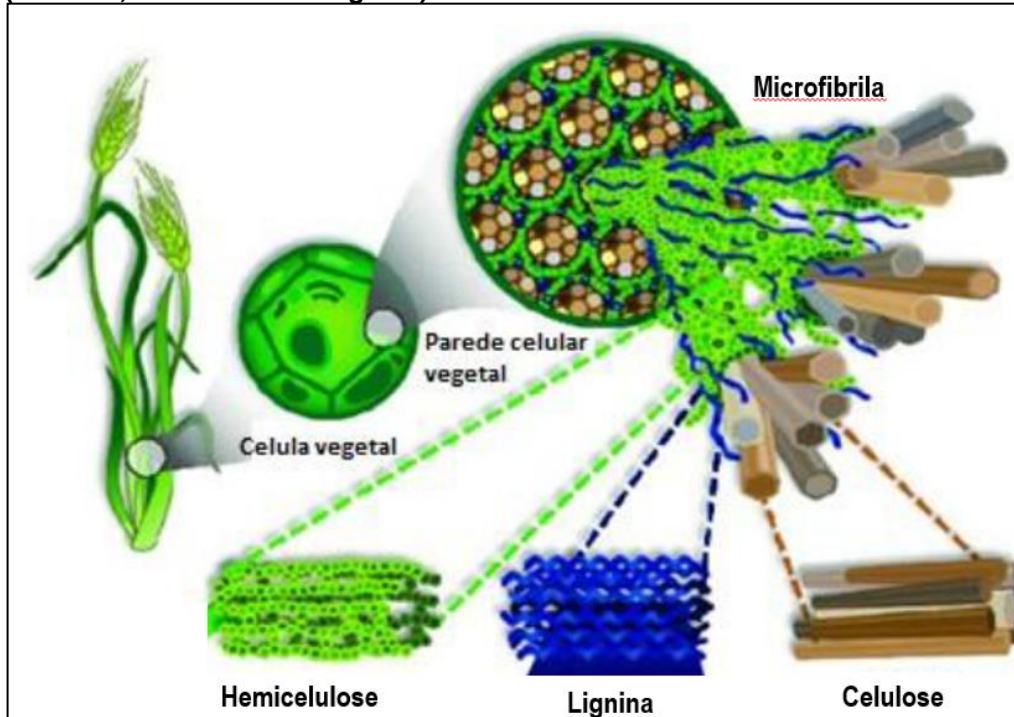
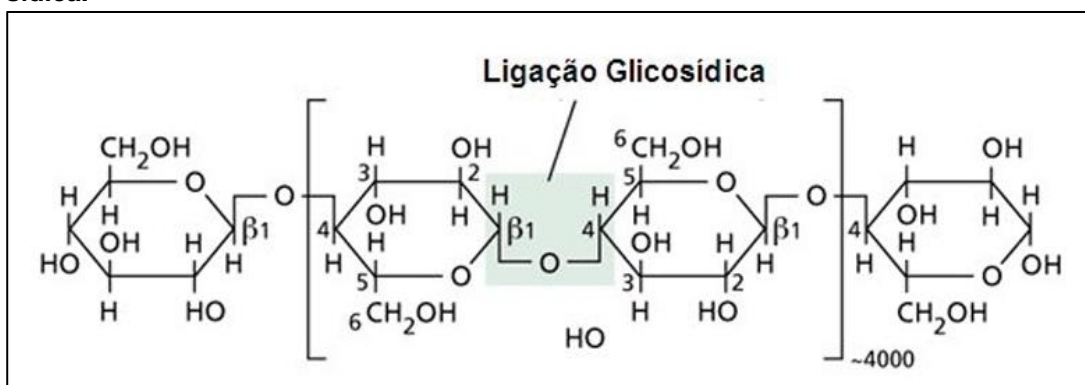


Figura 2. Representação esquemática da estrutura da biomassa lignocelulósica (celulose, hemicelulose e lignina).



Fonte: Extraído de Hernández-Beltrán et al., 2019.

Figura 3. Moléculas de glicose unidas entre si por ligações glicosídicas do tipo β-1,4, mostrando o sistema de numeração dos carbonos e a configuração da ligação glicosídica.



Fonte: Extraído de FARINAS, 2011.

Um dos principais elementos estruturais presentes na parede celular é a celulose, um homopolissacarídeo não ramificado composto exclusivamente por moléculas de glicose interligadas por ligações glicosídicas do tipo β-1,4. A

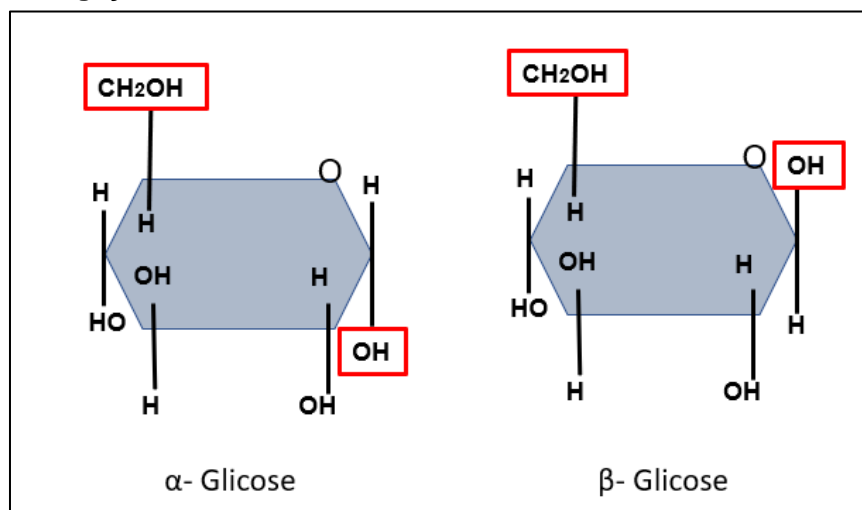
formação de uma ligação glicosídica entre duas unidades de glicose adjacentes ocorre pela eliminação de uma molécula de água, conforme ilustrado na Figura 3. Devido à disposição espacial alternada dessas ligações glicosídicas, a unidade

de repetição da celulose é a celobiose, um dissacarídeo (FARINAS, 2011).

Quando a hidroxila está abaixo, diz-se que a glicose está em sua forma

alfa (α), e quando está acima, diz-se que a glicose está em sua forma beta (β) (Figura 4; FARINAS, 2011)

Figura 4. Forma α e β da glicose, mostrando a diferença de posição das ligações.



Fonte: Elaborado pelos autores.

A celulose é amplamente reconhecida como o polissacarídeo mais abundante do planeta, e compreende mais de 50% da massa das madeiras. É um homopolissacarídeo de elevado peso molecular, de estrutura linear e não ramificada, composto por cerca de 10.000-15.000 unidades de D-glicose. Estas se conectam por ligações do tipo β -1-4 que se alinham de forma paralela. Cada unidade de glicose é constituída por três grupos hidroxila (OH^-) livres que desempenham que desempenham papel fundamental no comportamento físico-químico da celulose. São capazes de estabelecer dois tipos de ligações de hidrogênio, intramoleculares e intermoleculares, dependendo de sua posição na unidade glicosídica (KMETZKI, 2018).

As interações intramoleculares se estabelecem mediante a ligação entre os grupos OH^- de unidades glicosídicas contidas na mesma molécula que desempenham papel crucial na rigidez da cadeia de celulose. Essas ligações tornam essa região mais compacta e menos suscetível à degradação enzi-

mática. Por outro lado, as ligações intermoleculares ocorrem entre os grupos OH^- de moléculas de celulose adjacentes, criando regiões menos organizadas conhecidas como amorfas. As regiões amorfas da celulose apresentam menor resistência a ataques químicos e biológicos, logo se tornam pontos vulneráveis à degradação enzimática (KMETZKI, 2018).

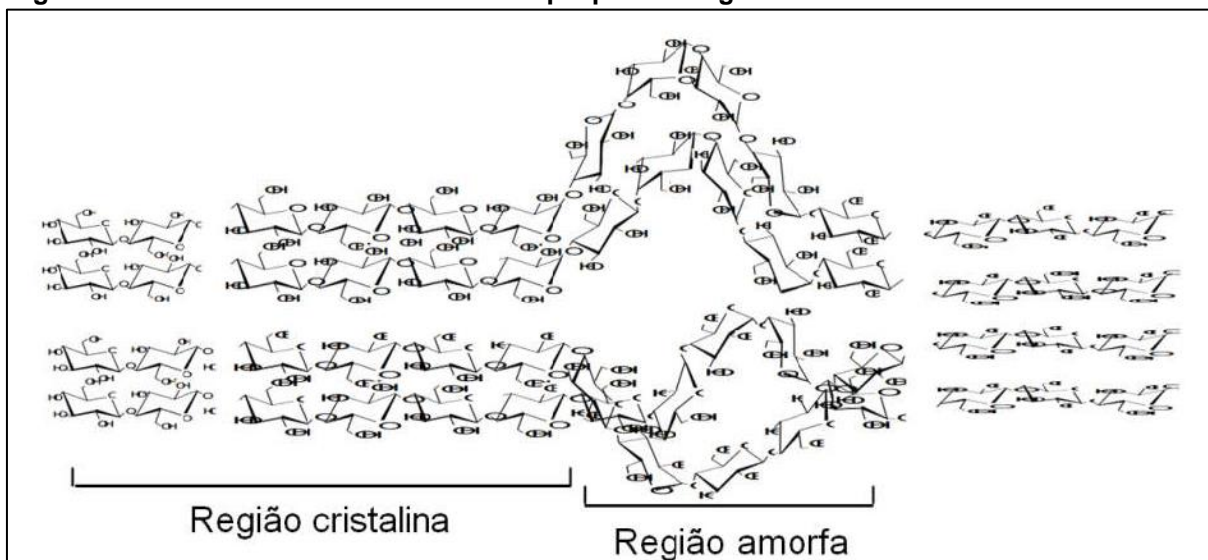
A celulose exibe áreas cristalinas notavelmente organizadas em sua estrutura, sustentadas por ligações de hidrogênio intra- e intermoleculares. Além disso, há regiões menos organizadas ou amorfas, onde as cadeias apresentam uma orientação aleatória. As regiões com ligações intra e intermoleculares estão destacadas na Figura 5, representada pela estrutura química da celulose (FARINAS, 2011).

A celulose, como o maior biopolímero global, ostenta notável relevância econômica em escala mundial. Desempenha papel central na constituição do algodão (mais de 94% de sua composição) e da madeira (mais de 50%). Em

conjunto, algodão e madeira são as principais fontes para a produção de diversos artigos de celulose, incluindo papel, tecidos, materiais de construção e

papelão, além disso, servem como matéria-prima para a obtenção de derivados de celulose, tais como celofane e acetato de celulose (CHAVES, 2023).

Figura 5. Estrutura da celulose com destaque para as regiões cristalina e amorfa.



Fonte: Extraído Reis, 2011 apud Kmetzki, 2018.

3 ENZIMAS DE INTERESSE BIOTECNOLÓGICO

Os primeiros registros sobre ação enzimática datam de 1783, quando Spallanzani observa a degradação enzimática da carne pelo suco gástrico. Em 1814, Kirchhoff nota a capacidade da proteína do glúten de cevada de transformar o amido em açúcar. No entanto, o termo “enzima” (do grego medieval *enzymos*, *en* (em ou dentro) e *zymos* (leveduras) é adotado por Kühne (1878). Nessa época, a crença predominante é que as enzimas são ativas somente em células vivas, conceito que persiste até 1897, quando Büchner observa que o extrato obtido a partir da pressão das células de levedura tem a capacidade de fermentar sacarose (EMBRAPA, 2021).

O uso de enzimas em processos vivos (biotecnologias) oferece diversas vantagens, pois permite uma ampla variedade de reações e vias bioquímicas. Dentre essas vantagens se incluem alta seletividade, condições suaves de reação (pressão, temperatura

e pH) e minimização de problemas ambientais e toxicológicos (EMBRAPA, 2021).

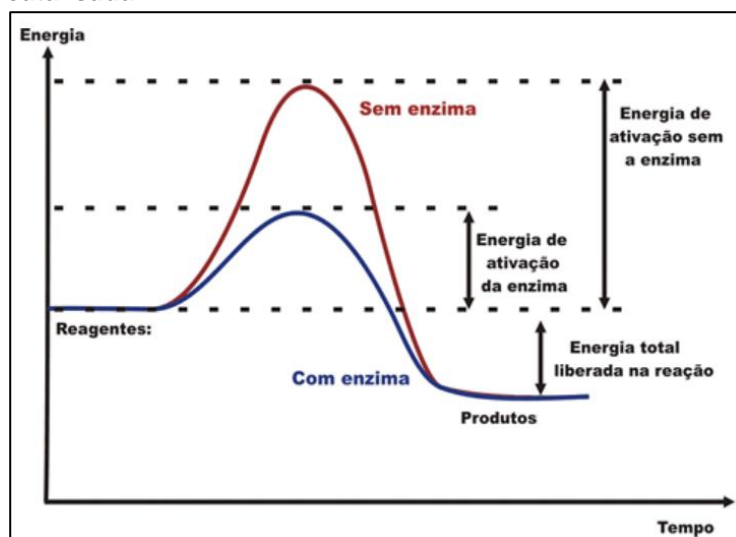
As enzimas desempenham papel fundamental em diversos setores industriais que abrangem segmentos como têxtil, cosméticos, alimentos, bebidas e fabricação de celulose e papel, entre outros. As enzimas são catalisadores altamente específicos, não são consumidas no processo e requerem apenas quantidades mínimas de energia de ativação para conduzir uma reação (Figura 6; SIQUEIRA, 2018). O Quadro 1 apresenta as principais enzimas de interesse comercial.

As proteínas constituem a maioria das enzimas que atuam como catalisadores das reações bioquímicas essenciais do metabolismo de todos os seres vivos. Devido à atividade catalítica, as enzimas exercem também papel crucial na decomposição da matéria orgânica, infecção de hospedeiros e deterioração de alimentos (NELSON; COX, 2014). Em particular, fungos fitopatogênicos, responsáveis por causar doenças em

plantas, produzem enzimas durante o processo de infecção. Da mesma forma, fungos endofíticos, que colonizam as plantas de forma assintomática, também

produzem enzimas, seja para penetrar na planta hospedeira ou para competir com fungos fitopatogênicos (ORLANDI et al., 2012).

Figura 6. Diagrama de uma reação catalisada e outra não catalisada.



Fonte: Extraído de Garcia, 2022.

Quadro 1. Principais enzimas comercializadas

ENZIMA	APLICAÇÃO
α Amilase, amiloglicosidase, β amilase	Sacarificação do amido, panificação ou produção de xaropes
Catalase	Eliminação de água oxigenada no processamento de alimentos
Lipase	Hidrólise ou interesterificação de óleos e gorduras
Glicose isomerase	Produção de isoglicose (High Fructose Syrup)
Hemicelulase ou xilanase	Hidrólise de hemicelulose no uso de resíduos celulolíticos
Invertase	Inversão da sacarose
Lactase	Hidrólise da lactose (lactícínios)
Renina ou coalho microbiano	Precipitação da caseína do leite-queijo
Naringinase	Remoção do amargo em citrus
Pectinases	Fermentação do cacau, extração de óleos de oliva, clarificação e extração de sucos, maceração de polpas.
Celulase	Produção de açúcares disponíveis, solubilização de parede celular
Protease	Produção de proteína hidrolisada, maturação de queijos, tenderização e cura de carnes

Fonte: Extraído de Embrapa, 2021.

As enzimas podem ser classificadas em seis categorias, de acordo com as reações catalisadas em (i) oxidoredutases (óxido-redução); (ii) transferases (transferem grupos químicos de uma molécula para outra); (iii) hidrolases (hidrólise); (iv) liases (cliva-

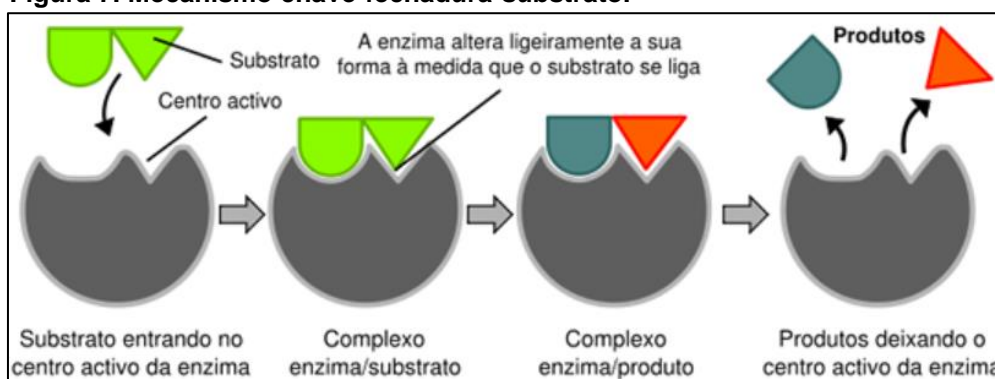
gem de ligações químicas); (v) isomerases (isomerização química) e (vi) ligases (formação de ligações covalentes entre moléculas, muitas vezes acompanhadas pela quebra de uma ligação de alta energia) (NELSON; COX, 2014).

Até o momento, o número de enzimas enumeradas no repertório da Comissão Internacional de Enzimas (E.C.) são de aproximadamente três mil. Contudo, para aplicação industrial apenas cerca de sessenta tipos de enzimas são utilizadas, destas 75% correspondem a hidrolases. O mercado está subdividido majoritariamente em enzimas utilizadas em detergentes (37%), têxteis (12%), amido (11%), panificação (8%) e ração animal (6%), que usam em torno de 75% das enzimas produzidas industrialmente (EMBRAPA, 2021).

3.1 O mecanismo “chave-fechadura”

Na catálise de uma reação química, as enzimas estabelecem interações com os substratos, resultando temporariamente na formação do complexo enzima-substrato. Durante a elaboração das estruturas secundária e terciária da enzima, considerando sua natureza proteica, determinados sítios moleculares emergem, destinados ao acolhimento de um ou mais substratos, análogo à inserção de uma chave em uma fechadura (Figura 7; NASCIMENTO, 2023).

Figura 7. Mecanismo chave-fechadura-substrato.



Fonte: Extraído de Só Biologia, 2023.

4 ENZIMAS LIGNINOCELULOLÍTICAS

As enzimas lignocelulolíticas figuram entre os grupos de enzimas comerciais mais lucrativos, cujo crescimento está associado à ampla aplicabilidade e à elevada eficiência enzimática para a conversão de biomassa. A notoriedade das enzimas lignocelulolíticas em relação a outros grupos enzimáticos decorre da complexidade de sua composição, englobando diversas enzimas e mecanismos (FERNANDES, 2021).

5 BIOTECNOLOGIA NA INDÚSTRIA DE PAPEL E CELULOSE

Na produção contemporânea de celulose e papel, busca-se incorporar amplamente a biotecnologia de forma a substituir agentes químicos empregados

no processo, por enzimas, resultando em melhorias na qualidade do produto final (BATISTA, 2018).

A aplicação de certos produtos químicos neste processo é reconhecida como potencialmente prejudicial ao meio ambiente. Sendo assim, a biotecnologia se destaca ao oferecer enzimas que substituem esses produtos, permitindo a extração da celulose de maneira menos danosa (BATISTA, 2018).

Entre as enzimas preponderantemente empregadas neste processo, destacam-se as xilanases, que desempenham papel no branqueamento da pasta celulósica de onde será extraído o produto; as celulases, que visam aumentar a tração e entrelaçamento das fibras; as lípases, que reduzem a goma liberada pela madeira; e as pectinases e peroxidases, que contribuem para o

tratamento da água proveniente desse processo industrial, entre outras (BUCKAMAN, 2023; NOVOZAYMES, 2018).

5.1 Celulase

As celulases constituem uma classe de enzimas que desempenham papel fundamental na desestruturação de materiais celulósicos, por meio de processos de hidrólise química. A classificação das celulases é determinada em função de seu mecanismo de ação e propriedades estruturais, sendo divididas em três categorias distintas, endoglucanases, exoglucanases e β -glucosidases (POHLMANN, 2018).

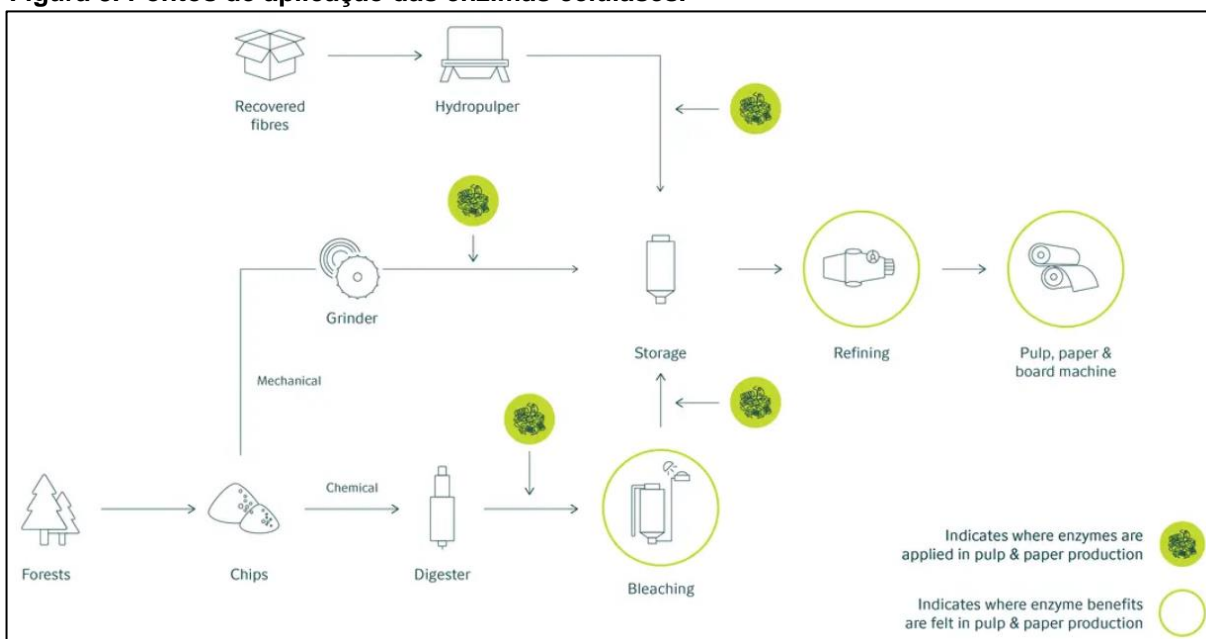
Geralmente, as celulases têm massas moleculares relativamente elevadas e se encontram na forma glicosilada com variação no teor de carboidratos de 1-50% da massa total da enzima. Sua estrutura pode ser dividida em três regiões distintas, o domínio catalítico (DC), que abrange aproximadamente 90% da sequência peptídica total e é a localização da catálise efetiva;

a região de ligação (RL), que contém poucos aminoácidos, mas é altamente glicosilada, e sua função é unir o domínio catalítico à terceira região, composta pelo módulo de ligação a carboidratos (MLC) (FARINAS, 2011).

Os MLCs desempenham funções cruciais, que incluem (i) aproximar e manter a enzima próxima à superfície do substrato para aumentar a taxa de degradação do polissacarídeo, (ii) ampliar a especificidade da enzima ao atuar em regiões seletivas da molécula de substrato e (iii) romper interações químicas na cadeia do substrato, especialmente se esta apresentar elevada cristalinidade (CASTRO, 2010).

A síntese de celulases é predominantemente conduzida por processos microbianos, com ênfase em fungos e leveduras como agentes produtores. Destaca-se os fungos filamentosos, em particular dos gêneros *Aspergillus* e *Trichoderma*, que emergem como os principais produtores desse conjunto enzimático (SILVA et al., 2021).

Figura 8. Pontos de aplicação das enzimas celulases.



Fonte: Extraído de Novozymes, 2023.

As celulases têm diversas aplicações industriais; são empregadas como

aditivos em formulações de enzimas digestivas, constituem componentes de

detergentes, desempenham papéis no processo de clareamento e amaciamento de fibras têxteis, são aplicadas no tratamento de águas residuais e na fabricação de celulose, na qual proporciona benefícios significativos. Em comparação com métodos tradicionais de polpação, a ação enzimática é mais específica e resulta em menor degradação das fibras, conseqüentemente, em qualidade superior de celulose final (FARINAS, 2011).

Na fabricação de celulose, a aplicação das celulasas podem ser feitas em diversos pontos do processo de fabricação. A Figura 8 mostra em quais pontos comumente são aplicadas (NOVOZYMES, 2023).

5.2 Lignina peroxidase

As etapas primordiais do processo químico compreendem a polpação, branqueamento e deslignificação onde agentes químicos específicos, tais como Na_2S , NaOH , H_2O_2 e ClO_2 , são empregados. Estes agentes frequentemente contribuem para a geração de diversos poluentes derivados da lignina. Este fenômeno acarreta o processamento e a descarga de fenol clorado, sulfonado e várias unidades de monômeros fenólicos livres nas águas residuais, apresentando potenciais riscos ambientais substanciais, em termos de diferentes parâmetros toxicológicos (SINGH, 2021a). Portanto, é essencial implementar uma degradação eficaz dos compostos derivados da lignina para preservar a integridade ambiental e mitigar os riscos associados a diversos contaminantes lignocelulósicos. A considerável complexidade estrutural da lignina enquanto polímero representa o desafio central na investigação das vias moleculares para a biodegradação da lignina (SINGH, 2021a).

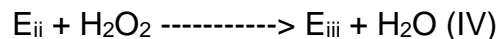
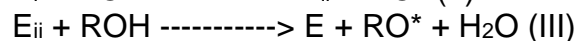
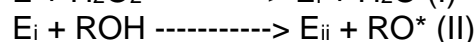
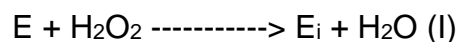
A família das enzimas peroxidases catalisam reações de oxidorredução; oxidam os substratos e concomitantemente, reduzem H_2O_2 (FERNANDES,

2021). Desta maneira, o uso de enzimas oxidativas tem se mostrado um processo alternativo para a realização do tratamento de efluentes. Estas enzimas demonstram propriedades interessantes como baixo consumo de energia, facilidade no controle do processo, além de operar numa faixa ampla de pH (2,0 a 8,0) (ELY, 2016).

As peroxidases podem ser categorizadas com base na presença ou ausência de um grupo heme, resultando na distinção entre peroxidases hêmicas e não hêmicas. As peroxidases hêmicas facilitam a peroxidação de substratos utilizando o íon de ferro presente no grupo heme. Por outro lado, as peroxidases não hêmicas, também denominadas peroxirredoxinas, empregam cisteínas com atividade redox em seu centro ativo (FERNANDES, 2021).

No contexto de um ciclo catalítico clássico, a forma férrica da enzima é oxidada pelo peróxido de hidrogênio, resultando no radical oxi-ferril. Este composto, por sua vez, sofre redução pela transferência de um elétron proveniente do substrato, como, por exemplo, a lignina. Como consequência, ocorre a transferência de elétron de uma molécula de substrato para a enzima promovendo seu retorno à forma inicial (FERNANDES, 2021).

Este ciclo catalítico pode ser exemplificado pelas equações (I) a (IV), em que ROH e RO representam respectivamente o substrato reduzido e o produto radical. Os substratos reduzidos incluem fenóis aromáticos, ácidos fenólicos e aminas, entre outros compostos aromáticos (ELY, 2016).



5.3 Xilanase

As xilanases são enzimas pertencen-

centes à família das glicosil-hidrolases (GH), que catalisam a hidrólise das ligações 1,4- β -D-xilosídicas na estrutura principal do xilano. As principais enzimas envolvidas na decomposição do xilano se dividem em duas categorias: as endoxilanases ou endo- β -xilanases, responsáveis por quebrar as ligações glicosídicas internas na cadeia do xilano, resultando na liberação de xilobioses. Estas, por sua vez, são decompostas pelas enzimas β -xilosidases, liberando monossacarídeos de xilose (KMETZKI, 2018).

Os fungos que geram xilanase, encontram-se espécies dos gêneros *Aspergillus*, *Coniothyrium*, *Disporotrichum*, *Penicillium*, *Thermomyces*, *Neurospora*, *Fusarium*, *Neocallimastix* e *Trichoderma* (BAJPAI, 2015).

Dentre estes microrganismos que produzem a xilanase, os fungos filamentosos se destacam por sua notável conveniência no cultivo e pela capacidade de secretar essas enzimas diretamente no meio de produção, dispensando a necessidade de romper as células para sua liberação. Além disso, eles demonstram altos índices de produção enzimática, o que abre caminho para diversas aplicações industriais (KUMAR et al., 2017, NASCIMENTO et al., 2014).

As enzimas de procedência microbiana despertam maior interesse no setor industrial devido à sua capacidade de serem geradas em curtos prazos e em quantidades significativas (ANBU et al., 2015).

As xilanases também atuam sinergicamente em conjunto com as celulasas, melhorando o inchaço e porosidade das fibras, o que possibilita uma maior acessibilidade das celulasas à celulose (MICHELIN et al., 2020).

A inclusão de hemicelulasas e xilanases no processo de branqueamento representa, fundamentalmente, o pioneirismo na incorporação de enzimas como instrumentos tecnológicos eficazes, passíveis de serem integrados em instalações industriais já existentes sem

a necessidade de investimentos significativos. O emprego de enzimas capazes de degradar o xilano tem adquirido relevância nas últimas duas décadas, especialmente devido a sua aplicação no estágio prévio ao branqueamento da polpa kraft (KMETZKI, 2018; COLLINS et al., 2005; POLIZELI et al., 2005).

5.4 Lignocelulose

A biomassa lignocelulósica representa uma abundante fonte de carbono orgânico renovável e vem demonstrando viabilidade na área bioenergética e no desenvolvimento de novas moléculas de interesse biotecnológico. O principal desafio reside na sua estrutura recalcitrante que apresenta dificuldades significativas para a desmontagem (FERNANDES, 2021).

A recalcitrância intrínseca na estrutura da biomassa lignocelulósica representa o principal desafio na separação da lignina, hemicelulose e celulose. Sendo necessário combinar uma espécie de coquetel de enzimas, para que a separação seja efetiva. Essa característica é atribuída a vários fatores, como o envolvimento protetor da celulose pela lignina, a cobertura da celulose pela hemicelulose, a baixa área superficial disponível e, notavelmente, a alta cristalinidade e extenso grau de polimerização da celulose em si (POHLMANN, 2018).

A estrutura da lignocelulose confere resistência a ataques mecânicos e químicos de outros organismos. Este fenômeno ocorre devido a uma estrutura altamente interconectada e rígida, resultado de processos evolutivos (JANUSZ et al., 2017).

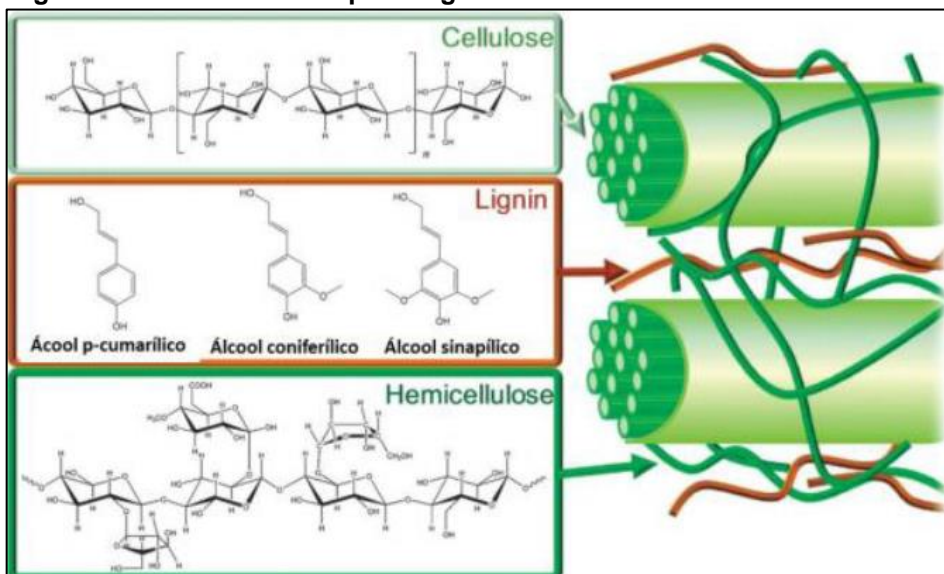
A degradação desta biomassa ocorre por meio de agentes degradadores que podem ser categorizados como físicos, químicos e biológicos. Os físicos tem-se a queima; os químicos, inclui-se ácidos fortes, bases fortes, óxidos de ferro e enxofre; e os biológicos, fungos, bactérias, cupins e besou-

ros (SUNDARARAJ et al., 2015).

Predominantemente, a biomassa lignocelulósica é composta por três biopolímeros, celulose (35-50%), hemicelulose (20-35%) e lignina (10-25%). A composição química de biomassas provenientes de fontes industriais, florestais ou resíduos agrícolas apresenta considerável variação entre elas (POHLMANN, 2018).

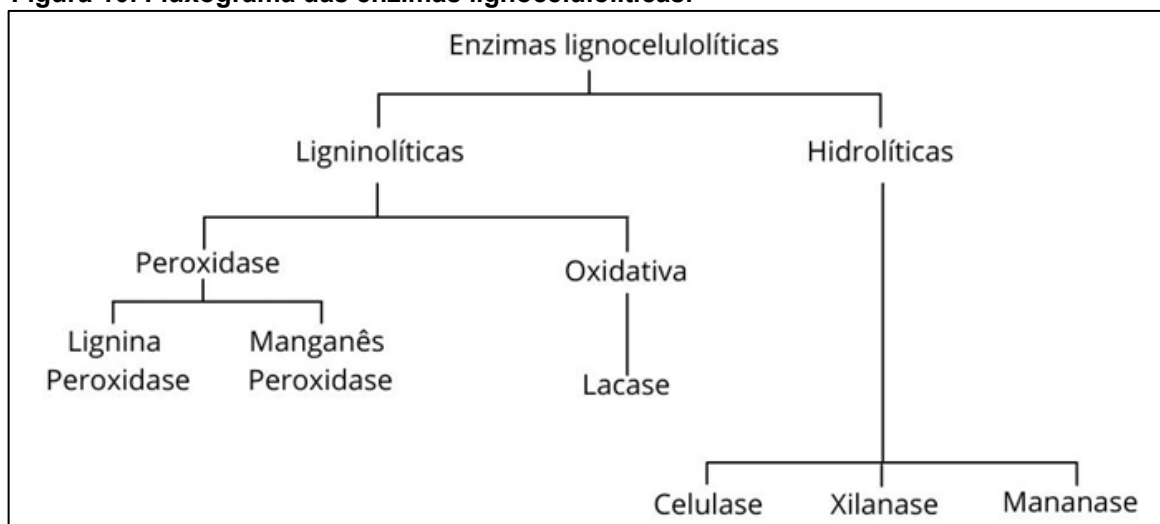
Estes materiais lignocelulósicos constituem mais de 90% do peso seco de uma célula vegetal, sendo predominantemente compostos por três moléculas em sua parede celular, celulose, hemiceluloses e lignina (Figura 9), além de uma quantidade menor de pectina e alguns extrativos minerais (FERNANDES, 2021).

Figura 9. Estrutura do complexo lignocelulósico.



FONTE: Extraído de Alonso et al., 2012.

Figura 10. Fluxograma das enzimas lignocelulolíticas.



FONTE: Extraído de Chukwuma et al., 2020.

Esta biomassa compreende resíduos agrícolas, florestais e algas, emerge como uma opção sustentável e renovável para a fabricação de uma

próxima geração de produtos, como biocombustíveis, compostos químicos, aditivos alimentares e enzimas (OKOLIE et al., 2021).

As estruturas químicas encontradas nos materiais lignocelulósicos podem ser prontamente decompostas por enzimas microbianas, o que torna o material mais acessível para futuros processos (ISIKGOR; BECER, 2015).

As enzimas presentes em microrganismos lignocelulolíticos geralmente se dividem em duas categorias: enzimas hidrolíticas e ligninolíticas. Entre as enzimas hidrolíticas, incluem-se celulasas, xilase e mananases. Já as enzimas ligninolíticas compreendem peroxidases e oxidades (Figura 10; FERNANDES, 2021).

As enzimas lignocelulolíticas se sobressaem em comparação a outros grupos enzimáticos devido à comple-

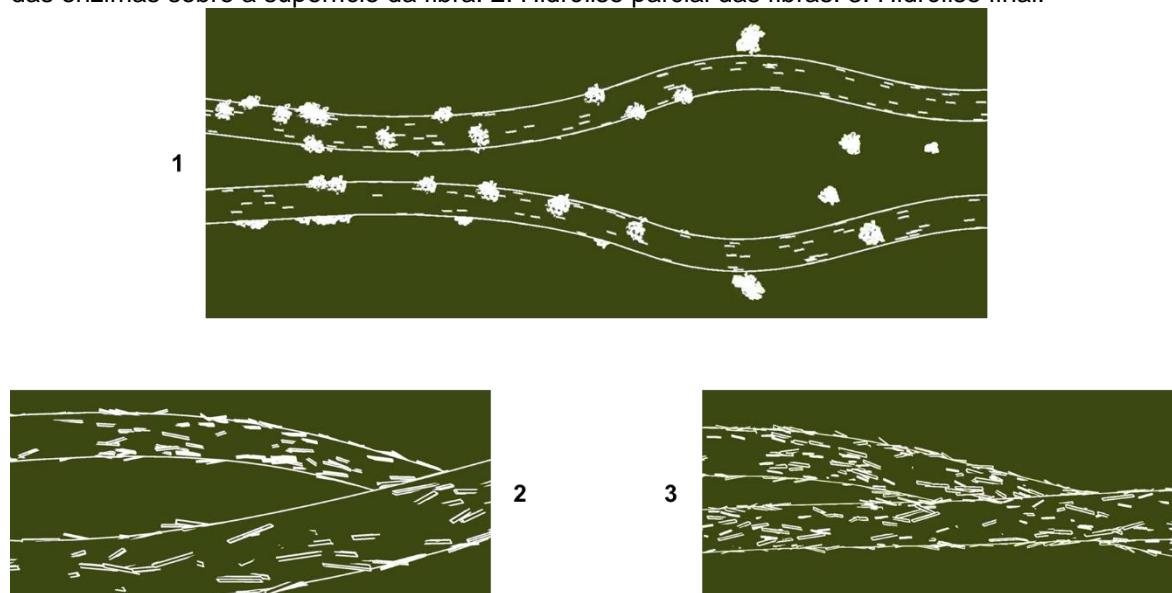
xidade de sua composição, que engloba uma variedade de enzimas e mecanismos (FERNANDES, 2021).

6 PROPRIEDADES FISCOQUÍMICAS

6.1 Tração

No Brasil, existem três principais fornecedores de enzimas industriais para o setor de celulose e papel. Ambas utilizam as celulasas para comporem seus produtos para ganho de tração. Em especial as endoglucanaeses, pois estas atacam as regiões amorfas da celulose para realizar a clivagem das cadeias de celulose, produzindo mais grupos terminais e menores cadeias de celulose (LANDIM, 2009).

Figura 11. Ilustração esquemática da ação celulasas sobre as fibras de celulose. 1. Deposição das enzimas sobre a superfície da fibra. 2. Hidrólise parcial das fibras. 3. Hidrólise final.



Fonte: Adaptado de Novozymes, 2023.

Os produtos enzimáticos da linha Maximize tem como propósito tratar diversas categorias de fibras, promovendo melhorias em suas propriedades, com a finalidade de otimizar a energia de refino requerida para atender às especificações preconizadas (BUKAN, 2016). São projetadas para tratar tipos específicos de fibras, abrindo as (Figura 11), para um desempenho ideal. Após o desgaste das fibras (Figura 12), a super-

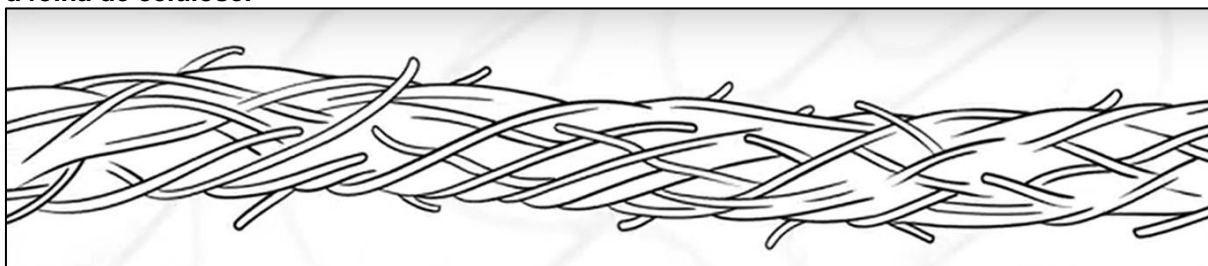
fície tornam-se apropriadas para formar as folhas de celulose (BUKAN, 2023). A Figura 13 mostra as fibras de celulose sem enzimas a esquerda e com enzimas a direita.

O condicionamento mecânico convencional é agressivo à fibra e usa muita energia, o que danifica e enfraquece as mesmas. A Maximize trabalha de forma diferente, ela envia enzimas especializadas (celulasas ou coquetel com outras

enzimas) à superfície das fibras, antes do refino mecânico para hidrolisarem as moléculas de celulose, por dentro e por fora, para desgastar a superfície. Isso ajuda as fibras a se entrelaçarem mais facilmente, exigindo muito menos energia e o que se obtém é um máximo entrelaçamento ou poder de ligação, com um mínimo de alteração à integridade da fibra. Esta não é danifi-

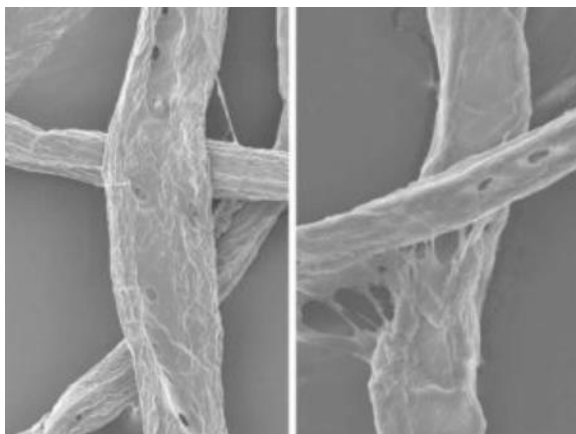
cada, encurtada ou enfraquecida e como resultado, tem-se muito mais flexibilidade na forma de usar o refino para a melhoria da drenagem e da resistência. A Maximyze trabalha para aprimorar os seguintes atributos: (i) força/tração; (ii) formação; (iii) opacidade; (iv) volume; (v) entrelaçamento das fibras e (vi) melhoria na drenagem (BUCKMAN, 2023).

Figura 12. Ilustração esquemática das fibras da celulose desgastadas, prontas para formarem a folha de celulose.



Fonte: BUCKAN, 2023.

Figura 13. Aplicação da enzima Maximyze. Esquerda – celulose sem enzimas. Direita – celulose com enzimas.



Fibras antes (L) e depois (R) da aplicação de Maximyze.

Fonte: Extraído de Buckan, 2023.

6.2 Bio-branqueamento

O processo de bio-branqueamento da polpa utilizando xilanases, é uma técnica que resulta na diminuição do volume de compostos a base de cloro utilizado no branqueamento, favorece a eliminação do xilano ligado ao complexo lignina-carboidrato, facilitando assim a retirada da lignina (BAJPAI, 2006). O

tratamento enzimático oferece vantagens como a diminuição dos custos operacionais, a redução de poluentes orgânicos, a melhoria do brilho, das propriedades da polpa, a redução do número de kappa e o aumento do rendimento de fibras (KMETZKI 2018).

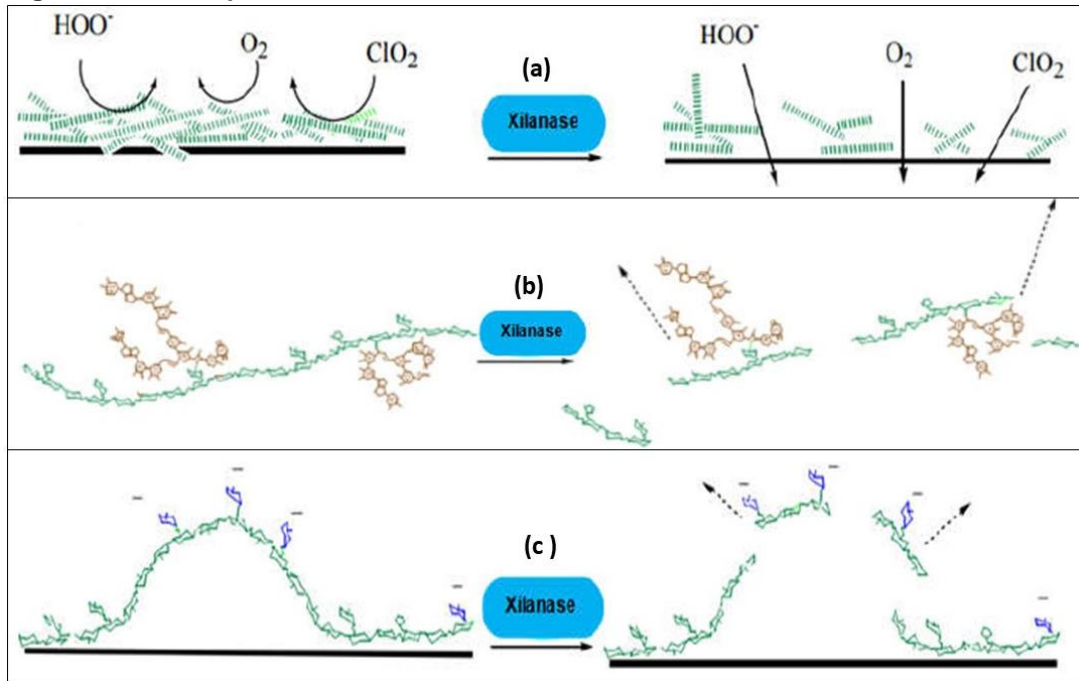
Apesar dos avanços recentes na área, os mecanismos enzimáticos envolvidos no processo de bio-branqueamento da polpa ainda não são completamente compreendidos (BAJPAI, 2015). No entanto, é estabelecido que o número kappa, indicativo do teor residual de lignina na polpa, diminui durante os tratamentos com xilanases. Além disso, há a sugestão de que as enzimas xilanases podem atuar na remoção do ácido hexenurônico, um componente presente no xilano formado durante a polpação alcalina (KMETZKI 2018).

A Figura 14 apresenta três possíveis hipóteses para o mecanismo da enzima xilanase, (i) o xilano precipitado na superfície da fibra atua como uma barreira à entrada de produtos químicos na fibra. A ação da xilanase consiste em remover parcialmente essa camada de

xilano, abrindo poros para a penetração de agentes químicos de branqueamento; (ii) a lignina está covalentemente ligada ao xilano, formando um complexo que é fragmentado pela ação das xilanases e

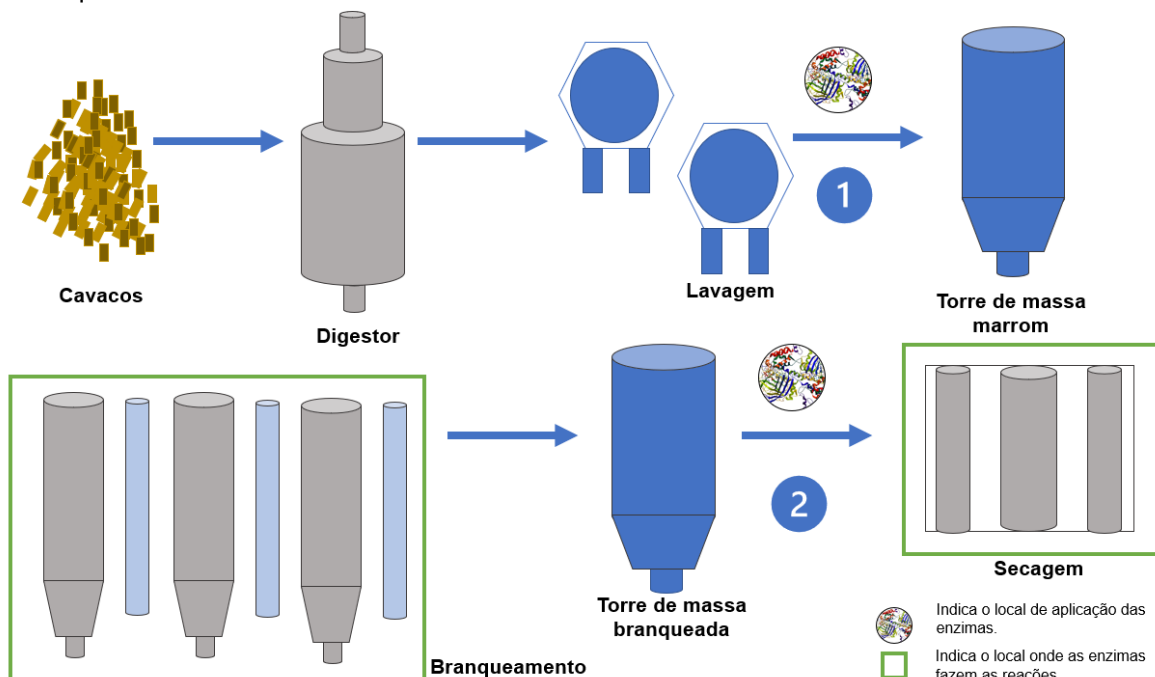
(iii) a xilanase remove áreas específicas dos xilano contendo ácido hexeneurônico, reduzindo assim o consumo de produtos químicos de branqueamento (HENRIKSSON et al., 2009).

Figura 14. Três hipóteses de mecanismo da enzima xilanase.



Fonte: Extraído de Henriksson et al., 2009.

Figura 15. Pontos de aplicação das enzimas xilanases. 1. Após lavagem. 2. Após branqueamento.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Dentre os fornecedores que comercializam enzimas xilanases, destacam-

se dois produtos específicos, o Ecopulp TXHP e o Vybrant. Ambos os produtos propõem a redução do consumo de agentes químicos no processo de branqueamento, o aprimoramento do rendimento da polpa e a minimização do descarte de resíduos nos efluentes (AB ENZYMES, 2023; BUCKMAN, 2023). A Figura 15 ilustra, de maneira simples, os pontos específicos do processo nos quais essas enzimas são aplicadas (1 – após lavagem da polpa; 2 – após branqueamento).

7 APLICAÇÃO DE ENZIMAS NA INDÚSTRIA DE CELULOSE

Nos últimos anos, há um evidente aumento do interesse das indústrias por enzimas catalisadoras da degradação do xilano. Os microrganismos, incluindo os fungos, são fontes promissoras dessas enzimas, sendo as xilanases especialmente consideradas altamente aplicáveis em diversos processos biotecnológicos (MOTTA et al., 2013).

Na indústria de papel e celulose, a presença da enzima xilanase livre de atividade celulásica tem demonstrado ser crucial nas fases iniciais do tratamento da matéria-prima e no processo de branqueamento da polpa celulósica. A sua aplicação possibilita a melhoria da eficiência do procedimento, principalmente ao reduzir a necessidade de reagentes como compostos de cloro, hipoclorito ou hidrossulfeto de zinco. Além disso, permite a adoção de condições de processamento mais brandas, resultando em impacto reduzido sobre as fibras e, conseqüentemente na obtenção de um produto final de maior qualidade (KMETZKI 2018). Dessa forma, as xilanases têm sido extensivamente empregadas, pois potencializam significativamente a ação dos agentes de branqueamento após o pré-tratamento da pasta. Essa otimização possibilita uma redução de até 25% no volume dos produtos clorados inicial-

mente utilizados. Como resultado, houve uma redução proporcional na geração de efluentes clorados (KMETZKI 2018).

A indústria de papel e celulose demanda, principalmente, a enzima xilanases por ter a capacidade de manter estabilidade em temperaturas elevadas e em ambientes de pH alcalino. Os efeitos positivos do tratamento enzimático abrangem a diminuição dos custos operacionais, a redução de poluentes orgânicos, o aprimoramento do brilho e das propriedades da polpa, a diminuição do índice kappa e o aumento do rendimento de fibras (GANGWAR et al., 2014).

Enzimas com propriedades bioquímicas compatíveis podem viabilizar a remoção mais eficiente da lignina durante as etapas de polpação e branqueamento, diminuindo a necessidade de agentes químicos oxidantes. Além disso, ao aprimorar as características da polpa branqueada, o tratamento enzimático resulta em uma série de melhorias no processo de produção de celulose, como a redução na geração de efluentes líquidos e, por conseguinte, na diminuição da toxicidade (MARTINS et al., 2014; ALI et al., 2001). Assim, várias pesquisas têm sido conduzidas na busca por enzimas adequadas para serem aplicadas nesse setor industrial (WALIA et al., 2015).

8 MEIO AMBIENTE

As principais fontes de contaminação por compostos orgânicos voláteis (EDCs, do inglês *endocrine disrupting compounds*) derivam da descarga e liberação de efluentes de águas residuais tratadas em corpos d'água doce, possivelmente devido à remoção parcial desses compostos durante o processo de tratamento de águas residuais. Os corpos hídricos receptores, que funcionam como fontes primárias de água potável, são frequentemente empregados para variadas finalidades

domésticas e agrícolas, incluindo irrigação, expondo, portanto, a população a riscos bioquímicos provenientes de efluentes de águas residuais de qualidade inadequada (SINGH, 2021b).

Os números de poluentes ambientais constituem os principais elementos presentes nas águas residuais originadas em diversos procedimentos industriais, apresentando probabilidade de incitar riscos ambientais e humanos em múltiplos aspectos. As intrincadas estruturas moleculares das substâncias, como corantes sintéticos, compostos fenólicos e lignina, demonstram resistência à degradação. Simultaneamente, a persistência desses contaminantes no ambiente pode comprometer a sustentabilidade, resultando em diversos riscos ambientais e humanos sujeitos a avaliações toxicológicas (SINGH, 2021b).

Os estágios de cloração e alcalinização na fase de branqueamento frequentemente resultam na geração de efluentes contendo substâncias de natureza tóxica. Os despejos provenientes das instalações de produção de celulose também podem influenciar o pH dos corpos hídricos receptores. Observa-se que tanto valores elevados ($\text{pH} > 9$) quanto valores baixos ($\text{pH} < 5$) exercem influência sobre a vida biológica, aumentando o efeito tóxico dos efluentes (CRUZ, 2017).

Sais inorgânicos dissolvidos geralmente não causam danos significativos à fauna aquática; contudo, sais contendo nitrogênio e fósforo funcionam como fertilizantes nos corpos d'água receptores, contribuindo para o aumento da eutrofização (CRUZ, 2017). Portanto, o uso de tratamentos enzimáticos em processos industriais de celulose possuem uma série de vantagens em relação ao meio ambiente, por promover redução na geração de efluentes líquidos e clorados, bem como, redução na toxicidade dos efluentes (KMETZKI 2018; MARTINS et al., 2014; ALI et al., 2001).

9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em conclusão, o presente trabalho ressalta irrefutavelmente a relevância da incorporação de enzimas no processo de produção de celulose, evidenciando benefícios substanciais tanto do ponto de vista econômico quanto ambiental.

Sob o prisma econômico, é possível constatar que a utilização de enzimas contribui para otimizar os processos, resultando em maior eficiência operacional e, por conseguinte, em redução de custos associados à produção de celulose. A eficácia desse processo na despolimerização de lignina, hemicelulose e outros componentes da matéria-prima evidencia seu potencial para aprimorar a rentabilidade do setor, tornando-o mais competitivo em um cenário global.

Além disso, do ponto de vista ambiental, verifica-se que a substituição de agentes químicos convencionais por enzimas, atua como um mecanismo vital na redução dos passivos ambientais da indústria de celulose. A capacidade das enzimas em operar em condições mais suaves, demandando menor consumo de energia e gerando menos resíduos tóxicos, alinha-se de forma proativa com os objetivos de sustentabilidade e responsabilidade ambiental.

Em suma, a integração efetiva de enzimas no processo de produção de celulose não apenas representa uma estratégia viável para otimização de custos, mas também reforça o comprometimento do setor com práticas mais sustentáveis. Este avanço tecnológico não apenas potencializa a competitividade da indústria, mas também contribui para a construção de um setor de celulose mais eficiente, econômica e ambientalmente responsável, assegurando assim um futuro mais sustentável para a indústria e para o meio ambiente.

REFERÊNCIAS

AB ENZYMES. Pulp and Paper Enzymes, 2023. Disponível em: <<https://www.abenzymes.com/en/your-industry/pulp-and-paper/>>. Acesso: 30 nov. 2023

ALI, M.; SREEKRISHNAN, T. R. Aquatic toxicity from pulp and paper mill effluents: a review. *Advances in Environmental Research*, v. 5, n. 2, p. 175-196, 2001.

ALONSO, D. M. et al. Bimetallic catalysts for upgrading of biomass to fuels and chemicals. *Chemical Society Reviews*, v. 41, p. 7977-7979, 2012.

ANBU, P. et al. Microbial enzymes and their applications in industries and medicine 2014. [Editorial]. *BioMed Research International*, v. 2015, p.1-3, 2015.

BAJPAI, P. Basic overview of pulp and paper manufacturing process. *Green chemistry and sustainability in pulp and paper industry*. Springer International Publishing Switzerland, cap. 2, p. 11-39, 2015. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-18744-0_2.

BAJPAI, P.; ANAND, A.; BAJPAI, P. K. Bleaching with lignin-oxidizing enzymes. *Biotechnology Annual Review*, v. 12, p. 349-378, 2006.

BATISTA, T. B. A indústria de papel e celulose no Brasil: Produtividade, competitividade, meio ambiente e mercado consumidor. 51 f. 2018. Monografia apresentada à Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

BIOLUB. O que são enzimas para papel e como atuam na produção de celulose. 2019. Disponível em: <<https://biolub.com.br/blog/o-que-sao-enzimas-para-papel-e-celulose/>>.

Acesso em: 09 set. 2023.

BUCKAN LABORATORIES INTERNATIONAL, INC. Enzyme-based chemicals for fiber refining enhance paper attributes such as strength, formation, opacity and bulk. 2023. Disponível em: <<https://www.buckman.com/innovation/maximize-for-graphics-paper/>>. Acesso em: 17 nov. 2023.

BUCKAN LABORATORIES INTERNATIONAL, INC. Gain the flexibility you need to control quality and cost with Buckman's Maximize solutions, 2016. Disponível em: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://www.buckman.com/wp-content/uploads/2018/04/a870por-h_mazimyzetissue_fme.pdf>. Acesso em: 17 nov. 2023.

CASTRO, A. M. et al., N. Produção, propriedades e aplicação de celulases na hidrólise de resíduos agroindustriais. *Química Nova*, São Paulo, v. 33, n. 1, p. 181-188, 2010.

CHAVES, L.S. Produção de nanocelulose fibrilada via moagem enzimática. 91 f. 2023. Dissertação de mestrado apresentado à Universidade Federal Fluminense Escola de Engenharia Departamento de Engenharia Química e de Petróleo. Niterói. 2023.

COLLINS, T.; GERDAY, C.; FELLER, G. Xylanases, xylanase families and extremophilic xylanases. *FEMS Microbiology Reviews*, v. 29, n. 1, p. 3-23, 2005.

COURI, S.; DAMASO, M. C. T. Enzimáticos. Embrapa, 2021. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/tecnologia-de-alimentos/processos/tipos-de-processos/enzimaticos#:~:text=O%20mercado%20est%C3%A1%20distribu%C3%ADdo%20principalmente,75%25%20>>

das%20enzimas%20produzidas%20industrialmente>. Acesso em: 09 set. 2023.

CRUZ FILHO, Paulo Bastos. Controle ambiental em fábricas de papel e celulose, 2017. Disponível em: <<https://revista.enap.gov.br/index.php/RSP/article/download/2157/1088>>. Acesso em: 17 nov. 2023.

ELY, C. et al. Aplicação de Peroxidases no Tratamento de Efluentes. Revista virtual de química, Lages, v. 8, n. 5, p. 1537-1549, jun. 2016.

ESTEVES, C. S. V. G. Efeito da aplicação de xilanases na redução do consumo de reagentes no branqueamento de pastas *kraft* de eucalipto. 2013. 126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Faculdade de Ciências e Tecnologia. Universidade de Coimbra. 2013.

FARINAS, C. S. A. Parede celular vegetal e as enzimas envolvidas na sua degradação. Emprapa. 2011. Disponível em: <<chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/919344/1/DOC542011.pdf>>. Acesso em: 24 nov. 2023.

FERNANDES, C. Como é feito o papel? Origem, processo e curiosidades. Segredos do mundo, 2021. Disponível em: <<https://segredosdomundo.r7.com/como-e-feito-o-papel/>>. Acesso em: 15 de nov. 2023.

FERNANDES, A. L. Enzimas lignocelulolíticas e seu potencial para tratamento de biomassa: uma revisão, 2021. 50 f. Monografia (Bacharel em Biotecnologia). Instituto latino-americano de ciências da vida e da natureza, Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu. 2021.

FOGAÇA, J. R. V. "Celulose"; Brasil

Escola. Disponível em: <<https://brasilecola.uol.com.br/quimica/celulose.htm>>. Acesso em: 15 nov. 2023.

GANGWAR, A. K.; PRAKASH, N. T.; PRAKASH, R. Applicability of microbial xylanases in paper pulp bleaching: A review. Bioresources, v. 9, n. 2, p. 3733-3754, 2014.

GARCIA, A. L. H. et al. Bioprocessos e biotecnologia. 1. ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 2022. E-book. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 16 nov. 2023.

HENRIKSSON, G.; LENNHOLM, H. Cellulose and Carbohydrate Chemistry. In: EK, M.; GELLERSTEDT, G.; HENRIKSSON, G. Wood chemistry and biotechnology. Berlin: de Gruyter, 2009.

HERNÁNDEZ-BELTRÁN, J. U. et al. Insight into pretreatment methods of lignocellulosic. Applied Sciences, v. 9, n. 18, 3721, 2019. doi: 10.3390/app9183721

JANUSZ, G. et al. Lignin degradation: Microorganisms, enzymes involved, genomes analysis and evolution. FEMS Microbiology Reviews, v. 41, n. 6, p. 941–962, 2017.

KMETZKI, A. C. F. Aplicação de xilanases fúngicas no processo de branqueamento da polpa kraft pelas indústrias de papel. 2018. 44 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Farmacêuticas). Centro de Ciências Médicas e Farmacêuticas, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2018.

KUMAR, D. et al. Xylanases and their industrial applications: a review. Biochemical and Cellular Archives, v. 17, n. 1, p. 353-360, 2017.

LANDIM, A.B. Análise de Grupos de

Pesquisa em Enzimas no Brasil. 2009. 117 f. (Monografia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2009.

MARINHO, A.; RODRIGO, F. Biotec na indústria de alimentos. Lina biotec, 2022. Disponível em: <<https://linabiotec.com.br/2022/07/25/biotec-na-industria-enzimas-na-industria-de-alimentos/#:~:text=As%20enzimas%20podem%20ser%20usadas,e%20maior%20dura%C3%A7%C3%A3o%20dos%20alimentos>>. Acesso em: 09 set. 2023.

MARTINS, L. O. et. al. Reduction in acute ecotoxicity of paper mill effluent by sequential application of xylanase and laccase. PLOS ONE, v. 9, n. 7, 2014. doi: 10.1371/journal.pone.0102581.

MICHELIN, M. et al. Nanocellulose production: Exploring the enzymatic route and residues of pulp and paper industry. Molecules, v. 25, n. 15, p. 1-36, 2020.

MOTTA, F. L.; ANDRADE, C. C. P.; SANTANA, M. H. A. A review of xylanase production by the fermentation of xylan: classification, characterization, and applications. Sustainable Degradation of Lignocellulosic Biomass-Techniques, Applications and Commercialization. Intech, 2013.

NASCIMENTO, P. S. Complexo chave e fechadura. Info escola. 2023. Disponível em: <<https://www.infoescola.com/bioquimica/complexo-chave-e-fechadura/>>. Acesso em: 16 nov. 2023.

NASCIMENTO, M. B. et al. Utilização de resíduos agroindustriais para a produção de Tanase por *Aspergillus* sp isolados do solo da Caatinga de Pernambuco, Brasil. E-xacta, v. 7, p. 95-103, 2014.

NELSON, D. L.; COX, M. M. Princípios

de bioquímica de Lehninger. (recurso eletrônico) 6a ed. Porto Alegre. Artmed Editora Ltda. 2014.

NEOPROSPECTA. Uso de enzimas industriais cresce com a biologia molecular. 2022. Disponível em: <<https://blog.neoprospecta.com/enzimas-industriais-biologia-molecular/>>. Acesso em: 09 set. 2023.

NOVOZAYMES. Enzymes for starch modification, 2023. Disponível em: <<https://www.novozymes.com/en/solutions/pulp-paper>>. Acesso em: 29 nov. 2023.

NOVOZAYMES. Biotecnologia na indústria de papel e celulose, 2016. Disponível em: <<http://www.bioblog.com.br/biotecnologia-na-industria-de-papel-e-celulose/>>. Acesso em: 17 nov. 2023.

OKOLIE, J. A. et al. A. Chemistry and Specialty Industrial Applications of Lignocellulosic Biomass. In Waste and Biomass Valorization. Springer Science and Business Media B.V, 2021.

ORLANDELLI, R. C et al. Enzimas de interesse industrial: produção por fungos e aplicações. Revista SaBios: Rev. Saúde e Biol., v. 7, n. 3, p. 97-109, 2012.

POHLMANN, B. C. Estudo de potenciais aplicações de nanocelulose obtida via hidrólise enzimática de resíduos da indústria de celulose, 2018. 74 f. Monografia (Bacharel em Engenharia Química). Escola de engenharia - Departamento de engenharia química e de petróleo, Universidade Federal Fluminense, Niterói. 2018.

SILVA, W. B.; OLIVEIRA, R. L., PORTO, T. S. Monitoramento tecnológico da aplicação de enzimas celulolíticas: panorama mundial e brasileiro. Revista GEAMA, Scientific Journal of

Environmental Sciences and Biotechnology, v. 7, p 48-58, ago. 2021.

SIKGOR, F. H.; BECER, C. R. Lignocelulosic biomass: a sustainable platform for the production of biobased chemicals and polymers. *Polymer Chemistry*, v. 6, 2015. doi: <https://doi.org/10.1039/C5PY00263J>.

SINGH, A. K. et al. In silico exploration of lignin peroxidase for unraveling the degradation mechanism employing lignin model compounds. *Royal Society of Chemistry*, v. 11, p. 1-22, mar. 2021.

SINGH, A. K. et al. Lignin peroxidase in focus for catalytic elimination of contaminants: A critical review on recent progress and perspectives. *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 177, p. 58-82, abr. 2021.

SIQUEIRA, P H. V. M. Utilização de

enzimas xilanases no processo de branqueamento de pastas químicas celulósicas. 2018. 43 f. (Monografia) – Universidade de Brasília, Brasília. 2018.

SÓ BIOLOGIA – Química da vida. Enzimas. 2023. Disponível em: <https://www.sobiologia.com.br/conteudos/quimica_vida/quimica11.php>. Acesso em: 16 nov. 2023.

SUNDARARAJ, R. et al. Natural durability of timbers under indian environmental conditions - an overview. *International Biodeterioration and Biodegradation*, v. 103, p. 196-214, 2015.

WALIA, A. et al. Modification in the properties of paper by using cellulase-free xylanase produced from alkalophilic *Cellulosimicrobium cellulans* CKMX1 in bio-bleaching of wheat straw pulp. *Canadian Journal of Microbiology*, 2015.