

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO  
ESCOLA DE QUÍMICA

**Thayane Rocha de Sousa**



MAPEAMENTO TECNOLÓGICO DO POTENCIAL MICROBIANO  
NA BIODEGRADAÇÃO DE BIOMASSA LIGNOCELULÓSICA NO  
CENÁRIO BRASILEIRO

RIO DE JANEIRO

2023

Thayane Rocha de Sousa

MAPEAMENTO TECNOLÓGICO DO POTENCIAL MICROBIANO NA  
BIODEGRADAÇÃO DE BIOMASSA LIGNOCELULÓSICA NO CENÁRIO  
BRASILEIRO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro Químico

Orientadores: Rodrigo Pires do Nascimento  
Ana Caroline Barros do Nascimento

Rio de Janeiro

2023

### CIP - Catalogação na Publicação

S725m      Sousa, Thayane Rocha de  
Mapeamento tecnológico do potencial microbiano na  
biodegradação de biomassa lignocelulósica no cenário  
brasileiro / Thayane Rocha de Sousa. -- Rio de  
Janeiro, 2023.  
88 f.

Orientador: Rodrigo Pires do Nascimento .  
Coorientadora: Ana Caroline Barros do  
Nascimento .

Trabalho de conclusão de curso (graduação) -  
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de  
Química, Bacharel em Engenharia Química, 2023.

1. Biomassa Lignocelulósica. 2. Enzimas  
Lignocelulolíticas . 3. Prospecção Tecnológica . I.  
Nascimento , Rodrigo Pires do , orient. II.  
Nascimento , Ana Caroline Barros do , coorient.  
III. Título.

Elaborado pelo Sistema de Geração Automática da UFRJ com os dados fornecidos pelo(a) autor(a), sob a responsabilidade de Miguel Romeu Amorim Neto - CRB-7/6283.

Thayane Rocha de Sousa

MAPEAMENTO TECNOLÓGICO DO POTENCIAL MICROBIANO NA  
BIODEGRADAÇÃO DE BIOMASSA LIGNOCELULÓSICA NO CENÁRIO  
BRASILEIRO

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado à Escola de Química da  
Universidade Federal do Rio de Janeiro,  
como parte dos requisitos necessários à  
obtenção do grau de Engenheiro Químico.

Aprovado em 01 de setembro de 2023.

---

Rodrigo Pires do Nascimento, D.Sc. (Orientador)

---

Ana Caroline Barros do Nascimento, D.Sc. (Co-Orientadora)

---

Ivaldo Itabaiana Jr, D.Sc. (titular interno)

---

Matheus Uchôa Oliveira, M.Sc.(titular externo)

---

Kese Pontes Freitas Alberton, D.Sc. (suplente)

Rio de Janeiro  
2023

*Dedico este trabalho aos meus pais, Valéria Rocha de Sousa e Antonio Manoel de Sousa, como a eles dedico todas as minhas conquistas.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo simples fato de existir e estar aqui hoje escrevendo esses agradecimentos. Que seja sempre feita a vontade d'Ele em minha vida.

À minha mãe Valéria e ao meu pai Antonio por serem minha base, meu maior suporte e minha motivação para ir atrás dos meus objetivos. Sem o apoio incondicional que sempre me foi dado por eles, eu não teria chegado até aqui. Agradeço por serem meu exemplo de determinação, minha fonte inesgotável de amor e por acreditarem em mim quando eu mesma já não acreditava mais.

À minha irmã Thaís por ser minha incansável defensora, por abrir as portas da universidade pública para mim e por ter me dado o meu maior presente.

À minha afilhada Liz, por ser meu combustível mesmo sem ter noção disso ainda. Vê-la crescer me faz seguir em frente.

Ao meu primo Fernando, por ser o irmão que a minha tia me deu, sempre compreensivo e presente.

Aos meus avós Adarcy, Ledy e Terezinha, por terem sempre cuidado tão bem de mim. Mesmo que minhas avós não me vejam agora, essa conquista também é delas.

Aos meus amigos, que sempre me ajudaram nas horas difíceis e também vibraram minhas vitórias comigo, em especial Kethelyn e Renan. Agradeço por serem meu porto seguro.

Ao Colégio Pedro II e à família que levo comigo desde 2011. Ao Pedro II tudo, sempre.

Aos amigos que fiz durante a trajetória na Universidade Federal do Rio de Janeiro, que compartilharam comigo tantas dores e alegrias.

Ao Rodrigo e à Carol, por serem mais que orientadores para mim. Agradeço pela paciência, pela disponibilidade, pelas risadas no laboratório e por me apoiarem.

Aos colegas do LEPM, pelos ensinamentos, por toda ajuda e pelo companheirismo.

Por último, mas não menos importante, agradeço à Serena, à Luna, ao Chico e à Catarina por serem refúgio e aconchego em momentos ruins e pelo amor incondicional.

## RESUMO

De Sousa, Thayane Rocha. MAPEAMENTO TECNOLÓGICO DO POTENCIAL MICROBIANO NA BIODEGRADAÇÃO DE BIOMASSA LIGNOCELULÓSICA NO CENÁRIO BRASILEIRO. Rio de Janeiro, 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

A bioeconomia surge como um modelo para otimizar o aproveitamento de recursos naturais renováveis, gerando bioprodutos, bioenergia e biocombustíveis, contrastando com o atual paradigma baseado em recursos fósseis. A dependência global do petróleo suscita preocupações acerca da finitude das reservas e do impacto ambiental. Nesse contexto, a biomassa lignocelulósica, abundante em resíduos agrícolas e florestais, emerge como uma matéria-prima promissora para biorrefinarias, que são complexas instalações industriais eficientes na conversão de biomassa em produtos sustentáveis por meio de enzimas lignocelulolíticas. Fungos filamentosos, notáveis fontes dessas enzimas, possuem intrínseca capacidade de secreção. A convergência entre bioeconomia, biomassa lignocelulósica e enzimas fúngicas propicia potenciais transformações econômicas e ambientais. O Brasil, líder mundial na produção de etanol a partir da cana-de-açúcar, está bem posicionado para empregar sua expertise em biocombustíveis a fim de ampliar a implantação de biorrefinarias, abarcando também a produção de produtos químicos e biomateriais. A colaboração entre a indústria, a pesquisa e o setor público pode acelerar o desenvolvimento, impulsionando a transição para uma economia mais circular e sustentável. A abordagem da biomassa lignocelulósica para a reutilização de resíduos agroindustriais apresenta um horizonte promissor, evidenciando tanto seu potencial econômico quanto ambiental. A expertise acumulada na produção de biocombustíveis pode catalisar a expansão das biorrefinarias, englobando uma variedade de produtos de elevado valor agregado. A integração de tecnologias avançadas pode acelerar essa estratégia, fomentando assim a economia sustentável e circular.

**Palavras-chave:** Biomassa Lignocelulósica. Enzimas Lignocelulolíticas. Prospecção Tecnológica.

## ABSTRACT

De Sousa, Thayane Rocha. MAPEAMENTO TECNOLÓGICO DOS AVANÇOS NA UTILIZAÇÃO DE ENZIMAS LIGNOCELULOLÍTICAS FÚNGICAS NA DEGRADAÇÃO DE BIOMASSA LIGNOCELULÓSICA. Rio de Janeiro, 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

Bioeconomy emerges as a model to optimize the utilization of renewable natural resources, generating bioproducts, bioenergy, and biofuels, contrasting with the current paradigm based on fossil resources. The global dependence on oil raises concerns about the finiteness of reserves and environmental impact. In this context, lignocellulosic biomass, abundant in agricultural and forest residues, emerges as a promising raw material for biorefineries, which are complex industrial facilities efficient in converting biomass into sustainable products through lignocellulosic enzymes. Filamentous fungi, notable sources of these enzymes, possess an inherent secretion capacity. The convergence of bioeconomy, lignocellulosic biomass, and fungal enzymes offers potential economic and environmental transformations. Brazil, a global leader in ethanol production from sugarcane, is well-positioned to leverage its expertise in biofuels to expand the implementation of biorefineries, also encompassing the production of chemicals and biomaterials. Collaboration among industry, research, and the public sector can accelerate development, driving the transition towards a more circular and sustainable economy. The approach of lignocellulosic biomass for the reuse of agro-industrial residues presents a promising horizon, highlighting both its economic and environmental potential. The accumulated expertise in biofuel production can catalyze the expansion of biorefineries, covering a variety of high-value-added products. The integration of advanced technologies can expedite this strategy, thus promoting a sustainable and circular economy.

**Keywords:** Lignocellulosic Biomass. Lignocellulolytic Enzymes. Technology Prospecting.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1:</b> Distribuição das áreas florestais pelo Brasil.....	18
<b>Figura 2:</b> Organização estrutural da parede celular vegetal .....	20
<b>Figura 3:</b> Modelo estrutural de uma celulose.....	21
<b>Figura 4:</b> Estrutura da celulose destacando as regiões cristalinas e amorfas. ....	22
<b>Figura 5:</b> Estrutura de um xiloglucano.....	23
<b>Figura 6:</b> Representação esquemática da lignina de eucalipto.....	25
<b>Figura 7:</b> Critérios de classificação para os fungos.....	27
<b>Figura 8:</b> Hierarquia taxonômica dos fungos filamentosos.....	28
<b>Figura 9:</b> Três diferentes cepas de espécies de Trichoderma. ....	34
<b>Figura 10:</b> Colônia de Aspergillus em placa, conidióforos e conídios.....	35
<b>Figura 11:</b> Estrutura típica de um Penicillium.....	37
<b>Figura 12:</b> Ação das enzimas do complexo celulolítico.....	39
<b>Figura 13:</b> Exemplos de hemiceluloses e suas respectivas enzimas de atuação. ....	41
<b>Figura 14:</b> Ciclo catalítico da lacase .....	43
<b>Figura 15:</b> Ciclo catalítico da lignina peroxidase.....	44
<b>Figura 16:</b> Ciclo catalítico da manganês peroxidase.....	45
<b>Figura 17:</b> Aplicações das frações de componentes presentes na biomassa vegetal.....	47
<b>Figura 18:</b> Principais métodos de pré-tratamentos apresentados nas biorrefinarias .....	48
<b>Figura 19:</b> Processos de conversão da biomassa lignocelulósica.....	49
<b>Figura 20:</b> Objetivos da prospecção tecnológica.....	52
<b>Figura 21:</b> Artigos encontrados por palavra-chave. ....	53
<b>Figura 22:</b> Artigos contendo o termo "lignocellulosic" publicados entre 2000 e 2022. ....	54
<b>Figura 23:</b> Distribuição por países dos artigos contendo o termo "lignocellulosic" entre os anos 2000 e 2023. ....	56
<b>Figura 24:</b> Distribuição dos principais assuntos dos artigos contendo o termo "lignocellulosic" entre os anos 2000 e 2023.....	56
<b>Figura 25:</b> Artigos contendo o termo "lignocellulosic" publicados entre 2000 e 2022 no Brasil.....	57
<b>Figura 26:</b> Distribuição dos principais assuntos dos artigos contendo o termo "lignocellulosic" entre os anos 2000 e 2023 no Brasil. ....	58
<b>Figura 27:</b> Artigos contendo o termo "lignocellulolytic" publicados entre 2000 e 2022. ....	59

<b>Figura 28:</b> Distribuição por países dos artigos contendo o termo "lignocellulolytic" entre os anos 2000 e 2023. ....	60
<b>Figura 29:</b> Distribuição dos principais assuntos dos artigos contendo o termo "lignocellulolytic" entre os anos 2000 e 2023. ....	61
<b>Figura 30:</b> Artigos contendo o termo "lignocellulolytic" entre os anos 2000 e 2022 no Brasil. ....	62
<b>Figura 31:</b> Distribuição dos principais assuntos dos artigos contendo o termo "lignocellulolytic" entre os anos 2000 e 2023 no Brasil. ....	63
<b>Figura 32:</b> Artigos contendo o termo "biorefinery" publicados entre 2000 e 2023. ....	64
<b>Figura 33:</b> Distribuição por países dos artigos contendo o termo "biorefinery" entre os anos 2000 e 2023. ....	65
<b>Figura 34:</b> Distribuição dos principais assuntos dos artigos contendo o termo "biorefinery" entre os anos 2000 e 2023. ....	66
<b>Figura 35:</b> Artigos contendo o termo "biorefinery" publicados entre 2000 e 2023 no Brasil. ....	66
<b>Figura 36:</b> Distribuição dos principais assuntos dos artigos contendo o termo "biorefinery" entre os anos 2000 e 2023. ....	67
<b>Figura 37:</b> Artigos contendo os termos "lignocellulosic", "lignocellulolytic" e "biorefinery" publicados entre 2000 e 2022. ....	68
<b>Figura 38:</b> Distribuição por países dos artigos contendo os termos "lignocellulosic", "lignocellulolytic" e "biorefinery" entre os anos 2000 e 2023. ....	69
<b>Figura 39:</b> Distribuição dos principais assuntos dos artigos contendo o termo "lignocellulosic", "lignocellulolytic" e "biorefinery" entre os anos 2000 e 2023. ....	70
<b>Figura 40:</b> Artigos contendo os termos "lignocellulosic", "lignocellulolytic" e "biorefinery" publicados entre 2000 e 2023 no Brasil. ....	71
<b>Figura 41:</b> Distribuição dos principais assuntos dos artigos contendo o termo "lignocellulosic", "lignocellulolytic" e "biorefinery" entre os anos 2000 e 2023 no Brasil. ....	72
<b>Figura 42:</b> Distribuição dos artigos contendo os termos "lignocellulosic", "lignocellulolytic" e "biorefinery" nas regiões do Brasil durante o período de 2000 a 2023. ....	73

**LISTA DE TABELAS**

<b>Tabela 1:</b> Oferta de biomassa considerando resíduos agrícolas, agroindustriais e silvicultura no Brasil, em milhões de toneladas. ....	19
<b>Tabela 2:</b> Enzimas produzidas por fungos e suas aplicações.....	32
<b>Tabela 3:</b> Comparação entre diferentes definições para Prospecção Tecnológica .....	51

**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

CH – Enzyme Comission

CBH - Celobiohidrolases

CBHI – Celobiohidrolases I

CBHII – Celobiohidrolases II

EGL - Endoglucanases

CMC - Caroximetilcelulose

BG -  $\beta$ -glicosidases

GH - Glicosil-hidrolases

CE - Carboidrato esterases

Lip - Lignina Peroxidase

MnP - Manganês Peroxidase

Lac - Lacase

## SUMÁRIO

1. Introdução.....	15
2. Objetivos.....	16
2.1. Objetivo geral .....	16
2.2. Objetivos específicos .....	16
3. Fundamentação teórica.....	17
3.1. Biomassa vegetal .....	17
3.1.1. Celulose.....	21
3.1.2. Hemicelulose.....	23
3.1.3. Lignina .....	25
3.2. Fungos.....	26
3.2.1. Classificação.....	27
Análises Filogenéticas .....	28
Características Morfológicas .....	29
Reprodução.....	29
Características Fisiológicas .....	30
Ecologia e habitat .....	30
3.2.2. Aplicações: enzimas fúngicas .....	31
<i>Trichoderma sp.</i> .....	33
<i>Aspergillus sp.</i> .....	34
<i>Penicillium sp.</i> .....	36
3.3. Enzimas Lignocelulolíticas.....	37
3.3.1. Celulases.....	38
3.3.2. Hemicelulases.....	40
3.3.3. Ligninases.....	42
3.4. Biorrefinaria.....	45
3.4.1. Conceito de biorrefinaria.....	45

3.4.2	Processamentos nas biorrefinarias lignocelulósicas.....	47
4.	Prospecção Tecnológica.....	50
4.1.	Pesquisa de Artigos Científicos .....	53
5.	Resultados e Discussão.....	54
5.1.	Pesquisa de Artigos Científicos .....	54
6.	Conclusões.....	73
7.	Referências bibliográficas .....	75

## 1. Introdução

A bioeconomia representa uma abordagem econômica que se concentra na exploração de recursos naturais renováveis para a produção de bioprodutos, bioenergia e biocombustíveis. Esse modelo econômico surge como uma alternativa às preocupações relacionadas aos riscos e limitações do atual paradigma, que depende principalmente de recursos fósseis. No cenário atual do Brasil, a bioeconomia surge como um impulsionador potencial para o desenvolvimento futuro, oferecendo oportunidades de inovação, geração de empregos e crescimento econômico (Nali et al., 2016).

Na realidade atual, o consumo global de energia está fortemente ligado à produção de petróleo. Prevê-se um aumento de 60% para 75% nas necessidades de petróleo até 2030, em grande parte devido ao crescimento dos setores industrial e de transporte em países emergentes. No entanto, as reservas de combustíveis fósseis são finitas e sua exploração contribui para o aquecimento global e as mudanças climáticas, devido ao aumento das emissões de gases de efeito estufa. Em um contexto global marcado pela preocupação com a preservação ambiental e pela limitação dos recursos fósseis, estão sendo desenvolvidas fontes alternativas e renováveis para atender à contínua demanda por energia e matérias-primas (Abo et al., 2019; Rodrigues, 2011).

Nesse contexto, a biomassa lignocelulósica emerge como uma matéria-prima promissora, uma vez que não entra em competição direta com a produção de alimentos e está amplamente disponível em diversas regiões do mundo (Bajpai, 2016). Ela se tornou uma alternativa viável para a produção de biocombustíveis e produtos químicos. Para viabilizar sua exploração, é necessário empregar um complexo industrial semelhante ao das refinarias de petróleo, onde ocorre a conversão dessa biomassa em produtos desejados e biocombustíveis. Tais instalações industriais são denominadas biorrefinarias (Rodrigues, 2011).

A biomassa lignocelulósica, composta principalmente por celulose, hemicelulose e lignina, representa uma abundante fonte de matéria orgânica presente em resíduos agrícolas, florestais e industriais. No entanto, sua utilização eficiente depende da complexa degradação desses componentes estruturais em açúcares fermentáveis. Esse processo de quebra da biomassa requer a ação coordenada de uma série de enzimas conhecidas como enzimas lignocelulolíticas, que têm a capacidade de despolimerizar a celulose e a hemicelulose, liberando os açúcares que podem ser convertidos em biocombustíveis e produtos químicos renováveis. As enzimas lignocelulolíticas têm

despertado um interesse crescente tanto na comunidade científica quanto na indústria, devido ao seu potencial para desempenhar um papel crucial na conversão eficiente da biomassa lignocelulósica em produtos valiosos e sustentáveis (Magalhães et al., 2019).

Dentre as fontes de enzimas lignocelulolíticas, os fungos filamentosos têm se mostrado particularmente proeminentes devido à sua capacidade natural de secretar um amplo espectro dessas enzimas. Os fungos filamentosos são conhecidos por sua habilidade de degradar e utilizar a biomassa lignocelulósica como fonte de carbono e energia, o que os torna importantes candidatos para processos biotecnológicos voltados à produção das enzimas celulolíticas (Benatti and Polizeli, 2023).

## 2. Objetivos

### 2.1. Objetivo geral

O presente estudo tem como objetivo geral coletar informações tecnológicas sobre a produção de enzimas lignocelulolíticas a partir de fungos filamentosos, visando à degradação da biomassa vegetal em biorrefinarias lignocelulósicas no Brasil, bem como apresentar o potencial e as possíveis aplicações dentro do contexto nacional.

### 2.2. Objetivos específicos

Dentre os objetivos específicos do presente trabalho, destacam-se os seguintes:

- Analisar a evolução do cenário tecnológico global relacionado à produção de enzimas lignocelulolíticas a partir de fungos filamentosos;
- Avaliar a evolução do cenário tecnológico no Brasil em relação à produção de enzimas lignocelulolíticas a partir de fungos filamentosos;
- Identificar tendências internacionais por meio de análise de artigos científicos sobre as tecnologias de produção de enzimas lignocelulolíticas a partir de fungos filamentosos, bem como seu emprego nas biorrefinarias lignocelulósicas;
- Apresentar possíveis aplicações a serem implementadas no contexto brasileiro para a reutilização de resíduos agroindustriais.

### 3. Fundamentação teórica

#### 3.1. Biomassa vegetal

A definição de biomassa vegetal consiste em toda matéria orgânica de origem vegetal, seja vegetação aquática ou terrestre, podendo ser de partes específicas desses vegetais, como troncos, galhos ou folhas, ou ainda ser resíduo do aproveitamento desses materiais de algum processo agroindustrial. Correspondente a 90% da biomassa disponível na biosfera, os materiais de origem lignocelulósica apresentam o recurso de maior abundância no planeta (Santos et al., 2012).

Segundo o conceito de biorrefinaria, definida como processo sustentável de processamento da biomassa lignocelulósica, existem duas destinações principais para a biomassa: o fracionamento dos componentes principais para posterior conversão em produtos com alto valor agregado ou em biocombustíveis. Estima-se que essa tecnologia estará à frente de um novo setor industrial focado na substituição de produtos e combustíveis a base de petróleo por produtos de rota mais sustentável (Kim et al., 2016).

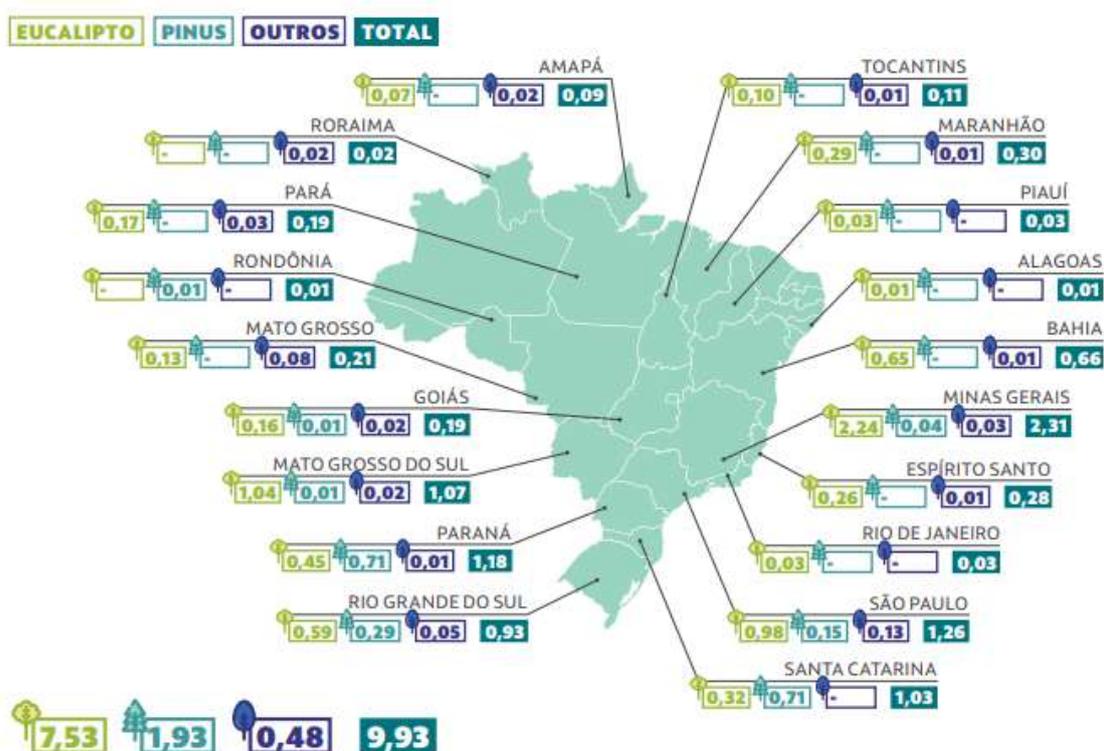
Existem diferentes fontes de obtenção para a biomassa lignocelulósica. Dentre elas, destacam-se: madeira (florestas, bosques, cavacos, desclassificados de eucalipto, serragem, etc.), resíduos agrícolas de cereais (casca de arroz, sabugo de milho, palha do trigo, etc.), bagaço de cana-de-açúcar e de sorgo sacarino, resíduos da indústria de papel e celulose e resíduos municipais (Júnior, 2013).

O Brasil apresenta capacidade para se tornar o país líder em aproveitamento integral das biomassas. Isso ocorre devido à grande biodiversidade presente no país, sendo a maior do planeta, à presença de alta incidência solar, à diversidade de culturas agrícolas, à abundância de recursos hídricos, à diversidade de clima e ao pioneirismo na produção do biocombustível (Assunção, 2010).

Dentre os cultivos da agricultura brasileira, se destacam hoje dois principais tipos: o de grãos, onde se encaixam por exemplo a soja, o milho, o arroz e o trigo, e o de cana de açúcar (Santos, 2011). O IBGE apontou uma produção de aproximadamente 261,4 milhões de toneladas de cereais, leguminosas e oleaginosas no Brasil entre os meses de janeiro e junho de 2022 (do Brasil, 2022). Há uma expressiva geração de resíduos provenientes de lavouras no país, gerando grandes quantidades de biomassa lignocelulósica que não é utilizada para comercialização direta. Parte desses subprodutos agrícolas vem sendo aproveitada para a geração de produtos como acetato

de celulose, etanol de 2ª geração, hidroximetilfurfural, alcaloides, xilitol e polpa celulósica (Cardoso et al., 2023).

Além disso, há uma considerável oferta de matéria-prima proveniente do setor florestal. De acordo com a Indústria Brasileira de Árvores, em 2021, havia aproximadamente 9,93 milhões de hectares plantados com eucalipto, pinus e outras espécies, principalmente nos estados de Minas Gerais, São Paulo, Paraná, Mato Grosso do Sul, Santa Catarina e Rio Grande do Sul (Ibá, 2022), conforme ilustrado na Figura 1. Observa-se que a região Sudeste é a que possui a maior área plantada de eucalipto, enquanto a região Sul detém a maior área plantada de pinus.



*Figura 1: Distribuição das áreas florestais pelo Brasil com foco em pinus e eucalipto.*

Fonte: Indústria Brasileira de Árvores (2022).

De acordo com o Plano Nacional de Energia 2030, elaborado pelo Ministério de Minas e Energia em 2007, o Brasil disponibilizou um total de 558 milhões de toneladas de biomassa em 2005, com uma projeção de aumento para 1.402 milhões de toneladas até 2030, como ilustrado na Tabela 1.

**Tabela 1:** Oferta de biomassa considerando resíduos agrícolas, agroindustriais e silvicultura no Brasil, em milhões de toneladas.

	<b>2005</b>	<b>2010</b>	<b>2015</b>	<b>2020</b>	<b>2030</b>
<b>Total</b>	<b>558</b>	<b>731</b>	<b>898</b>	<b>1058</b>	<b>1402</b>
Resíduos agrícolas	478	633	768	904	1196
Milho (espiga e palha)	176	251	304	361	485
Arroz (palha)	57	59	62	66	69
Cana-de-açúcar	60	73	100	119	160
Resíduos agroindustriais	80	98	130	154	207
Cana-de-açúcar (bagaço)	58	70	97	115	154
Arroz (casca)	2	2	3	3	3
Madeira	6	8	10	12	16
Florestas energéticas	13	30	31	43	46
Madeira excedente	13	30	31	43	46

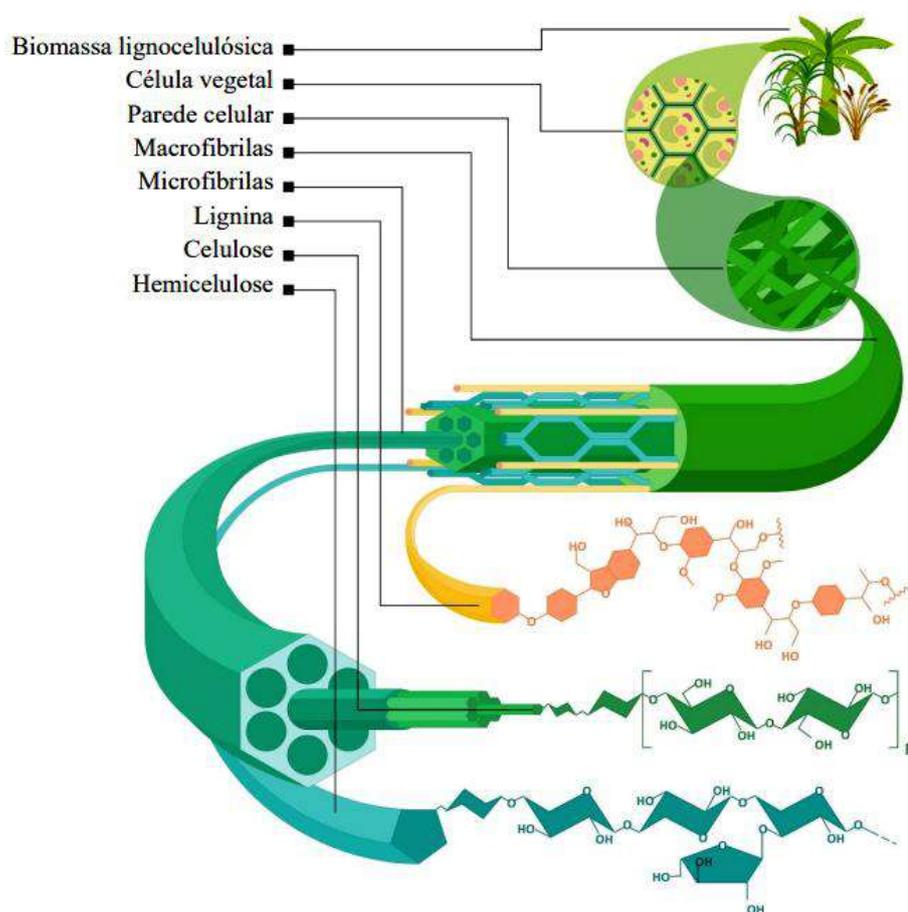
Fonte: adaptado de Ministério de Minas e Energia (2007).

A Tabela 1 evidencia que desde 2005, os resíduos agrícolas compõem mais de 85% de toda a biomassa vegetal gerada no Brasil, sendo essa tendência prevista para se manter constante até 2030. A reutilização desses resíduos não apenas representa uma estratégia para valorizar esses recursos, mas também oferece a oportunidade de reduzir a quantidade de resíduos gerados durante o cultivo, transporte e processamento. Isso visa a aprimorar a sustentabilidade dos processos agroindustriais, bem como agregar valor aos resíduos, minimizando seu descarte (De Miranda et al., 2019; Júnior, 2013; Li e Wilkins, 2021).

Algumas grandes empresas no Brasil já adotam a tecnologia de aproveitamento da biomassa lignocelulósica proveniente de resíduos. Um exemplo é a Raízen S.A., que utiliza resíduos da palha e do bagaço da cana-de-açúcar utilizados na produção do etanol de primeira geração para fabricar etanol de segunda geração. A empresa prevê que sua capacidade de produção nos próximos anos atingirá a marca de 2 bilhões de litros de etanol de segunda geração (Raízen, 2023).

A biomassa lignocelulósica é composta principalmente por celulose, hemicelulose e lignina, com proporções variáveis conforme o tamanho e a espécie do vegetal. Representa a maior fonte de carboidratos naturais do mundo (Santos et al., 2012). A célula vegetal possui uma parede celular fina e resistente, desempenhando

papel na estabilidade mecânica e no crescimento celular, prevenindo sua ruptura. É composta por uma complexa mistura de polissacarídeos, como celulose, hemiceluloses e lignina (Taiz e Zeiger, 2002). A celulose corresponde a cerca de 30 a 45% do peso total da parede celular, enquanto as hemiceluloses abrangem de 25 a 45% e a lignina representa cerca de 15 a 30% (Gupta e Verma, 2015). Em proporções menores, há presença de proteínas estruturais, lipídeos e substâncias inorgânicas (Magalhães et al., 2019). A proporção relativa entre esses três principais componentes da parede celular varia conforme a espécie vegetal (Carvalho et al., 2009). A Figura 2 ilustra a distribuição dos componentes da parede celular vegetal em sua estrutura mais comum.



*Figura 2: Organização estrutural da parede celular vegetal*

Fonte: adaptado de Magalhães et al. (2019)

Na Figura 2, as fibrilas compostas de celulose, polissacarídeos que são formados por ligações glicosídicas, se organizam em uma disposição espiralada, conferindo força e flexibilidade à parede celular. Envolvendo essas fibrilas, encontra-se a lignina, que consiste em um polímero aromático heterogêneo formado por ligações éter estáveis. Essas ligações conferem resistência contra ataques químicos e enzimáticos. O terceiro

componente essencial da parede celular é a hemicelulose, um heteropolissacarídeo ramificado composto por blocos de construção que incluem pentoses, hexoses, ácidos urônicos e radicais acetila. A combinação desses componentes resulta em um material altamente resistente e flexível (Castro e Pereira Jr, 2010).

### 3.1.1. Celulose

A celulose, o biopolímero mais abundante na parede celular, é uma matéria-prima amplamente utilizada em diversas indústrias, além de ser uma fonte de energia renovável de grande importância global (Oliveira, 2013). A estrutura detalhada da celulose é apresentada na Figura 3.

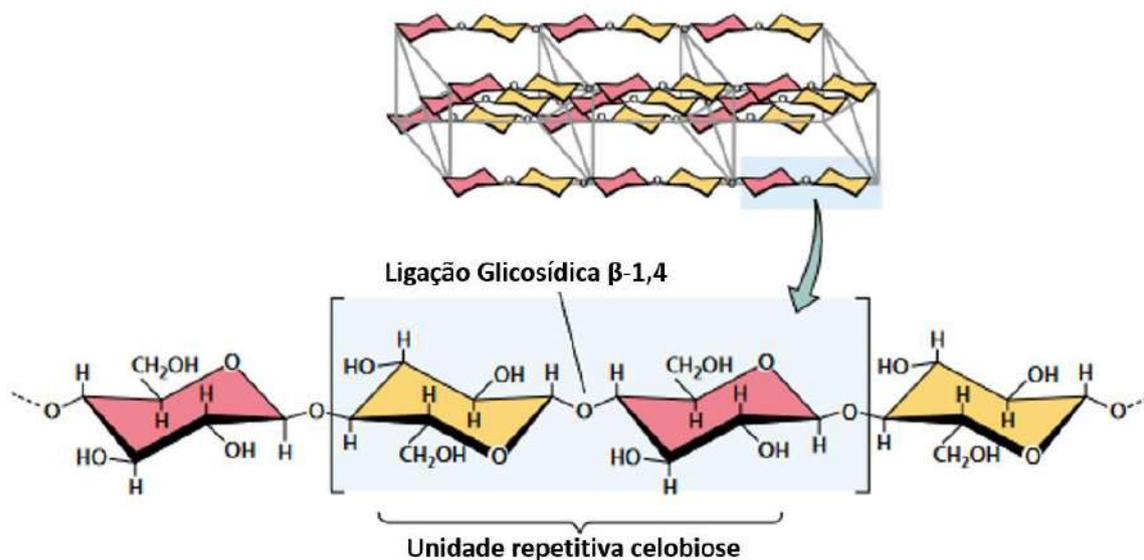
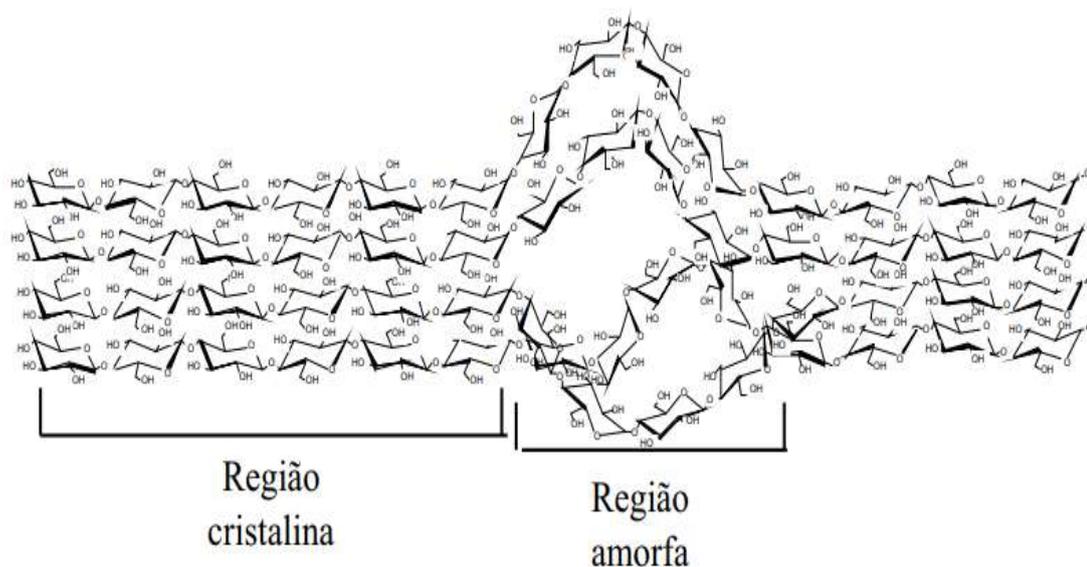


Figura 3: Modelo estrutural de uma celulose.

Fonte: Adaptado de Taiz e Zeiger (2002)

Como observado na **Figura 3** a celulose trata-se de um homopolissacarídeo de estrutura linear e plana constituído por moléculas de glicose que se unem através de ligações glicosídicas do tipo β-1,4, eliminando uma molécula de água. A unidade repetitiva do polímero é a celobiose, um dissacarídeo, o que se deve à configuração espacial alternada das ligações glicosídicas (Farinas, 2011). As interações entre as cadeias de celulose são fortemente ligadas e estabilizadas por ligações de hidrogênio intra e intermoleculares. Essas ligações formam as microfibrilas, que se tornam um

conjunto altamente ordenado e insolúvel em água, apresentando duas regiões distintas: as amorfas e as cristalinas (Farinas, 2011). Na **Figura 4** está apresentado a estrutura e organização dessas duas regiões.



*Figura 4: Estrutura da celulose destacando as regiões cristalinas e amorfas.*

Fonte: Farinas (2011)

Na Figura 4, é possível observar que as regiões amorfas exibem um grau de organização mais baixo, proporcionando um maior acesso aos açúcares fermentáveis presentes nessas áreas. Isso ocorre devido à maior facilidade de quebra estrutural nessa região. Por outro lado, as estruturas cristalinas possuem um alto grau de organização e podem variar em comprimento, sendo mais resistentes às reações de hidrólise (Farinas, 2011). Essas duas regiões organizam-se em finas lamelas, ou camadas, conforme representado na Figura 4. Essas camadas, com diferentes graus de organização, formam uma rede que compõe e estrutura a parede celular vegetal (Silva, 2016).

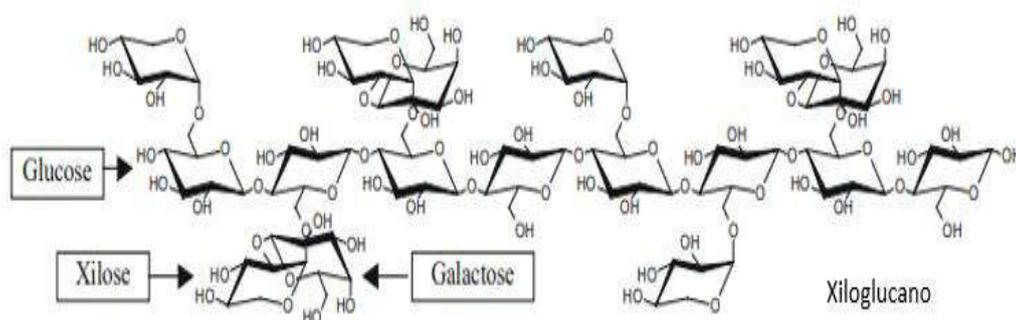
Nas regiões cristalinas, as cadeias de glucana estão dispostas de maneira paralela (Silva, 2013), o que resulta em um arranjo estrutural onde os átomos estão fixos em posições bem definidas em relação uns aos outros. Nessas áreas altamente organizadas, as moléculas que constituem as microfibrilas são empacotadas de forma a fornecer resistência à penetração por enzimas e moléculas pequenas, como a água. Essas regiões altamente organizadas intercalam-se com as regiões amorfas, que compõem de 5% a

20% da microfibrila. Pesquisas recentes indicam que a porção desordenada da celulose é hidrolisada em uma taxa muito mais rápida do que a porção cristalina (Estela e Luis, 2013).

No que diz respeito às funções químicas presentes na estrutura da celulose, as hidroxilas e os acetais têm grande relevância. As hidroxilas são responsáveis pela interação entre as moléculas, conferindo estabilidade devido à formação de pontes de hidrogênio. Essas funções têm influência nas características químicas e estruturais da celulose, proporcionando estabilidade térmica, baixa reatividade, resistência a agentes oxidantes, proteção mecânica e controle no acesso de compostos químicos, enzimas ou degradação microbiana aos grupos funcionais (Mariano et al., 2016).

### 3.1.2. Hemicelulose

Sendo o segundo biopolímero mais abundante na natureza (Díaz-Malvárez et al., 2013), a hemicelulose compreende cerca de 25% a 45% da biomassa lignocelulósica (Gupta e Verma, 2015). Ela é composta por diversos resíduos de açúcares, incluindo pentoses (xilose e arabinose), hexoses (glicose, manose e galactose), além de ácidos urônicos e grupos acetila. A Figura 5 ilustra a estrutura de um xiloglucano, destacando a presença dos monossacarídeos na cadeia principal.



*Figura 5: Estrutura de um xiloglucano.*

Fonte: Adaptado de Buckeridge et al. (2000)

Os açúcares na hemicelulose se ligam principalmente por meio de ligações β-1,4, formando uma estrutura principal consistente de um tipo específico de resíduo, a partir do qual se originam ramificações laterais de cadeias curtas de outros compostos.

Diferentemente da celulose, a hemicelulose não apresenta regiões cristalinas (Farinas, 2011).

As hemiceluloses são frequentemente classificadas com base na composição da estrutura do polímero, ou seja, nas principais unidades de açúcar presentes. Os principais componentes da hemicelulose são a xilana, encontrada em cereais e madeiras de folhosas (hardwood), e a manana, mais proeminente nas hemiceluloses de madeiras de coníferas (softwood). As xiloglucanas consistem em moléculas de glicose ligadas por ligações  $\beta$ -1,4, com ramificações de xilose unidas por ligações  $\alpha$ -1,6. Por outro lado, as xilanas são cadeias de xilose ligadas por ligações  $\beta$ -1,4. Essas cadeias principais possuem ramificações compostas por xiloses ou arabinoses, ácidos glucurônicos, manoses, galactoses e ramnoses. Esses polissacarídeos são os principais constituintes das paredes celulares primárias e secundárias (Santos et al., 2012).

As mananas são um grupo de polímeros que incluem mananas lineares, com unidades de manose ligadas por ligações  $\beta$ -1,4. As glicomananas têm uma cadeia principal com manoses e glicoses unidas por ligações  $\beta$ -1,4, sendo encontradas tanto em madeiras de folhosas como em madeiras de coníferas. As galactomananas possuem uma cadeia principal formada por manoses, com ramificações de galactoses ligadas por ligações  $\alpha$ -1,6. Por sua vez, as galactoglicomananas têm uma cadeia principal de manoses e glicoses ligadas por ligações  $\beta$ -1,4, e ramificações de galactose ligadas por ligações  $\alpha$ -1,6. Em menor abundância, estão as arabinanas, compostas por unidades de arabinose ligadas por ligações  $\alpha$ -1,5, e as galactanas, compostas por unidades de galactose ligadas por ligações  $\beta$ -1,3 (Santos et al., 2012; Souza e Kawaguti, 2021).

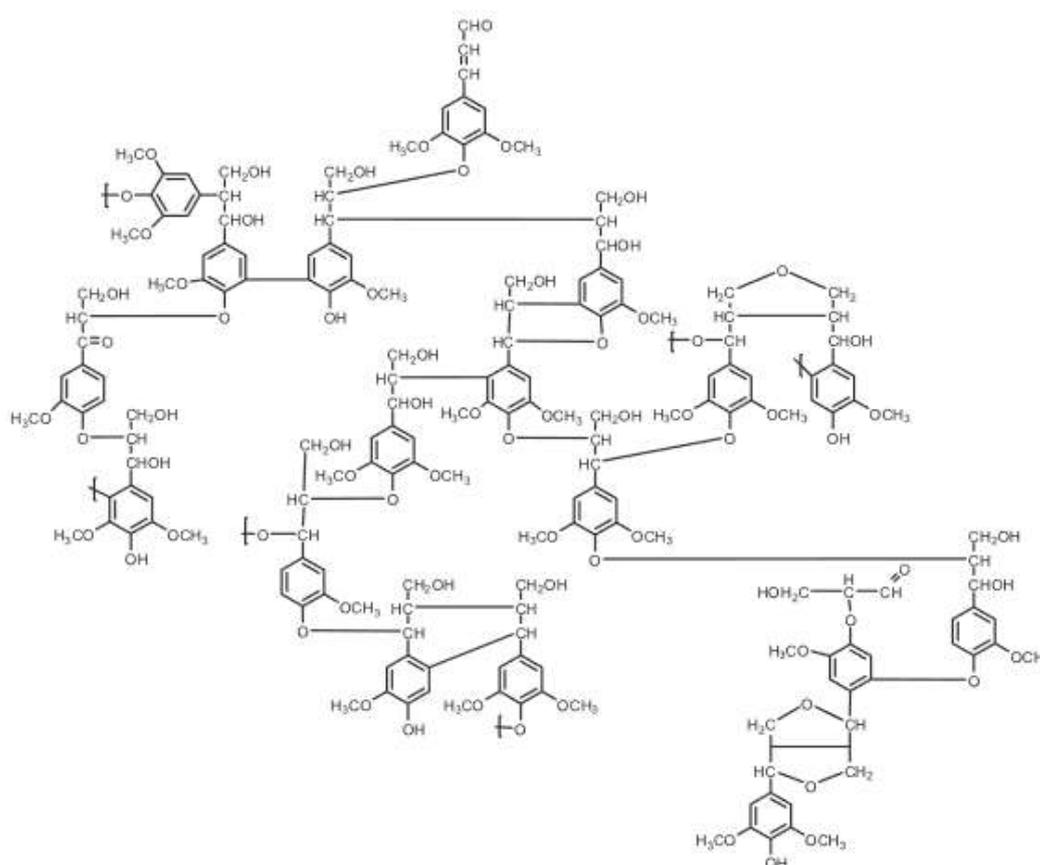
Comparativamente à celulose, as hemiceluloses são mais solúveis, pois têm menor massa molecular e sofrem hidrólise mais rapidamente, devido à quebra mais fácil de suas ligações glicosídicas, permitindo, assim, a utilização de seus açúcares (Santos et al., 2012).

A xilana é o principal componente da hemicelulose na parede celular vegetal, representando cerca de 35% de seu peso seco total. Trata-se de um heteropolissacarídeo complexo com ramificações e um esqueleto homopolimérico composto por unidades de xilopiranosil ligadas por ligações  $\beta$ -1,4. A xilana desempenha um papel significativo na integridade estrutural da parede celular devido às suas ligações covalentes e não covalentes. As xilanas tendem a interagir com a celulose e outros componentes da hemicelulose, formando agregados por meio de ligações de hidrogênio. Os constituintes

predominantes da cadeia principal desse componente incluem resíduos de acetil, arabinofuranosil e glucuronil (Silva; Oliveira, 2013).

### 3.1.3. Lignina

A lignina é um polímero composto por unidades de três álcoois: p-cumaril, coniferil e sinapil, que estão interligados em uma intrincada rede (Santos et al., 2012). Esses três monômeros se ligam resultando em aproximadamente dez tipos diferentes de ligações entre si, o que dá origem a uma estrutura tridimensional do polímero. A Figura 6 ilustra a estrutura da lignina encontrada na parede celular de um eucalipto.



*Figura 6: Representação esquemática da lignina de eucalipto.*

Fonte: Santos et al. (2012)

Na Figura 6, é possível observar que a estrutura representada não é uniforme. A lignina exibe áreas amorfas e estruturas globulares que variam conforme a fonte da biomassa (Santos et al., 2012). Os três principais compostos fenólicos presentes em sua

composição podem desempenhar papéis cruciais nas ligações cruzadas entre moléculas de xilana e na conexão entre a xilana e outros polissacarídeos (Silva, 2013).

A lignina desempenha um papel nas fibras da biomassa lignocelulósica, conferindo rigidez mecânica devido à aderência entre celulose e lignina (Santos et al., 2012). Ela fortalece os caules e os tecidos vasculares, permitindo o crescimento vertical e a condução de água e minerais, ao mesmo tempo que desempenha uma função crucial de proteção na parede celular vegetal, bloqueando o crescimento de patógenos (Taiz e Zeiger, 2002).

Em comparação com a celulose e hemiceluloses, a lignina está presente em proporções menores na parede celular vegetal. Ainda assim, ela oferece limitações suficientes para retardar ou até mesmo impedir completamente a ação microbiana (Castro e Pereira Jr, 2010). Além disso, a lignina representa o principal desafio na otimização do aproveitamento do material lignocelulósico, devido à complexidade associada à sua degradação. Nesse sentido, diversos estudos têm sido conduzidos para melhorar a utilização desse componente da biomassa por meio de processos biológicos, como o uso de fungos filamentosos para degradação da lignina, aproveitando seu diversificado aparato enzimático (Chatterjee e Venkata Mohan, 2022; Estela e Luis, 2013).

### 3.2. Fungos

Segundo Atlas (1997), os fungos são seres vivos quimioheterotróficos, eucarióticos e aclorofilados, com estrutura celular vegetativa que pode ser multicelular, conhecida como fungos filamentosos, ou unicelular, como as leveduras. Esses organismos podem ser encontrados em ambientes terrestres e aquáticos. Numerosas variedades de fungos demonstram a habilidade de decompor matérias-primas lignocelulósicas, evidenciando o potencial para a decomposição de compostos mais intrincados, como os aromáticos. Exemplos notáveis englobam micro-organismos pertencentes ao filo Ascomycota, como é o caso do *Trichoderma reesei*, bem como fungos que causam a decomposição branca, como o *Phanerochaete chrysosporium*, e fungos responsáveis pela decomposição marrom, representados pelo *Formitopsis palustres*. Até o ano de 1970, mais de 14.000 espécies de fungos já tinham sido identificadas como capazes de biodegradar material lignocelulósico (Dashtban et al., 2010).

### 3.2.1. Classificação

Os fungos constituem um grupo altamente diversificado de organismos que desempenham papéis fundamentais nos ecossistemas. Eles contribuem para a decomposição da matéria orgânica, estabelecem simbiose com plantas na forma de micorrizas, participam na produção de alimentos e medicamentos, além de atuarem como patógenos em diversos organismos. A classificação dos fungos é de suma importância para compreender sua biodiversidade, ecologia e evolução, sendo também crucial para a pesquisa, a indústria e a aplicação prática desses seres (Magnoli et al., 2022). A Figura 7 apresenta os critérios mais amplamente utilizados na classificação dos fungos:



*Figura 7: Critérios de classificação para os fungos.*

Fonte: Autoria própria.

### Análises Filogenéticas

Conforme os estudos de Zeghal et al. (2021), a taxonomia recente reconhece a existência de 19 filos importantes no reino dos fungos. Estes organismos são categorizados em várias divisões ou filos com base em suas características morfológicas e filogenéticas. Alguns dos filos fúngicos mais conhecidos incluem Ascomycota, Basidiomycota, Zygomycota, Glomeromycota, Chytridiomycota (fungos quitrídeos) e Microsporidia (Magnoli et al., 2022). A Figura 8 apresenta a classificação filogenética dos fungos filamentosos.

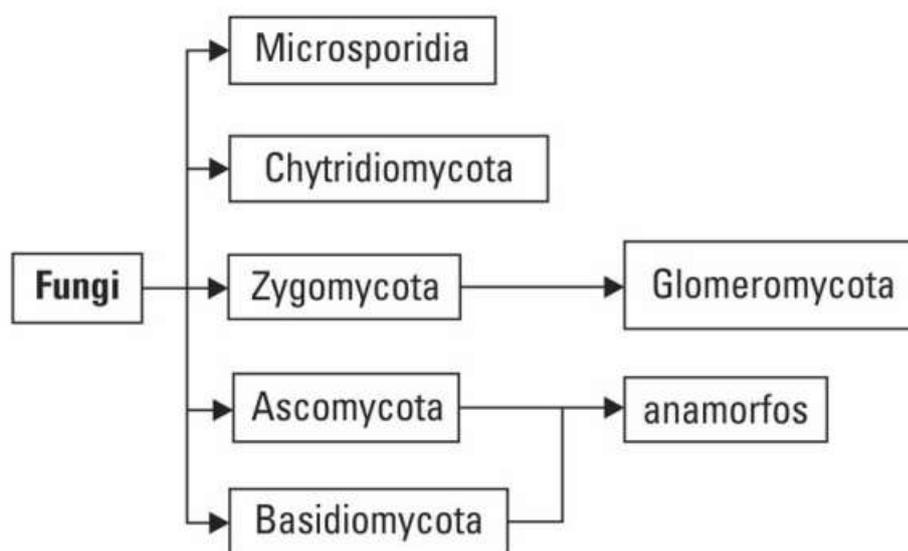


Figura 8: Hierarquia taxonômica dos fungos filamentosos.

Fonte: (Nascimento et al., 2018).

Os fungos do filo Chytridiomycota, conhecidos como fungos zoospóricos, têm uma capacidade de decomposição relativamente limitada, e algumas espécies são parasitas de raízes vegetais, enquanto outras são anaeróbias e podem ser encontradas no rúmen de ruminantes. Os fungos do filo Zygomycota possuem uma estrutura micelial mais complexa e um crescimento rápido, sendo considerados decompositores fracos. O filo Glomeromycota foi proposto mais recentemente e engloba fungos com características morfológicas, ecológicas e genéticas distintas dos demais zigomicetos.

Os ascomicetos representam o maior número de espécies conhecidas dentro do reino Fungi. Este grupo inclui tanto fungos macroscópicos quanto microscópicos, que habitam diversos substratos e podem agir como sapróbios, parasitas ou predadores. Por sua vez, os basidiomicetos compreendem aproximadamente 34% das espécies de fungos

já identificadas. Eles podem ser macro ou microscópicos e englobam uma variedade de cogumelos, incluindo espécies comestíveis, tóxicas, venenosas e alucinógenas (Nascimento et al., 2018).

### *Características Morfológicas*

As características externas e microscópicas dos fungos desempenham um papel fundamental na sua classificação em diferentes grupos taxonômicos. Isso inclui a forma e o tamanho das estruturas reprodutivas, como ascos, basídios e esporângios, bem como a presença e o tipo de esporos, além da coloração e textura das colônias fúngicas.

Os fungos filamentosos possuem uma estrutura chamada hifa, que consiste em paredes celulares espessas e resistentes que envolvem a membrana citoplasmática. De acordo com Madigan e colaboradores (2015), a composição das paredes celulares fúngicas é composta principalmente por polissacarídeos, representando cerca de 80 a 90% da composição, sendo a quitina o polissacarídeo mais abundante. Além disso, as paredes celulares contêm uma pequena quantidade de lipídeos, proteínas e polifosfatos.

O crescimento das hifas ocorre pelo alongamento das extremidades. A porção da hifa que obtém nutrientes é chamada de hifa vegetativa, enquanto a porção envolvida na reprodução é conhecida como hifa reprodutiva ou aérea, conforme explicado por Tortora e colaboradores (2000). Essa distinção entre hifas vegetativas e reprodutivas é uma característica importante na classificação e identificação dos fungos filamentosos.

### *Reprodução*

A reprodução dos fungos filamentosos ocorre assexuadamente de três formas distintas: pela divisão celular, pelo crescimento e disseminação de filamentos de hifas e pela produção assexuada de esporos (Madigan, 2015). Os esporos assexuais formam-se a partir das hifas aéreas, separando-se da célula parental e germinando, assim originando novos fungos filamentosos (Tortora et al. 2000). Além disso, ocorre a formação de esporos sexuais, resultantes da fusão de gametas unicelulares ou de hifas especializadas. Ambas as formas de esporos têm a capacidade de gerar novas hifas e micélio (Madigan, 2015).

A reprodução dos fungos pertencentes ao filo Zygomycota acontece por meio de esporangióforos, os quais são produzidos nos esporângios, estruturas reprodutoras

assexuadas. Por outro lado, os basidiomicetos e ascomicetos reproduzem-se de forma sexuada, produzindo ascósporos nos ascos, no caso dos ascomicetos, e basidiósporos nos basídios, nos basidiomicetos. De forma paralela, pode ocorrer reprodução assexuada com a produção de esporos assexuados, denominados conídios. Os fungos dividem-se em três grupos conforme o tipo de reprodução: os holomorfos realizam ambos os tipos de reprodução, sexuada e assexuada; os anamorfos reproduzem-se unicamente assexuadamente; e os teleomorfos reproduzem-se exclusivamente por reprodução sexuada (Molinaro et al., 2009).

### *Características Fisiológicas*

No que concerne à nutrição, os fungos são heterotróficos, digerindo matéria orgânica em decomposição e dejetos orgânicos (saprófitos), ou obtendo nutrientes de outros organismos (parasitas), absorvendo os nutrientes transportados para a célula através da membrana citoplasmática. Eles desempenham um papel crucial como decompositores e produtores de enzimas capazes de degradar polímeros complexos, como a celulose e a lignina, encontrados em plantas. Além de sua importância vital no processo de decomposição da matéria orgânica, as enzimas produzidas pelos fungos têm uma ampla gama de aplicações biotecnológicas (Black, 2002; Atlas, 1997).

Devido à rigidez da parede celular, os fungos obtêm nutrição absorvendo nutrientes solúveis simples. Para gerar energia, eles realizam a respiração celular ou a fermentação, e armazenam energia na forma de glicogênio (Molinaro et al., 2009).

Os fungos filamentosos possuem uma significativa relevância na biotecnologia, sendo capazes de sintetizar uma grande diversidade de micro e macromoléculas utilizadas nas indústrias farmacêutica e alimentícia. Além disso, sua habilidade na produção de enzimas, participação nos processos de biodegradação de poluentes e contribuições para a agricultura e medicina também são mencionadas (Nascimento et al., 2018).

### *Ecologia e habitat*

Os fungos estão amplamente distribuídos por todo o planeta, sendo encontrados em diversas partes da natureza, incluindo o ar, o solo, a água, superfícies vegetais e

animais, material orgânico em decomposição, bem como em produtos alimentícios e industriais (Molinari et al., 2009).

Algumas espécies de fungos, como aquelas pertencentes ao gênero *Mucor* que são responsáveis por podridões brancas, possuem capacidades metabólicas limitadas. Esses fungos estabelecem relações mutualísticas e prosperam junto com outros fungos que degradam celulose e lignina. Microrganismos que não são capazes de degradar a barreira da lignina ou enfrentam restrições físicas podem obter energia a partir de intermediários de baixo peso molecular liberados da lignocelulose pelos verdadeiros fungos causadores da podridão branca (Bajpai, 2016).

### 3.2.2. Aplicações: enzimas fúngicas

Os fungos filamentosos desempenham um papel significativo na vida humana e no meio ambiente devido a suas propriedades distintas, que possibilitam sua contribuição na produção de produtos de saúde, alimentos e no processo de degradação e reciclagem de compostos na natureza (Magnoli et al., 2022; Powers-Fletcher et al., 2016). Além disso, eles têm um valor biotecnológico considerável na produção de enzimas, vitaminas, polissacarídeos, polióis, pigmentos, lipídeos e glicolipídeos, e são amplamente comercializados (Azevedo e Barata, 2018; Chatterjee e Venkata Mohan, 2022; Dashtban et al., 2010; Vara e Karnena, 2020).

A produção enzimática por fungos é uma característica notável e essencial para sua sobrevivência e adaptação em diversos ambientes. Os fungos possuem um sistema metabólico complexo que lhes confere a habilidade de sintetizar e secretar uma ampla variedade de enzimas, permitindo a utilização de diversas fontes de nutrientes e a degradação de materiais complexos (Azevedo e Barata, 2018) A Tabela 2 apresenta algumas enzimas produzidas por fungos e suas principais aplicações.

Alguns fungos apresentam a característica de produzir ou excretar uma variedade diversificada de enzimas, incluindo as enzimas hidrolíticas (Estela e Luis, 2013; Ogeda e Petri, 2010), que desempenham um papel crucial na quebra de substâncias complexas em moléculas menores. Essas enzimas são fundamentais na degradação da biomassa lignocelulósica e incluem celulasas, hemicelulasas e ligninases. Além disso, outras enzimas de grande importância, conforme apresentado na Tabela 2, são as proteases, que degradam proteínas em aminoácidos, e as lipases, que atuam na clivagem de lipídios em ácidos graxos e glicerol (Marotti et al., 2017; Mironenka et al., 2020;

Toscano et al., 2013). Adicionalmente, os fungos têm a capacidade de produzir enzimas extracelulares como amilases, pectinases, xilanases e mananases, as quais são responsáveis pela degradação de outros polissacarídeos presentes em fontes de nutrientes (Singh et al., 2016).

*Tabela 2: Enzimas produzidas por fungos e suas aplicações*

<b>Enzima</b>	<b>Fungo</b>	<b>Aplicação</b>
$\alpha$ -amilase	<i>Aspergillus niger, A. oryzae</i>	Hidrólise do amido
Protease	<i>Aspergillus spp.</i>	Hidrólise de proteínas (panificação)
Pectinase	<i>Aspergillus, Rhizopus</i>	Clarificação de sumos de fruta
Lipase	<i>Mucor, Aspergillus, Penicillium</i>	Laticínios e detergentes
Renina	<i>Mucor spp.</i>	Coagulação do leite
Celulase	<i>Trichoderma reesei, Aspergillus</i>	Indústria alimentar, têxtil e de papel e celulose
Lactase	<i>Aspergillus niger</i>	Indústria alimentar
Lacase	<i>Lentinus, Pleurotus e Penicillium.</i>	Indústria têxtil e de bebidas, biorremediação e degradação de corantes
Lignina Peroxidase	<i>Phanerochaete, Panus, Aspergillus e Penicillium.</i>	Degradação de corantes
Manganês Peroxidase	<i>Phanerochaete, Panus, Aspergillus e Penicillium.</i>	Branqueamento de celulose

Fonte: Autoria própria com base em Azevedo e Barata, 2018; Carvalho, 2011.

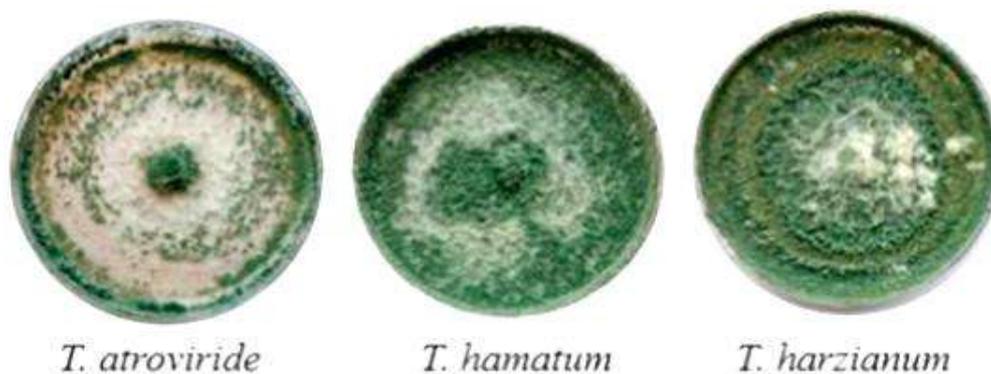
A complexa capacidade metabólica dos fungos em sintetizar e secretar uma variedade de enzimas é crucial para sua nutrição e crescimento em ambientes diversos. Essa habilidade também confere aos fungos uma importância substancial em diversas aplicações biotecnológicas e industriais, incluindo a produção de enzimas utilizadas em processos industriais, como na indústria alimentícia, na produção de biocombustíveis e na fabricação de produtos químicos renováveis (Magnoli et al., 2022; Powers-Fletcher et al., 2016).

Entre os microrganismos capazes de produzir enzimas degradadoras de biomassa vegetal, destacam-se os fungos filamentosos, algumas leveduras, bactérias e actinomicetos, com um enfoque especial nos fungos filamentosos, principalmente nas linhagens de *Trichoderma reesei* e *Aspergillus niger*, além de algumas espécies de *Penicillium*. O fungo *T. reesei* tem sido amplamente empregado na indústria para a produção de coquetéis enzimáticos celulolíticos (Castro e Pereira Jr, 2010). Nos próximos subitens, serão abordados os três principais gêneros fúngicos produtores de enzimas lignocelulolíticas.

#### *Trichoderma sp.*

*Trichoderma* é um gênero de fungo filamentoso pertencente ao Filo Ascomycota, o qual abrange uma ampla variedade de linhagens de fungos multifuncionais. Membros do gênero *Trichoderma* são cosmopolitas e componentes prevalentes em diferentes ecossistemas em uma ampla gama de zonas climáticas, concentrando-se especialmente em regiões de clima tropical e temperado. A ocorrência das espécies de *Trichoderma* é modulada por vários fatores, incluindo microclima, disponibilidade de substratos e complexas interações ecológicas. A sobrevivência em habitats geográficos distintos pode estar relacionada com a diversidade metabólica, alta capacidade reprodutiva e habilidades competitivas das cepas de *Trichoderma* na natureza (Gupta et al., 2014). Espécies de *Trichoderma* spp. podem teoricamente ser isoladas de quase todos os tipos de campos agrícolas e áreas florestais, com vários impactos positivos nas culturas agrícolas, incluindo o controle biológico de doenças vegetais, indução de resistência sistêmica, aumento da disponibilidade e absorção de nutrientes, promoção do crescimento das plantas, melhoria do rendimento das culturas e degradação de pesticidas xenobióticos. Pelas razões mencionadas acima, esses fungos têm sido amplamente estudados e comercializados como biofungicidas e biofertilizantes (Gupta et al., 2014; Zin e Badaluddin, 2020; Nascimento et al., 2022).

Em termos gerais, os membros desse gênero apresentam características morfológicas comuns e facilmente identificáveis. Suas linhagens inicialmente se manifestam como colônias brancas e felpudas, evoluindo posteriormente para tufo compactos de coloração amarelada e verde profundo. Seu crescimento é rápido e ocorre de maneira concêntrica, adotando a forma de um anel na superfície do meio de cultura (Figura 9) (Zin e Badaluddin, 2020).



**Figura 9:** Três diferentes cepas de espécies de *Trichoderma*.

Fonte: adaptado de Zin e Badaluddin (2020)

Devido à sua notável capacidade de secreção de proteínas, as espécies de *Trichoderma* são amplamente utilizadas na produção de enzimas industriais, tornando-se um foco significativo de estudo devido ao seu potencial biotecnológico. Por exemplo, cepas mutantes de *Trichoderma reesei* são reconhecidas por sua habilidade na produção de enzimas que degradam a parede celular vegetal (Rigo et al., 2021). Esses fungos estão entre os organismos mais investigados e bem conhecidos em relação à produção de celulases, sendo capazes de sintetizar um conjunto completo dessas enzimas (Verma e Kumar, 2020).

O gênero *Trichoderma* contém espécies com capacidade de secretar enzimas e devido à alta taxa de excreção, juntamente com a diversidade e especificidade de substratos das enzimas produzidas, a aplicação do gênero *Trichoderma* em diversas áreas da biotecnologia é uma realidade (Gupta et al., 2014). Uma espécie em particular *Trichoderma reesei*, apresenta alta capacidade de produção e secreção de celulases, com potencial aplicação nas indústrias alimentícia (produção de alimentos e ração animal), têxteis (biopolimento e bioestonagem), indústrias de polpa e papel (melhora da qualidade da polpa celulósica) e, mais recentemente, na biorrefinaria (produção de etanol 2G) (Gordillo-Fuenzalida et al., 2019).

#### *Aspergillus sp.*

O gênero *Aspergillus*, que pertence ao Filo Ascomycota, é um dos fungos filamentosos mais comuns. Suas diversas espécies podem ser encontradas facilmente, especialmente em regiões de clima tropical, habitando o solo, o ar, a água, organismos

vegetais e animais, inclusive participando do processo de deterioração desses organismos (Rosa et al., 2002).

A morfologia do gênero *Aspergillus* é distintiva. Suas espécies apresentam uma estrutura conhecida como "aspergillum", que consiste em uma haste (estipe) e uma vesícula, a partir da qual surgem os esporos assexuais (conídios). As fiáldes, que são séries de células alongadas, são responsáveis pela produção desses esporos, e elas se agrupam para cobrir total ou parcialmente a vesícula. A estrutura completa inclui a cabeça aspergillar (aspergillum), a estipe e a célula pé, conhecida como conidióforo (Rosa et al., 2002).

A aparência das colônias é um aspecto crucial para a identificação das espécies de *Aspergillus*. As colônias têm um crescimento rápido, inicialmente são brancas ou amareladas, evoluindo para tonalidades de marrom e até preto. As colônias das espécies de *Aspergillus* consistem em micélio aéreo com conidióforos abundantemente distribuídos pela superfície do substrato, resultando em uma alta taxa de produção de esporos (Santos, 2007). A Figura 10 ilustra a aparência das colônias em placa e a estrutura desses fungos sob um microscópio.

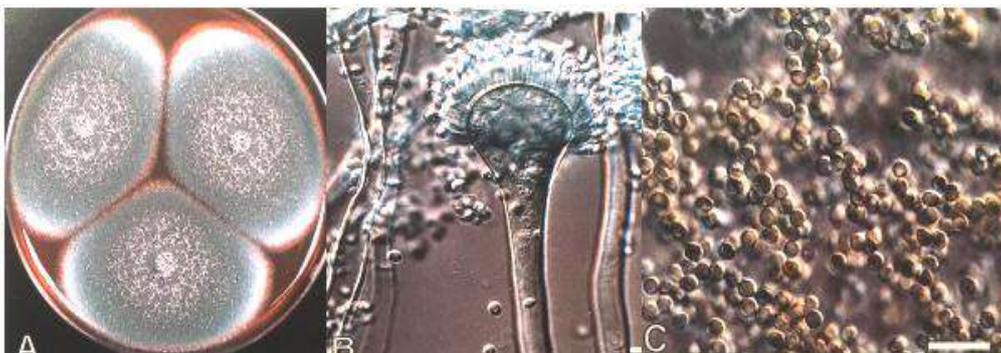


Figura 10: Colônia de *Aspergillus* em placa, conidióforos e conídios.

Fonte: adaptado de Francisco (2017).

A primeira exploração humana conhecida do *Aspergillus* para fins benéficos foi para a transformação de arroz, soja e outros alimentos vegetais, visando melhorar sua palatabilidade e torná-los disponíveis para fermentação posterior por leveduras e bactérias. A domesticação do *Aspergillus* para produção de alimentos é considerada ter tido origem na China há cerca de 2000 anos atrás. Posteriormente, fermentações semelhantes de alimentos foram adotadas na Indonésia, Japão, Coreia e outras partes da Ásia, recebendo o nome de Koji (nome japonês para grãos e/ou soja fermentados por

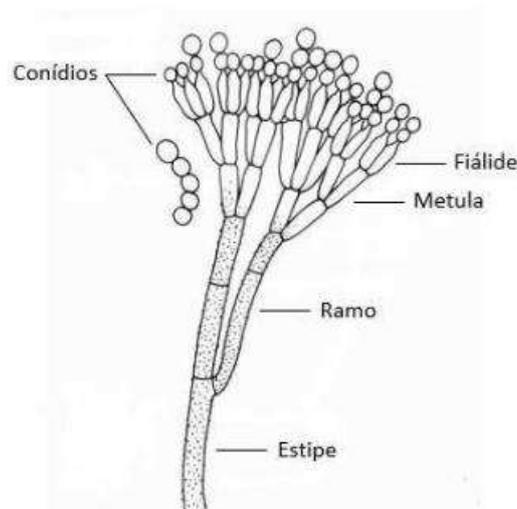
fungos). Essas fermentações (processos de koji) são a base de processos comerciais robustos no mundo moderno, nos quais um fungo filamentoso secreta uma variedade de enzimas à medida que invade e degrada seu substrato, passando de proteínas para peptídeos e aminoácidos, e de amido para açúcares simples (Goldman & Osmani, 2008).

As espécies do gênero *Aspergillus* são conhecidas por apresentarem a capacidade de excreção de diversas enzimas com aplicação comercial, caracterizando um alto potencial biotecnológico. Dentre as principais enzimas produzidas estão as celulases, lactases, invertases, pectinases, proteases e amilases, com aplicações nas indústrias de alimentos, têxtil, farmacêutica, de bebidas, de panificação, de papel e na área da saúde (Matúš et al., 2023; Rocha, 2010). As altas taxas de excreção apresentadas em intervalos de tempo curtos quando comparados a outros gêneros, até mesmo em comparação com a espécie *Trichoderma reesei*, conferem ao *Aspergillus niger* grande interesse comercial para produção de celulases (Carranza et al., 2017, 2014; Matúš et al., 2023; Rodríguez-Zúñiga et al., 2011).

#### *Penicillium sp.*

As espécies que compõem o gênero *Penicillium* habitam diversos ecossistemas, mas seu habitat natural é o solo. Elas possuem alta tolerância a condições extremas, como baixa disponibilidade de água, temperaturas elevadas e pHs adversos, sendo consideradas pouco exigentes nutricionalmente. Essa característica lhes confere a capacidade de crescer em praticamente qualquer ambiente (Cardoso et al., 2007).

As características de suas colônias são importantes para a identificação do gênero, com a cor do micélio variando entre tons de amarelo, verde, vermelho e marrom. Microscopicamente, é possível observar a presença de hifas septadas. Os conidióforos surgem como ramos do micélio e consistem de um estipe que pode ser estreito ou alargado, dependendo da espécie. O "Penicillus" tem início na ponta do estipe, onde estão presentes as células conidiogênicas fiálides, bem como as células de apoio métula e ramo. Em algumas espécies, pode haver também a presença de râmulo entre essas células (Pitt, 1991). A Figura 11 ilustra a estrutura de um *Penicillium*.



*Figura 11: Estrutura típica de um Penicillium*

Fonte: Lima (2015).

O gênero *Penicillium* é capaz de sintetizar uma quantidade elevada de metabólitos secundários, podendo alcançar uma produção mais eficiente do que outros microrganismos. Ele é considerado um produtor competente de enzimas lignocelulolíticas, com aproximadamente 30 espécies constantes na literatura capazes de produzir enzimas com diversas propriedades e especificidades (Marotti et al., 2017; Matúš et al., 2023; Temer et al., 2014).

### 3.3. Enzimas Lignocelulolíticas

No ano de 2017, o valor de mercado global das enzimas atingiu a marca de US\$ 7,1 bilhões, sendo a Europa responsável por um terço da produção global de enzimas. Projetou-se alcançar US\$ 10,5 bilhões até 2024, apresentando uma taxa de crescimento anual de 5,7% de 2018 a 2024. Naquele mesmo ano, quase 70% do mercado de enzimas era controlado por microrganismos. A vasta gama de aplicações das enzimas em diversos setores industriais, como alimentício, farmacêutico, de biocombustíveis e têxtil, justifica a crescente demanda (Papadaki et al., 2020).

Para possibilitar a utilização da celulose e da hemicelulose provenientes da biomassa lignocelulolítica como fontes de açúcares na fermentação, é necessário realizar a hidrólise desses polissacarídeos em glicose. Os complexos enzimáticos responsáveis pela hidrólise dos materiais lignocelulolíticos são as celulasas, hemicelulasas e ligninases (Benatti and Polizeli, 2023).

As enzimas compreendidas no complexo de enzimas lignocelulolíticas, como as celulases (glucanases,  $\beta$ -glucosidades), hemicelulases (xilanases, acetil-esterases, etc) e ligninases (lacases, lignina peroxidases, manganês peroxidases), podem ser produzidas por alguns microrganismos a partir da utilização de substratos de baixo valor comercial, como resíduos agroindustriais, em condições específicas de crescimento (Bonugli-Santos et al., 2010; Dashtban et al., 2010; Sánchez-Ramírez et al., 2014)..

### 3.3.1. Celulases

As celulases constituem um grupo de enzimas que colaboram em conjunto para a degradação da celulose em unidades de açúcar, como glicose e celobiose. Elas são classificadas com base em seu modo de ação enzimática e nas especificidades do substrato em endoglucanases, exoglucanases e  $\beta$ -glicosidades. As celulases pertencem à classe de enzimas glicosil hidrolase, que têm como função a hidrólise de oligossacarídeos e polissacarídeos (Kuhad et al., 2016). Essas enzimas são categorizadas de acordo com a codificação 3.2.1.x da Comissão de Enzimas (EC), onde o valor x varia com o tipo de celulose avaliada (Castro e Pereira Jr, 2010).

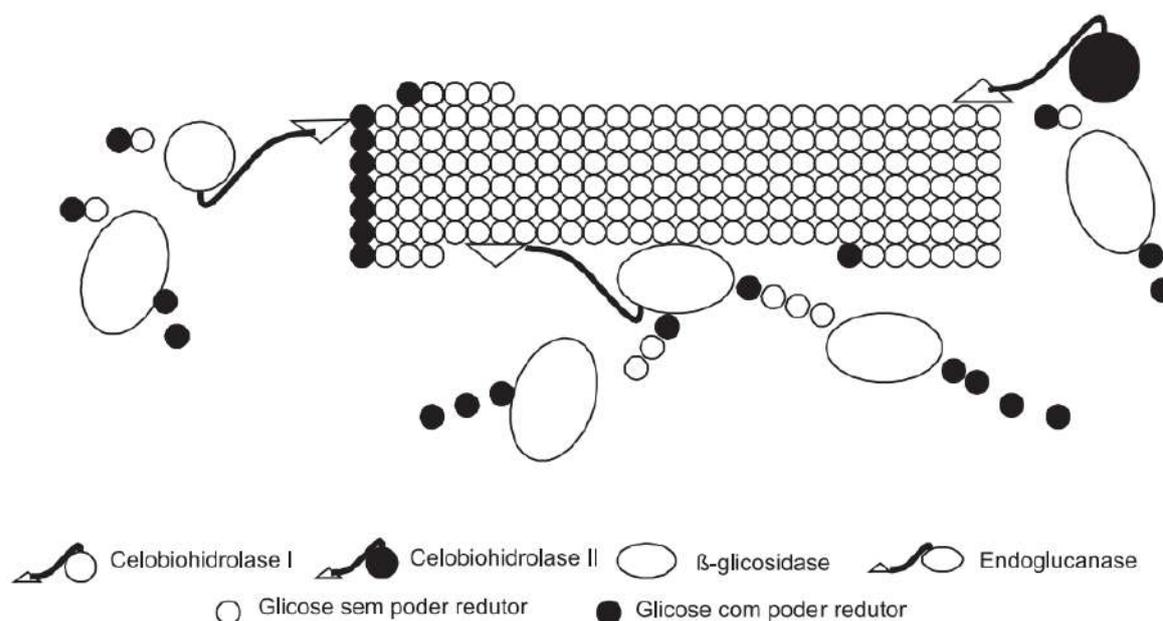
As exoglucanases, também conhecidas como celobiohidrolases (CBH), ou exo-1,4- $\beta$ -D-glucanases, atuam na hidrólise da ligação glicosídica  $\beta$ -1,4 na região externa da celulose. Isso resulta na formação de várias unidades de celobiose contendo diversos açúcares não redutores e oligossacarídeos de carboidratos (Ranjan et al., 2023). Essas enzimas são responsáveis pela rápida solubilização do polímero celulósico e iniciam a hidrólise da celulose, atuando na celulose cristalina. Elas promovem uma reação lenta e gradual de despolimerização (Coelho e Silva, 2018). Ao liberar oligossacarídeos com diferentes graus de polimerização, as exoglucanases criam novas extremidades redutoras, quando a glicose possui uma hidroxila heterosídica livre, e não redutoras, quando a hidroxila heterosídica na extremidade da molécula está ligada a uma glicose adjacente (Castro e Pereira Jr, 2010). Com base nas preferências individuais pelas extremidades redutoras ou não redutoras das cadeias de celulose em sua região cristalina, as celobiohidrolases são classificadas em CBHI ou CBHII. As CBHI são as exoglucanases com preferência pela extremidade redutora, enquanto as CBHII são as que possuem preferência pela extremidade não redutora (Lynd et al., 2002).

As endoglucanases (EGL), também conhecidas como endo- $\beta$ -1,4-glicanases ou carboximetil celulases, são caracterizadas pela EC 3.2.1.4 e agem clivando as ligações

glicosídicas  $\beta$ -1,4 internas na celulose. Isso resulta na liberação de oligossacarídeos de diferentes comprimentos. Elas atuam na celulose amorfa e em celuloses quimicamente modificadas que sejam solúveis, como a carboximetilcelulose (CMC) (Coelho e Silva, 2018). A atividade catalítica dessas enzimas pode ser medida pela redução da viscosidade do meio, o que ocorre devido à diminuição da massa molar média da celulose ou de seus derivados (Ogeda e Petri, 2010).

As  $\beta$ -glicosidades (BG), também conhecidas como celobiasas (EC 3.2.1.21), atuam na conversão de oligossacarídeos solúveis em glicose com grau de polimerização inferior a 7, bem como na formação de celobiose, que é gerada pelas endoglicanases e exoglicanases, finalizando assim a hidrólise da celulose. Essas enzimas sofrem inibição pelo próprio produto de hidrólise. Além disso, existem as celulases oxidativas que despolimerizam a celulose por meio de reações de radicais, como a celobiose desidrogenase (Coelho e Silva, 2018; Castro e Pereira Jr, 2010).

A Figura 12 ilustra o funcionamento das enzimas no complexo celulolítico.



*Figura 12: Ação das enzimas do complexo celulolítico.*

Fonte: Castro e Pereira Jr (2010)

A Figura 12 apresenta a atuação das enzimas do complexo celulolítico. Ao trabalharem em conjunto, essas enzimas apresentam um rendimento maior do que a simples soma dos rendimentos individuais de cada enzima. Surge uma sinergia notável entre EGL-CBH, onde a endoglucanase age na região amorfa da fibra, liberando

terminais redutores e não redutores para a ação da exoglucanase. Essa colaboração também é evidente na relação CBH-CBH, com a atuação simultânea das exoglucanases nos terminais redutores e não redutores liberados após a ação da endoglucanase. Além disso, uma terceira forma de cooperação é observada nas relações CBH-BG e EGL-BG, onde tanto as exoglucanases quanto as endoglucanases liberam celobiose e oligossacarídeos como produtos de suas hidrólises. Esses produtos, por sua vez, são substratos para a ação da  $\beta$ -glicosídeos, que conclui a hidrólise da celulose de forma eficaz (Castro e Pereira Jr, 2010).

### 3.3.2. Hemicelulases

As hemicelulases constituem um conjunto de enzimas cuja principal função é a degradação de hemiceluloses. As principais fontes naturais de produção dessas enzimas são as bactérias e os fungos filamentosos. Atualmente, a maioria das hemicelulases comerciais é produzida por fungos, devido à sua alta capacidade de excreção em condições controladas. Uma variedade abrangente de ascomicetos tem sido empregada na produção desses biocatalisadores, destacando-se espécies como *Trichoderma*, como o *Trichoderma reesei* (Méndez-Líter et al., 2021).

Dado que a hemicelulose apresenta uma estrutura complexa e heterogênea, a ação de diversas hemicelulases é necessária para completar a reação de hidrólise. Essas hemicelulases são classificadas de acordo com sua atividade catalítica em glicosil-hidrolases (GHs), que atuam na hidrólise de ligações glicosídicas, e carboidrato esterases (CEs), que realizam a hidrólise de ligações éster presentes em grupos laterais de acetato ou ácido ferúlico (Van Dyk e Pletschke, 2012). A Figura 13 ilustra algumas estruturas de hemiceluloses e as enzimas que as utilizam como substrato.

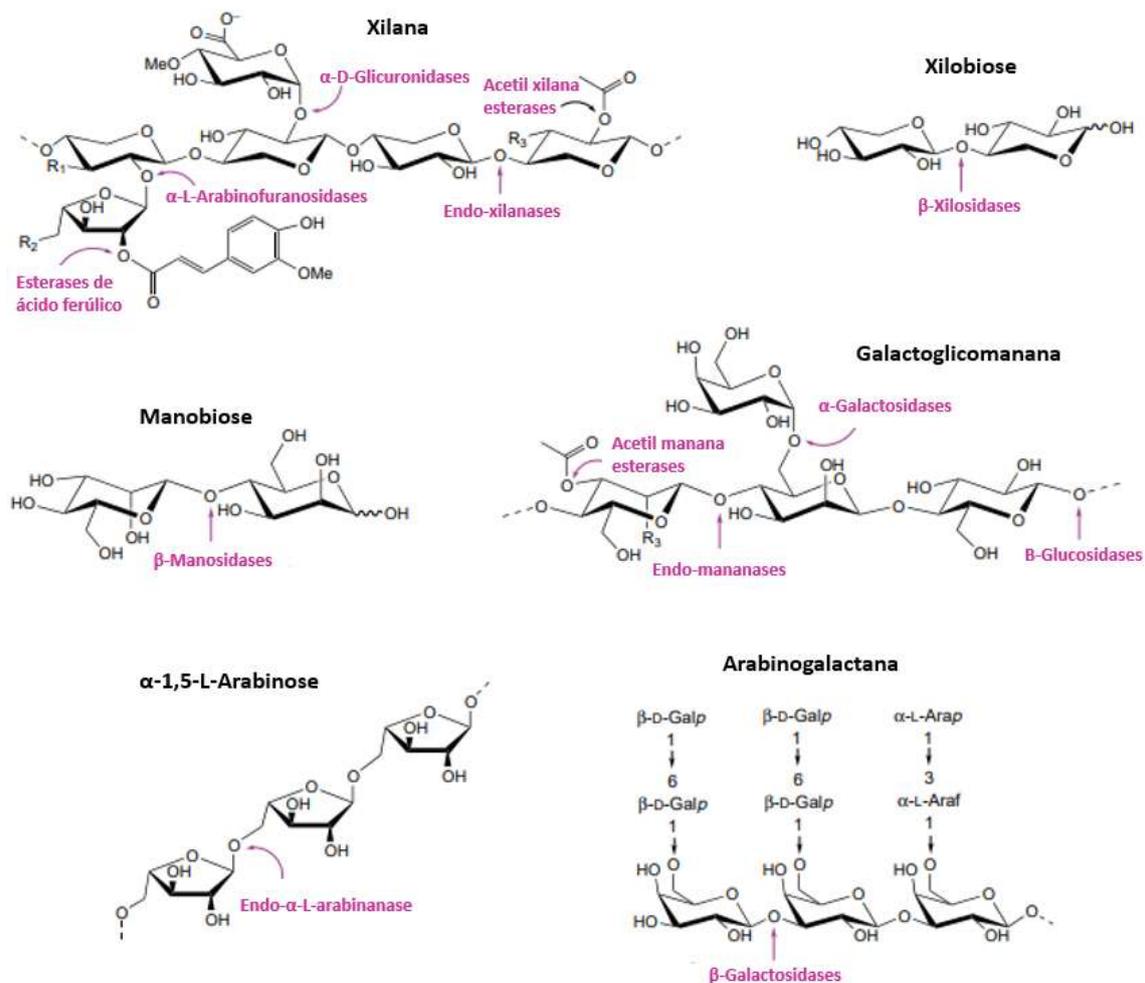


Figura 13: Exemplos de hemiceluloses e suas respectivas enzimas de atuação.

Fonte: Adaptado de Shallom e Shoham (2003)

Para realizar a hidrólise das ligações glicosídicas da xilana, são essenciais as endoxilanases (endo- $\beta$ -1,4-xilanase ou 1,4- $\beta$ -D-xilano xilanohidrolidase, EC 3.2.1.8). Estas enzimas atuam ao hidrolisar as ligações glicosídicas presentes na estrutura da xilana, resultando em pequenos oligossacarídeos, como a xilobiose. Além disso, é necessário o papel das  $\beta$ -xilosidases (1,4- $\beta$ -D-xilana xilohidrolase, ou xilobiase, ou ainda exo-1,4- $\beta$ -xilanase, EC 3.2.1.37), que hidrolisam as ligações  $\beta$ -1,4, liberando xilose a partir da extremidade não redutora dos xilo-oligossacarídeos (Van Dyk e Pletschke, 2012).

Adicionalmente, as  $\beta$ -mananases (endo-1,4- $\beta$ -mananases / 1,4- $\beta$ -D-manana mananohidrolase, EC 3.2.1.78) desempenham um papel crucial na hidrólise de hemiceluloses predominantemente compostas por mananos. Essas enzimas promovem a liberação de mano-oligômeros curtos, conhecidos como manobioses. Os mano-

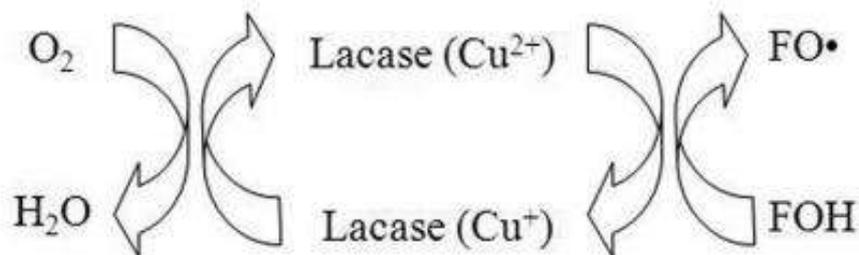
oligômeros resultantes podem ser subsequentemente hidrolisados por  $\beta$ -manosídeses ( $\beta$ -D-manosidade / 1,4- $\beta$ -D-manosídeo manohidrolase, EC 3.2.1.25), resultando na liberação de manoses (Souza e Kawaguti, 2021).

Em certos casos, a estrutura principal da xilana pode conter diversas cadeias laterais ramificadas contendo resíduos como L-arabinose, D-galactose, acetil e outros. Os resíduos de  $\alpha$ -L-arabinofuranose são encontrados em polissacarídeos da parede celular de várias plantas, incluindo arabinoxilanas, arabinogalactanas e arabinanas. As exo-arabinosídeses, como as  $\alpha$ -L-arabinofuranosídeses (EC 3.2.1.55), são enzimas acessórias presentes no complexo das hemicelulases. Elas atuam no substrato p-nitrofenil- $\alpha$ -L-arabinofuranosídeo e também nas arabinanas presentes nas cadeias laterais das hemiceluloses, clivando ligações  $\alpha$ -1,2 e  $\alpha$ -1,3 nas extremidades não redutoras, bem como ligações  $\alpha$ -1,3 e  $\alpha$ -1,6 das arabinogalactanas, que também estão ligadas às cadeias laterais. Por outro lado, as endo-arabinosídeses, como as 1,5- $\alpha$ -L-arabinases, têm como substrato exclusivo as arabinanas lineares. As arabinosídeses aceleram a hidrólise das ligações glicosídicas em mais de 107 vezes e são consideradas catalisadoras altamente eficientes. Atuam em sinergia com outras hemicelulases e possuem ampla especificidade de substrato (Moreira et al., 2011; Temer et al., 2014).

### 3.3.3 Ligninases

As ligninases são as enzimas empregadas na biodegradação da lignina de origem vegetal. Essa classe de enzimas inclui as lignina peroxidases (LiPs), as manganês peroxidases (MnPs) e as lacases (Lac). Essas enzimas são produzidas por alguns microrganismos, especialmente pelos fungos de podridão branca, e sua ação resulta na mineralização completa da lignina, facilitando a entrada das celulases e hemicelulases na degradação dos outros componentes da biomassa lignocelulósica (Paul et al., 2023).

A lacase (Lac, EC 1.10.3.2) é uma enzima que possui cobre em seu sítio ativo. Ela atua catalisando a oxirredução de compostos fenólicos e aminas aromáticas, utilizando oxigênio molecular como receptor final de elétrons (Bonugli-Santos et al., 2010; Paul et al., 2023). A reação ocorre por meio da remoção de um elétron dos fenóis, o que reduz o íon  $\text{Cu}^{2+}$  a  $\text{Cu}^{3+}$  e converte o  $\text{O}_2$  em  $\text{H}_2\text{O}$  (Aguiar e Ferraz, 2011). Um aspecto biologicamente relevante da lacase é a sua ampla gama de substratos (Janusz et al., 2020). A Figura 14 ilustra o processo dessa reação.



*Figura 14: Ciclo catalítico da lacase*

Fonte: Aguiar e Ferraz (2011).

A lignina peroxidase (LiP, EC 1.11.1.14) apresenta um pH ótimo caracteristicamente baixo, situado entre 3,0 e 4,5. Essa enzima é capaz de catalisar a oxidação tanto de unidades aromáticas fenólicas quanto não fenólicas presentes na lignina (Biko et al., 2020).

O ciclo catalítico da lignina peroxidase envolve três etapas distintas. Na primeira etapa, ocorre a oxidação do Fe III pelo peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ ), que age como acceptor de elétrons. Isso resulta na formação do intermediário oxo-ferrílico (Intermediário I). Na segunda etapa, o Intermediário I, que apresenta uma deficiência de dois elétrons, sofre redução por uma molécula de substrato, a qual pode ser um composto aromático não fenólico. Nesse processo, a molécula doadora de elétrons do substrato contribui com um elétron para o Intermediário I, gerando assim o Intermediário II, que possui uma deficiência de apenas um elétron. Na terceira e última etapa, o substrato reduzido cede um elétron ao Intermediário II, concluindo assim o ciclo de oxidação da LiP e restaurando-a ao seu estado de oxidação férrica em repouso (Falade et al., 2017). A Figura 15 ilustra de forma exemplar a reação descrita.

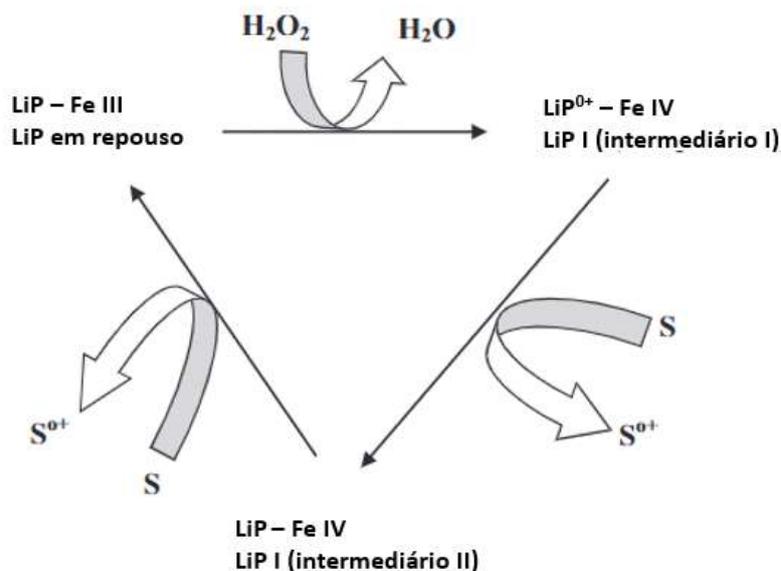


Figura 15: Ciclo catalítico da lignina peroxidase

Fonte: Adaptado de Falade et al. (2017)

A Manganês peroxidase (MnP, EC 1.11.1.13) é dependente de íons  $\text{Mn}^{2+}$  para a sua atividade e é capaz apenas de abstrair elétrons de estruturas aromáticas fenólicas, não sendo ativa em estruturas não fenólicas. Semelhante à Lignina peroxidase, o ciclo catalítico da Manganês peroxidase requer a presença de peróxido de hidrogênio para iniciar a reação (Aguiar e Ferraz, 2011).

O ciclo catalítico da MnP se inicia com a ligação da enzima férrica nativa ao peróxido de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ), formando um complexo ferro-peróxido (Intermediário I). Posteriormente, há a doação de elétrons pelo íon  $\text{Mn}^{2+}$  para o Intermediário I, originando o Intermediário II. O segundo intermediário formado recebe um elétron do íon  $\text{Mn}^{2+}$ , finalizando o ciclo catalítico ao retornar à forma nativa. O íon  $\text{Mn}^{3+}$  gerado é estabilizado por ácidos orgânicos, como o oxalato, que atua como um mediador redox (Benatti and Polizeli, 2023). A Figura 16 ilustra o ciclo descrito para essa enzima.

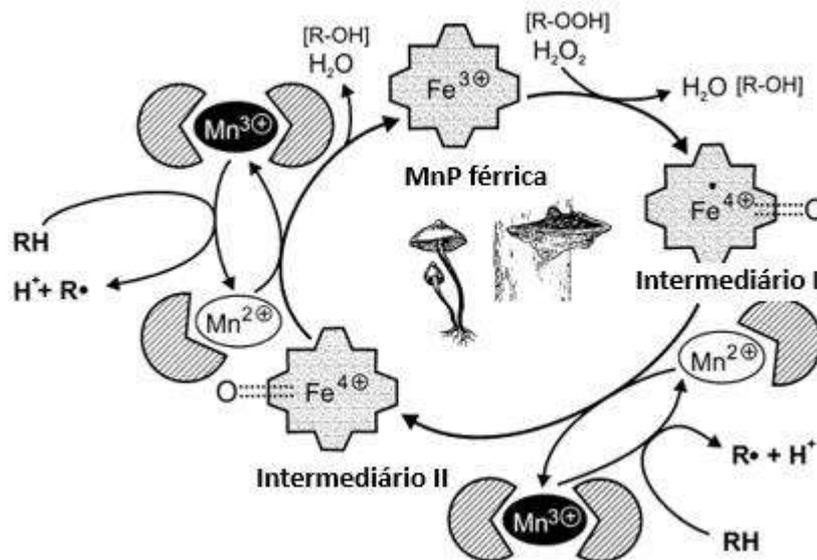


Figura 16: Ciclo catalítico da manganês peroxidase

Fonte: Adaptado de Hofrichter (2002)

Em relação à capacidade oxidativa, as enzimas do complexo lignolítico estão dispostas da seguinte maneira: as lignina peroxidases (LiPs) apresentam a maior capacidade oxidativa, enquanto as lacases possuem a menor capacidade. Por sua vez, as manganês peroxidases (MnPs) exibem uma capacidade oxidativa intermediária em comparação com as outras duas enzimas (Aguiar e Ferraz, 2011).

### 3.4. Biorrefinaria

#### 3.4.1. Conceito de biorrefinaria

Uma biorrefinaria é uma indústria responsável por converter biomassa vegetal em combustíveis, energia ou produtos químicos. Ela opera de maneira semelhante a uma refinaria de petróleo, porém utiliza processos sustentáveis (Alvim et al., 2015). Esse conceito está intimamente ligado à química verde, uma vez que ambas visam a utilização eficiente de recursos naturais. As biorrefinarias têm como objetivo estabelecer cadeias de valor comparáveis às dos produtos derivados do petróleo, mas com impactos ambientais reduzidos. Isso é alcançado por meio da consideração de balanços de massa e energia, análise do ciclo de vida e redução das emissões de gases

de efeito estufa, através da integração de sistemas que abrangem matérias-primas, processos, produtos e resíduos (Junior, 2011).

Os produtos gerados por uma biorrefinaria podem ser classificados em produtos de energia, produtos químicos ou materiais. Dentre os produtos de energia, destacam-se como os mais relevantes o biogás, o singás, o hidrogênio e o biometano na forma gasosa; os péletes, a lignina e o carvão como produtos sólidos; e o bioetanol, o biodiesel e o bio-óleo como produtos líquidos. Por outro lado, entre os principais produtos químicos e materiais estão os químicos de alta qualidade, produtos químicos em grande quantidade e blocos de construção sintéticos; ácidos orgânicos, como ácido lático, succínico, propiônico e seus derivados de açúcar; polímeros e resinas, incluindo plásticos derivados de amido, polietileno, polipropileno, polibutadieno, resinas fenólicas e furânicas; biomateriais derivados de madeira, polpa, papel ou celulose; alimentos e ração animal; fertilizantes; cosméticos; e outros produtos (Rodrigues, 2011).

As biorrefinarias podem ser categorizadas de acordo com o tipo de biomassa que processam em pelo menos quatro tipos (Bastos, 2012):

- Biorrefinaria verde: processa biomassa verde, como gramíneas, cereais imaturos, entre outros;
- Biorrefinaria de planta inteira: realiza o processamento de grãos comestíveis;
- Biorrefinaria aquática: baseia-se na biomassa de algas;
- Biorrefinaria lignocelulósica: converte a biomassa lignocelulósica.

A escolha da matéria-prima a ser processada está relacionada a diversos fatores, como disponibilidade regional e preços de mercado. Diferentes regiões ao redor do mundo possuem maior oferta de diferentes tipos de biomassa (Junior, 2011). No cenário atual, o Brasil se destaca como o principal produtor de cana-de-açúcar e açúcar, o segundo maior exportador de alimentos, além de ser o segundo maior produtor mundial de bioetanol e um dos maiores exportadores de produtos florestais. Devido à disponibilidade de matérias-primas lignocelulósicas, que são menos impactadas pelas flutuações do mercado em comparação com recursos fósseis, as biorrefinarias lignocelulósicas têm se disseminado amplamente (Santos, 2011; Junior, 2017).

### 3.4.2 Processamentos nas biorrefinarias lignocelulósicas

Para a obtenção de produtos em biorrefinarias lignocelulósicas, sejam eles produtos químicos ou biocombustíveis, são necessárias diversas etapas de processamento. Essas etapas podem variar dependendo do tipo específico de produto e do processo utilizado, conforme observado na Figura 17.

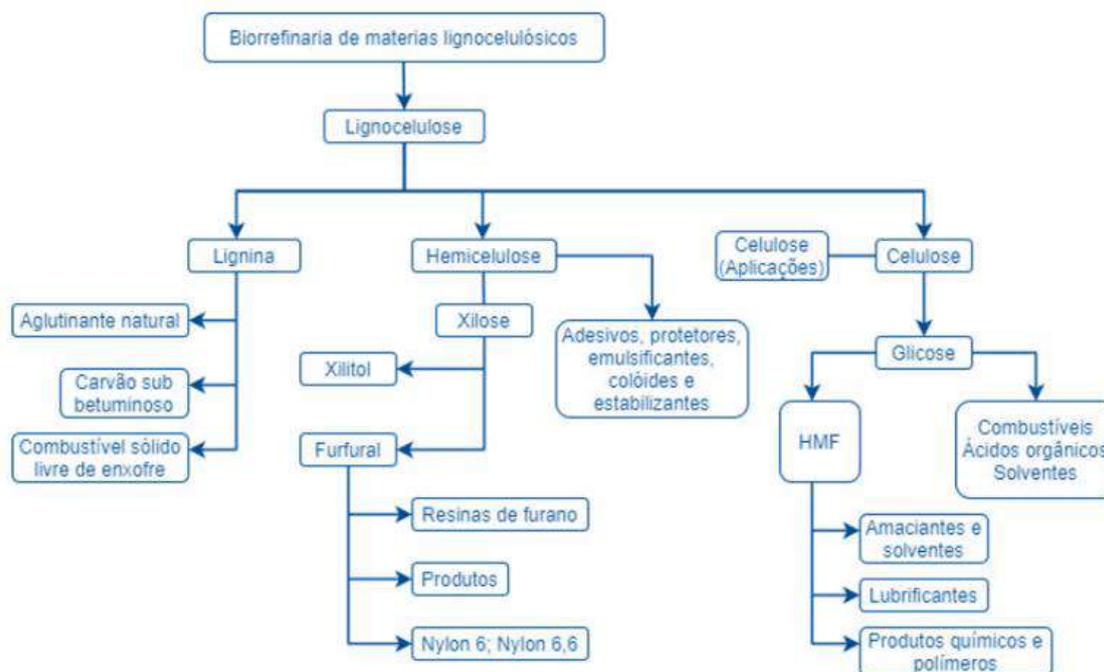


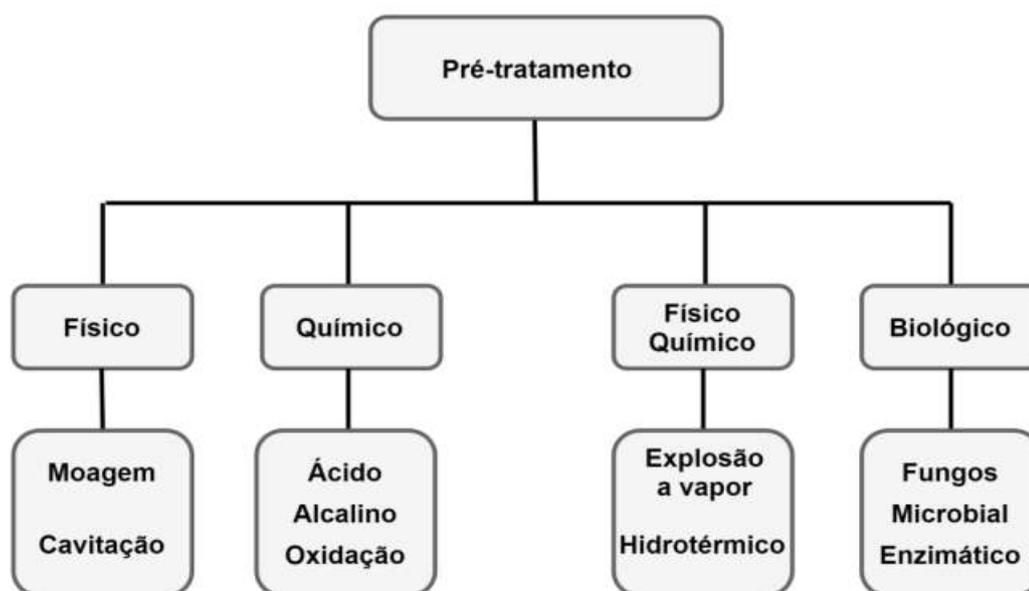
Figura 17: Aplicações das frações de componentes presentes na biomassa vegetal

Fonte: (Aguiar e Ferraz, 2011; Alvim et al., 2015)

A diversidade de produtos provenientes das biorrefinarias, conforme ilustrado na Figura 17, demonstra o potencial dessas instalações para desempenhar um papel crucial na transição de uma economia centrada em combustíveis fósseis para uma economia mais sustentável e baseada em biomassa. Isso traz consigo benefícios ambientais e econômicos significativos. Além dos biocombustíveis, os produtos resultantes das biorrefinarias englobam uma ampla gama de produtos químicos, insumos para indústrias alimentícias, de ração animal e farmacêutica. Adicionalmente, desempenham um papel relevante nas indústrias de materiais de construção, papel e celulose, bem como na geração de energia (Alvim et al., 2015).

Uma biorrefinaria envolve várias etapas essenciais para a conversão eficiente e sustentável da biomassa em diversos produtos de valor. Embora as etapas possam variar com base no tipo de biomassa e nos produtos finais desejados, as principais são o pré-tratamento, hidrólise, fermentação e a separação e purificação dos produtos (Júnior, 2013).

O pré-tratamento da matéria-prima é a primeira etapa, podendo ser realizado por métodos físicos ou químicos. O objetivo principal do pré-tratamento é enfraquecer a estrutura da biomassa lignocelulósica, uma vez que sua composição resistente dificulta a ação das enzimas lignocelulolíticas. Esses pré-tratamentos podem ser classificados em químicos, físicos e biológicos (Junior, 2013). Os métodos mais comuns estão ilustrados na Figura 18.



*Figura 18: Principais métodos de pré-tratamentos apresentados nas biorrefinarias*

Fonte: ( Nakaema, 2021.)

Após a etapa de pré-tratamento, uma variedade de tecnologias pode ser empregada, dependendo dos objetivos desejados. A conversão bioquímica pode ser realizada para transformar as celuloses e hemiceluloses em etanol por meio de fermentação. Por outro lado, a conversão química pode levar à produção de ácido levulínico a partir de polissacarídeos C6 ou furfural a partir de polissacarídeos C5 por meio de hidrólise ácida. A lignina, embora não seja fermentável, pode ser utilizada para gerar energia através da queima ou submetida a tratamentos termoquímicos que a transformam em biocombustíveis, como também por pirólise, resultando em produtos

químicos. Ademais, os três componentes da biomassa lignocelulósica - celulose, hemicelulose e lignina - têm o potencial de produzir biocombustíveis ou bioquímicos através de gaseificação para produção de gás de síntese ou por meio de pirólise para obter bio-óleo, os quais podem ser posteriormente transformados em produtos finais (Rodrigues, 2011). A Figura 17 apresenta os processos de conversão da biomassa lignocelulósica, contemplando as etapas de pré-tratamento físico ou químico, bem como os processos bioquímicos e termoquímicos.

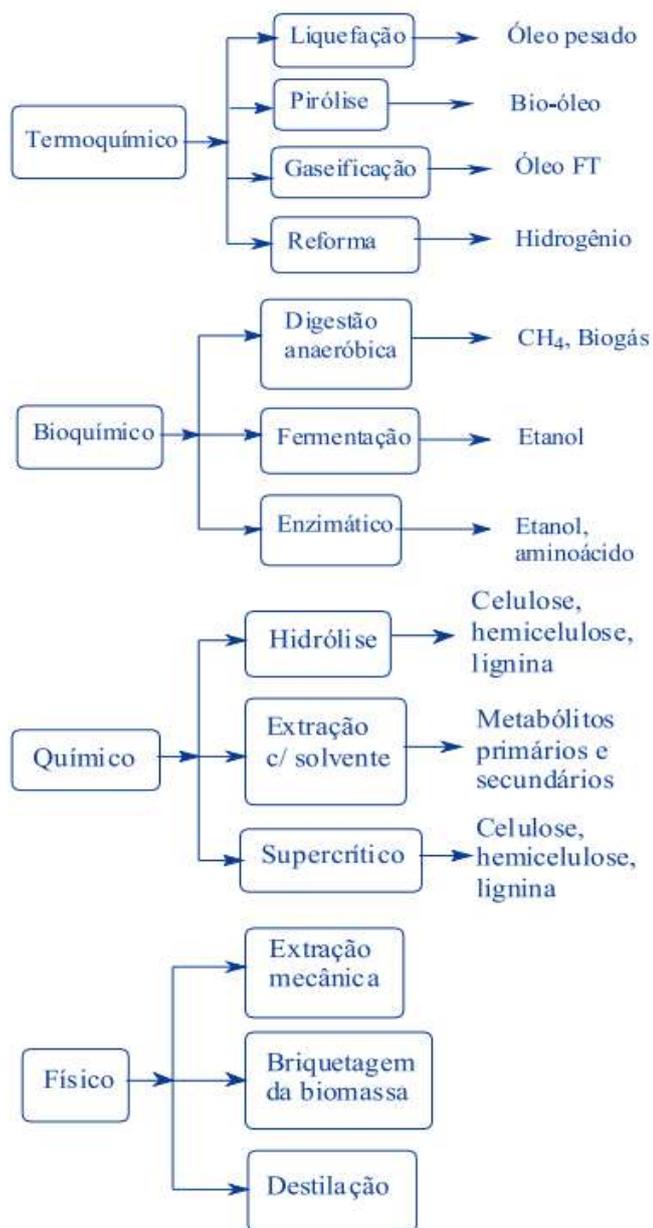


Figura 19: Processos de conversão da biomassa lignocelulósica

Fonte: Adaptado de Rodrigues (2011)

Com base na Figura 19, é evidente que não apenas uma ampla gama de produtos pode ser alcançada, mas também uma variedade de métodos que podem ser combinados, resultando em uma maior aplicabilidade desses processos nas indústrias que lidam com resíduos agroindustriais (Li e Wilkins, 2021).

#### 4. Prospecção Tecnológica

O termo "prospecção tecnológica" se refere à busca por novas tecnologias, produtos e compreensão das trajetórias tecnológicas, sendo essencial para definir estratégias de mercado e identificar possibilidades de parcerias na inovação aberta. Em certos casos, também é utilizado o termo "inteligência tecnológica", pois proporciona uma visão de novas oportunidades de negócios para empresas, assim como o mapeamento de mercados e concorrentes, permitindo a identificação de oportunidades e riscos como parte de uma estratégia de inovação (Sebrae, 2022).

No Brasil, a literatura sobre esse tema ainda não é extensiva. Os termos mais utilizados são: prospecção, estudos do futuro e prospectiva. Na língua inglesa, destacam-se os termos: forecasting, foresighting e future studies. Desde sua origem no Japão, as metodologias de prospecção têm sido continuamente adaptadas para serem aplicadas em estudos, empresas, sociedades e economias, visando definir estratégias de investimento (Coelho, 2003; da Paz, 2021).

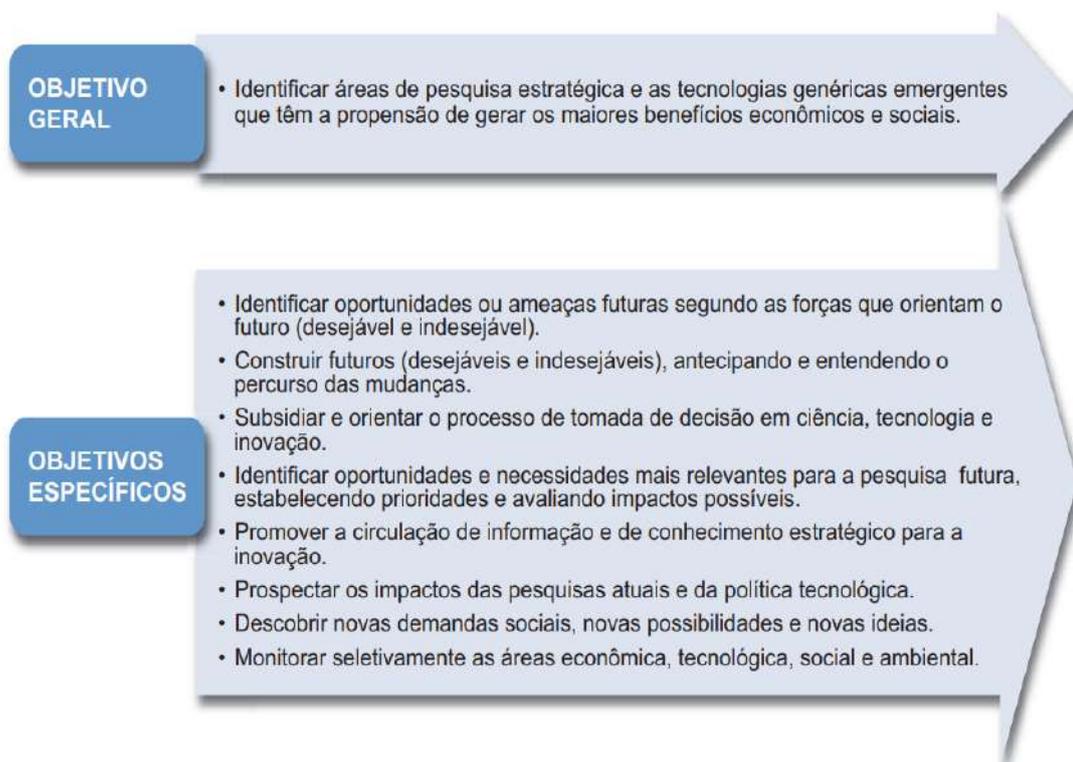
Diferentes autores apresentam definições e objetivos diversos para a prospecção tecnológica, como evidenciado na Tabela 3.

Os estudos prospectivos se tornam ferramentas analíticas que ajudam a reduzir as incertezas e os riscos que surgem em um cenário de transformações constantes, sejam elas de natureza econômica, ambiental, social ou institucional. Através da aplicação de métodos quantitativos e qualitativos, esses estudos facilitam o desenvolvimento de soluções viáveis para desafios que possam surgir no futuro. Apesar de sua importância crucial, a área de prospecção tecnológica é relativamente recente, tendo ganhado impulso nos Estados Unidos na década de 1950 e, no Brasil, somente a partir da década de 1990 (Teixeira, 2013). A Figura 20 ilustra os principais objetivos da prospecção tecnológica.

*Tabela 3: Comparação entre diferentes definições para Prospecção Tecnológica*

<b>Autor</b>	<b>Definição</b>
Irvine e Martin (1984)	Exercício sistemático voltado para o futuro de longo prazo da ciência, tecnologia e inovação, objetivando o embasamento da tomada de decisões políticas atualizadas.
Coelho (2003)	Conjunto de exercícios de prospecção com foco na capacidade funcional ou no tempo, realizando previsões acerca do futuro da tecnologia e levando em consideração condições externas que afetam suas metas estabelecidas. Auxilia líderes a adotarem posições estratégicas e avaliarem se do ponto de vista evolucionista, garantindo uma vantagem competitiva.
Kupfer (2004)	Forma sistemática de mapeamento dos desenvolvimentos tecnológicos e científicos futuros que têm potenciais significativos de influenciar indústrias, a economia ou a sociedade.
Tigre (2006)	Envolve uma série de esforços ordenados que analisam um grupo de atores e fatores envolvidos no processo de inovação e criação, considerando as inter-relações e tentando fazer previsões e identificar potenciais evoluções e quaisquer efeitos da mudança tecnológica. É uma aposta de como a tecnologia irá se comportar no futuro, do ponto de vista de utilização, inovação e aceitação da tecnologia. Além disso, a prospecção carrega um elevado grau de subjetividade estando sujeita a muitos critérios e incertezas, cabendo uma verificação.
SECTES/CEDEPLAR (2009)	Se baseia na visão sistêmica do futuro a longo prazo da ciência, tecnologia, economia e sociedade, com o objetivo de identificar as áreas de pesquisas estratégicas e as tecnologias emergentes que tenham tendência de gerar benefícios sociais e econômicos.

Fonte: adaptado de Duarte (2023)



*Figura 20: Objetivos da prospecção tecnológica*

Fonte: Teixeira (2023)

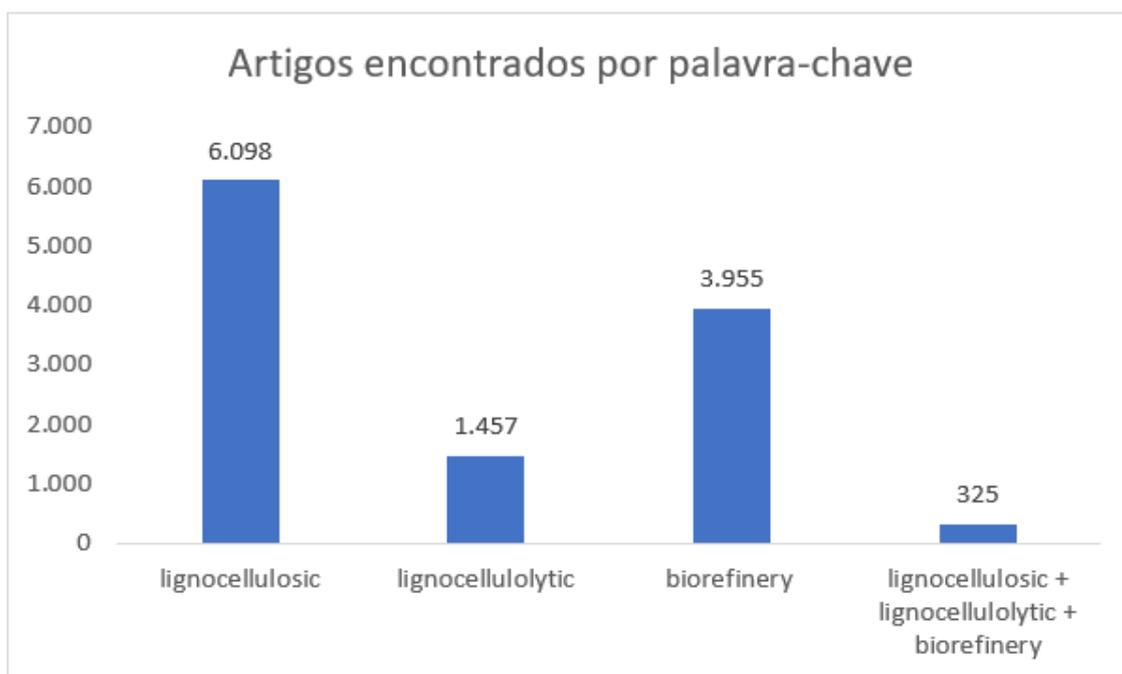
Para a realização da prospecção tecnológica, uma variedade de fontes de informação é utilizada, incluindo revistas, patentes, catálogos, artigos científicos e outros recursos relevantes (de Oliveira, 2011). Uma das abordagens comumente empregadas é o monitoramento tecnológico, que envolve a coleta, análise e validação de informações relacionadas aos avanços científicos e tecnológicos em uma determinada área de interesse (Da Silva et al., 2021).

No contexto do presente trabalho, foi conduzida uma pesquisa de prospecção tecnológica utilizando a plataforma SCOPUS, que é amplamente reconhecida como uma das maiores e mais influentes bases de dados de resumos, patentes e citações de literatura científica revisada por pares em diversas áreas, incluindo ciência, tecnologia, medicina, ciências sociais, artes e humanidades. A plataforma abrange um acervo de mais de 20 mil periódicos, incluindo publicações de editoras renomadas como Elsevier, Emerald, Informa, Taylor e Francis, Springer e Inderscience (Fahimnia et al., 2015).

#### 4.1. Pesquisa de Artigos Científicos

Para realizar uma prospecção tecnológica de mercado a longo prazo, foram analisados artigos científicos relacionados à utilização de enzimas lignocelulolíticas de fungos filamentosos na degradação de biomassa em biorrefinarias lignocelulósicas. Esses artigos publicados abordam as pesquisas mais recentes, novas descobertas, aplicações e tecnologias no campo. Foram selecionadas as palavras-chave "lignocellulosic", "lignocellulolytic" e "biorefinery", e as buscas foram realizadas nos títulos, resumos e palavras-chave dos artigos.

A **Figura 21** apresenta os resultados obtidos a partir da pesquisa restrita a artigos disponíveis na plataforma Scopus durante o período de 2000 a 2023, utilizando também os filtros "fungi" para as enzimas e "lignocellulosic" para as biorrefinarias.



**Figura 21:** Artigos encontrados por palavra-chave.

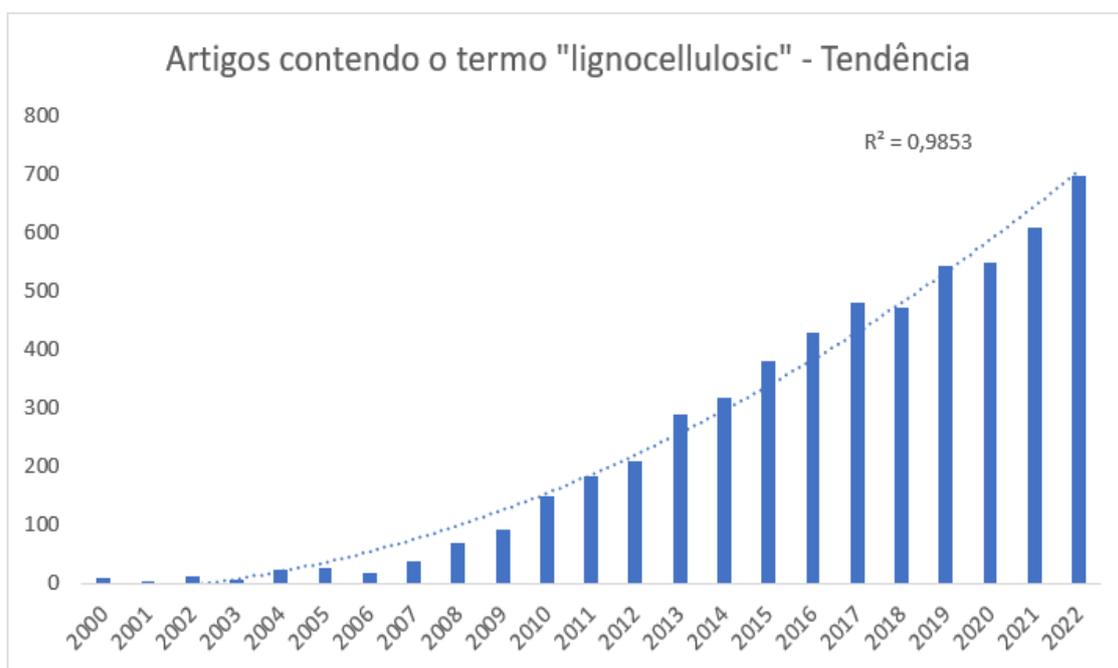
Fonte: Elaboração Própria.

## 5. Resultados e Discussão

### 5.1. Pesquisa de Artigos Científicos

A primeira fase da pesquisa envolveu uma análise da relevância de cada palavra-chave no contexto acadêmico, incluindo a observação de tendências comportamentais. Ao pesquisar artigos utilizando o termo "lignocellulosic" nos títulos, resumos, palavras-chave e conteúdo dos textos, obtivemos uma visão geral das investigações sobre biomassas lignocelulósicas ao longo do tempo. A pesquisa foi conduzida com a aplicação de filtros pertinentes, e associando o termo "biomass" para direcionar os resultados especificamente ao foco do estudo em questão.

O padrão de pesquisa revelou um aumento no volume de pesquisas ao longo dos anos, com exceção de 2020, possivelmente devido à centralização dos esforços na pandemia de COVID-19. Esse aumento reflete a crescente importância da biomassa como um tema de destaque, especialmente no contexto da busca constante por fontes de energia renovável, acessível economicamente e ecologicamente sustentável. A Figura 22 ilustra o número global de artigos publicados entre os anos de 2000 e 2022.



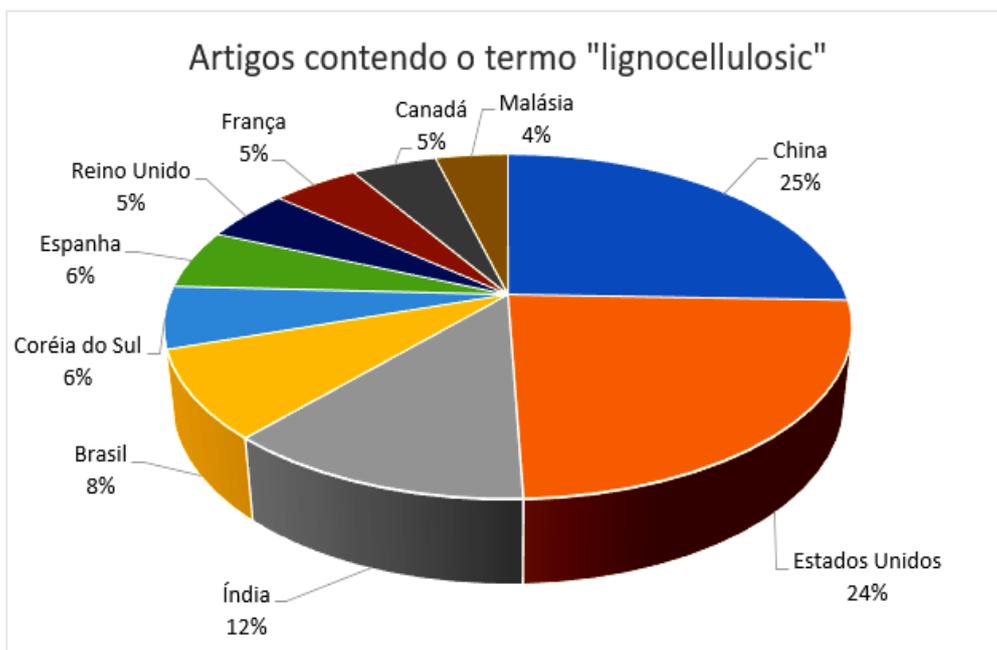
**Figura 22:** Artigos contendo o termo "lignocellulosic" publicados entre 2000 e 2022.

Fonte: Elaboração própria baseada em pesquisa na plataforma Scopus, 2023.

Excluindo o ano de 2023, visto que ainda podem ocorrer novas publicações, é exibida uma tendência polinomial de ordem 2 ao longo dos anos, apresentando um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,9853. Isso reforça a crescente importância global das biomassas lignocelulósicas. Durante os primeiros 7 meses de 2023, já foram registrados 496 artigos publicados, indicando um potencial para manter a trajetória de crescimento e superar o total de 697 artigos publicados em 2022 (Fig. 22).

A Figura 23 ilustra a distribuição dos artigos por países que abordam o tema, destacando uma concentração significativa de estudos na China, seguida pelos Estados Unidos. No entanto, apesar de o Brasil ser um dos maiores produtores agrícolas globais, com uma capacidade substancial para incorporar biomassa lignocelulósica em sua matriz energética, ainda não aproveita plenamente essa fonte (De Miranda et al., 2019). O Brasil registrou um total de 18.421 artigos publicados sobre o assunto desde o ano 2000 até o presente, o que ressalta a necessidade de aprofundar ainda mais as pesquisas. Isso possibilitaria a exploração do vasto potencial do país para utilizar a biomassa oriunda da agricultura não somente em sua matriz energética, mas também na produção de produtos químicos.

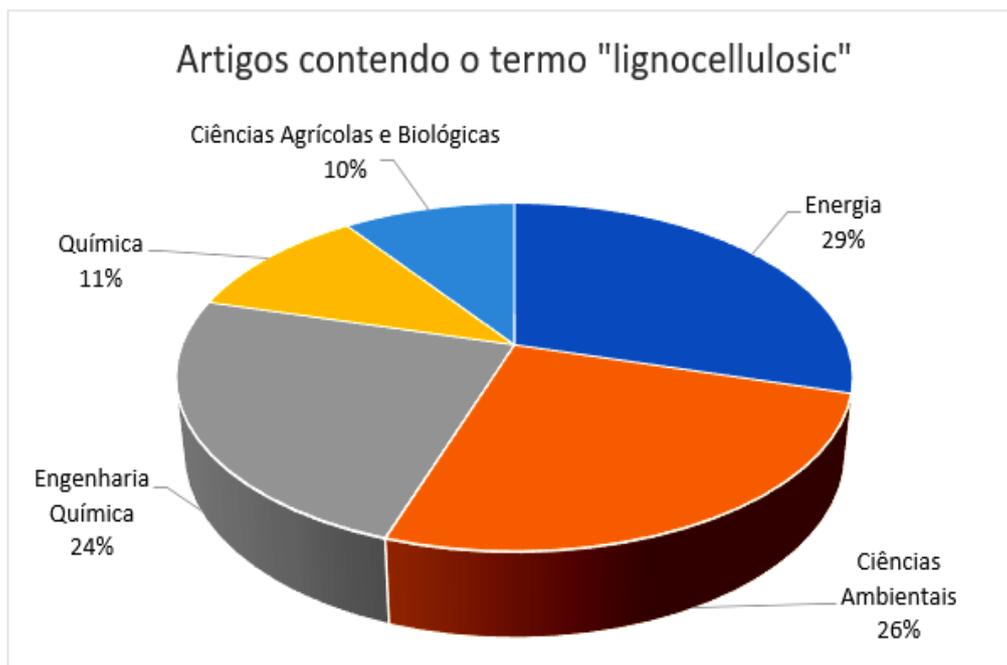
O elevado número de publicações nos Estados Unidos pode ser atribuído à sua posição como o maior produtor mundial de milho, o que o torna também o principal produtor de bioetanol derivado desse grão. Por sua vez, na China, a crescente preocupação com fontes de energia renovável é motivada pelo fato de ser o maior consumidor energético global e, predominantemente, depender de recursos fósseis. Nesse país, a geração de energia a partir de biomassa concentra-se principalmente no processamento da palha. Em relação à Índia, ela ocupa a segunda posição como maior produtora de cana-de-açúcar, ficando atrás apenas do Brasil. A Índia adota o sorgo sacarino para a produção de etanol (Andrade Cardoso et al., 2023; Junior, 2011).



**Figura 23:** Distribuição por países dos artigos contendo o termo "lignocellulosic" entre os anos 2000 e 2023.

Fonte: Elaboração própria baseada em pesquisa na plataforma Scopus, 2023.

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** ilustra a distribuição das principais áreas de pesquisa nas quais os artigos se enquadram. Ao analisar a figura, fica evidente que as áreas predominantes de estudo em nível global são Energia, Ciências Ambientais, Engenharia Química, Química e Ciências Agrícolas e Biológicas.



**Figura 24:** Distribuição dos principais assuntos dos artigos contendo o termo "lignocellulosic" entre os anos 2000 e 2023.

Fonte: Elaboração própria baseada em pesquisa na plataforma Scopus, 2023.

Com o intuito de obter uma compreensão mais detalhada da situação no Brasil, a mesma pesquisa foi conduzida com foco exclusivamente no país, conforme demonstrado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** Observa-se que nos anos 2000, 2001, 2002 e 2003 não houve registros de estudos sobre o tema. O interesse pelas biomassas lignocelulósicas teve seu início em 2004, porém, somente a partir de aproximadamente 2012, houve um notável aumento na quantidade de artigos publicados, marcando o início de um período de crescimento contínuo.



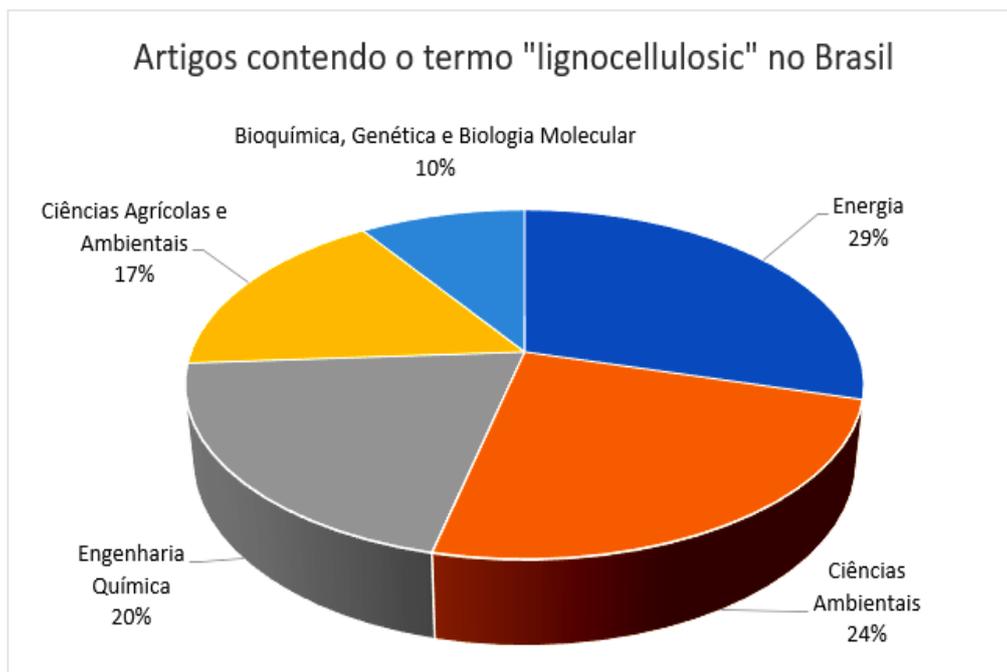
**Figura 25:** Artigos contendo o termo "lignocellulosic" publicados entre 2000 e 2022 no Brasil.

Fonte: Elaboração própria baseada em pesquisa na plataforma Scopus, 2023.

Como ilustrado na Figura 25, o interesse pelas biomassas lignocelulósicas demonstrou um crescimento seguindo um padrão polinomial de ordem 2, com um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,9521. Até o momento, em 2023, já foram publicados 47 artigos nos primeiros 7 meses, o que representa um número menor do que o total de publicações do ano anterior. Vale ressaltar que, apesar de terem se iniciado os estudos somente em 2004, o Brasil figura entre os cinco principais países em termos de quantidade de artigos sobre esse tema.

A divisão entre os principais assuntos aos quais se relacionam os artigos publicados no país está relacionada na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** O

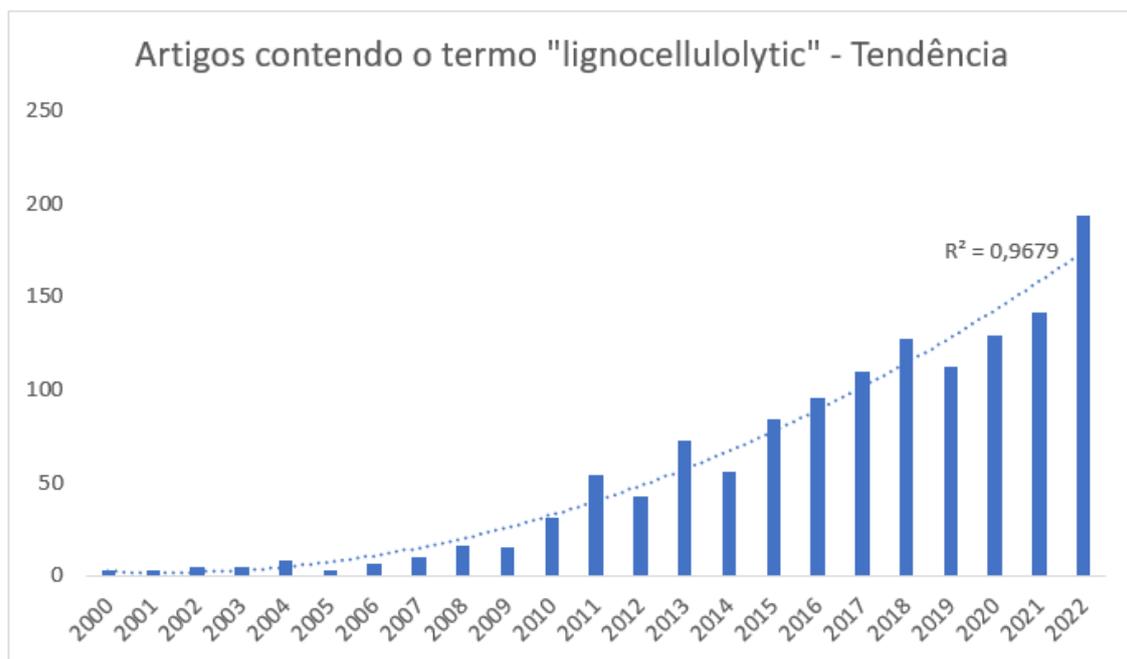
Brasil segue a tendência mundial e tem suas pesquisas voltadas para a energia, com 29% das publicações.



**Figura 26:** Distribuição dos principais assuntos dos artigos contendo o termo "lignocellulosic" entre os anos 2000 e 2023 no Brasil.

Fonte: Elaboração própria baseada em pesquisa na plataforma Scopus, 2023.

O termo "lignocellulolytic" também foi escolhido como palavra-chave para o aprofundamento na prospecção tecnológica. Além disso, aplicou-se o filtro "fungi" para limitar as publicações às enzimas lignocelulolíticas derivadas de fungos. Os artigos abrangem diversas abordagens para a obtenção desse conjunto enzimático complexo, além da otimização de suas atividades. A Figura 27 exibe o número de publicações em escala mundial por ano nos últimos 23 anos.

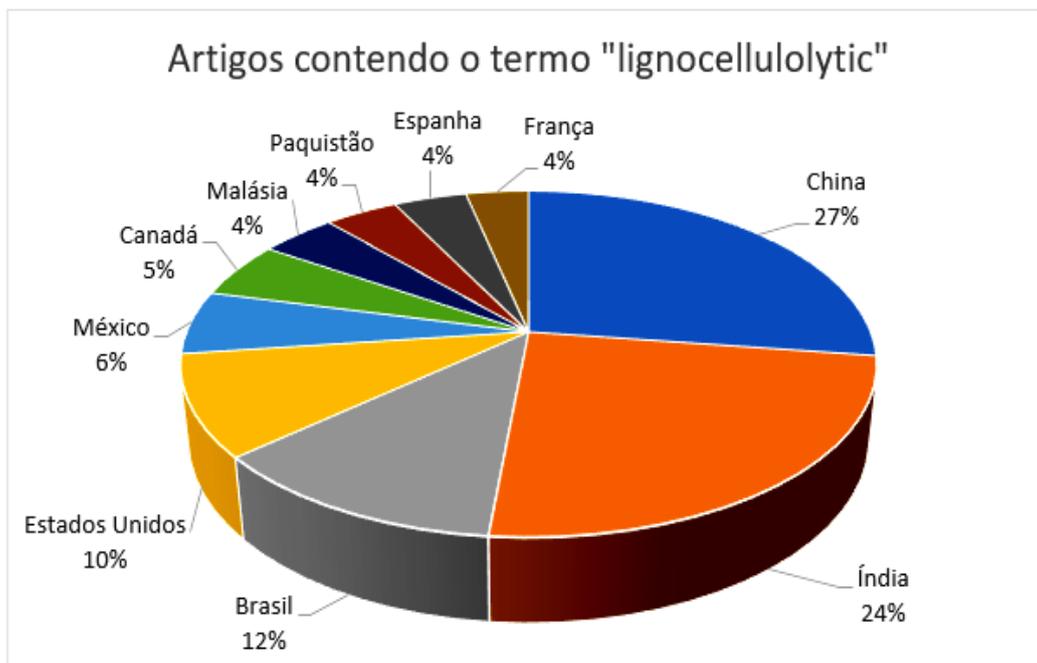


**Figura 27:** Artigos contendo o termo "lignocellulolytic" publicados entre 2000 e 2022.

Fonte: Elaboração própria baseada em pesquisa na plataforma Scopus, 2023.

Excluindo o ano de 2023 para uma análise mais precisa da tendência, é revelado um aumento constante ao longo dos anos, evidenciado por uma linha de tendência polinomial de segunda ordem, com um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,9679. Nos primeiros sete meses de 2023, já foram publicados 132 artigos, o que corresponde a 68% do total de publicações do ano anterior.

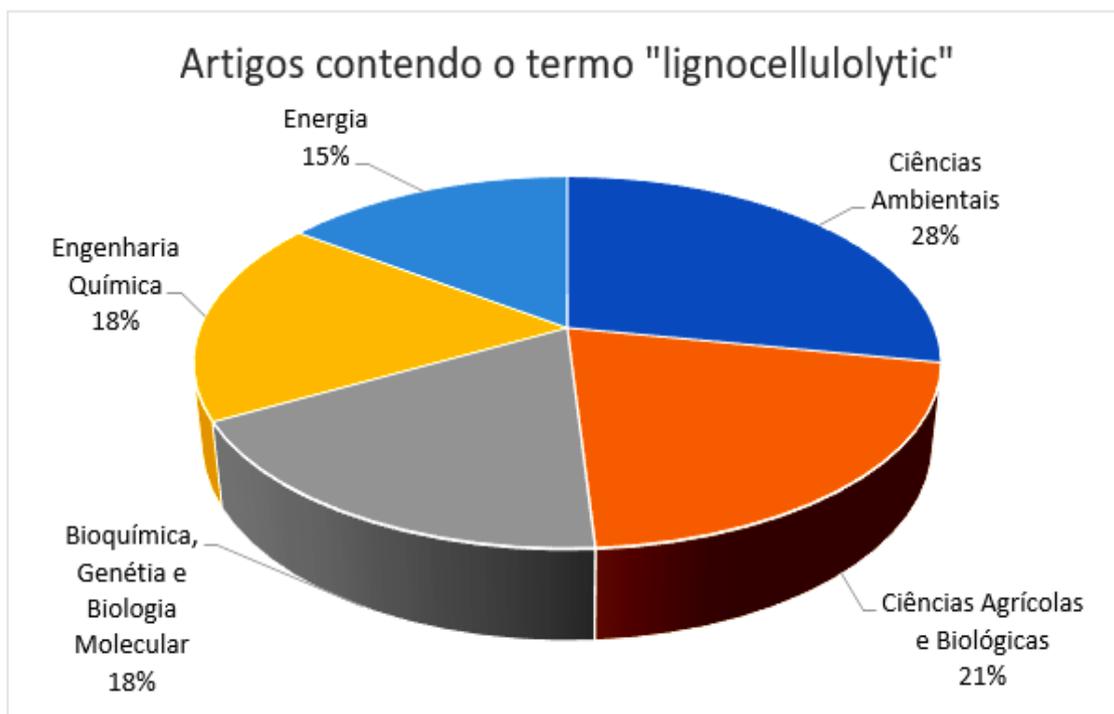
Realizando uma análise dos principais países que publicaram acerca do termo "lignocellulolytic", foi possível observar que segue tendência parecida de países que publicaram estudos sobre biomassa lignocelulósica. A grande maioria dos artigos foi publicada pela China, seguida da Índia e do Brasil, respectivamente. A Figura 28 mostra os dados discutidos.



**Figura 28:** Distribuição por países dos artigos contendo o termo "lignocellulolytic" entre os anos 2000 e 2023.

Fonte: Elaboração própria baseada em pesquisa na plataforma Scopus, 2023.

A distribuição dos principais assuntos abordados nas publicações sobre as enzimas lignocelulolíticas fúngicas, na Figura 29, demonstram que a principal área que estuda esses complexos enzimáticos hoje é Ciências Ambientais. Nesse aspecto, a principal utilidade dessas enzimas é a biodegradação de materiais lignocelulósicos não só com a intenção de obtenção de produtos químicos ou biocombustíveis, como também na intenção de biorremediação de poluentes presentes no solo ou na água, decorrentes principalmente da agroindústria (Mattos, 2002).



**Figura 29:** Distribuição dos principais assuntos dos artigos contendo o termo "lignocellulolytic" entre os anos 2000 e 2023.

Fonte: Elaboração própria baseada em pesquisa na plataforma Scopus, 2023.

No cenário nacional, as pesquisas sobre os complexos enzimáticos que degradam celulose, hemicelulose e lignina tiveram maior relevância a partir de 2009. Entre os anos 2000 e 2023, foram publicados 145 trabalhos. Os resultados da pesquisa são apresentados na Figura 30.

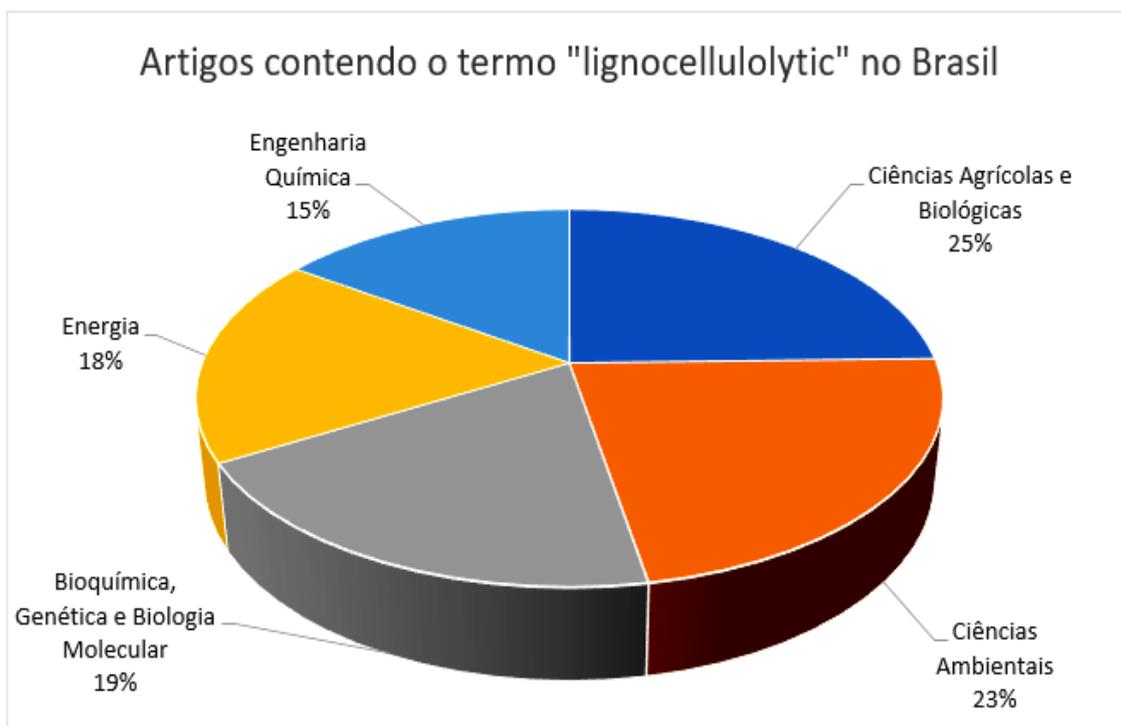


**Figura 30:** Artigos contendo o termo "lignocellulolytic" entre os anos 2000 e 2022 no Brasil.

Fonte: Elaboração própria baseada em pesquisa na plataforma Scopus, 2023.

A Figura 30 exibe a tendência polinomial de segunda ordem que retrata o comportamento das publicações relacionadas às enzimas lignocelulolíticas no Brasil, abrangendo o período de 2000 a 2022, com um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,9727. Nos anos recentes, o interesse nesse tópico no país aumentou substancialmente, sendo que somente nos primeiros sete meses de 2023 já foram registrados 12 trabalhos publicados. Esse valor é três vezes superior ao número total de publicações ocorridas uma década atrás.

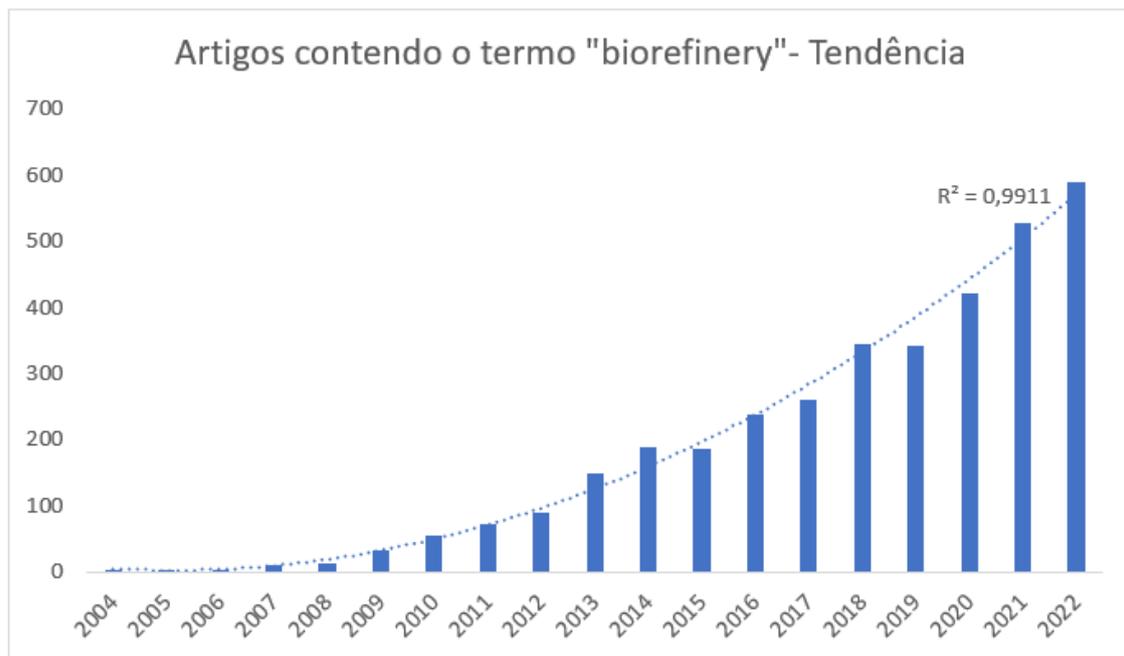
Ao analisarmos os principais tópicos associados às pesquisas sobre enzimas lignocelulolíticas fúngicas, a Figura 31 apresenta pontos interessantes a serem avaliados. Ela indica que a área de maior interesse no Brasil em relação a esses complexos enzimáticos é Ciências Agrícolas e Biológicas, seguida por Ciências Ambientais, o que segue a tendência global. No contexto brasileiro, há uma ênfase mais acentuada no biocontrole devido à importância da agricultura no país. Nesse âmbito, os fungos filamentosos desempenham um papel significativo, sendo extensivamente estudados e empregados como agentes de controle biológico na produção agrícola, especialmente as espécies do gênero *Trichoderma* (Meyer et al., 2019).



**Figura 31:** Distribuição dos principais assuntos dos artigos contendo o termo "lignocellulolytic" entre os anos 2000 e 2023 no Brasil.

Fonte: Elaboração própria baseada em pesquisa na plataforma Scopus, 2023.

O termo "biorefinery" também foi empregado como palavra-chave, em conjunto com o termo "lignocellulosic", a fim de restringir os resultados da pesquisa aos artigos científicos relacionados a biorrefinarias lignocelulósicas. Os estudos abrangendo o período de 2000 a 2023 e relacionados ao termo "biorefinery" são apresentados na Figura 32. No panorama geral, observa-se que somente em 2008 esse tema começou a receber uma atenção mais específica e a ser objeto de estudos dedicados.



**Figura 32:** Artigos contendo o termo "biorefinery" publicados entre 2000 e 2023.

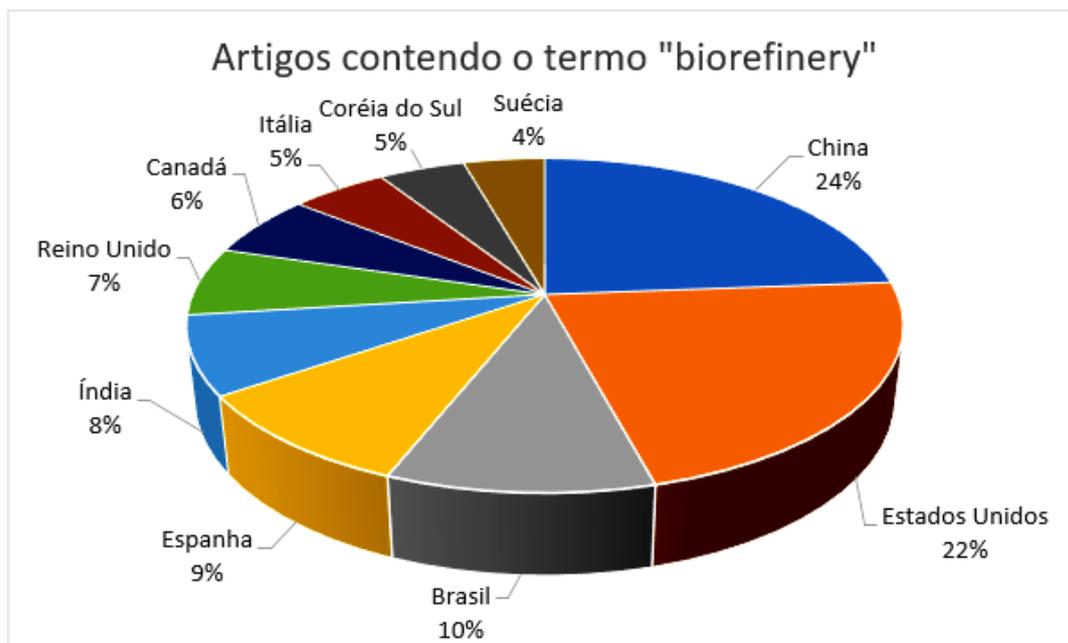
Fonte: Elaboração própria baseada em pesquisa na plataforma Scopus, 2023.

O comportamento das publicações referentes às refinarias lignocelulósicas em âmbito global é retratado na Figura 32. A linha de tendência mais apropriada para representar essa dinâmica é a polinomial de ordem 2, com um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,9908, indicando um interesse crescente nesse campo. O aumento no número de estudos sobre o tema é motivado principalmente pela busca pela substituição de recursos fósseis por fontes renováveis na produção de energia e combustíveis, e pelas implicações das biorrefinarias nesse contexto. O ano de 2023 já apresenta potencial para superar o número de artigos publicados em 2022, reforçando essa tendência ascendente.

Por meio da análise da Figura 33, podemos constatar que o Brasil mantém a mesma posição no ranking dos países com maior número de publicações sobre as biorrefinarias lignocelulósicas, contribuindo com 343 dos 3.955 artigos publicados durante os 23 anos abrangidos pela análise. Os países mais prolíficos em termos de trabalhos realizados são a China e os Estados Unidos, respectivamente. Curiosamente, os países da Europa não se destacam tanto entre os principais países na figura, o que não reflete a situação real das biorrefinarias lignocelulósicas estabelecidas ao redor do mundo, já que a maioria está concentrada no continente europeu.

De acordo com Cardoso et al. (2023), atualmente existem 72 biorrefinarias que empregam biomassa lignocelulósica como matéria-prima, das quais 31 estão localizadas

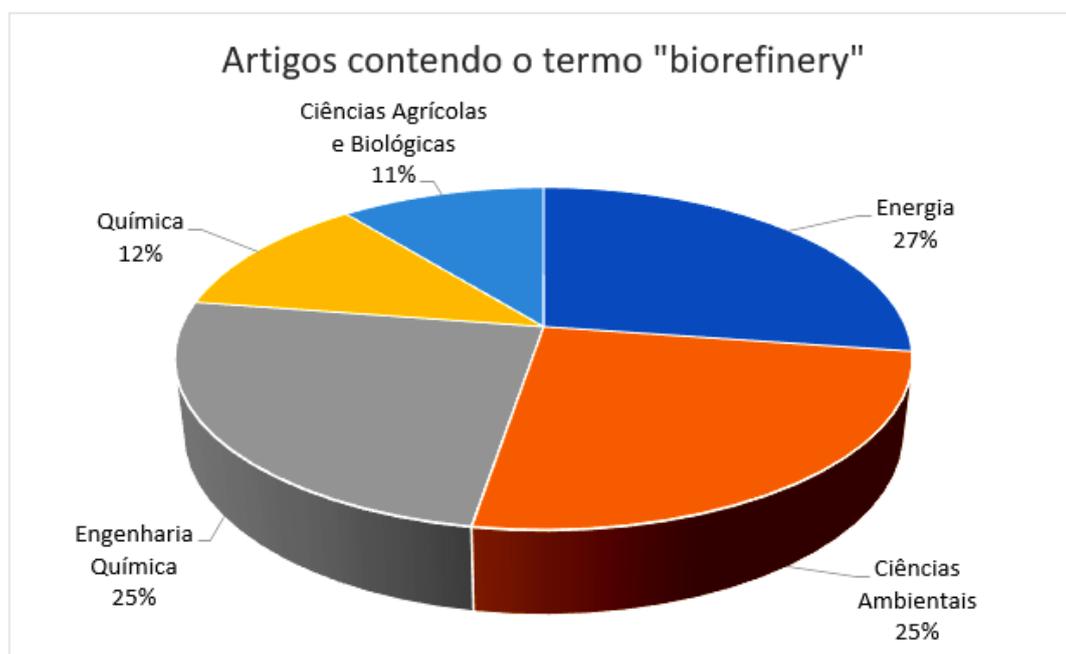
na Europa, 18 na América do Norte e 18 na Ásia, sendo os Estados Unidos e a China os principais países com unidades fabris em seus respectivos continentes. Notavelmente, o Brasil conta com 3 biorrefinarias, sendo o único país da América do Sul a deter essa tecnologia.



**Figura 33:** Distribuição por países dos artigos contendo o termo "biorefinery" entre os anos 2000 e 2023.

Fonte: Elaboração própria baseada em pesquisa na plataforma Scopus, 2023.

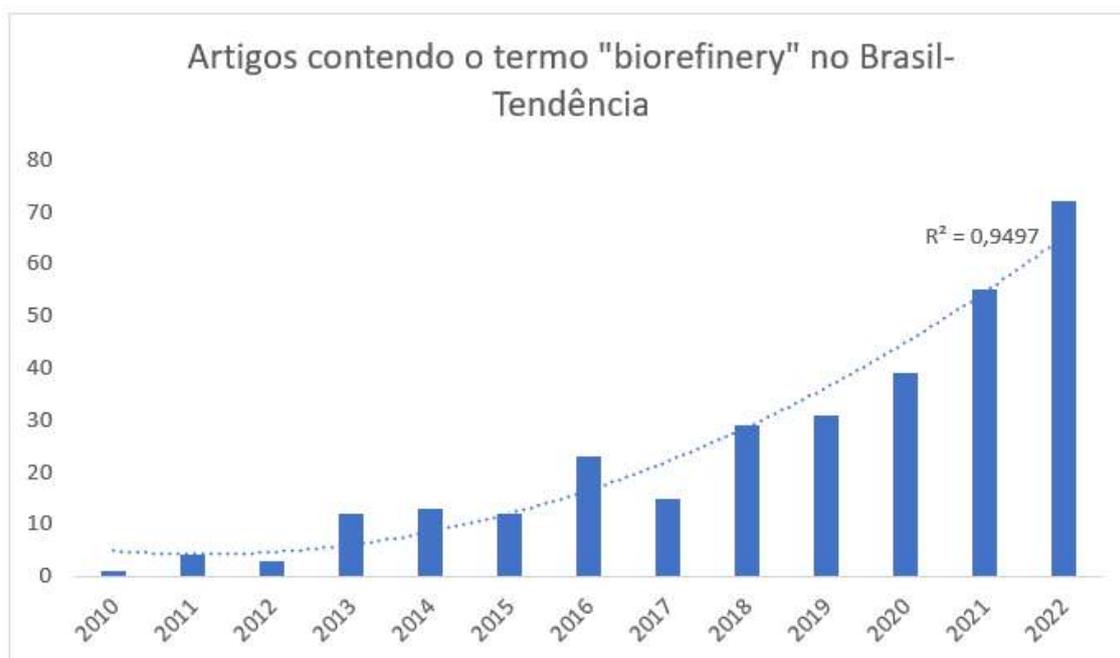
A pesquisa sobre as principais áreas que se dedicam ao estudo das biorrefinarias lignocelulósicas gerou os resultados ilustrados na Figura 33. Nesse contexto, a área de energia desponta como a principal área de investigação. É importante notar que cerca de 70% das biorrefinarias espalhadas pelo mundo têm foco na produção de etanol, sendo a Ásia a região com a predominância dessa atividade, onde 17 das 18 biorrefinarias em operação concentram-se exclusivamente na produção de bioetanol. Além disso, a área de Ciências Ambientais representa 25% dos artigos publicados, evidenciando a crescente preocupação global com fontes de energia limpa, como destacado por Cardoso et al. (2023).



**Figura 34:** Distribuição dos principais assuntos dos artigos contendo o termo "biorefinery" entre os anos 2000 e 2023.

Fonte: Elaboração própria baseada em pesquisa na plataforma Scopus, 2023.

No Brasil, o tema das biorrefinarias de biomassa lignocelulósica passou a ter maior relevância nos últimos 15 anos, mas nos últimos 4 anos foram publicados 200 trabalhos, enquanto os anos anteriores somaram apenas 143, evidenciando o recente interesse pelo assunto. Os dados discutidos estão presentes na Figura 35.

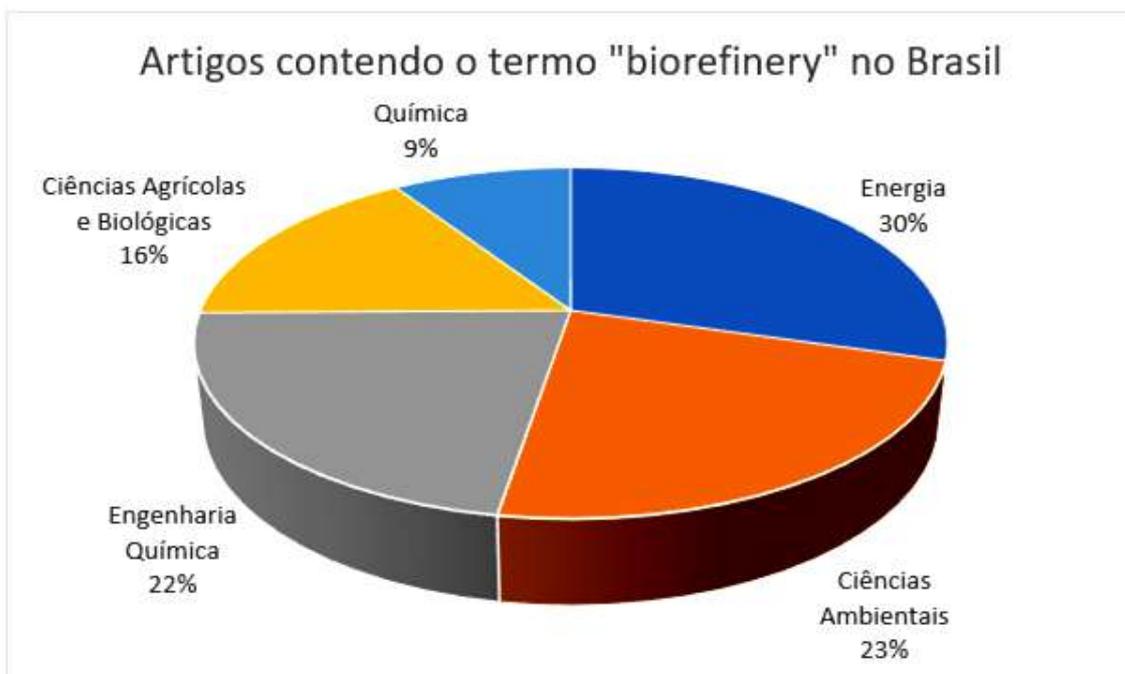


**Figura 35:** Artigos contendo o termo "biorefinery" publicados entre 2000 e 2023 no Brasil.

Fonte: Elaboração própria baseada em pesquisa na plataforma Scopus, 2023.

O comportamento das publicações sobre o tema no país segue uma tendência polinomial de ordem 2, com  $R^2$  igual a 0,9405, enfatizando o recente interesse contínuo sobre o assunto.

As principais áreas de pesquisa relacionadas aos trabalhos publicados no Brasil são ilustradas na Figura 36. A área de energia emerge novamente como a mais envolvida no tema, representando 30% dos trabalhos publicados, seguida por Ciências Ambientais com 23% e Engenharia Química com 22%. Esses resultados se alinham de maneira coerente com a realidade das biorrefinarias lignocelulósicas estabelecidas no país, uma vez que todas as três unidades presentes no Brasil têm o etanol como seu único produto. Isso evidencia a forte preocupação brasileira com a transição para uma matriz energética mais sustentável, conforme destacado por Cardoso et al. (2023).

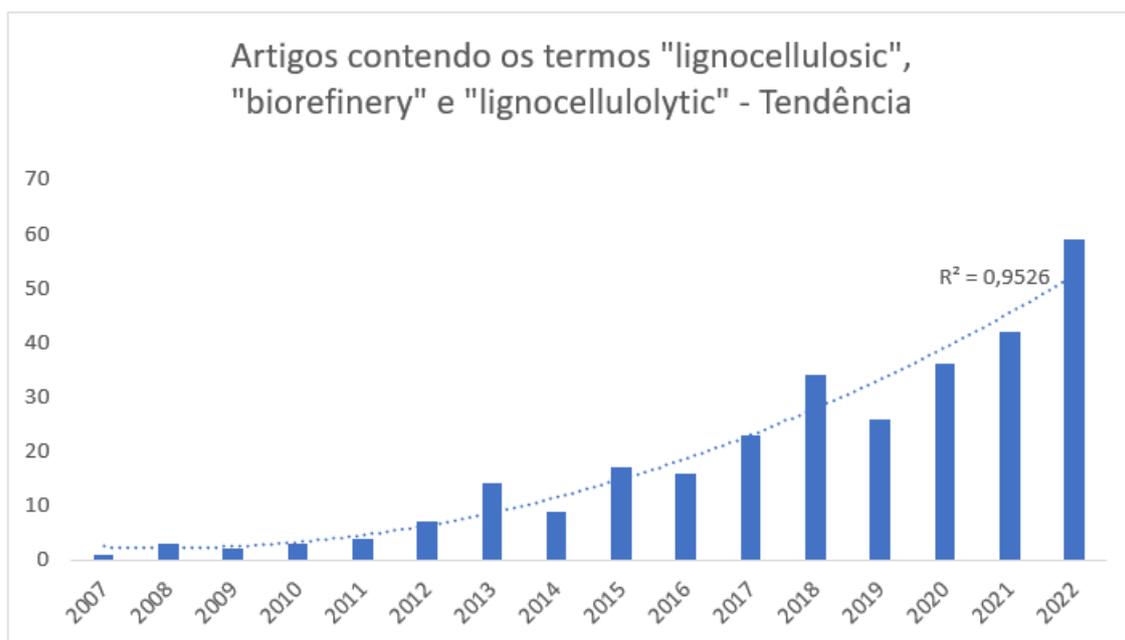


**Figura 36:** Distribuição dos principais assuntos dos artigos contendo o termo "biorefinery" entre os anos 2000 e 2023.

Fonte: Elaboração própria baseada em pesquisa na plataforma Scopus, 2023.

Uma segunda fase da prospecção tecnológica foi conduzida com o objetivo de analisar a inter-relação dos tópicos abordados na primeira parte, tanto em âmbito global quanto nacional. Os comportamentos associados aos artigos encontrados foram apresentados como resultado dessa análise.

A Figura 37 apresenta o número de artigos publicados simultaneamente abrangendo os três assuntos: biomassa lignocelulósica, enzimas lignocelulolíticas fúngicas e biorrefinaria lignocelulósica. É perceptível que os estudos correlacionados a esses temas começaram a surgir a partir de 2005. Desde então, foram publicados um total de 325 artigos científicos abrangendo essas áreas interligadas.

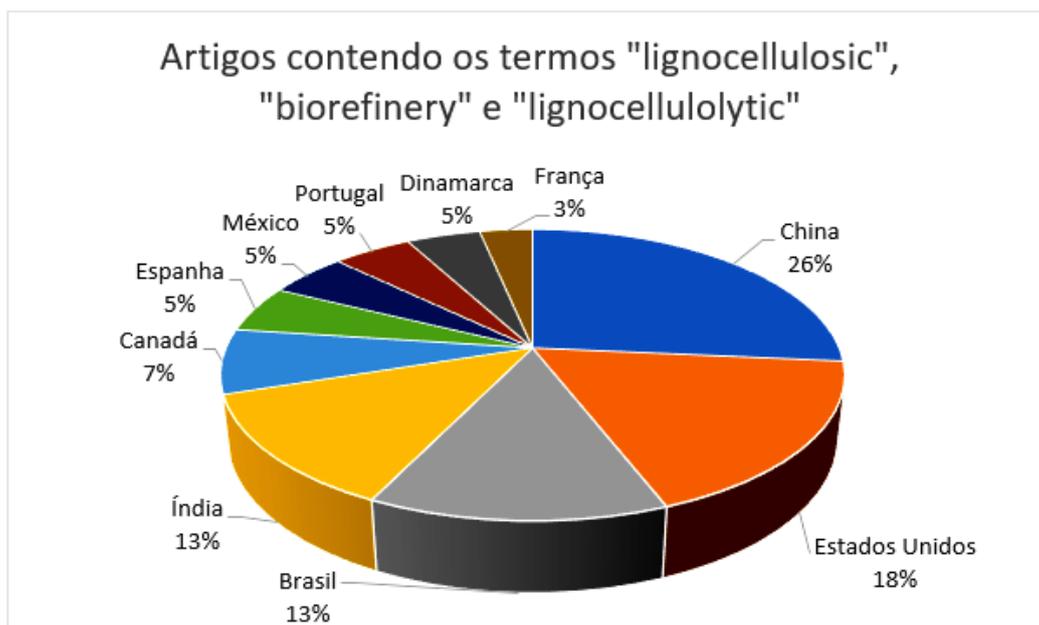


**Figura 37:** Artigos contendo os termos "lignocellulosic", "lignocellulolytic" e "biorefinery" publicados entre 2000 e 2022.

Fonte: Elaboração própria baseada em pesquisa na plataforma Scopus, 2023.

A Figura 37 apresenta a tendência dessas publicações, que apresentou comportamento bem descrito por uma curva polinomial de ordem 2, com  $R^2$  igual a 0,9565. No ano de 2023, já foram publicados 28 novos estudos, logo a previsão é de que a tendência se mantenha ainda nesse ano.

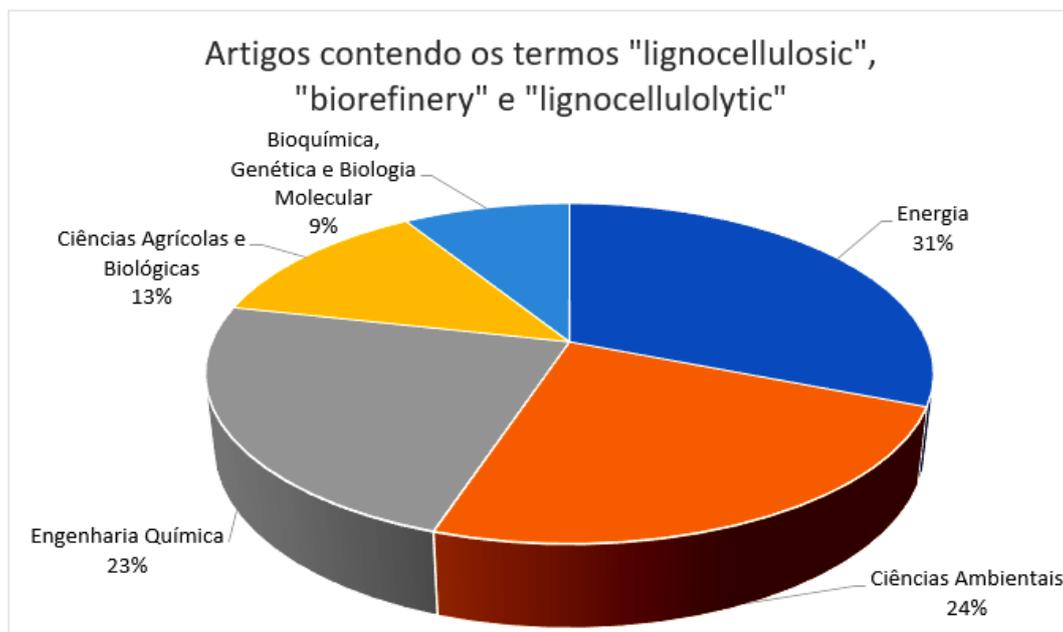
Sobre os países onde estão distribuídos os estudos que contém tanto as biorrefinarias e biomassas lignocelulósicas quanto as enzimas lignocelulolíticas fúngicas, estão representados na Figura 38. Nela é possível analisar que a maior parte dos trabalhos (26%) foram realizados na China, seguido dos Estados Unidos e do Brasil com 18% e 13%, respectivamente. Esse cenário está alinhado com a distribuição de matéria-prima lignocelulósica ao redor do mundo, já que os principais produtores de cana-de-açúcar e milho são esses três países.



**Figura 38:** Distribuição por países dos artigos contendo os termos "lignocellulosic", "lignocellulolytic" e "biorefinery" entre os anos 2000 e 2023.

Fonte: Elaboração própria baseada em pesquisa na plataforma Scopus, 2023.

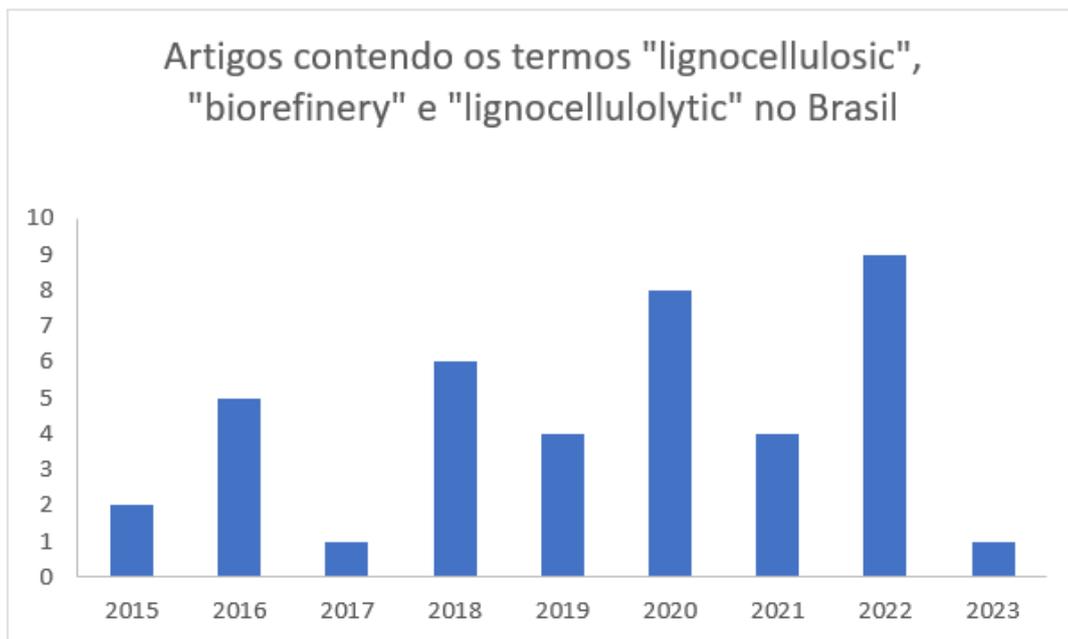
No gráfico apresentado na Figura 38, é possível verificar as principais áreas de estudo que se interessaram pelos assuntos associados no mundo. Mais uma vez foi seguida a tendência das áreas de pesquisa dos assuntos analisados separadamente, com Energia sendo o foco principal, seguido de Ciências Ambientais e Engenharia Química, em linha com o principal foco das biorrefinarias espalhadas pelo mundo.



**Figura 39:** Distribuição dos principais assuntos dos artigos contendo o termo "lignocellulosic", "lignocellulolytic" e "biorefinery" entre os anos 2000 e 2023.

Fonte: Elaboração própria baseada em pesquisa na plataforma Scopus, 2023.

Ao voltar o foco para o Brasil, fica evidente a falta de pesquisa sobre os temas interligados entre si. Na Figura 40, está a distribuição de pesquisas feitas no Brasil ao longo dos anos, num total de 40 publicações entre os anos de 2015 a 2023, pois antes de 2015 não havia sido publicado nenhum artigo.

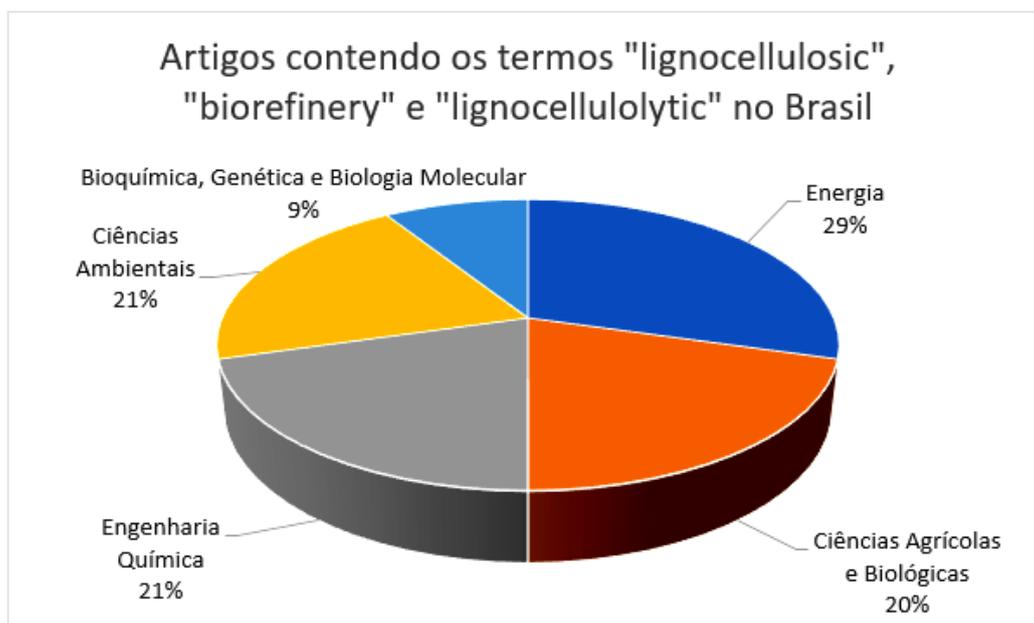


**Figura 40:** Artigos contendo os termos "lignocellulosic", "lignocellulolytic" e "biorefinery" publicados entre 2000 e 2023 no Brasil.

Fonte: Elaboração própria baseada em pesquisa na plataforma Scopus, 2023.

Não foi possível determinar uma linha de tendência para descrever o comportamento descrito no gráfico de maneira satisfatória. Como a preocupação pela associação dos temas foi tardia, espera-se que a tendência seja de crescimento pelos próximos anos, vista a pertinência no panorama energético e econômico brasileiro e mundial.

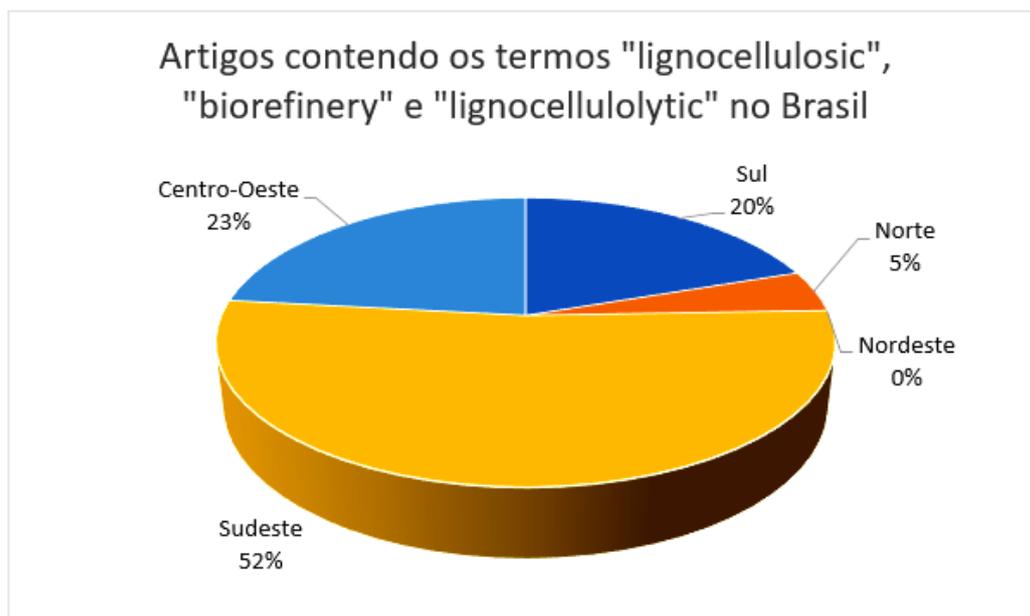
O gráfico da Figura 41 mostra as principais áreas de pesquisa que estão relacionadas aos artigos publicados sobre o tema no Brasil. É notório que segue o padrão mundial de utilização dos recursos voltados para a produção de biocombustíveis e energia através de processamentos que geram menos impactos ao meio ambiente, uma vez que "Energia" é a área que mais se destaca, com 29% das publicações. Ciências Ambientais surgem em segundo lugar, com 21%, assim como Engenharia Química, também com 21%.



**Figura 41:** Distribuição dos principais assuntos dos artigos contendo o termo "lignocellulosic", "lignocellulolytic" e "biorefinery" entre os anos 2000 e 2023 no Brasil.

Fonte: Elaboração própria baseada em pesquisa na plataforma Scopus, 2023.

Realizando uma análise mais minuciosa das regiões do Brasil que contribuíram com os trabalhos publicados, é evidente que a região Sudeste desempenha um papel fundamental, estando envolvida em mais da metade dos estudos realizados. Por outro lado, o Nordeste não figura no panorama, não tendo contribuído com nenhum trabalho sobre o assunto. A região Centro-Oeste aparece em 23% das publicações, o Sul em 20% e a região Norte participou em 5% dos estudos. Os resultados específicos dessa distribuição estão apresentados na Figura 42.



**Figura 42:** Distribuição dos artigos contendo os termos "lignocellulosic", "lignocellulolytic" e "biorefinery" nas regiões do Brasil durante o período de 2000 a 2023.

Fonte: Elaboração própria baseada em pesquisa na plataforma Scopus, 2023.

## 6. Conclusões

A realização da prospecção tecnológica possui um valor inestimável, permitindo antecipar progressos tecnológicos e oportunidades de inovação, facilitando a adaptação e organização para lidar com mudanças e seus impactos, seja para definir estratégias de mercado ou gestão de riscos. Além disso, oferece uma visão clara do panorama atual em um determinado campo, revelando possibilidades de exploração ou lacunas no desenvolvimento. No presente estudo, foi conduzido um mapeamento tecnológico por meio da análise de artigos na plataforma Scopus, que revelou convergências nos cenários global e brasileiro, apesar de algumas discrepâncias pontuais.

Com relação aos fungos filamentosos, possuem alto potencial na produção de enzimas lignocelulolíticas, mas são subutilizados na degradação de biomassa vegetal para a obtenção de produtos químicos ou biocombustíveis, especialmente no Brasil, onde sua principal aplicação é o controle biológico na agricultura. Já as biomassas lignocelulósicas são amplamente disponíveis e uma alternativa promissora aos recursos fósseis para a produção de energia e produtos químicos de alto valor. A utilização

dessas biomassas não compete com a oferta de alimentos, uma vez que muitas vezes se origina de resíduos agroindustriais, e também apresenta baixo custo.

No contexto do processamento das biomassas lignocelulósicas, as biorrefinarias desempenham um papel crucial. Cerca de 70% dessas instalações estão focadas na produção de bioetanol. Enquanto Europa e na América do Norte, mais da metade das refinarias produz outros produtos além do bioetanol, na Ásia e no Brasil, todas convertem a matéria-prima apenas em etanol (Rodrigues, 2011). Essas unidades fabris representam uma área com grande potencial de inovação e desenvolvimento tecnológico, incluindo a capacidade de integrar várias cadeias de valor para a produção de bioquímicos, otimizando seu funcionamento. Dado o cenário agroindustrial avançado do Brasil, com uma das maiores produções de cana-de-açúcar e florestas plantadas de eucalipto e pinus no mundo, o país está bem posicionado para se destacar como produtor de bioprodutos químicos. A crescente demanda por esses produtos, a insuficiência de produtos derivados do petróleo e as vantagens competitivas da cana-de-açúcar impulsionam o desenvolvimento nessa área no Brasil.

Em resumo, a prospecção tecnológica destaca a necessidade de explorar o potencial dos fungos filamentosos, das biomassas lignocelulósicas e das biorrefinarias no Brasil para produção de bioprodutos químicos, mas ressalta a importância de superar os desafios científicos e tecnológicos.

## 7. Referências bibliográficas

Abo, B.O., Gao, M., Wang, Y., Wu, C., Ma, H., Wang, Q., 2019. Lignocellulosic biomass for bioethanol: an overview on pretreatment, hydrolysis and fermentation processes. *Reviews on Environmental Health* 34, 57–68. <https://doi.org/10.1515/reveh-2018-0054>

Aguiar, A., Ferraz, A., 2011. Mecanismos envolvidos na biodegradação de materiais lignocelulósicos e aplicações tecnológicas correlatas. *Quím. Nova*. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422011001000006>

Alvim, J.C., Alvim, F.A.L.S., Sales, V.H.G., Sales, P.V.G., Oliveira, E.M. de, Costa, A.C.R. da, 2015. Biorrefinarias: conceitos, classificação, matérias primas e produtor. *J. Bioen. Food Sci.*

Assunção, F.C.R., 2010. *Química verde no Brasil, 2010-2030*, Ed. rev. e atualizada. ed. CGEE, Brasília, DF.

Atlas, R.M. Microbial diversity. In: *Principles of Microbiology*. 2 ed. Wm. C. Brown Publishers, pp. 1098-1147. 1997.

Azevedo, E., Barata, M., 2018. Diversidade no reino Fungi e aplicações à Indústria. *Rev. Ciência Elem.* 6. <https://doi.org/10.24927/rce2018.077>

Bajpai, P., 2016. Structure of Lignocellulosic Biomass, in: Bajpai, P. (Ed.), *Pretreatment of Lignocellulosic Biomass for Biofuel Production*, SpringerBriefs in Molecular Science. Springer, Singapore, pp. 7–12. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-0687-6\\_2](https://doi.org/10.1007/978-981-10-0687-6_2)

Bastos, V. D. Biorrefinarias (2012). Biocombustíveis e química renovável: revolução tecnológica e financiamento. *Revista do BNDES*, n. 38, p. 85-138. BNDES, Rio de Janeiro, dez. 2012

Benatti, A.L.T., Polizeli, M.D.L.T.D.M., 2023. Lignocellulolytic Biocatalysts: The Main Players Involved in Multiple Biotechnological Processes for Biomass

Valorization. *Microorganisms* 11, 162.  
<https://doi.org/10.3390/microorganisms11010162>

Biko, O.D.V., Viljoen-Bloom, M., Van Zyl, W.H., 2020. Microbial lignin peroxidases: Applications, production challenges and future perspectives. *Enzyme and Microbial Technology* 141, 109669. <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2020.109669>

Black, J. G. *Microbiologia: Fundamentos e Perspectivas*. 4ª edição. Guanabara Koogan S.A. Rio de Janeiro, 2002.

Bonugli-Santos, R.C., Durrant, L.R., da Silva, M., Sette, L.D., 2010. Production of laccase, manganese peroxidase and lignin peroxidase by Brazilian marine-derived fungi. *Enzyme and Microbial Technology* 46, 32–37.  
<https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2009.07.014>

Buckeridge, M.S., Tiné, M.A.S., Santos, H.P. & Lima, D.U. 2000. Polissacarídeos de reserva de parede celular em sementes, estrutura, metabolismo, funções e aspectos ecológicos. *Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal* 12: 137-162.

Cardoso, E.A., Galvão, V.A.D.N., Santos, V.L.D., Oliveira, M.L.D., Santos, R.C., Pontes, L.A.M., 2023. Revisão acerca de biorrefinarias com base lignocelulósica: aspectos atuais. *Lat. Am. J. Energy Res.* 10, 67–76.  
<https://doi.org/10.21712/lajer.2023.v10.n1.p67-76>

Cardoso, P.G., Queiroz, M.V.D., Pereira, O.L., Araújo, E.F.D., 2007. Morphological and molecular differentiation of the pectinase producing fungi *Penicillium expansum* and *Penicillium griseoroseum*. *Braz. J. Microbiol.* 38, 71–77.  
<https://doi.org/10.1590/S1517-83822007000100015>

Carranza, C.S., Barberis, C.L., Chiacchiera, S.M., Magnoli, C.E., 2017. Assessment of growth of *Aspergillus* spp. from agricultural soils in the presence of glyphosate. *Revista Argentina de Microbiología* 49, 384–393.

Carranza, C.S., Bergesio, M.V., Barberis, C.L., Chiacchiera, S.M., Magnoli, C.E., 2014. Survey of *Aspergillus* section *Flavi* presence in agricultural soils and effect of

glyphosate on nontoxicogenic *A. flavus* growth on soil-based medium. *Journal of applied microbiology* 116, 1229–1240.

Carvalho, W., Canilha, L., Ferraz, A., Milagres, A.M.F., 2009. Uma visão sobre a estrutura, composição e biodegradação da madeira. *Quím. Nova* 32, 2191–2195. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422009000800033>

Castro, A.M.D., Pereira Jr, N., 2010. Produção, propriedades e aplicação de celulases na hidrólise de resíduos agroindustriais. *Quím. Nova* 33, 181–188. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422010000100031>

Chatterjee, S., Venkata Mohan, S., 2022. Fungal biorefinery for sustainable resource recovery from waste. *Bioresource Technology* 345, 126443. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126443>

Coelho, G.D., Silva, L.R.I., 2018. Produção e caracterização da celulase (CMCase) por fungo isolado da fase termofílica de um processo de compostagem em fermentação em estado sólido tendo bagaço de coco verde como substrato 7.

Da Paz, A. Mapeamento tecnológico dos métodos de extração de lipídeos de microalgas. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2021.

Da Silva, W. B., de Oliveira, R. L., Porto, T S. (2021). Monitoramento tecnológico da aplicação de enzimas celulolíticas: panorama mundial e brasileiro. *Revista Geama*, 7(2), 48–58.

Dashtban, M., Schraft, H., Syed, T.A., Qin, W., 2010. Fungal biodegradation and enzymatic modification of lignin. *Int J Biochem Mol Biol* 1, 36–50.

De Miranda, R.L., Martins, E.M., Lopes, K., 2019. A potencialidade energética da biomassa no Brasil. *RDS* 5, 94. <https://doi.org/10.18616/rdsd.v5i1.4829>

Díaz-Malvárez, F.I., García-Almendárez, B.E., Hernández-Arana, A., Amaro-Reyes, A., Regalado-González, C., 2013. Isolation and properties of  $\beta$ -xylosidase from *Aspergillus niger* GS1 using corn pericarp upon solid state fermentation. *Process Biochemistry* 48, 1018–1024. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2013.05.003>

Do Brasil, CI, 2022. IBGE estima safra de 261,4 milhões de toneladas em 2022. Agência Brasil. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2022-07/ibge-estima-safra-de-2614-milhoes-de-toneladas-em-2022>. Acesso em: 30 de julho de 2023

Duarte, K. R. Mapeamento tecnológico da utilização de microalgas para produção de biocombustíveis. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2023

Estela, R., Luis, J., 2013. Hydrolysis of Biomass Mediated by Cellulases for the Production of Sugars, in: Chandel, A. (Ed.), Sustainable Degradation of Lignocellulosic Biomass - Techniques, Applications and Commercialization. InTech. <https://doi.org/10.5772/53719>

Fahimnia, B., Sarkis, J., Davarzani, H., 2015. Green supply chain management: A review and bibliometric analysis. International Journal of Production Economics 162, 101–114. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2015.01.003>

Falade, A.O., Nwodo, U.U., Iweriebor, B.C., Green, E., Mabinya, L.V., Okoh, A.I., 2017. Lignin peroxidase functionalities and prospective applications. MicrobiologyOpen 6, e00394. <https://doi.org/10.1002/mbo3.394>

Farinas, C. S. A parede celular vegetal e as enzimas envolvidas na sua degradação. Embrapa Instrumentação. São Carlos, 2011.

Francisco, M. R. da C. M. Caracterização de isolados de *Aspergillus* provenientes de ambiente hospitalar – identificação molecular e determinação dos padrões de susceptibilidade aos antifúngicos. Dissertação de Mestrado em Biologia Humana e Ambiente – Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa. Lisboa, 2017.

Goldman, G.H. and Osmani, S.A. (2008). The Aspergilli. Genomics, Medical Aspects, Biotechnology, and Research Methods. Taylor & Francis Group. 1<sup>st</sup> Edition. ISBN: 978-0-8493-9080-7.

Gordillo-Fuenzalida, F., Echeverria-Vega, A., Cuadros-Orellana, S., Faundez, C., Kähne, T., Morales-Vera, R., 2019. Cellulases Production by a *Trichoderma* sp. Using

Food Manufacturing Wastes. Applied Sciences 9, 4419.  
<https://doi.org/10.3390/app9204419>

Guedes, L. B. Tendências tecnológicas de produtos de cuidados com o cabelo a partir de um viés sustentável. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2023.

Gupta, V.K., Schmoll, M., Herrera-Estrella, A., Upadhyay, R.S., Druzhinina, I., and Tuohy, M.G. (2014). *Biotechnology and Biology of Trichoderma*. (Amsterdam: Elsevier).

Gupta, A., Verma, J.P., 2015. Sustainable bio-ethanol production from agro-residues: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 41, 550–567.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.032>

Hofrichter, M., 2002. Review: lignin conversion by manganese peroxidase (MnP). *Enzyme and Microbial Technology* 30, 454–466. [https://doi.org/10.1016/S0141-0229\(01\)00528-2](https://doi.org/10.1016/S0141-0229(01)00528-2)

Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ). Relatório anual IBÁ 2022. São Paulo: IBÁ, 2022. Disponível em <[www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2022-compactado.pdf](http://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2022-compactado.pdf)>. Acesso em: 10 de agosto de 2023.

INPI - Instituto Nacional da Propriedade Industrial. Perguntas frequentes sobre patentes. Site do INPI, Brasília. Disponível em: <https://www.gov.br/inpi/pt-br/servicos/perguntas-frequentes/patentes>. Acesso em: 09 de agosto de 2023.

Janusz, G., Pawlik, A., Świdarska-Burek, U., Polak, J., Sulej, J., Jarosz-Wilkolazka, A., Paszczyński, A., 2020. Laccase Properties, Physiological Functions, and Evolution. *IJMS* 21, 966. <https://doi.org/10.3390/ijms21030966>

Junior, S.V., 2017. Rumo a uma química renovável brasileiro a partir da biomassa vegetal. *Revista Virtual de Química* 9.

Júnior, S.V., 2013. *Biomassa para Química Verde*, 1st ed. Embrapa Agroenergia, Brasília, DF.

Junior, S.V., 2013. Biomassa para química verde. Embrapa Agroenergia, Brasília, DF.

Junior, S.V., 2011. Biorrefinarias: cenários e perspectivas. Embrapa Agroenergia, Brasília, DF.

Kim, J.S., Lee, Y.Y., Kim, T.H., 2016. A review on alkaline pretreatment technology for bioconversion of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology* 199, 42–48. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.08.085>

Kuhad, R.C., Deswal, D., Sharma, S., Bhattacharya, A., Jain, K.K., Kaur, A., Pletschke, B.I., Singh, A., Karp, M., 2016. Revisiting cellulase production and redefining current strategies based on major challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 55, 249–272. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.132>

Li, M., Wilkins, M., 2021. Lignin bioconversion into valuable products: fractionation, depolymerization, aromatic compound conversion, and bioproduct formation. *Syst Microbiol and Biomanuf* 1, 166–185. <https://doi.org/10.1007/s43393-020-00016-6>

Lima, D. P. Avaliação do uso do sistema de código de barras de DNA para identificação de fungos potencialmente micotoxigênicos isolados de milho e derivados. Dissertação de Mestrado em Ciências da Saúde – Centro de Pesquisas René Rachou, Fundação Oswaldo Cruz. Belo Horizonte, 2015.

Lynd, L.R., Weimer, P.J., Van Zyl, W.H., Pretorius, I.S., 2002. Microbial Cellulose Utilization: Fundamentals and Biotechnology. *Microbiol Mol Biol Rev* 66, 506–577. <https://doi.org/10.1128/MMBR.66.3.506-577.2002>

Madigan, M.T., 2015. Brock biology of microorganisms, Fourteenth edition. ed. Pearson, Boston.

Magalhães, A.I., Carvalho, J.C., Melo Pereira, G.V., Karp, S.G., Câmara, M.C., Medina, J.D.C., Soccol, C.R., 2019. Lignocellulosic biomass from agro- industrial residues in South America: current developments and perspectives. *Biofuels, Bioprod. Bioref.* 13, 1505–1519. <https://doi.org/10.1002/bbb.2048>

Magnoli, K., Carranza, C.S., Aluffi, M.E., Benito, N., Magnoli, C.E., Barberis, C.L., 2022. Fungal Biology.

Mariano, M., El Kissi, N., Dufresne, A., 2016. Cellulose nanocrystal reinforced oxidized natural rubber nanocomposites. *Carbohydrate Polymers* 137, 174–183. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.10.027>

Marotti, B.S., Cortez, D.V., Gonçalves, D.B., De Castro, H.F., 2017. Seleção de espécies do gênero *Penicillium* produtoras de lipase ligada ao micélio para aplicação em hidrólise de óleos vegetais. *Quim. Nova*. <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170033>

Mattos, M. L. T. Microbiologia do solo. In: Nunes, R. R. & Rezende, M. O. O. (org). *Recurso solo: propriedades e usos*. São Carlos: Editora Cubo, p. 250-272, 2015

Matúš, P., Littera, P., Farkas, B., Urík, M., 2023. Review on Performance of *Aspergillus* and *Penicillium* Species in Biodegradation of Organochlorine and Organophosphorus Pesticides. *Microorganisms* 11, 1485. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11061485>

Méndez-Líter, J.A., De Eugenio, L.I., Nieto-Domínguez, M., Prieto, A., Martínez, M.J., 2021. Hemicellulases from *Penicillium* and *Talaromyces* for lignocellulosic biomass valorization: A review. *Bioresource Technology* 324, 124623. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124623>

Meyer, M. C.; Mazaro, S. M.; Silva, J. C. da. (ed) *Trichoderma: Uso na Agricultura*. EMBRAPA, Brasília, 2019

Ministério de Minas e Energia. *Plano Nacional de Energia 2030*. Brasília: MME/EPE, 2007

Mironenka, J., Różalska, S., Soboń, A., Bernat, P., 2020. Lipids, proteins and extracellular metabolites of *Trichoderma harzianum* modifications caused by 2, 4-dichlorophenoxyacetic acid as a plant growth stimulator. *Ecotoxicology and environmental safety* 194, 110383.

Molinaro, E.M., Caputo, L.F.G., Amendoeira, M.R.R., 2009. *Conceitos e Métodos para a Formação de Profissionais em Laboratórios de Saúde*. EPSJV, Rio de Janeiro.

Moreira, L.R.S., Milanezi, N. vG., Filho, E.X.F., 2011. Enzymology of Plant Cell Wall Breakdown: An Update, in: Buckeridge, M.S., Goldman, G.H. (Eds.), *Routes to*

Cellulosic Ethanol. Springer New York, New York, NY, pp. 73–96.  
[https://doi.org/10.1007/978-0-387-92740-4\\_6](https://doi.org/10.1007/978-0-387-92740-4_6)

Nakaema, H., n.d. Estratégias de pré-tratamento de biomassa lignocelulósica para melhorar a produção de biogás e bioquímicos em biorrefinarias.

Nali, E.C., Ribeiro, L.B.N.M., Hora, A.B. da, 2016. Biorrefinaria integrada à indústria de celulose no Brasil : oportunidade ou necessidade? BNDES Setorial, n. 43, mar. 2016.

Nascimento, R.P. do, Coelho, M.A.Z., Ribeiro, B.D., Pereira, K.S. (Eds.), 2018. Microbiologia Industrial: Bioprocessos, 1st ed. Elsevier, Rio de Janeiro.

Nascimento, V.C., Rodrigues-Santos, K.C., Carvalho-Alencar, K.L., Castro, M.B., Kruger, R.H., Lopes, F.A.C., 2022. Trichoderma: biological control efficiency and perspectives for the Brazilian Midwest states and Tocantins. Braz. J. Biol. 82, e260161.  
<https://doi.org/10.1590/1519-6984.260161>

Oliveira, M. M. M.; Quental, C. M. A prospecção tecnológica como ferramenta de planejamento estratégico para a construção do futuro do Instituto Oswaldo Cruz. Revista Eletrônica de Comunicação, Informação & Inovação em Saúde, [S. l.], v. 6, n. 1, 2012. DOI: 10.3395/reciis.v6i1.607. Disponível em<: <https://www.reciis.icict.fiocruz.br/index.php/reciis/article/view/607>>. Acesso em: 04 de agosto de 2023.

Oliveira, M. M. Q. Obtenção de novos mutantes celulolíticos a partir do fungo *Trichoderma atroviride*. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciências Biológicas: Microbiologia e Imunologia). Instituto de Microbiologia Prof. Paulo de Goés – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2009.

Ogeda, T.L., Petri, D.F.S., 2010. Hidrólise Enzimática de Biomassa. Quím. Nova 33, 1549–1558. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422010000700023>

Papadaki, E., Kontogiannopoulos, K.N., Assimopoulou, A.N., Mantzouridou, F.Th., 2020. Feasibility of multi-hydrolytic enzymes production from optimized grape pomace residues and wheat bran mixture using *Aspergillus niger* in an integrated citric acid-

enzymes production process. *Bioresource Technology* 309, 123317. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123317>

Paul, M., Pandey, N.K., Banerjee, A., Shrotri, G.K., Tomer, P., Gazara, R.K., Thatoi, H., Bhaskar, T., Hazra, S., Ghosh, D., 2023. An insight into omics analysis and metabolic pathway engineering of lignin-degrading enzymes for enhanced lignin valorization. *Bioresource Technology* 379, 129045. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129045>

Pitt, J. I. 1991. *A Laboratory Guide to Common Penicillium Species*. North Wales: Commonwealth Scientific e Industrial Research Organization – Division of Food Processing.

Powers-Fletcher, M.V., Kendall, B.A., Griffin, A.T., Hanson, K.E., 2016. Filamentous Fungi, in: Hayden, R.T., Wolk, D.M., Carroll, K.C., Tang, Y.-W. (Eds.), *Diagnostic Microbiology of the Immunocompromised Host*. ASM Press, Washington, DC, pp. 311–341. <https://doi.org/10.1128/9781555819040.ch14>

Raízen, 2023. Etanol de segunda geração: potencial e oportunidades. Raízen. Disponível em: <https://www.raizen.com.br/blog/etanol-de-segunda-geracao>. Acesso em: 30 de julho de 2023.

Ranjan, R., Rai, R., Bhatt, S.B., Dhar, P., 2023. Technological road map of Cellulase: A comprehensive outlook to structural, computational, and industrial applications. *Biochemical Engineering Journal* 198, 109020. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2023.109020>

Rigo, D., Gayeski, L., Tres, G.A., Camera, F.D., Zeni, J., Valduga, E., Cansian, R.L., Backes, G.T., 2021. PRODUÇÃO MICROBIOLÓGICA DE ENZIMAS: UMA REVISÃO/MICROBIOLOGICAL PRODUCTION OF ENZYMES: A REVIEW. *BJD* 7, 9232–9254. <https://doi.org/10.34117/bjdv7n1-624>

Rocha, C. P. Otimização da produção de enzimas por *Aspergillus niger* em fermentação em estado sólido. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2010.

Rodrigues, J.A.R., 2011. Do engenho à biorrefinaria: a usina de açúcar como empreendimento industrial para a geração de produtos bioquímicos e biocombustíveis. *Quím. Nova* 34, 1242–1254. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422011000700024>

Rodríguez-Zúñiga, U.F., Farinas, C.S., Bertucci Neto, V., Couri, S., Crestana, S., 2011. Produção de celulasas por *Aspergillus niger* por fermentação em estado sólido. *Pesq. agropec. bras.* 46, 912–919. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2011000800018>

Sánchez-Ramírez, J., Martínez-Hernández, J.L., Segura-Ceniceros, E.P., Contreras-Esquivel, J.C., Medina-Morales, M.A., Aguilar, C.N., Iliná, A., 2014. Immobilization of lignocellulolytic enzymes in magnetic nanoparticles. *Química Nova* 37. <https://doi.org/10.5935/0100-4042.20140085>

Santos, F.A., Queiróz, J.H.D., Colodette, J.L., Fernandes, S.A., Guimarães, V.M., Rezende, S.T., 2012. Potencial da palha de cana-de-açúcar para produção de etanol. *Quím. Nova* 35, 1004–1010. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422012000500025>

Santos, M. F. R. F. Elaboração do Technology Roadmap para biorrefinaria de produtos da lignina no Brasil. Tese de Doutorado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2011.

Santos, S. F. M. Estudo da produção de pectinase por fermentação em estado sólido utilizando pedúnculo de caju como substrato. Tese de Doutorado em Engenharia Química – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Nata, Rio Grande do Norte, 2007.

Sebrae/PR. Prospecção tecnológica. Disponível em: <https://sebraepr.com.br/comunidade/artigo/prospeccao-tecnologica>. Acesso em: 03 de agosto de 2023.

Shallom, D., Shoham, Y., 2003. Microbial hemicellulases. *Current Opinion in Microbiology* 6, 219–228. [https://doi.org/10.1016/S1369-5274\(03\)00056-0](https://doi.org/10.1016/S1369-5274(03)00056-0)

Silva, J. C. A. Produção de  $\beta$ -xilosidases e L-arabinofuranosidases por *Trichoderma atroviride* 102C1, visando a degradação da biomassa. Trabalho de Conclusão de Curso

(Graduação em Ciências Biológicas: Microbiologia e Imunologia). Instituto de Microbiologia Paulo Goés – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2013.

Silva, J. C. A. Utilização de subprodutos agrícolas para produção de beta-glucosidase, beta-xilosidase e alfa-L-arabinofuranosidase pela linhagem mutante *Trichoderma atroviride* 102C1. Dissertação de Mestrado em Microbiologia. Instituto de Microbiologia Paulo Goés – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2016.

Singh, R., Kumar, M., Mittal, A., Mehta, P.K., 2016. Microbial enzymes: industrial progress in 21st century. 3 Biotech 6, 174. <https://doi.org/10.1007/s13205-016-0485-8>

Souza, T.S.P.D., Kawaguti, H.Y., 2021. Cellulases, Hemicellulases, and Pectinases: Applications in the Food and Beverage Industry. Food Bioprocess Technol 14, 1446–1477. <https://doi.org/10.1007/s11947-021-02678-z>

Taiz, L., Zeiger, E., 2002. Plant physiology, 3rd ed. ed. Sinauer Associates, Sunderland, Mass.

Teixeira, Luciene Pires. Prospecção Tecnológica: importância, métodos e experiências da Embrapa Cerrados. EMBRAPA. Distrito Federal, 2013.

Temer, B., Terrasan, C.R.F., Carmona, E.C., 2014. -L-Arabinofuranosidase from *Penicillium janczewskii*: Production with brewers spent grain and orange waste. Afr. J. Biotechnol. 13, 1796–1806. <https://doi.org/10.5897/AJB2013.13361>

Tortora, G.J., Funke, B.R., Case, C.L., 2000. Microbiologia (10a. ed.). Grupo A - Artmed.

Toscano, L., Montero, G., Cervantes-Díaz, L., Stoytcheva, M., Gochev, V., Beltran-García, M., 2013. Production and partial characterization of extracellular lipase from *Trichoderma harzianum* by solid state. Biotechnology & Biotechnological Equipment 27, 3776–3781. <https://doi.org/10.5504/BBEQ.2012.0140>

Van Dyk, J.S., Pletschke, B.I., 2012. A review of lignocellulose bioconversion using enzymatic hydrolysis and synergistic cooperation between enzymes—Factors affecting

enzymes, conversion and synergy. *Biotechnology Advances* 30, 1458–1480.  
<https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2012.03.002>

Vara, S., Karnena, M.K., 2020. Fungal enzymatic degradation of industrial effluents - A review. *Current Research in Environmental and Applied Mycology* 10, 417–442.  
<https://doi.org/10.5943/CREAM/10/1/33>

Verma, N., Kumar, V., 2020. Impact of process parameters and plant polysaccharide hydrolysates in cellulase production by *Trichoderma reesei* and *Neurospora crassa* under wheat bran based solid state fermentation. *Biotechnology Reports* 25, e00416.  
<https://doi.org/10.1016/j.btre.2019.e00416>

Zin, N.A., Badaluddin, N.A., 2020. Biological functions of *Trichoderma* spp. for agriculture applications. *Annals of Agricultural Sciences* 65, 168–178.  
<https://doi.org/10.1016/j.aoas.2020.09.003>