

Utilização de resíduos agroindustriais para produção de celulase: uma revisão

Use of agro-industrial waste for cellulase production: a review

Utilización de residuos agroindustriales para producción de celulasa: una revisión

Recebido: 18/06/2020 | Revisado: 01/07/2020 | Aceito: 04/07/2020 | Publicado: 17/07/2020

Analyse Villanueva Gaete

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1471-7443>

Universidade Federal Fluminense, Brasil

E-mail: an4lyse@gmail.com

Carlos Eduardo de Souza Teodoro

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8591-0502>

Universidade Federal Fluminense, Brasil

E-mail: carlosteodoro@id.uff.br

Ana Paula Martinazo

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0704-2986>

Universidade Federal Fluminense, Brasil

E-mail: anapaulamartinazzo@id.uff.br

Resumo

Novas tecnologias estão em estudo com vistas a utilização de resíduos agroindustriais no desenvolvimento de bioprocessos, por exemplo para produção de biocombustíveis, energia, plásticos e insumos nas indústrias de alimentos e bebidas. O objetivo do trabalho foi realizar o estado da arte sobre a utilização de resíduos agroindustriais para produção de celulase. A metodologia adotada foi estudo exploratório e descritivo, utilizando publicações científicas da última década. Verificou-se que um mercado de importância para os bioprocessos são as enzimas comerciais produzidas por microrganismos que utilizam resíduos agroindustriais como nutrientes, que provaram ser uma opção viável quando comparadas as suas contrapartes químicas. A celulase é a terceira enzima mais utilizada em vários processos, detrás das proteases e amilases, cuja demanda está aumentando em aplicações industriais, como na fabricação de detergentes, têxteis, papel, ração animal, suco de frutas, alimentos, bebidas e biocombustíveis. As celulasas são enzimas sintetizadas por uma grande diversidade de microrganismos. A composição do meio de crescimento dos microrganismos pode afetar significativamente no rendimento e produtividade da celulase e é de importância no

desenvolvimento de bioprocessos industriais. O uso de resíduos agroindustriais é uma estratégia interessante para reduzir custos associados à formulação do meio de cultura, como uma alternativa econômica e ecologicamente viável para a destinação desses recursos e produção de enzimas em larga escala.

Palavras-chave: Biotecnologia agrícola; Agroindústria; Biorrefinarias; Lignocelulose; Enzimas; Microorganismos.

Abstract

New technologies are under study with a view to the use of agro industrial wastes in the development of bioprocesses, for example for the production of biofuels, energy, plastics and inputs in the food and beverage industries. The aim of this study was to realize the state of the art on the use of agro-industrial residues for the production of cellulase. The methodology adopted was exploratory and descriptive research, using scientific publications from the last decade. It was found that a market of importance for bioprocesses are commercial enzymes produced by microorganisms that use agro-industrial residues as nutrients, which have proved to be a viable option when compared to their chemical counterparts. Cellulase is the third most used enzyme in several processes, behind proteases and amylases, whose demand is increasing in industrial applications, such as in detergents, textiles, paper processing, animal feed, fruit juice, food, drinks and biofuels. Cellulases are inducible enzymes synthesized by a wide variety of microorganisms. The composition of the microorganism growth medium can significantly affect the cellulase yield and productivity and is important in the development of industrial bioprocesses. The use of agro-industrial waste is an interesting strategy for reducing the costs associated with the culture medium composition, as an economical and ecologically viable alternative for the destination of these resources and the production of enzymes on a large scale.

Keywords: Agricultural biotechnology; Agribusiness; Biorefineries; Lignocellulose; Enzymes; Microorganisms.

Resumen

Nuevas tecnologías están en estudio para la utilización de residuos agroindustriales en el desarrollo de bioprocesos, por ejemplo para producción de biocombustibles, energía, plásticos e insumos en industrias de alimentos y bebidas. El objetivo de este trabajo fue realizar el estado de arte del uso de residuos agroindustriales para producción de celulasa. La metodología adoptada fue un estudio exploratorio y descriptivo, utilizando publicaciones

científicas de la última década. Se observó que un mercado de importancia para los bioprocesos son las enzimas comerciales producidas por microorganismos que utilizan residuos agroindustriales como nutrientes, que probaron ser una opción viable al ser comparada con sus contrapartes químicas. La celulasa es la tercera enzima más utilizada, además de proteasas y amilasas, y su demanda está aumentando en varios procesos, como en la fabricación de detergentes, textiles, papel, comidas para animales, alimentos, bebidas y biocombustibles. Las celulasas son enzimas sintetizadas por una grande diversidad de microorganismos. La composición del medio de crecimiento puede afectar significativamente en el rendimiento y productividad de la celulasa y es de importancia en el desarrollo de bioprocesos. El uso de residuos agroindustriales es una estrategia interesante para reducir costos asociados a la formulación del medio de cultura, como una alternativa económica y ecológicamente viable para la destinación de estos recursos y producción de enzimas a gran escala.

Palabras clave: Biotecnología agrícola; Bio-refinerías; Lignocelulosa; Enzimas; Microorganismos.

1. Introdução

As agroindústrias têm investido cada vez mais na capacidade de processamento, gerando quantidades enormes de subprodutos, sendo parte reaproveitada como ração animal. Todavia, em muitos casos, os subprodutos são considerados custo operacional para as empresas, sendo descartado e atuando como fonte de contaminação ambiental. Esse desperdício tem como resultado perdas irre recuperáveis na economia, diminuindo a disponibilidade de recursos e fonte de renda para a população (Nascimento & Franco, 2015).

Alguns resíduos das produções já possuem aplicabilidade na agricultura, minimizando os impactos da geração destes. Parte do resíduo, por exemplo, é usado para cobrir e proteger o solo, mantendo matéria orgânica e os nutrientes no campo. Entretanto, uma outra parte ainda não é utilizada e pode ser avaliado seu aproveitamento em bioprocessos (Silva et al., 2018).

A Associação Brasileira das Indústrias de Biomassa e Energia Renovável (ABIB, 2016) estima que em 2015 tenham sido gerados 202,18 milhões de toneladas de resíduos da agricultura, da pecuária, da silvicultura, das indústrias de beneficiamento de alimentos e bebidas, das indústrias de papel – celulose e do setor madeireiro – moveleiro, ou seja, enormes quantidades de subprodutos para serem aproveitadas. Além disso, Pedroso et al. (2018), destacam que a cadeia produtiva da biomassa e sua transformação, apresenta alta demanda de recursos humanos, por isso, do ponto de vista social, tem grande potencial de

geração de empregos e renda, fortalecendo a cadeia produtiva da economia rural.

Novas tecnologias estão em estudo com vistas a utilização de resíduos agroindustriais como a biomassa lignocelulósica no desenvolvimento de bioprocessos. Por exemplo, as preocupações ambientais sobre a utilização de combustíveis fósseis e seu esgotamento levaram ao desenvolvimento de fontes alternativas e renováveis de energia. A biomassa lignocelulósica pode ser utilizada para gerar bioetanol por via enzimática a ser utilizada como combustível, ademais as enzimas são usadas em processos industriais, como panificação, fabricação de cervejas, detergentes, produtos fermentados, têxteis, farmacêuticos, processamento de couro, entre outras atividades. Portanto, essas iniciativas aumentaram a demanda de enzimas em várias aplicações industriais. (Singh et al., 2016; Patel et al., 2019).

Os custos relativamente altos da produção de enzimas são barreiras à sua aplicação comercial em indústrias. Esses custos dependem da escolha de microrganismos eficientes, de meios de cultivos baratos e/ou de processos fermentativos adequados que possibilitem aumentar a produtividade (Merino & Cherry 2007; Penha et al., 2016). Os resíduos agroindustriais podem ser ricos em carboidratos, proteínas ou lipídios e podem estar disponíveis nas formas sólida ou líquida. Qualquer resíduo agrícola, se usado como um componente importante do meio de fermentação, pode reduzir o custo total de produção, diminuindo o custo da matéria-prima usada no processo de fermentação. Os custos para um bioprocessos típico variam de 10% a 50% do custo total de produção e, portanto, o uso de resíduos agroindustriais seria benéfico. (Gopalan & Nampoothiri, 2016)

Vários estudos, como os de Boechat (2010), Mrudula (2011), Trivedi et al., (2011) Sadhu et al., (2013), Shaikh et al., (2013), Harshvadhan et al., (2013), Meng et al., (2014), Ladeira et al., (2014), Thomas et al., (2016), Azadiam et al., (2017), têm proposto a utilização de resíduos agroindustriais como fibra de coco, bagaço de cana, resíduos de papel, palha de arroz, palha de milho, farelo de trigo e outros resíduos lignocelulósicos como substratos indutores para a produção de enzimas, entre elas a celulase, como uma alternativa econômica e ecologicamente viável para a destinação desses recursos e produção de enzimas em larga escala. Neste sentido, esta revisão abordará o estado da arte sobre o emprego de resíduos agroindustriais para produção de celulase.

2. Metodologia

O presente trabalho foi uma pesquisa exploratória e descritiva (Prodanov & Freitas, 2013), abordando o estado da arte sobre a utilização de resíduos agroindustriais para produção

de celulase.

As bases de dados utilizadas para a compilação de artigos científicos foram: Science Direct, Pubmed, Google academic, Elsevier, Scielo e Periódicos Capes.

3. Valorização de Resíduos Agroindustriais

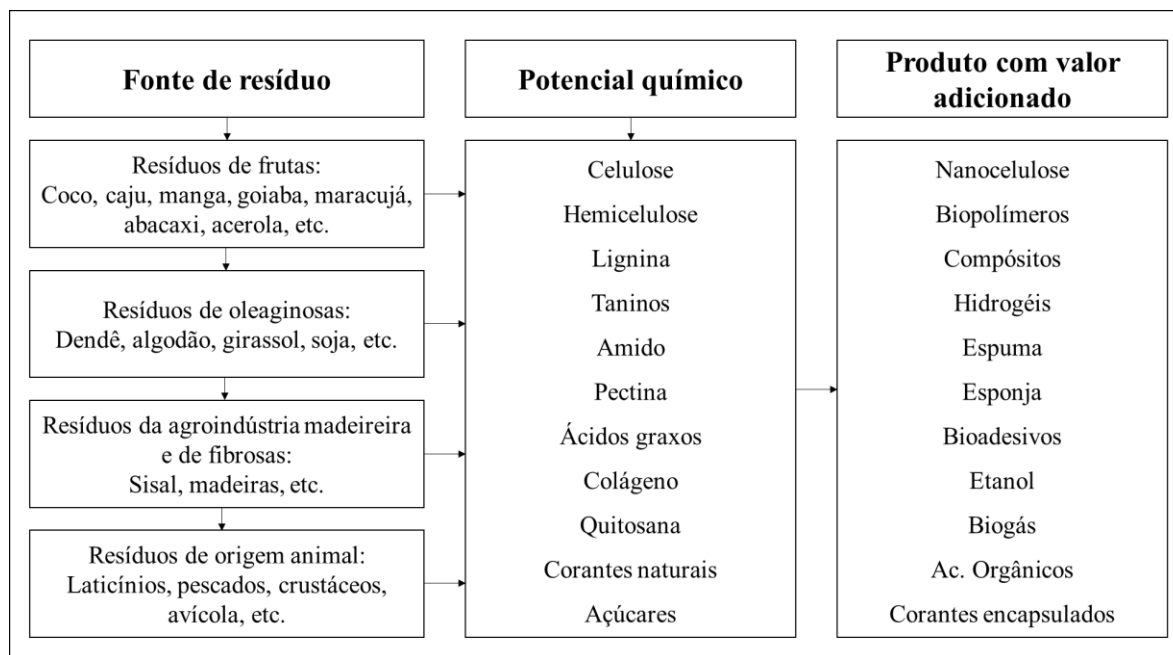
A AIBIB (2016) define como biomassa de resíduos agrícolas aquela constituída por todo material que é deixado no campo no processo de colheita das culturas, sendo formada por palhas, caules e folhas em geral. Existem também os resíduos agroindustriais, que são resultantes do processo de beneficiamento de algumas culturas, tendo-se como exemplos a casca de arroz e o caroço do algodão.

Considerando a superexploração dos recursos naturais, uma atenção especial tem sido voltada à minimização ou reuso de resíduos e ao estabelecimento de novos usos de produtos e subprodutos agropecuários em substituição aos recursos não renováveis. Em razão disso, a química verde, química limpa, química ambientalmente benigna, ou química autossustentável já é realidade, especialmente em países com indústria química desenvolvida e que apresentam controle rigoroso na emissão de poluentes. Um bom exemplo é a adoção crescente do conceito de biorrefinaria, cuja lógica é análoga às refinarias de petróleo e integra processos visando à valorização total da matéria prima (Leistritz et al., 2007).

De forma geral, os resíduos da agroindústria de processamento de produtos de origem vegetal (frutas, oleaginosas, fibrosas, madeiras, etc.) e origem animal (laticínios, avicultura de corte, aquicultura, etc.) apresentam em suas composições diferentes constituintes, que abrem oportunidades de agregação de valor pela aplicação do conceito de biorrefinaria (Rosa et al., 2011). A Figura 1 apresenta de forma simplificada a visão conceitual e o potencial de valorização dos resíduos agroindustriais.

De acordo com Nascimento & Franco (2015), a indústria brasileira de alimentos é responsável por 15% do faturamento do setor industrial no país. Um dos principais entraves ocasionados pelo crescimento desse setor está associado à produção de resíduos. A quantidade de resíduos gerados pelas agroindústrias no Brasil acumula um enorme potencial, podendo ter uma finalidade benéfica ao homem e ao ambiente.

Figura 1. Potencial de valorização de resíduos agroindustriais de origem vegetal e animal.



Fonte: adaptado de Rosa et al. (2011).

4. Materiais Lignocelulósicos

A biomassa lignocelulósica é considerada uma alternativa sustentável e renovável quando comparada aos recursos fósseis. A pesquisa sobre o desenvolvimento de novos meios de aproveitamento de biomassa lignocelulósica para produção de combustíveis, energia e materiais aumentou na última década, à medida que ficou claro que o desenvolvimento de tecnologias deve estar centrado na mitigação das mudanças climáticas. Somado a isso, os materiais lignocelulósicos não são comestíveis e, portanto, não competem com as culturas alimentares e podem ser colhidas de várias fontes, como lixo municipal, resíduos agrícolas e resíduos de madeira e floresta (Tu & Hallet, 2019).

O material lignocelulósico é composto principalmente por três polímeros: celulose, hemicelulose e lignina, juntamente com pequenas quantidades de outros componentes, como grupos acetil, minerais e compostos fenólicos. Dependendo do tipo de biomassa lignocelulósica, esses polímeros são organizados em estruturas tridimensionais não uniformes complexas, em diferentes graus e composição relativa variável (Isikgor & Becer, 2016).

A celulose é o maior componente estrutural das paredes celulares vegetais, responsável pela resistência mecânica dos tecidos das plantas. As macromoléculas de hemicelulose, também encontradas na parede celular são formadas frequentemente por polímeros repetidos de pentoses e hexoses. A lignina, por sua vez, contém três álcoois aromáticos (álcool

coniferílico, álcool sinapílico e álcool p-cumarílico) produzidos através de um processo biossintético e forma um selo protetor em torno dos outros dois componentes da parede celular vegetal, celulose e hemiceluloses (Anwar et al., 2015).

Celulose, hemicelulose e lignina não são distribuídas uniformemente dentro das paredes celulares. A estrutura e a quantidade desses componentes na planta variam de acordo com espécie, tecido e maturidade da parede celular. Por tanto, a composição do resíduo de lignocelulose depende muito da sua fonte, seja ela derivada de madeira, gramíneas, etc. Geralmente, a biomassa lignocelulósica consiste em 25 a 50% de celulose, 15 a 35% de hemicelulose e 5 a 30% de lignina (Tabela 1) (Castro & Pereira, 2010; Anwar et al., 2015; Isikgor & Becer, 2016).

Tabela 1. Tipos de biomassa lignocelulósica e sua composição química.

Biomassa lignocelulósica	Celulose (%)	Hemicelulose (%)	Lignina (%)	
Madeira	Álamo	50,8 – 53,3	26,2 – 28,7	15,5 – 16,3
	Carvalho	40,4	35,9	24,1
	Eucalipto	54,1	18,4	21,5
	Pinho	42,0 – 50,0	24,0 – 27,0	20,0
Resíduos agrícolas	Palha de trigo	35,0 – 39	23,0 – 30	12,0 – 16,0
	Palha de cevada	36,0 – 43,0	24,0 – 33,0	6,3 – 9,8
	Palha de arroz	29,2 – 34,7	23,0 – 25,9	17,0 – 19,0
	Palha de aveia	31,0 – 35,0	20,0 – 26,0	10,0 – 15,0
	Espigas de milho	33,7 – 41,2	31,9 – 36,0	6,1 – 15,9
	Bagaço de cana de açúcar	25,0 – 45,0	28,0 – 32,0	15,0 – 25,0
	Palha de sorgo	32,0 – 35,0	24,0 – 27,0	15,0 – 21,0
Gramíneas	Gramíneas	25,0 – 40,0	25,0 – 50	10,0 – 30,0

Fonte: adaptado de Isikgor & Becer (2016).

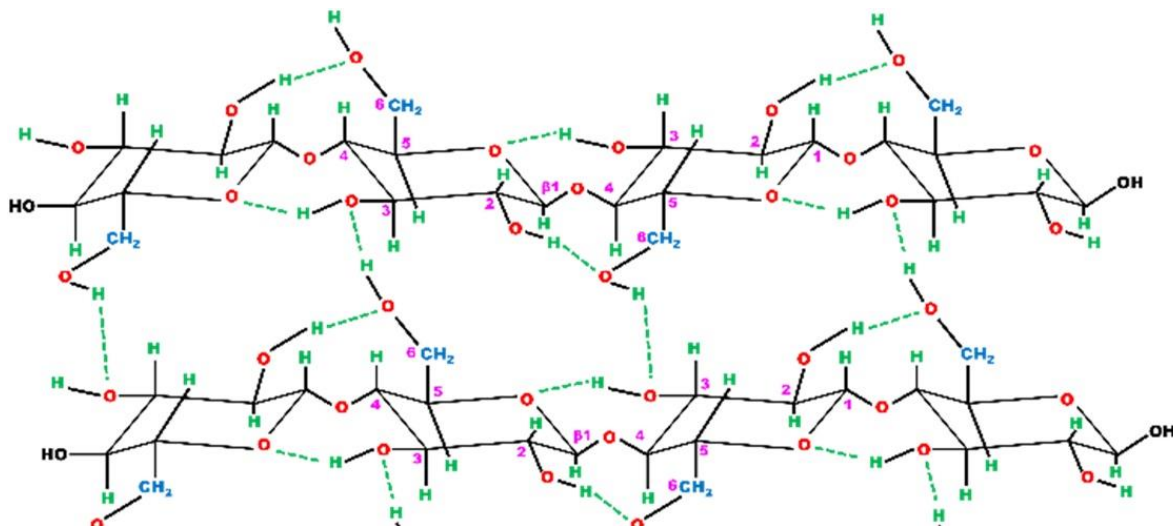
4.1 Celulose

A celulose representa a matéria-prima mais promissora para a bioconversão (Yin et al., 2010). Como cerca da metade do carbono orgânico na biosfera está presente na forma de celulose, a sua conversão em combustível e produtos químicos valiosos tem uma importância primordial (Isikgor & Becer, 2016).

A celulose é um polímero altamente estável, composto por moléculas de glicose e ligado a cadeias lineares de até 12.000 monômeros que são unidos por ligações glicosídicas β

– 1,4. A biomassa vegetal contém 40 e 50% de moléculas de celulose que são mantidas juntas por ligações de hidrogênio no estado nativo, mas elas têm uma forte tendência a formar pontes de hidrogênio o que aumenta a rigidez da celulose e torna altamente insolúvel e resistente para a maioria dos solventes orgânicos. A fórmula química da celulose é $(C_6H_{10}O_5)_n$ e a estrutura de uma cadeia do polímero é apresentada na Figura 2 (Anwar et al., 2015).

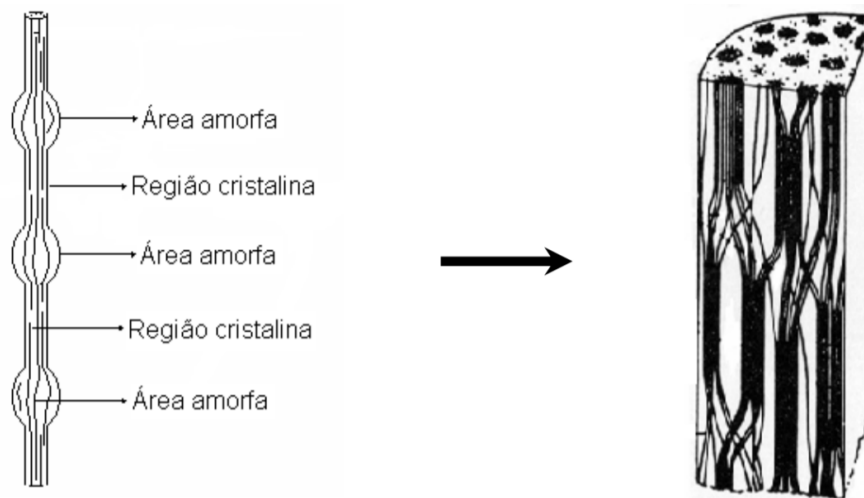
Figura 2. Estrutura da celulose.



Fonte: Woiciechowski et al. (2020).

O grau de polimerização da celulose pode ser da ordem 7.000 a 10.000 monômeros de glicose por molécula, o que lhe confere elevada massa molecular. As moléculas de celulose podem se alinhar lado a lado, em cadeias adjacentes, estendidas na mesma direção, formando micelas. As micelas podem se interligar através de pontes de hidrogênio, formando microfibrilas. Estas microfibrilas, com diâmetro médio de 1 a 30 nm, apresentam regiões cristalinas e amorfas (Ramos, 2003). Embora não exista uma separação definitiva entre as duas regiões, há evidências de que as microfibrilas têm um núcleo cristalino rodeado e interrompido por áreas amorfas (Figura 3). Considera-se que essas áreas amorfas sejam formadas pela presença de moléculas de água, que evitam a cristalização da celulose. Ao passo que, as pontes de hidrogênio, inter e intramoleculares são responsáveis pela manutenção das regiões cristalinas, tornando a celulose resistente à hidrólise ácida, alcalina ou enzimática (Ramos, 2003) Todavia, quando ocorre hidrólise, a celulose sofre despolimerização, liberando monômeros de glicose, que podem ser utilizados como intermediários na produção de insumos químicos (Bevilaqua, 2010).

Figura 3. Representação das regiões amorfa e cristalina da fibra de celulose.



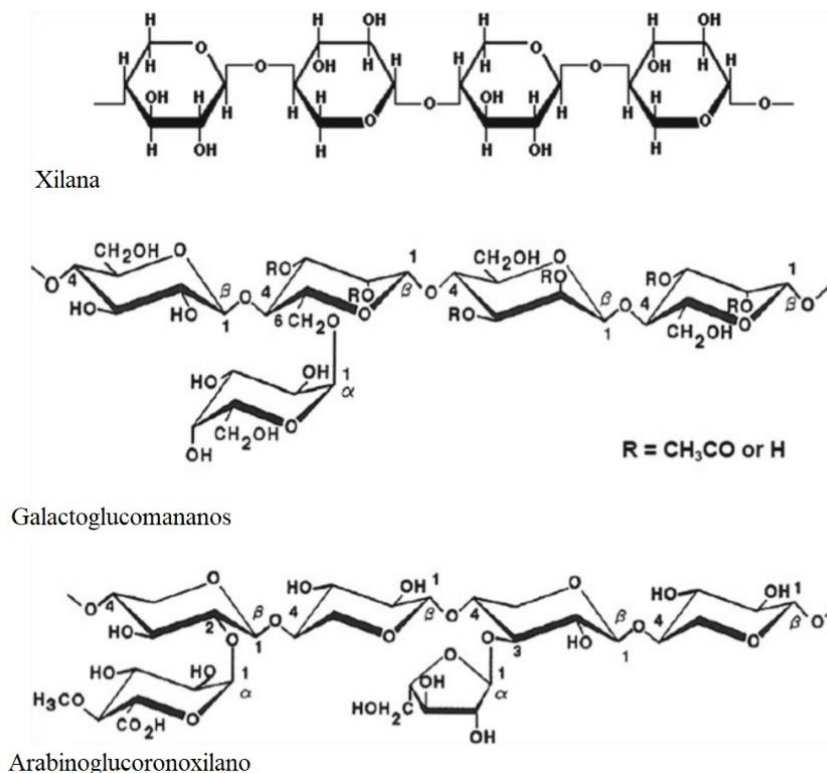
Fonte: Boechat (2010).

4.2 Hemicelulose

Hemiceluloses são polissacarídeos não celulósicos também denominados polioses. As hemiceluloses diferem da celulose pela composição de várias unidades de açúcar, com cadeias moleculares menores e ramificadas. Enquanto a celulose, como substância química, contém exclusivamente a D-glicose como unidade fundamental, as hemiceluloses são polímeros, em cuja composição podem aparecer condensadas em proporções variadas, as seguintes unidades de açúcar: D-glicose, D-manose e D-galactose (hexoses) e, em maior quantidade, por D-xilose, L-arabinose (pentoses), podendo ainda apresentar quantidades variáveis de ácidos urônicos e grupos acetila, formando polímeros de estrutura ramificada e de cadeias mais curtas (Figura 4) (Lino, 2015; Bevilaqua 2010).

O grau de polimerização das hemiceluloses está na faixa de 100 a 200 unidades, muito menor que o da celulose, mas pode apresentar um alto grau de substituições mais ou menos complexas. A hemicelulose é amorfa, com pouca força física e pode ser prontamente hidrolisada por ácidos ou bases diluídos, além das enzimas hemicelulases (Zoghلامي & Paes, 2019).

Figura 4. Estrutura dos principais açúcares que compõem a hemiceluloses.



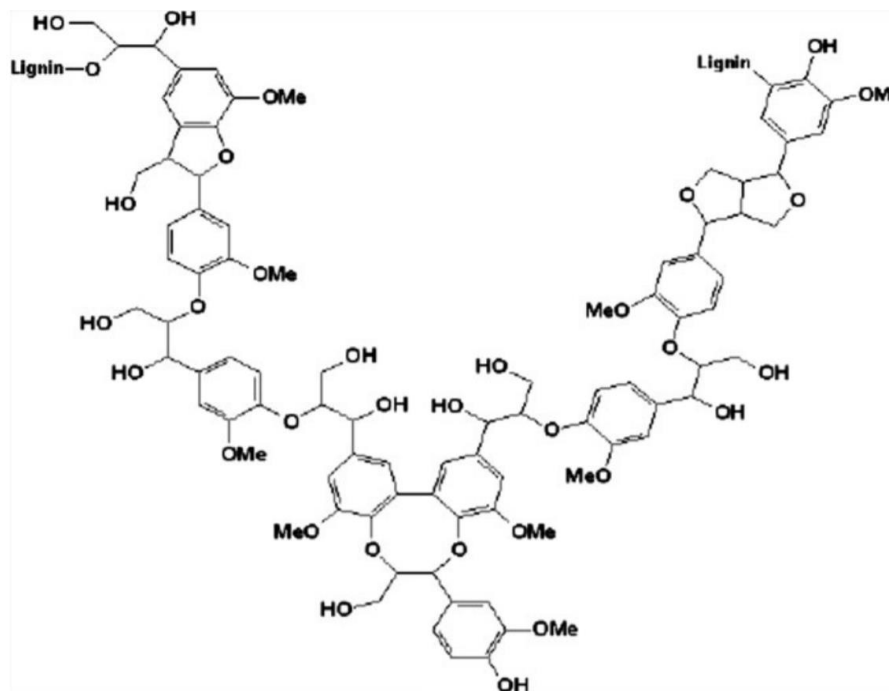
Fonte: Bajpai (2016).

4.3 Lignina

A lignina é o segundo polímero mais abundante na biomassa lignocelulósica após a celulose. A composição da lignina depende de sua origem vegetal. As ligninas de madeiras de fibras longas (coníferas), madeiras de fibras curtas (folhosas) e gramíneas possuem estruturas básicas muito diferente entre elas (Lino, 2015; Zoghلامي & Paes, 2019).

É um heteropolímero amorfo muito complexo de fenilpropanóides que é responsável pela hidrofobicidade e rigidez estrutural da parede celular, ligando a hemicelulose à celulose. É sabido que a lignina desempenha um papel negativo na conversão da celulose por vários fatores, como o teor total de lignina e a composição/estrutura da lignina. Em primeiro lugar, a lignina pode limitar fisicamente a acessibilidade dos polissacarídeos: ela representa uma barreira física que bloqueia o acesso das enzimas à celulose. Além disso, pode absorver irreversivelmente celulasas e outras enzimas durante a hidrólise enzimática devido a suas características estruturais hidrofóbicas, incluindo pontes de hidrogênio, grupos metoxi e estruturas poliaromáticas (Zoghلامي & Paes, 2019). A estrutura está representada na Figura 5.

Figura 5. Estrutura da lignina (polímero reticulado complexo de anéis aromáticos).



Fonte: Bajpai (2016).

5. Aproveitamento de Resíduos Agroindustriais

As indústrias que processam qualquer tipo de biomassa geram resíduos com características específicas, variando em volume, estado físico e composição. Mesmo sendo resíduos, esses materiais ainda são biodegradáveis, no entanto, geralmente precisam ser tratados antes do descarte final, a fim de evitar danos ambientais. A reciclagem desses resíduos, por razões econômicas ou ambientais, também pode valorizá-los como produtos. A biotecnologia e o bioprocessamento fornecem alternativas importantes para o uso de resíduos biodegradáveis como matéria-prima em novos processos, através da bioconversão de suas moléculas constituintes, que são uma rica fonte de energia, carbono e nutrientes para novos produtos (Woiciechowski et al., 2020).

Os resíduos e materiais lignocelulósicos podem ser usados como matéria prima para a produção de alimentos, combustíveis, insumos químicos, enzimas e bens de consumo diversos. Propriedades como o teor de lignina, acessibilidade da celulose a enzimas e microorganismos e o grau de cristalinidade da celulose determinam a digestibilidade total da biomassa e sua futura aplicabilidade. Alguns dos subprodutos da agropecuária, como bagaço e palha de cana de açúcar, arroz e trigo estão sendo utilizados biotecnologicamente na produção de produtos (Rodrigues et al. 2013).

Beltrán-Ramírez et al., (2019), expõem que outro mercado relevante relacionado aos produtos de resíduos agroindustriais está nos fitoquímicos com a extração de carotenoides, flavonoides e antocianinas, entre outros com potencial uso na indústria alimentar. Mesmo na indústria farmacêutica, os peptídeos bioativos são considerados um mercado em crescimento e representam uma solução potencial para tratamentos eficazes de doenças.

Os resíduos agroindustriais também podem ser utilizados para produção de bioplásticos (Hawas et al., 2015; Riça et al., 2017; Cecchini, 2017; Tripathi et al., 2019). As tendências indicam que a crescente sensibilização das pessoas pela substituição de plásticos por alternativas biodegradáveis e ambientalmente favoráveis permite o crescimento do mercado dos resíduos agroindustriais (Beltrán-Ramírez et al., 2019).

Outro mercado de importância são as enzimas comerciais, produzidas por microrganismos que utilizam resíduos agroindustriais como nutrientes indutores, que provaram ser uma opção viável quando comparadas as suas contrapartes químicas em diversos processos relacionados a laticínios, cervejas, vinhos e sucos, gorduras e óleos, panificação, detergentes, têxteis, couro, polpa e papel. O advento da tecnologia de fermentação, possibilitou a produção de enzimas em grandes quantidades e de forma bem caracterizada (Kapoor et al., 2016). Mas é importante destacar que os produtos biotecnológicos só podem competir com aqueles da indústria petroquímica quando os recursos de biomassa são processados através de sistemas otimizados em biorrefinarias (Santos et al., 2011).

5.1 Biorrefinaria

Biorrefinaria é uma unidade produtiva que integra geração de energia e produtos de valor agregado elevado obtidos a partir de biomassa, com pouco desperdício e emissões, trazendo novas oportunidades de ganho. O conceito de biorrefinaria é fundamentado na conversão integral de recursos renováveis como fonte de macromoléculas a exemplo da celulose, hemiceluloses, lignina, pectina, taninos, amido, colágeno, corantes naturais e outros constituintes químicos, em diferentes produtos intermediários ou finais, incluindo alimentos, produtos químicos, biomateriais e energia. Esse conceito preconiza ainda a minimização dos impactos ambientais negativos e maximização do uso do recurso renovável, considerando o ciclo de vida dos produtos obtidos, e melhorando a eficácia e sustentabilidade das cadeias agroindustriais (Fernando et al., 2006; Rosa et al., 2011).

Em seus estudos, Ree & Annevelink (2007) apontam a existência de sete tipos de biorrefinaria:

1. Biorrefinarias convencionais: de fato, muitas indústrias existentes já são uma espécie de biorrefinaria convencional (indústria açucareira, de amido, óleos vegetais, petroquímicas, indústrias convencionais de biocombustíveis (biodiesel, bioetanol, biogás, etc.). Essas indústrias usam tecnologias de conversão para separar a biomassa em alguns produtos principais e materiais residuais.
2. Biorrefinarias verdes: baseia-se na pressurização de biomassa úmida, como gramíneas e culturas verdes (lucerna, trevo), resultando em um bolo de prensa rica em fibras e suco de prensa rico em nutrientes. Esse conceito de biorrefinaria difere dos demais porque a biomassa fresca é processada.
3. Biorrefinarias de cereais: é baseada na moagem a seco ou úmida de biomassa. As matérias-primas são cereais, como: centeio, trigo e milho. O primeiro passo é a separação mecânica em uma fração de grãos e palha; onde a porção de grão é aproximadamente 20% em peso e a porção de palha é 80% em peso. Ambos os fluxos serão processados posteriormente separadamente. O grão vai entregar amido. O canudo (uma mistura de palha, nós, espigas e folhas) representa uma matéria-prima lignocelulósica e pode ser posteriormente processado na biorrefinaria de materiais lignocelulósicos.
4. Biorrefinarias de duas plataformas: é baseado no fracionamento da biomassa em principalmente um açúcar e uma fração de lignina. A fração de açúcar será bioquimicamente convertida em um portfólio de possíveis produtos biológicos, tais como: materiais, produtos químicos e combustíveis. A fração de lignina (e os resíduos do processo bioquímico) será convertida termoquimicamente para a produção de um espectro de produtos de base biológica, incluindo energia e/ou calor, para atender às necessidades internas de energia e calor do processo.
5. Biorrefinarias termoquímicas: várias tecnologias podem ser aplicadas, como: torrefação, pirólise, gaseificação e/ou utilização térmica hídrica (HTU). Um tipo específico de biorrefinaria termoquímica é usar a infraestrutura petroquímica baseada em óleo bruto já existente. A biomassa bruta e/ou os intermediários derivados da biomassa podem ser

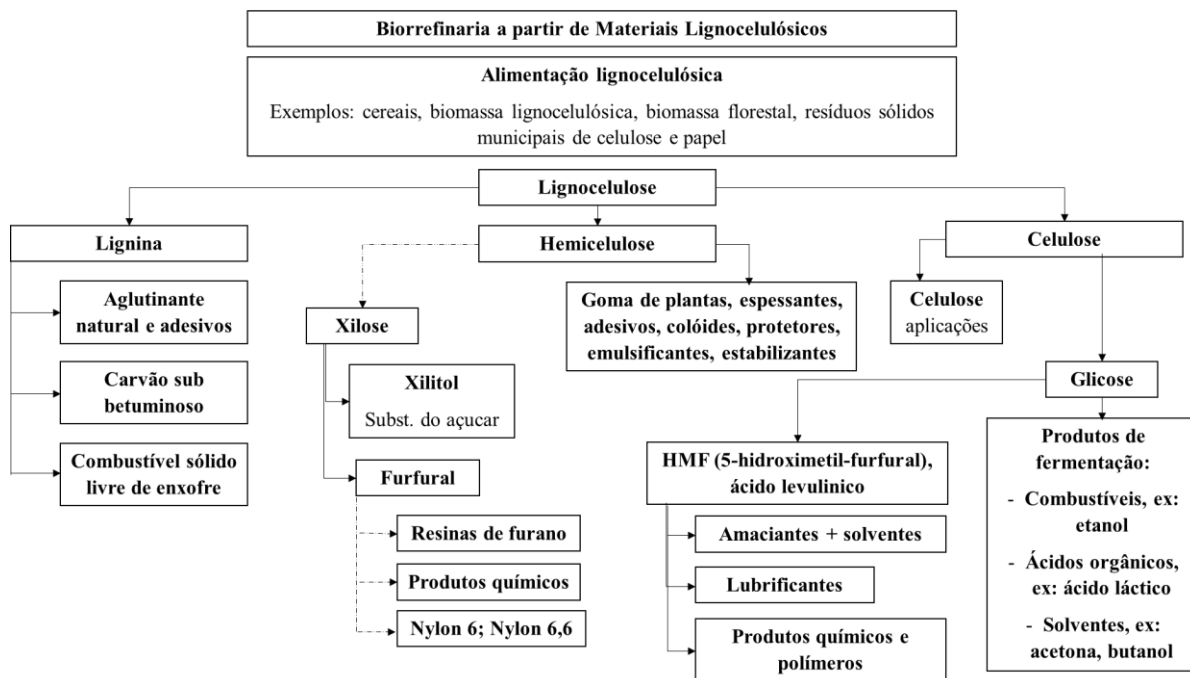
condicionados e, em seguida, introduzidos nessas infraestruturas, substituindo combustíveis fósseis e matérias-primas pelas fontes sustentáveis. Esse tipo de “modernização ecológica” das infraestruturas convencionais existentes resultará potencialmente na realização das primeiras biorrefinarias térmicas químicas reais no mercado.

6. Biorrefinarias aquáticas: O potencial técnico das culturas marinhas para a redução de gases de efeito estufa é reconhecido há muitos anos, devido à sua capacidade de usar CO₂ e a possibilidade de alcançar produtividades mais altas do que as culturas terrestres. A produção de biocombustível a partir dessas culturas marinhas, incluindo aspectos gerais de sustentabilidade, é um tópico crescente de discussão.
7. Biorrefinarias de material lignocelulósico: é baseado no fracionamento de fontes de biomassa ricas em materiais lignocelulósicos, que podem ser posteriormente processados em um portfólio de produtos finais de base biológica, materiais, produtos químicos, combustíveis e energia ou calor (Figura 6).

Zuin & Ramin (2018), expõem um modelo holístico de biorrefinaria que integra o ciclo de biomassa, biocombustível, biomateriais e bioenergia, baseado em tecnologias verdes e sustentáveis no âmbito da bioeconomia e economia circular. Geissdoerfer et al., (2017), definem a economia circular como um sistema regenerativo no qual a entrada de recursos e o desperdício, a emissão e o vazamento de energia são minimizados pela desaceleração, fechamento e estreitamento de loops de material e energia. Isso pode ser alcançado por meio de projeto, manutenção, reparo, reutilização, remanufatura, reforma e reciclagem de longa duração.

A biorrefinaria a partir de materiais lignocelulósicos usa um mix de fontes de biomassa para a produção de uma série de produtos por meio de uma combinação de tecnologias. Esta biorrefinaria consiste em três frações químicas básicas: hemicelulose, celulose e lignina (Santos et al., 2011).

Figura 6. Produtos potenciais obtidos na biorrefinaria de materiais lignocelulósicos.



Fonte: adaptado de Kamm et al. (2006).

Esses produtos de base biológica terão uma boa posição no mercado petroquímico tradicional. Espera-se que a biomassa rica em materiais lignocelulósicos se torne a fonte de biomassa mais importante, porque ficará amplamente disponível a custos moderados, e seu cultivo e uso competem menos com alimentos e forragens. Assim, no futuro, diferentes cadeias de valor de biomassa (alimentos, alimentos para animais, combustíveis e produtos químicos) serão amplamente ligadas (Ree & Annevelink, 2007).

6. Produção de Enzimas

As enzimas são proteínas que catalisam reações químicas com especificidade, e reduzindo o tempo de reação. Essas reações são a base do metabolismo de todos os organismos vivos. O uso industrial de enzimas se desenvolveu rapidamente devido a suas funções específicas (Vandenberghé et al., 2016). As moléculas de enzima são complexas demais para serem sintetizadas por meios puramente químicos e, portanto, a única maneira de fazê-las é utilizando organismos vivos. A fabricação de enzimas lida com a fermentação, onde processos enzimáticos geralmente são realizados em condições amenas (Vigneswaran et al., 2014). Com base na reação de catálise, as enzimas microbianas podem ser classificadas em seis tipos (Liu et al., 2017):

- Oxidoredutases: catalisam reações de oxidação/redução
- Transferases: transferem um grupo funcional
- Hidrolases: catalisam a hidrólise de várias ligações
- Lyases: clivam várias ligações por outros meios diferentes de hidrólise e oxidação
- Isomerases: catalisam alterações de isomerização dentro de uma única molécula
- Ligases: unem duas moléculas com ligações covalentes

As principais fontes de enzimas industriais são microrganismos. Atualmente, existem 510 enzimas microbianas utilizadas comercialmente. Das enzimas industriais, 75% são hidrolíticas (Vigneswaran et al., 2014; Liu et al., 2017). A primeira enzima produzida industrialmente foi a amilase takadiastase fúngica, empregada como agente farmacêutico nos Estados Unidos em 1894. Na década de 1950 foi observado um crescimento importante na produção de enzimas industriais e no uso de enzimas microbianas. Em 1969, 80% de todos os detergentes para roupas continha enzimas, principalmente proteases. Enzimas adicionais, como lipases, amilases, pectinases e oxidoredutases, foram experimentadas posteriormente na indústria de detergentes (Vandenberghe et al., 2016).

As enzimas mais utilizadas nas indústrias são as celulases, lacases, pectinases, xilanases, proteases, amilases e mananases (Tabela 2) (Kapoor et al., 2016).

Tabela 2. Principais enzimas industriais e suas aplicações comerciais.

Enzima	Aplicação industrial
Celulases	Biocombustíveis, celulose e papel, têxteis, alimentos e bebidas, detergentes e ração animal
Lacases	Biorremediação, conversão de lignocelulose, têxteis, biossensores, alimentos, produtos farmacêuticos, síntese orgânica e papel
Pectinases	Frutas e vinho, tratamento de águas residuais pécnicas, degomação de fibras vegetais, processamento têxtil e ração animal
Xilanases	Têxteis, alimentos, ração animal, panificação, bioconversão de lignoceluloses e celulose, papel, clarificação de mosto e sucos e liquefação de frutas e legumes
Proteases	Detergentes, fabricação de cerveja, carne, fotografia, laticínios, processamento de alimentos, couro, ração animal, papel e produtos farmacêuticos
Amilases	Hidrólise de amido, detergentes, panificação, biocombustíveis, produtos farmacêuticos e produtos químicos finos
Mananases	Ração, perfuração de petróleo e gás, branqueamento biológico de polpas de madeira macia, extração de óleo, clarificação de café, têxteis e produção de manooligossacarídeos prebióticos

Fonte: Kapoor et al. (2016).

As vendas de proteases representam mais de 60% de todas as vendas de enzimas industriais no mundo e ainda constituem o melhor segmento de produtos no mercado global de enzimas industriais. As amilases representam cerca de 30% da produção mundial de enzimas e as lipases representam o outro grande segmento de produtos do mercado (Liu et al., 2017).

As enzimas do complexo celulolítico são centrais para a transformação da biomassa e produção de etanol e bioprodutos. O alto custo destas enzimas, porém, apresenta um obstáculo significativo à comercialização (Brijwani et al., 2010). O uso de resíduos agroindustriais é uma estratégia interessante para a redução dos custos associados à formulação do meio de cultura dos microrganismos produtores de enzimas (Vandenberghe et al., 2016).

Os bioprocessos tradicionais utilizam açúcares refinados como fontes de carbono e sais contendo grupos nitrato ou amônio como fonte de nitrogênio, e alguns processos usando fontes indefinidas de nitrogênio, como extrato de levedura, peptona bacteriológica e extrato de carne bovina. Mais recente, buscando tornar os bioprocessos econômicos e encontrar fontes mais baratas de carbono, os materiais lignocelulósicos, como os resíduos

agroindustriais, vieram à tona, e da mesma forma, fontes mais baratas de nitrogênio, como licor de milho e uréia se destacam. Qualquer resíduo agrícola, se usado como um componente importante do meio de fermentação, pode reduzir o custo de produção já que a matéria prima para um bioprocessamento típico varia de 10% a 50% do custo total (Gopalan & Nampoothiri, 2016).

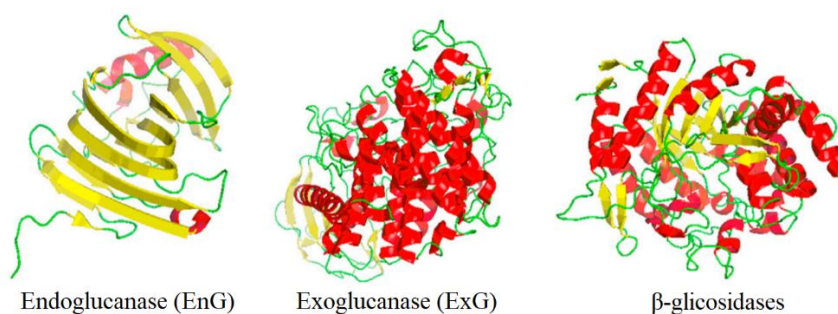
7. Enzimas Celulases

As enzimas do complexo celulolítico são hidrolases que clivam ligação O-glicosídicas, sendo classificadas pela Enzyme Commission (EC) com a codificação 3.2.1.x, onde o valor de x varia com a celulase avaliada (Castro & Pereira, 2010).

Na natureza, a hidrólise completa da celulose é mediada por uma combinação de três tipos principais de celulases, a estrutura pode ser observada na Figura 7 (Liu et al., 2017). A classificação das celulases, segundo Lynd et al., (2002) é de acordo com seu local de atuação no substrato celulósico:

- Endoglucanases (EnG), que clivam ligações internas da fibra celulósica
- Exoglucanases (ExG), que atuam na região externa da celulose
- β -glicosidases (BG), que hidrolisam oligossacarídeos solúveis em glicose.

Figura 7. Estrutura da celulase.



Fonte: adaptado de Liu et al. (2017).

A EnG, está classificada como EC 3.2.1.4, possui como nome sistemático, segundo a IUBMB – International Union of Biochemistry and Molecular Biology – 1,4- β -D-glucano-4-glucano-hidrolase. Esta enzima é responsável por iniciar a hidrólise do complexo celulolítico. Tal enzima hidrolisa aleatoriamente as regiões internas da estrutura amorfa da fibra celulósica,

liberando oligossacarídeos de diversos graus de polimerização (GP) e, conseqüentemente, novos terminais, sendo um redutor e um não redutor (Lynd et al., 2002).

O grupo das ExG é constituído por celobio-hidrolase (CBH) e glucano-hidrolase (GH) (Castro & Pereira 2010). Lynd et al., (2002) expõe que a CBH (EC 3.2.1.91) possui o nome sistemático 1,4- β -D-glucana-celobio-hidrolase. A CBH participa da hidrólise primária da fibra e é responsável pela amorfogênese, que é um fenômeno ainda não elucidado completamente, porém sabe-se que envolve uma ruptura física do substrato, acarretando na desestratificação das fibras, pelo aumento das regiões intersticiais. A amorfogênese promove aumentos na taxa de hidrólise da celulose, por tornar amorfas as regiões cristalinas do polímero, deixando-o mais exposto às celulasas. A GH (EC 3.2.1.74), cujo nome sistemático é 1,4- β -D-glucana-glucano-hidrolase, é pouco reportada, mas possui estratégia de hidrólise da fibra celulósica de elevada importância, pois é capaz de liberar glicose diretamente do polímero (Lynd et al., 2002).

O terceiro e último grande grupo de enzimas do complexo celulolítico engloba a BG, ou β -glicosídeo gluco-hidrolase (EC 3.2.1.21), que é seu nome sistemático. A BG tem a propriedade de hidrolisar celobiose e oligossacarídeos solúveis em glicose. É reportada com a característica de sofrer inibição por seu produto de hidrólise como a CBH (Lynd et al., 2002).

Quando atuam conjuntamente, as enzimas do complexo celulolítico apresentam um rendimento melhor do que a soma dos rendimentos individuais, ou seja, quando atuam isoladamente umas das outras (Lynd et al., 2002). Tal efeito é conhecido como sinergia. São conhecidas pelo menos três formas de sinergia entre as celulasas (Castro & Pereira 2010):

- Sinergia EnG-ExG, atuando nas regiões amorfas da fibra, disponibiliza terminais redutores e não redutores para atuação de CBH I e CBH II, respectivamente
- Sinergia ExG-ExG, CBH I e CBH II tem ação simultânea na hidrólise dos terminais redutores e não redutores liberados por ação da EnG
- Sinergia ExG-BG e EnG-BG, como seus produtos de hidrólise, ExG e EnG liberam celobiose e oligossacarídeos, respectivamente, que são substratos para a BG.

7.1 Aplicações de celulase nas indústrias

Desde o ano 1997, Bhat & Bhat mencionavam que as celulasas possuem grande importância econômica, podendo ser aplicadas em uma ampla variedade de atividades industriais. Desde a década passada, a celulase é a terceira enzima mais utilizada na indústria

em vários processos, atrás apenas das proteases e amilases, e é a segunda maior enzima industrial em volume de dólar, cuja demanda está aumentando por aplicações industriais, como indústria de detergentes, têxtil, de processamento de papel, de ração animal, de suco de frutas, alimentos e bebidas, biocombustíveis (Bajaj & Mahajan, 2019; Patel et al., 2019; Kapoor et al., 2016). Na Tabela 3 pode-se observar as principais aplicações da celulase nas indústrias.

As celulases são enzimas induzíveis sintetizadas por uma grande diversidade de microrganismos, incluindo fungos e bactérias, durante seu crescimento em materiais celulósicos (Liu et al., 2017). Apenas um número limitado de organismos tem a capacidade de realizar decomposição completa da celulose devido à recalcitrância de suas ligações glicosídicas, exigindo uma enzima celulase complexa, composta por diferentes componentes que atuam em sinergia, de modo a hidrolisar completamente o polissacarídeo (Patel et al., 2019).

A enzima celulase pode ser produzida por fermentação sólida ou submersa. Mas a maioria das empresas optaram pela fermentação submersa em lotes alimentados para produzir celulase de baixo custo (Zhang et al, 2013). Prevê-se que a celulase será a enzima industrial de maior volume caso o etanol da biomassa lignocelulósica produzido via hidrólise enzimática se torne um importante combustível de transporte. O potencial comercial do uso de celulases para este fim reside em sua eficiência na conversão de biomassa lignocelulósica em glicose que pode ser utilizada para gerar uma série de produtos de valor agregado (Patel et al., 2019).

Tabela 3. Aplicações de celulase em indústrias.

Indústria	Função	Aplicação
Alimentos	Hidrólise de componentes da parede celular; diminuindo a viscosidade e mantendo a textura do suco de frutas	Extração de suco de frutas; alteração das propriedades sensoriais de frutas, legumes, óleo de azeitonas e sopas; redução da deterioração dos alimentos; extração de pigmentos aplicáveis como corantes naturais de alimentos
Ração animal	Pré-tratamento de silagem agrícola e ração de grãos para hidrólise parcial de materiais lignocelulósicos	Melhoria na qualidade nutricional de alimentação animal; melhoria na digestibilidade dos alimentos; ganho de peso de frangos de corte e galinhas; diminuição da colonização de bactérias patogênicas no intestino grosso
Cerveja e vinho	Hidrólise de polissacarídeos da parede celular de plantas; modificação de resíduos aromáticos	Melhoria na maceração da pele e extração de cor das uvas, qualidade, estabilidade e clarificação e aroma dos vinhos
Têxteis, lavanderia e detergentes	Atua no tecido de algodão e rompimento das pequenas extremidades da fibra no tecido de algodão, soltando o corantes após a lavagem	Produção de tecidos de alta qualidade; prevenção ou remoção permanente de formação de pelos e bolinhas. Aumenta a eficiência na limpeza de manchas e no cuidado de tecidos, remoção de sangue, proteínas, mucosas, gorduras, lípidos e carboidratos.
Polpa e papel	Polpação mecânica, biodificação de fibras, remoção de revestimentos de tinta e toners de papel	Aumenta a resistência à tração e as altas qualidades das fibras, reduz o consumo de energia, melhora a drenagem das fábricas de papel e a fabricação de papéis.
Agricultura	Solubilização de paredes celulares de plantas ou fungos; inibição da germinação de esporos e crescimento de fungos	Produção de protoplastos vegetais ou fúngicos, linhagens híbridas e mutantes, fertilidade do solo, crescimento das plantas
Biocombustíveis	Conversão de material celulósico em glicose e outros açúcares fermentáveis	Produção de proteínas unicelulares ou produtos de fermentação como etanol
Farmacêuticas	Digestão de fibra de celulose	Preparação de digestina, hidrólise rápida de celulase; degradação das paredes celulares de organismos patogênicos
Gestão de resíduos	Degradação de resíduos celulósicos	Redução da poluição ambiental

Fonte: Behera et al. (2016); Jayasekara & Ratnayake (2019).

7.2 Microrganismos produtores de celulases

As enzimas microbianas costumam ser mais úteis do que as enzimas de plantas e animais devido à grande variedade de atividades catalíticas disponíveis, maiores rendimentos, possível facilidade de manipulação genética e rápido crescimento de microrganismos nos meios econômicos. As enzimas microbianas também são mais estáveis do que as correspondentes enzimas vegetais e animais e sua produção é relativamente mais conveniente e segura (Kasana & Gulati, 2011).

As celulases são enzimas induzíveis, sintetizadas por uma grande diversidade de microrganismos, incluindo fungos e bactérias durante seu crescimento em materiais celulósicos. Esses microrganismos podem ser aeróbios, anaeróbicos, mesófilicos, termofílicos ou psicrófilos (Kuhad et al., 2011). Na Tabela 4 são apresentados alguns microrganismos capazes de produzir celulase.

As fontes microbianas comuns de celulases para produção em escala industrial são microrganismos mesófilos cultivados na faixa de temperaturas de 30 – 35°C. No entanto, as enzimas produzidas por organismos termófilos crescidos nas faixas de 50 – 90°C são mais vantajosas para processos industriais severos, têm taxas de reação mais rápidas e são menos propensas à contaminação. Também, microrganismos psicrófilos (crescidos na faixa de 0 – 20°C) são os candidatos ideais para a produção de enzimas ativas a baixa temperatura, que são muito procurados como aditivos para a roupa já que a indústria de detergentes está agora focada nas celulases para temperaturas de lavagem mais baixas e redução no consumo de água. Dessa forma, dependendo do produto desejado, um produtor microbiano apropriado de enzimas hidrolíticas pode ser selecionado a partir da ampla variedade disponível na natureza (Watanabe & Tokuda, 2001; Kasana & Gulati, 2011).

Os microrganismos produzem as celulases dentro de suas células (enzimas intracelulares) e também podem secretar as enzimas para ação fora da célula (extracelulares). Os microrganismos são geralmente cultivados em grandes câmaras de fermentação sob condições controladas para maximizar a produção de enzimas. As enzimas são acumuladas no interior das células ou são secretadas no meio dos tanques de fermentação. Nas etapas subsequentes, as células rompidas ou o meio incluindo as enzimas são sujeitas a processos de purificação adicionais usando várias técnicas químicas, mecânicas e térmicas (Vigneswaran et al., 2014).

Tabela 4. Microrganismos produtores de celulase.

Fungos	<i>Aspergillus niger</i> ; <i>A. nidulans</i> ; <i>A. oryzae</i> ; <i>A. terreus</i> ; <i>Fusarium solani</i> ; <i>F. oxysporum</i> ; <i>Hemicola insolens</i> ; <i>H. grisea</i> ; <i>Melanocarpus albomyces</i> ; <i>Penicillium brasilianum</i> ; <i>P. occitanis</i> ; <i>P. decumbans</i> ; <i>Trichoderma reesei</i> ; <i>T. longibrachiatum</i> ; <i>T. harzianum</i> ; <i>Chaetomium cellulyticum</i> ; <i>C. thermophilum</i> ; <i>Neurospora crassa</i> ; <i>P. fumigosum</i> ; <i>Thermoascus aurantiacus</i> <i>Mucor circinelloides</i> ; <i>P. janthinellum</i> ; <i>Paecilomyces inflatus</i> ; <i>P. echinulatum</i> ; <i>Trichoderma atroviride</i> <i>Coniophora puteana</i> ; <i>Lanzites trabeum</i> ; <i>Poria placenta</i> ; <i>Tyromyces palustris</i> ; <i>Fomitopsis</i> sp. <i>Phanerochaete chrysosporium</i> ; <i>Sporotrichum thermophile</i> ; <i>Trametes versicolor</i> ; <i>Agaricus arvensis</i> ; <i>Pleurotus ostreatus</i> ; <i>Phlebia gigantean</i>
Bactérias	Aeróbicas <i>Acinetobacter junii</i> ; <i>A. amitatus</i> ; <i>Acidothermus cellulolyticus</i> ; <i>Anoxybacillus</i> sp.; <i>Bacillus subtilis</i> ; <i>B. pumilus</i> ; <i>B. amyloliquefaciens</i> ; <i>B. licheniformis</i> ; <i>B. circulan</i> ; <i>B. flexus</i> ; <i>Cellulomonas biazotea</i> ; <i>Cellvibrio gilvus</i> ; <i>Eubacterium cellulosolvens</i> ; <i>Geobacillus</i> sp.; <i>Microbispora bispora</i> ; <i>Paenibacillus curdlanolyticus</i> ; <i>Pseudomonas cellulosa</i> ; <i>Salinivibrio</i> sp. Anaeróbicas <i>Acetivibrio cellulolyticus</i> ; <i>Butyrivibrio fibrisolvens</i> ; <i>Clostridium thermocellum</i> ; <i>C. cellulolyticum</i> ; <i>C. acetobutylium</i> ; <i>C. papyrosolvens</i> ; <i>Fibrobacter succinogenes</i> ; <i>Ruminococcus albus</i>
Actinomicetes	<i>Cellulomonas fimi</i> ; <i>C. bioazotea</i> ; <i>C. uda</i> ; <i>Streptomyces drozdowiczii</i> ; <i>S. lividans</i> ; <i>Thermomonospora fusca</i> ; <i>T. curvata</i>

Fonte: Kuhad et al. (2011).

A definição da composição do meio de crescimento dos microrganismos pode afetar significativamente no rendimento e na produtividade das enzimas e é de importância central no desenvolvimento de bioprocessos industriais. O uso de resíduos agroindustriais é uma estratégia interessante para a redução dos custos associados à formulação do meio de cultura (Vandenberghe et al., 2016). Bagaço de cana, palha de arroz, palha de trigo, farelo de trigo, palha de milho, fibra de coco, casca de arroz, casca de laranja e fibra de coco são só alguns resíduos agroindustriais estudados e utilizados para produção de celulase por diversos microrganismos (Sadhu et al., 2013; Meng et al., 2014; Ladeira et al., 2014; Kazeem et al., 2017; Aita et al., 2019). Na Tabela 5 são apresentados estudos de produção de celulase por vários microrganismos utilizando resíduos agroindústrias como fonte de carbono.

Tabela 5. Produção de celulase por diversos microrganismos utilizando resíduos agroindustriais como fonte de carbono.

Resíduo agroindustrial	Microrganismo	Autor
Fibra de coco	<i>Aspergillus niger</i>	Mrudula, 2011
Casca de laranja, bagaço de cana	<i>Bacillus</i> sp.	Sadhu et al., 2013
Palha de trigo e farelo de arroz	<i>Bacillus</i> sp. H1666	Harshvardhan et al., 2013
Palha de milho	<i>Bacillus subtilis</i> BY-3	Meng et al., 2014
Bagaço de cana e milho	<i>Bacillus</i> sp.	Ladeira et al., 2014
Bagaço de cana	<i>Bacillus vallismortis</i> RG07	Gaur et al., 2015
Farelo de milho	<i>Bacillus</i> sp. TMF-1	Salim et al., 2016
Casca de arroz	<i>Bacillus Licheniformis</i> 2D55	Kazeem et al., 2017
Alfafa palha	<i>Bacillus sonorensis</i>	Azadian et al., 2017
Casca de batata	<i>Bacillus subtilis</i> K18	Irfan et al., 2017
Bagaço de cana	<i>Paenibacillus polymyxa</i> ND24	Bohra et al., 2018
Resíduo de álamo	<i>Bacillus cereus</i>	Tabssum et al., 2018
Bagaço de cana	<i>Metarhizium anisopliae</i> IBCB 348	Aita et al., 2019
Farelo de arroz	<i>Bacillus halodurans</i> CAS1	Annamalai et al., 2019

Fonte: Autores.

8. Considerações Finais

As agroindústrias geram grandes quantidades de resíduos que podem causar problemas ambientais e aumentar os custos nos processos de produção. Existe uma necessidade urgente de mudar a percepção em relação aos resíduos agrícolas, pois eles podem ser utilizados como matéria prima de baixo custo para a produção sustentável de vários produtos. A demanda do mercado por enzimas industriais está aumentando, sendo necessária a busca de fontes de enzimas com diferentes funcionalidades. Assim, muitos laboratórios industriais e acadêmicos estão estudando e implementando a utilização de resíduos agroindustriais como substratos econômicos para a produção de enzimas, entre elas, a celulase, que pode ser utilizada em diversos processos industriais. Para futuras pesquisas, recomenda-se abordar na produção de celulase testando resíduos agroindustriais específicos e identificar os microrganismos de melhor atuação com os quais poderia se-obter a produção

mais eficiente. Estes estudos contribuem no desenvolvimento de tecnologias verdes e a implementação do conceito de economia circular nas agroindústrias.

Referências

ABIB – Associação Brasileira das Indústrias de Biomassa e Energia Renovável. Atlas Brasileiro Biomassa e Energia. (2016). Curitiba, Paraná. Retrieved Jan 27, 2020, from <https://es.calameo.com/read/0008953904f21ebb5e908>

Aita, B., Spannemberg, S., Schmaltz, S., Zobot, G., Tres, M., Kuhn, R., Mazutti, M. (2019). Production of cell-wall degrading enzymes by solid-state fermentation using agroindustrial residues as substrates. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(3). doi.org/10.1016/j.jece.2019.103193

Anwar, Z., Gulfraz, M., Irshad, M. (2015). Agro-industrial lignocellulosic biomass a key to unlock the future of bio-energy: a brief review. *Journal of radiation research and applied sciences*, 7(2), 163 – 173. doi 10.1016/j.jrras.2014.02.003

Azadian, F., Badoei-Dalfard, A., Namaki-Shoushtari, A., Karami, Z., Hassanshahian, M. (2017). Production and characterization of an acido-thermophilic, organic solvent stable cellulase from *Bacillus sonorensis* HSC7 by conversion of lignocellulosic wastes. *Journal of genetic engineering and biotechnology*, 15, 187 – 196. doi: doi.org/10.1016/j.jgeb.2016.12.005

Bajaj, P., & Mahajan, R. (2019) Cellulase and xylanase synergism in industrial biotechnology. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 103, 8711 – 8724. doi: 10.1007/s00253-019-10146-0

Bajpai, p. (2016). Pretreatment of lignocellulosic biomass for biofuel production. *Green Chemistry for Sustainability. Springerbriefs in molecular science*, 7-12. doi: 10.1007/978-981-10-0687-6_2

Behera, B., Sethi B., Mishra, R., Dutta, S., Thatoi, H. (2017) Microbial cellulases – Diversity and biotechnology with reference to mangrove environment: a review. *Journal of Genetic Engineering and Biotechnology*, 15(1), 197 – 210. doi: 10.1016/j.jgeb.2016.12.001

Bevilaqua, D. 2010. Produção de ácido levulínico por meio de hidrólise ácida da casca de arroz. Santa maria, 2010. 87 f. Dissertação (mestrado em química) – centro de ciências naturais e exatas, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS

Bhat, M. & Bhat, S. (1997) Cellulose degrading enzymes and their potencial industrial applications. *Biotechnology advances*, 15(3-4), 583-620. doi: 10.1016/s0734-9750(97)00006-2

Biswas, R., Persad, A., Bisaria, V. (2014). Production of cellulolytic enzymes. *Bioprocessing of renewable resources to commodity bioproducts*, 105-132. doi: 10.1002/9781118845394.ch5

Boechat, A. (2010). Produção de celulases pelo microrganismo termofílico *Bacillus* sp SMIA-E. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Campos dos Goytacazes-RJ.72 p.

Brijwani, K., & Vadlani, P. (2011). Cellulolytic enzymes production via solid-state fermentation: effect of pretreatment methods on physicochemical characteristics of substrate. *Enzyme research*, 2011, 10. doi: doi.org/10.4061/2011/860134

Castro, A., & Pereira, N. (2010). Produção, propriedade e aplicação de celulases na hidrólise de resíduos agroindustriais. *Quimica nova*, 33(1), 181-188. doi: doi.org/10.1590/S0100-40422010000100031

Cecchini, C. (2017). Bioplastics made from upcycled food waste. Prospects for their use in the field of design. *The design journal*, 20, 1596 – 1610. doi: doi.org/10.1080/14606925.2017.1352684

Fernando, S., Adhikari, S., Chandrapal, C., & Murali, N. (2006). Biorefineries: current status, challenges, and future direction. *Energy & Fuels*, 20(4), 1727-1737. doi: doi.org/10.1021/ef060097w

Gaur, R., & Tiwari, S. (2015). Isolation, production, purification and characterization of an organic-solvent-thermostable alkalophilic cellulase from *B. vallismortis* RG07. *BMC Biotechnology*, 15, 19(2015), 1 – 12. doi: doi.org/10.1186/s12896-015-0129-9

Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N., Hultink, E. (2017). The circular economy – a new sustainability paradigm? *Journal of cleaner production*, 143, 757 – 768. doi: [10.1016/j.jclepro.2016.12.048](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048)

Gopalan, N., & Nampoothiri, K. (2016). Biotechnological production of enzymes using agro-industrial wastes: economic considerations, commercialization potential and future prospects. *Agro-industrial wastes as feedstock for enzymes production*. Chapter 14, 313 – 330.

Harshvardhan, K., Mishra, A., & Jha, B. (2013). Purification and characterization of cellulase from a marine *Bacillus* sp. H1666: a potential agent for single step saccharification of seaweed biomass. *Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic*, 93, 51 – 56. doi: doi.org/10.1016/j.molcatb.2013.04.009

Hawas, J. M., Banna, T., Belal, E., Azir, A. (2016). Production of bioplastic from some selected bacterial strains. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*. 5 (1), 10 – 22. Retrieved from <https://www.ijcmas.com/>

Isikgor, F. & Becer, R. (2016). Lignocellulosic biomass: a sustainable platform for the production of bio-based chemicals and polymers. *Polymer Chemistry*, 6 (25), 4497 – 4559. doi: doi.org/10.1039/C5PY00263J

Jayasekara, S., & Ratnayake, R. (2019). Microbial cellulases: an overview and applications. *Cellulose*, 22. doi: [10.5772/intechopen.84531](https://doi.org/10.5772/intechopen.84531)

Kamm, B., Gruber, P., & Kamm, M. (2010). Biorefineries – industrial processes and products: status quo and future directions, 949 p. Retrieved from <https://www.wiley.com/en->

py/Biorefineries+Industrial+Processes+and+Products:+Status+Quo+and+Future+Directions-
p-9783527329533

Kapoor, M., Panwar, D., Kaira, G. (2016). Bioprocesses for enzyme production using agro-wastes: technical challenges and commercialization potential. *Agroindustrial wastes as feedstock for enzymes production*. Chapter 3, 61 – 93.

Kasana, R., & Gulati, A. (2011). Cellulases from psychrophilic microorganisms: a review. *Journal of Basic Microbiology*, 51 (6), 572 – 579. doi: doi.org/10.1002/jobm.201000385

Kazeem, M., Shah, U., Baharuddi, A., Rahman, N. (2017). Prospecting agro-waste cocktail: supplementation for cellulase production by a newly isolated thermophilic *B. liccheniformis* 2D55. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 182, 1318 – 1340. doi: [10.1007/s12010-017-2401-z](https://doi.org/10.1007/s12010-017-2401-z)

Ladeira, S., Cruz, E., DelaTorre, A., Barbosa, J., Martins, M. (2015). Cellulase production by thermophilic *Bacillus* sp. SMIA-2 and its detergent compatibility. *Electronic Journal of Biotechnology*, 18 (2), 110 – 115. doi: doi.org/10.1016/j.ejbt.2014.12.008

Leistriz, L., Hodur, N., Senechal, D., Stowers, M.; McCalla, D., Saffron, C. (2007). Biorefineries using agricultural residue feedstock in the great plains, North Dakota State University, Department of Agribusiness and Applied Economics, Statistical Series Report. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/23514732_Biorefineries_Using_Agricultural_Residue_Feedstock_In_The_Great_Plains

Lino, A. G. (2015) Composição química e estrutural da lignina e lípidos do bagaço e palha da cana de açúcar. Tesse (doutorado em agroquímica). Universidade Federal de Viçosa, MG.

Liu, X., & Kokare, C. (2017). Microbial enzymes of use in industry. *Biotechnology of microbial enzymes: Production, biocatalysis and industrial applications*, 267 – 298. doi: [10.1016/B978-0-12-803725-6.00011-X](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803725-6.00011-X)

Lynd, L., Weimer, P., Zyl, W., & Pretorius, I. (2002). Microbial cellulose utilization: fundamentals and biotechnology. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 66, (3), 505 – 577. doi: 10.1128/MMBR.66.3.506-577.2002

Marco, E., Heck, K., Martos, E., Van der Sand, S. (2017). Purification and characterization of a thermostable alkaline cellulase produced by *B. licheniformis* 308 isolated from compost. *Anais da academia brasileira de ciencias*, 89 (3), 2359 – 2370. doi.org/10.1590/0001-3765201720170408.

Meng, F., Ma, L., Ji, S., Yang, W., Cao, B. (2014). Isolation and characterization of *Bacillus subtilis* strain BY-3, a thermophilic and efficient cellulose producing bacterium on untreated plant biomass. 2014. *Letters in applied microbiology*, 59 (3), 306-312. doi: 10.1111/lam.12276

Merino, S. & Cherry, J. (2007). Progress and challenges in enzyme development for biomass utilization. *Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology*, 108, 95–120. doi.org/10.1007/10_2007_066

Monteiro, V., & Silva, R. (2009) Aplicações industriais da biotecnologia enzimática. *Revista processos químicos*, 3 (5), 10 – 23. doi: 10.19142/rpq.v3i5.83

Mrudula, S. & Murugammal, R. (2011). Production of cellulose by *Aspergillus niger* under submerged and solid state fermentation using coir waste as a substrate. *Brazilian journal of microbiology*, 42 (3), 1119-1127. doi: 10.1590/S1517-838220110003000033

Nascimento, W. & Franco, C. (2015). Avaliação do potencial dos resíduos produzidos através do processamento agroindustrial no Brasil. *Revista virtual de química*, 7 (6), 1968 – 1987. doi: 10.5935/1984-6835.20150116

Patel, A., Singhanian, R., Sim, S., Pandey, A. (2019). Thermostable cellulases: current status and perspectives. *Bioresour. Technol.*, 279, 385 – 392. doi: 10.1016/j.biortech.2019.01.049

Pedroso, L., Silva, F., Melo, A., Junior, M., Shimoya, A. (2018). Demandas atuais e futuras da biomassa e da energia renovável no Brasil e no mundo. *Brazilian Journal of Development*, 4, (5), 1980 – 1996. Retrieved from: <https://www.brazilianjournals.com/index.php/BRJD/article/view/231/192>

Penha, E., Viana, L., Gottsechalk, L., Terzi, S., Souza, E., Cordeiro, S., Santos, J., Salum, T. (2016). Aproveitamento de resíduos da agroindústria do óleo de dendê para a produção de lipase por *Aspergillus niger*. *Ciência rural*, 46 (4), 755-761. <http://dx.doi.org/10.1590/0103-8478cr20131673>

Premalatha, N., Gopal, N. O., Jose, P. A., Anandham, R., Kwon, S. (2015). Optimization of cellulase production by *Enhydrobacter* sp. ACCA2 and its application in biomass saccharification. *Frontiers in Microbiology*, 6 (10). doi: 10.3389/fmicb.2015.01046

Prodanov, C. C. & Freitas, E. C. (2013). Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico. Novo Hamburgo-RS: Feevale. 2da edição. Retrieved from: <http://www.feevale.br/Comum/midias/8807f05a-14d0-4d5b-b1ad-1538f3aef538/E-book%20Metodologia%20do%20Trabalho%20Cientifico.pdf>

Ramírez, F., Tamayo, D., Corona, I., Cervantes, J., Claudio, J., Rodríguez, E. (2019). Agro-industrial waste revalorization: the growing biorefinery. *Biomass for bioenergy – recent trends and future challenge*. doi: 10.5772/intechopen.83569

Ramos, L. (2003) The chemistry involved in the steam treatment of lignocellulosic materials. *Química nova*, 26 (6), 863 – 871. doi.org/10.1590/S0100-40422003000600015

Ree, R., V., & Annevelink, E. (2007). Status report biorefinery. Agrotechnology & Food Sciences Group. Wageningen university & research e-depot. Retrieved from: <https://research.wur.nl/en/publications/status-report-biorefinery-2007>

Riça, L., Moraes, L., Souza, D., Souza, R., Muller, M. (2016). Aproveitamento de torta do tabaco gerado na produção de biodiesel para a obtenção de bioplásticos. *Revista Jovens Pesquisadores*, 6, (2). doi.org/10.17058/rjp.v6i2.7523.

Rodrigues, C., Lorenci A., Letti, L. (2013). Biotecnologia aplicada à agroindústria. Materiais lignocelulósicos como matéria prima para a obtenção de biomoléculas de valor comercial, 4. Retrieved from: <http://pdf.blucher.com.br.s3-sa-east-1.amazonaws.com/openaccess/9788521211150/completo.pdf>

Rosa, M., Souza, M., Figueiredo, M., Morais, J., Santaella, S., Leitão, R. (2011). Valorização de resíduos da agroindústria. II Simpósio Internacional sobre Gerenciamento de Resíduos Agropecuários e Agroindustriais, 1. Retrieved from: https://www.researchgate.net/publication/259850615_ValORIZACAO_DE_RESIDUOS_DA_AGROINDUSTRIA

Sadhu, S., Saha, P., Sem, S., Mayilraj, S., Maiti, T. (2013). Production, purification and characterization of a novel thermotolerant endoglucanase from *Bacillus* strain isolated from cow dung. Springerplus, 2 (10). doi: 10.1186/2193-1801-2-10

Salim, A., Grbavcic, S., Sekuljica, N., Stefanovic, A., Tanaskovic, S., Lukovic, N., Jugovic, Z. (2016) Production of enzymes by a newly isolated *Bacillus* sp. TMF-1 in solid-state fermentation on agricultural by-products: the evaluation of substrate pretreatment methods. Bioresource Technology, 228, 193 – 200. doi: 10.1016/j.biortech.2016.12.081

Santos, M., Borshiver, S., Couto, M. (2011). Iniciativas para o uso da biomassa lignocelulósica em biorrefinarias: a plataforma sucroquímica no mundo e no Brasil. Economia e Energia, 15 (82). Retrieved from: https://ecen.com/eee82/eee82p/revistae82p_empdf.pdf

Shaiki, N., Patel, A., Mehta, S., Patel N. (2013). Isolation and screening of cellulolytic bacteria inhabiting different environment and optimization of cellulase production. Universal Journal of Environmental Research and Technology, 3 (1), 39 – 49. Retrieved from: <http://www.environmentaljournal.org/3-1/ujert-3-1-4.pdf>

Silva, I., Lima, R., Ruzene, D., Silva, D da. (2019). Resíduos agroindustriais como biomassa alternativa para geração de energia distribuída em comunidades rurais. Energias alternativas: tecnologias sustentáveis para o nordeste brasileiro. Aracaju: associação acadêmica de propriedade intelectual, 189 – 211. Retrieved from: <https://ri.ufs.br/jspui/handle/riufs/12607>

Singh, R., Kumar, M., Mittal, A., Mehta, P. (2016). Microbial enzymes: industrial progress in 21st century. 3 Biotech, 6 (2), 174. doi: 10.1007/s13205-016-0485-8

Sukumaran, R., Singhanian, R., Pandey, A. (2005). Microbial cellulases: production, application and challenges. Journal of Scientific and Industrial Research, 64 (11), 832 – 844. Retrieved from: https://www.researchgate.net/publication/228635285_Microbial_cellulases-Production_applications_and_challenges

Thomas, L., Ram, H., Kumar, A., Singh, V. (2016). Production, optimization and characterization of organic solvent tolerant cellulases from lignocellulosic waste-degrading *Actinobacterium, promicromonospora* sp. VP111. Applied biochemistry and biotechnology, 179, 863 – 879. doi: 10.1007/s12010-016-2036-5

Tipathi, A., Yadav, A., Jha, A., Srivastava, S. Utilizing of sugar refinery waste (Cane Molasses) for production of bio-plastic under submerged fermentation process. Journal of Polymers and the Environment, 20 (2), 446 – 453. doi: 10.1007/s10924-011-0394-1

Trivedi, N., Gupta, V., Kumar, M., Kumari, P., Reddy, C., Jha, B. (2011). An alkali-halotolerant cellulase from *Bacillus flexus* isolated from green seaweed *Ulva lactuca*. Carbohydrate polymers. 83 (2), 891 – 897. doi: 10.1016/j.carbpol.2010.08.069

Tu, W. C. & Hallet, J. P. (2019). Recent advances in the pretreatment of lignocellulosic biomass. Current opinion in green and sustainable chemistry, 20, 11 – 17. doi.org/10.1016/j.cogsc.2019.07.004

Vandenberghe, L., Carvalho, J. C., Libardi, N., Rodrigues, C., Soccol, C. (2016). Microbial enzyme factories: current trends in production processes and commercial aspects. Agro-industrial wastes as feedstock for enzymes production, chapter 1, 1 – 22.

Vigneswaran, C., Ananthasubramanian, M., Kandhavadi, P. (2014). Industrial enzymes. Bioprocessing of textiles. Fundamentals for applications and research perspective, chapter 2, p 23 – 52.

Watanabe, H., & Tokuda, G. (2011). Animal cellulases. *Cellular and molecular life sciences*, 58 (9), 1167 – 1178. doi: 10.1007/PL00000931

Woiciechowski, A., Neto, C., Vandenberghe, L., Neto, D., Sydney, A., Letti, L., Karp, S., Torres, L., Soccol, C. (2020). Lignocellulosic biomass: acid and alkaline pretreatments and their effects on biomass recalcitrance – conventional processing and recent advances. *Bioresourse technology*, 304. doi: 10.1016/j.biortech.2020.122848.

Zhang, X., & Zhang, Y. (2020). Cellulases: characteristics, sources, production and applications. *Bioprocessing technologies in biorefinery for sustainable production of fuels, chemicals and polymers*, 1, 131 – 146. Retrieved from: https://bioenergycenter.org/besc/publications/Zhang_cellulases_yr7.pdf

Zoghلامي, A., & Paes, G. (2018). Lignocellulosic biomass: understanding recalcitrance and predicting hydrolysis. *Frontiers in Chemistry Chemical and Process Engineering*, 7. doi: 10.3389/fchem.2019.00874

Zuin, V., & Ramin, L. (2018). Green and sustainable separation of natural products from agro-industrial waste: challenge, potentialities and perspectives on emerging approaches. *Topics in Current Chemistry*, 376 (3). doi.org/10.1007/s41061-017-0182-z

Porcentagem de contribuição de cada autor no manuscrito

Analyse Villanueva Gaete – 60%

Carlos Eduardo de Souza Teodoro – 30%

Ana Paula Martinazzo – 10%