



Latin American Journal of Energy Research – Lajer (2023) v. 10, n. 1, pp. 67–76
<https://doi.org/10.21712/lajer.2023.v10.n1.p67-76>

Revisão acerca de biorrefinarias com base lignocelulósica: aspectos atuais *Review of lignocellulosic-based biorefineries: current aspects*

Eneida Andrade Cardoso^{1*}, Vitor Almeida de Novaes Galvão², Vivian Lima dos Santos¹,
Manuela Lisboa de Oliveira³, Ronaldo Costa Santos⁴, Luiz Antônio Magalhães Pontes⁵

¹ Graduada em Engenharia Química, no Centro Universitário Jorge Amado - Unijorge, campus Salvador, BA, Brasil

² Graduando do curso de Engenharia Química, na Universidade Federal da Bahia - UFBA, campus Salvador, BA, Brasil

³ Doutoranda do curso de Engenharia Química, na Universidade Federal da Bahia - UFBA, campus Salvador, BA, Brasil

⁴ Docente nas disciplinas do curso de Engenharia, no Centro Universitário Jorge Amado - Unijorge, campus Salvador, BA, Brasil

⁵ Docente nas disciplinas do curso de Engenharia Química, na Universidade Federal da Bahia - UFBA, campus Salvador, BA, Brasil

*Autor para correspondência, E-mail: eneidaac@gmail.com

Received: 24 January 2023 | Accepted: 9 March 2023 | Published online: 10 June 2023

Resumo: A atual dependência dos combustíveis fósseis contribui com a poluição atmosférica, prejudicando a saúde humana e o meio ambiente, sendo assim primordial a busca de novas iniciativas para suprir a crescente demanda energética. A fim de contornar esta problemática, programas governamentais de incentivo à implementação de refinarias de conversão de biomassa foram instaurados em todo o mundo, entre eles *Renewable Energy Directive* (RED) e o *Renova Bio*. Como matéria-prima destas, a biomassa lignocelulósica mostra-se promissora devido à sua abundância na natureza, caráter sustentável e renovável. Diante disto, este estudo visa realizar uma revisão acerca das biorrefinarias com base lignocelulósica, contendo informações de: origem, tecnologia utilizada, *input* (entrada), *output* (saída), entre outras. Para este fim, foi realizada uma prospecção com estudos científicos e técnicos com auxílio da bibliografia disponível. Os resultados evidenciam que, em um montante de 72 refinarias pertencentes ao banco de dados da *IEA Bioenergy*: aproximadamente 58% utilizam tecnologia de fermentação, 43% destas estão na Europa e aproximadamente 70% das empresas produzem etanol.

Palavras chave: biomassa, lignocelulósica, biorrefinaria, segunda, geração.

Abstract: *The current dependence on fossil fuels contributes to atmospheric pollution, causing harms to human health and to the environment, thus making it essential to seek new initiatives to meet the growing energy demand. In order to work around this problem, government programs to encourage the implementation of biomass conversion refineries have been implemented around the world, including the Renewable Energy Directive (RED) and the Renova Bio. As feedstock for these, lignocellulosic biomass shows promise due to its abundance in nature, its sustainable and its renewable character. In view of this, this paper aims to carry out a review of lignocellulosic-based biorefineries, covering information on: origin, technology used, input, output, among others. For this purpose, a survey was carried out with scientific and technical studies with the help of the available bibliography. The results show that in a total of 72 refineries belonging to the IEA Bioenergy database: approximately 58% use fermentation technology, 43% of those are in Europe and approximately 70% produce ethanol.*

Keywords: lignocellulosic, biomass, biorefinery, second, generation.

1 Introdução

O Brasil apresentou, no ano de 2021, de acordo com o IBP (Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás), um consumo aparente de petróleo em torno de 2 milhões bep/dia, com tendências claras de aumento marcadas nos primeiros meses de 2022 (IBP, 2022). A demanda energética do país está atrelada à maior queima de combustíveis fósseis, acarretando um agravamento nos problemas ambientais oriundos desta. Neste cenário, as biorrefinarias são de grande interesse na transição para a indústria química verde (Li et al.,

2017). E, como fonte energética, a biomassa lignocelulósica mostrou-se promissora, devido à sua abundância no planeta (Graça et al., 2018).

A biomassa lignocelulósica refere-se ao material de origem vegetal formado principalmente por hemicelulose (20-35%), lignina (5-30%) e celulose (35-50%). Também conhecida como biomassa residual, compõe algas, arbustos, gramíneas, resíduos agrícolas e culturas energéticas (Donate, 2014; Yousuf, Pirozzi e Sannino, 2020). Usada tipicamente como fonte de energia térmica para cozinhar e aquecer, a biomassa lignocelulósica mostrou-se uma excelente fonte de carboidratos de baixo custo, sendo assim vantajosa para produção de uma gama de produtos de grande valor comercial como biocombustíveis (etanol, biogás, etc.), além de ser utilizada como substrato para produção de moléculas de alto valor agregado (ácidos orgânicos, proteínas microbianas, entre outros) (Cai et al., 2017; De Oliveira et al., 2019).

O beneficiamento do material precursor é realizado através de biorrefino. Esse processo é definido como “processamento sustentável da biomassa em um espectro de produtos comercializáveis (alimentos, rações, materiais, produtos químicos) e energia (combustíveis, energia, calor)” de acordo com *IEA Bioenergy Task 42 - Agência Internacional de Energia Biorrefinaria Missão 42* (2009). As unidades conversoras desse material possuem diversas vantagens em comparação com as refinarias de petróleo como: uma matéria-prima heterogênea que apresenta variedade de origens; pequenas restrições de produção e uso; além de afetar positivamente as questões climáticas e o desenvolvimento rural, promovendo uma fonte de energia alternativa menos poluente (Aristizábal-Marulanda e Cardona, 2019). Sendo assim, as biorrefinarias mostram-se promissoras tanto para países industrializados quanto para países emergentes, possibilitando uma gama de produtos de base biológica e energia de forma econômica, social e ambientalmente sustentável (De Jong e Jungmeier, 2015).

Diante das inovações tecnológicas no ramo da biotecnologia, além das demandas urgentes para implementação de fontes de energia alternativas aos combustíveis fósseis, alguns incentivos a programas de produção de biocombustíveis vêm crescendo, dentre estes: o *Renewable Fuel Standard* (RFS) - Estados Unidos, o *Low Carbon Fuel Standard* (LCFS) - também nos Estados Unidos, o *Renewable Energy Directive* (RED) - UE (União Europeia) e o *RenovaBio* - Brasil. O *RenovaBio*, instituído pela Lei nº 13.576/2017, almeja ampliar a produção de biocombustíveis, operando em quatro frentes: desenvolvimento fundamentado na sustentabilidade ambiental, econômica e financeira; debate da função dos biocombustíveis na matriz energética; atenção às novas fontes de biocombustíveis e regras de comercialização (Roitman, 2019).

Diante do exposto, o presente estudo se propõe a realizar uma revisão sobre biorrefinarias que utilizam como base materiais lignocelulósicos, trazendo aspectos de suas produções, tecnologias utilizadas, matérias-primas comuns e produtos finais mais visados, observando a viabilidade técnica atual.

2 Metodologia

Para a fundamentação teórica deste artigo, foi realizado mapeamento de estudos científicos e técnicos com auxílio da literatura disponível. Os periódicos e artigos científicos foram mapeados por meio do acesso a bases de dados *Science Direct*, *Scielo Brasil* e *Google Acadêmico*.

A fim de trazer o que há de mais atual em biorrefinarias, foi utilizado o banco de dados *IEA Bioenergy*, que é um Programa de Colaboração Tecnológica (TCP- Technology Collaboration Programme) fundado em 1978 pela Agência Internacional de Energia (IEA- International Energy Agency), visando facilitar a cooperação e a troca de informações entre países que possuem programas nacionais de pesquisa, desenvolvimento e implantação de bioenergia. O site possui uma gama de instalações no segmento de biorrefinarias, e permite a utilização de filtros capazes de restringir a busca.

Com o objetivo de delimitar o tema, foram utilizados os seguintes filtros de acordo com a categoria:

- *Matéria-prima/Input*: lignocelulósicos, biomassa / misturas de carvão de biomassa;
- *Produção/Output*: bio-óleo, bio-gás, hidrogênio, isobuteno, metanol, hidrocarbonetos do tipo diesel, diesel com conteúdo biogênico, etanol, aditivos alimentares, combustíveis tipo gasolina, diesel renovável, Gás Natural Sintético (SNG- Synthetic Natural Gas), combustíveis de aviação sustentáveis (SAF- Sustainable Aviation Fuel) e vários produtos químicos.

Assim, de posse do material, foram mapeadas as principais informações sobre biorrefinarias com biomassa lignocelulósica no Brasil e no mundo, discorrendo sobre projetos e operações.

3 Resultados e discussões

3.1 Biorrefinarias no mundo

Realizou-se no atual estudo uma revisão de literatura atualizada que discorre sobre a operação de biorrefinarias ao redor do globo.

Hassan, Williams e Jaiswal (2019), estudando sobre a metodologia de processamento do material lignocelulósico, mostra alguns dos desafios que biorrefinarias na Europa têm enfrentado nesse começo de utilização da biomassa como matéria-prima. Como o custo do uso do amido como insumo é alto, tem havido um aumento nas pesquisas acerca do processamento deste tipo de biomassa, por ser de baixo custo e o mais abundante do planeta. De fato, estima-se que, até 2030, pelo menos 1 bilhão de toneladas desse material será produzido anualmente apenas na Europa (Panoutsou et al., 2016). O estudo supracitado no início deste parágrafo mostra que, das 224 biorrefinarias que estavam em operação na Europa em 2017, 43 eram instalações de segunda geração (2G), que usam materiais lignocelulósicos residuais em grande quantidade. Esse nicho ganhou força a partir de 2012, com o lançamento da estratégia de Bioeconomia Europeia, que visa a produção de recursos biológicos renováveis e a sua conversão em produtos de valor agregado. Esta estratégia e seus planos de ação aumentaram o faturamento da bioeconomia total na UE (União Europeia) de 2,09 trilhões de euros em 2008 para 2,29 trilhões de euros em 2015 (Piotrowski, Carus e Carrez, 2018). Além disso, medidas acessórias visam incentivar o uso de resíduos lignocelulósicos na produção de biocombustíveis (Hassan, Williams e Jaiswal, 2019).

Apesar da abundância de matéria-prima, a logística em torno do fornecimento da biomassa não é simples. Sua cadeia de fornecimento pode abranger etapas de coleta, secagem, compactação, transporte e armazenamento, e tais processos variam a depender do tipo de biomassa e da sua fonte (Joly e Verdade, 2015). Cada um desses estágios da cadeia enfrenta seus próprios desafios. Por exemplo, durante o processo de coleta podem ser enfrentadas flutuações imprevisíveis em quantidade e qualidade, além de possível contaminação e alto teor de umidade. Na secagem, essa umidade pode complicar o manuseio da biomassa, aumentando sua suscetibilidade à deterioração. A compactação é realizada para que o transporte e o armazenamento venham a ser eficientes. Antes disso, entretanto, pode ser necessário processamento mecânico do material por trituração para reduzir o tamanho. Equipamentos usados na agricultura podem ser usados nesses processos, mas novas tecnologias estão se tornando necessárias para lidar com as crescentes quantidades de biomassa em escala industrial (Hassan, Williams e Jaiswal, 2019).

Após coleta, secagem e compactação em instalações descentralizadas, o material é então transportado para a biorrefinaria. Nos sistemas de transporte e de armazenamento, a baixa densidade de resíduos lignocelulósicos, os custos de energia e as variações na quantidade e disponibilidade sazonal de resíduos são dificuldades que podem inviabilizar o processo. Além disso, há aspectos relativos à saúde e à segurança ao se armazenar a biomassa (Koppejan *et al.*, 2013). Algumas das iniciativas estratégicas propostas pela *European Biorefinery Joint Strategic* incluem a disponibilidade de máquinas capazes de lidar com grandes quantidades de matéria-prima, o mapeamento de inventários de biomassa e o estabelecimento de um polo regional centralizado para coleta e armazenamento do material (Star-Colibri, 2011). Espera-se que esses esforços diminuam os custos logísticos e, por consequência, os custos de produção da biorrefinaria. Não obstante, sabe-se também que os custos logísticos e a complexidade operacional aumentam à medida que a capacidade de processamento e/ou o raio de armazenamento de matéria-prima aumentam. Para enfrentar esses desafios, a integração em menor escala de unidades de biorrefinarias para implementação em pequenas áreas rurais-urbanas na Europa está sendo estudada (Hassan, Williams e Jaiswal, 2019).

Além da parte logística, uma etapa posterior do processo de transformação da biomassa lignocelulósica merece atenção. Como esse material precursor é uma matriz complexa que é relativamente resistente à degradação, é necessário um estágio de pré-tratamento para facilitar a liberação dos açúcares presos à estrutura (Capolupo, Faraco, 2016; Zhao *et al.*, 2022). Muitos métodos convencionais são atualmente usados para pré-tratamento, a depender da matéria-prima e do valor do produto final. Os principais desafios aqui estão relacionados à possibilidade e flexibilidade para otimização do processo de produção de modo que o mesmo continue sustentável em novos contextos, como com adição de novas matérias-primas e/ou mudanças na demanda de mercado e na economia. A título de exemplo, um modelo proposto comumente citado é o de uma planta integrada de biorrefinaria de celulose/papel que é capaz de gerar, juntamente com os produtos convencionais, outros insumos, combustíveis ou energia elétrica. Assim, em todo processo que seja reinventado, deve-se buscar alcançar um equilíbrio viável entre a eficácia do pré-tratamento, o custo e a sustentabilidade ambiental (Hassan, Williams e Jaiswal, 2019). Outro exemplo de mudança de processo que poderia resultar em um uso mais eficiente dos recursos é a separação da hemicelulose e da lignina

presentes no licor negro que é tradicionalmente queimado para geração de energia. Isso porque a hemicelulose possui um poder calorífico inferior à lignina, e sua separação poderia destiná-la a outras finalidades, como à produção de etanol ou poliéster (FitzPatrick et al., 2010).

O mercado de produtos de base biológica inclui compostos como o bioetanol, o biodiesel e o biogás, além de produtos bioquímicos como enzimas industriais e biomateriais como plásticos biodegradáveis. No entanto, a bioenergia recebeu maior atenção de políticas específicas da UE (União Europeia) (Ravindran, Jaiswal, 2016). Até 2030, a UE (União Europeia) pretende fornecer 25% de sua energia de transporte através de biocombustíveis derivados de biorrefinarias 2G (Segunda Geração). A essa altura, também se planeja ter substituído 30% dos produtos químicos à base de petróleo por produtos químicos de base biológica. Espera-se que a evolução da procura do mercado, combinada com outras políticas que estimulem a sensibilização do público, acelerem o desenvolvimento de produtos e encorajem o investimento do setor privado. Especialistas internacionais preveem que pelo menos 15 biorrefinarias avançadas serão lançadas até 2024 na Europa (Valdivia et al., 2016).

Outros aspectos que precisam ser considerados são a disponibilidade inicial de matéria-prima e o seu potencial para ser usada em múltiplos fluxos de produção. No trabalho de FitzPatrick et al. (2010) é mencionada uma biorrefinaria existente em Pomacle, França, que produz etanol, ácido succínico e glicose através de uma única instalação com muitos fluxos de processamento. Isso é conseguido através da utilização de um microrganismo robusto (*Escherichia coli* K-12) que utiliza uma variedade de matérias-primas (glicose, sacarose, glicerina, etc.) em um processo anaeróbico e aquoso.

A importância do conceito de biorrefinaria também se mostra na produção de biodiesel. O glicerol bruto é um coproduto do processo químico usado para sintetizar o biodiesel a partir de matérias-primas de biomassa de primeira e segunda geração e costumava ser tradicionalmente considerado um material residual devido ao seu valor baixo de mercado. Recentemente, empresas químicas como Dow Chemical Company, Huntsman Corporation, Cargill e Archer Daniels Midland Corporation começaram a usar o glicerol como material para conversão em propilenoglicol. Além disso, a Dow Chemical Company e a Solvay estão explorando o uso de glicerol na produção de epícloridrina, que pode ser usada na produção de resinas epóxi e elastômeros de epícloridrina. Devido à sua versatilidade, é previsto que o glicerol pode se tornar um substituto para muitos petroquímicos comumente usados (FitzPatrick et al., 2010).

De acordo com a pesquisa realizada para a composição da Tabela 1, a Europa é o continente com o maior número de iniciativas que envolvem o biorrefino de matéria-prima lignocelulósica. Entretanto, em números absolutos, os Estados Unidos são o país que apresenta mais instalações, contando com 10, seguido da China, que conta com 9. Algumas das principais empresas que compõem esta tabela têm um pouco dos seus métodos de funcionamento explanados a seguir.

A Altaca Energy é uma empresa que possui uma instalação de P&D no GOSB Technopark, Istambul, Turquia e é especializada na fabricação de produtos orgânicos valiosos a partir de biomassa úmida e resíduos orgânicos. Sua nova planta de fabricação de bio-óleo na cidade de Gönen será a primeira de seu tipo no mundo a implementar a tecnologia original CatLiq, que baseia-se no princípio de conversão de resíduos orgânicos em bio-óleo com a ajuda de catalisadores sob pressão e temperatura muito altas. Após o comissionamento da primeira planta CatLiq, planeja-se construir plantas adicionais, com parceiros financeiros e firmar contratos de licença, em cooperação com investidores, em outras partes do mundo.

A BioCentury Research Farm, fundada em 2009, é a primeira instalação integrada de pesquisa e demonstração dos Estados Unidos que é dedicada à produção e ao processamento de biomassa. A biomassa inclui culturas lignocelulósicas, resíduos de culturas e grãos. Suas metas incluem o desenvolvimento de novas matérias-primas com propriedades preferenciais para conversão em biocombustíveis e produtos de base biológica e desenvolver novos métodos de biorrefino usando abordagens termoquímicas, biológicas e de química catalítica.

A planta piloto da australiana Mackay Renewable Biocommodities é pioneira em pesquisa e inovação em biorrefino. Ao transformar a biomassa agrícola em bioprodutos mais limpos, é criado um setor agrícola mais lucrativo e sustentável. Seus pesquisadores estão criando biocombustíveis, produtos químicos verdes e outros bioprodutos usando matérias-primas de biomassa, como bagaço de cana, lixo e melaço, além de outros produtos agrícolas como algodão, grãos e resíduos hortícolas via processos inovadores e limpos.

3.2 Biorrefinarias no Brasil

O Brasil produziu cerca de 261,4 milhões de toneladas na safra de cereais, leguminosas e oleaginosas em 2022, é o que aponta o levantamento realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) até o mês de junho, sendo esta 3,2% maior que a safra de 2021 do mesmo período (Do Brasil, 2022). A

agricultura brasileira apresenta uma constante de crescimento, acarretando em uma grande geração de resíduos provenientes das lavouras. Gera-se assim quantidades expressivas de biomassa lignocelulósica que não é aproveitada para comercialização direta (De Oliveira *et al.*, 2019). Subprodutos da agricultura como: bagaço de cana, palha de cana e de arroz estão sendo aproveitados para a geração de produtos como acetato de celulose, etanol 2G, hidroximetilfurfural, alcaloides, xilitol e polpa celulósica (Rodrigues, 2017).

Esse mercado ainda é discreto, enquanto um grande número de tecnologias de aproveitamento da biomassa lignocelulósica ainda não estão amadurecidas (Schultz, Belém e Braga, 2022). Isto não quer dizer que este mercado seja inexistente, conquanto temos alguns exemplos de empresas já em operação inclusive no Brasil. Uma destas é a GranBio, empresa de biotecnologia com instalações na cidade de São Miguel dos Campos - AL, que produz etanol 2G e outros bioquímicos usando como matéria prima os resíduos da atividade sucroalcooleira da região (Rosário, Soutinho e Silva, 2016). A empresa tem capacidade de processar até 26 t/ano de bagaço e palha de cana-de-açúcar, produzindo até 35.900 m³/ano (IEA Bioenergy, 2022). Outra empresa é a Raízen Energia, que produz etanol 2G desde 2015, com capacidade produtiva de 60.000 m³/ano, também usando resíduos do beneficiamento de cana-de-açúcar (IEA Bioenergy, 2022). Ambas produzem etanol a partir de processo fermentativo.

Com uma perspectiva de aumento da demanda mundial por biocombustíveis, a GranBio firma uma aliança com a Nuseed (empresa australiana), a fim de estimular a utilização da cana-de-açúcar na geração de energia. A combinação inclui a aquisição de ativos comerciais e de melhoramento de cana-energia da GranBio pela Nuseed, como também uma parceria em pesquisa e desenvolvimento; estimando-se que a partir de 2028 possa-se produzir 100 milhões de galões de combustível de aviação sustentável (SAF-Sustainable Aviation Fuel) (Machado, 2022). No mesmo intuito, a Vibra Energia fecha contrato de comercialização de SAF e diesel verde HVO (Hydrotreated Vegetable Oil, em português, hidrotreatamento de óleo vegetal) em parceria com a Brasil BioFuels (BBF), com pretensão de início em 2025. Espera-se um investimento inicial de 2 bilhões de reais, com uma produção estimada de 500 milhões de litros de biocombustível (Chiappini, 2022). Dados que demonstram que os biocombustíveis apresentam uma crescente de desenvolvimento e investimento, apontando como promissora a perspectiva de materiais oriundos de biorrefinarias.

3.3 Panorama de biorrefinarias

Buscando trazer uma visão geral das biorrefinarias no Brasil e no mundo, foi confeccionada a Tabela 1 abaixo, que apresenta dados de instalações de conversão de biomassa, incluindo: biocombustíveis avançados, instalações de combustão, gaseificação e pirólise. A pesquisa foi realizada no site *IEA Bioenergy* e conta com informações relacionadas a tecnologia utilizada, a matéria prima base, produto final e país de origem.

Tabela 1: Compilado de biorrefinarias com matéria prima lignocelulósica baseado no banco de dados *IEA Bioenergy*.

Nome do projeto	Local	Status	Tecnologia	Input	Output
<i>BBCA</i>	China	OP	Fermentação	Espiga de milho/palha de milho	Etanol
<i>Fuyang project</i>	China	PL	Fermentação	Palha de trigo e palha de milho	Etanol
<i>Low Carbon Biofuel Plant</i>	Canadá	PL	Liquefação Hidrotermal	Resíduos de serraria	Bio-óleo
<i>FuturoL pilot</i>	França	OP	Fermentação	Flexível; subprodutos lenhosos e agrícolas, resíduos, culturas energéticas	Etanol
<i>2G ethanol Commercial plant</i>	Índia	CONS	Fermentação	Bambu	Etanol
<i>biorefinery</i>	Áustria	OP	Fermentação	Licor gasto de sulfito da polpação de madeira de abeto	Etanol
<i>Canergy</i>	Estados Unidos	CAN	Fermentação		Etanol
<i>2G ethanol Commercial plant</i>	Índia	CONS	Fermentação	Palha de arroz	Etanol
<i>BornBioFuel 2</i>	Dinamarca	CAN	Fermentação	Palha, várias gramíneas, resíduos de jardim	Etanol, biogás, lignina
<i>Bio-Jet production development (with NEDO)</i>	Japão	OP	Fermentação	Lignocelulósicos	Etanol, combustíveis de aviação sustentáveis e outros
<i>Woodspirits</i>	Holanda	ESP	Gaseificação	Lascas de madeira	Metanol
<i>Synthesis Demo Guessing</i>	Áustria	PAR	Síntese de Combustível	Syngas a partir do gaseificador	SNG
<i>BioTfueL pilot</i>	França	OP	Gaseificação	Resíduos florestais, palha, resíduos verdes, culturas dedicadas	Líquidos FT, combustíveis de aviação sustentável
<i>BALI Biorefinery Demo</i>	Noruega	OP	Fermentação	Bagaço de cana, palha, madeira, culturas energéticas, outros lignocelulósicos	Etanol, lignina, vários produtos químicos

<i>ChemCell Ethanol</i>	Noruega	OP	Fermentação	Licor gasto de sulfito da polpa de madeira de abeto	Etanol
<i>CTC</i>	Brasil	CAN	Fermentação	Cana-de-açúcar	Etanol
<i>Chempolis Biorefining Plant</i>	Finlândia	OP	Fermentação	Biomassa lignocelulósica não madeireira e não alimentar, como palha, junco, cacho vazio de frutas, bagaço, talos de milho, bem como resíduos de madeira	Etanol, vários produtos químicos
<i>COFCO Commercial</i>	China	PL	Fermentação		Etanol
<i>Energy pilot</i>	China	OP	Fermentação	Resíduos agrícolas e florestais	Etanol
<i>Synthesis Enerkem Sherbrooke</i>	Canadá	OP	Gaseificação	Resíduos sólidos urbanos, cavacos de madeira, madeira tratada, lodo, coque de petróleo, plásticos usados e palha de trigo	Etanol, metanol, SNG
<i>Gaya</i>	França	OP	Gaseificação	Madeira	SNG
<i>Envirals Leopoldov Site</i>	Eslováquia	PL	Fermentação		Etanol
<i>GoBiGas Phase 1 restart</i>	Suécia	Não OP	Gaseificação	Resíduos florestais, pellets de madeira, galhos e copas de árvores	SNG, calor, eletricidade
<i>Kinross Plant 1</i>	Estados Unidos	CAN	Fermentação	Lascas de madeira	Etanol, lignina
<i>PCH Placer County</i>	Estados Unidos	OP	Pirólise Rápida	Biomassa	SNG
<i>PCH Alberta</i>	Canadá	OP	Pirólise Rápida	Biomassa	SNG
<i>Bioflex 1</i>	Brasil	OP	Fermentação	Bagaço de cana e palha	Etanol
<i>Greenfield</i>	Canadá	OP	Fermentação		Etanol
<i>GTI gasifier Des Plaines</i>	Estados Unidos	OP		Pellets e lascas de madeira	Calor, combustíveis tipo gasolina
<i>Blue Tower Technology Herten</i>	Alemanha	ESP	Outra tecnologia de gaseificação	Vegetação à beira da estrada, Syngas	Hidrogênio, calor
<i>SAF Speyer</i>	Alemanha	PL	Alcool a jato		Combustíveis de aviação sustentáveis
<i>Henan 2</i>	China	OP	Fermentação		Etanol
<i>Henan 1</i>	China	OP	Fermentação	Palha de trigo/milho	Etanol
<i>2G ethanol Commercial plant</i>	Índia	CONS	Fermentação	Palha de arroz	Etanol
<i>demo</i>	Dinamarca	PAR	Fermentação	Palha de trigo	Etanol, C5 melaço
<i>2G ethanol demo plant</i>	Índia	OP	Fermentação	bagaço de cana, palha de arroz, resíduos agrícolas	Etanol
<i>2G ethanol Commercial plant</i>	Índia	CONS	Fermentação	Palha de arroz	Etanol
<i>2G ethanol demo plant</i>	Índia	CONS	Fermentação	Bagaço de cana, palha de arroz, resíduos agrícolas	Etanol
<i>2G ethanol Pilot plant</i>	Índia	OP	Fermentação	Bagaço de cana, palha de arroz, resíduos agrícolas	Etanol
<i>demo</i>	Canadá	OP	Fermentação	Palha de trigo, cevada e aveia; palha de milho, bagaço de cana e outros resíduos agrícolas	Etanol
<i>BioCentury Research Farm</i>	Estados Unidos	OP	Fermentação	Grãos, oleaginosas, óleos vegetais, glicerina	Etanol, FT líquidos
<i>Jilin 2</i>	China	OP	Fermentação	Palha	Etanol
<i>bioliq</i>	Alemanha	OP	Gaseificação	Palha	DME, combustíveis tipo gasolina
<i>bioliq</i>	Alemanha	OP	Pirólise Rápida	Palha	Bio-óleo, combustíveis sólidos - outros
<i>bioliq</i>	Alemanha	OP	Gaseificação	Palha	DME, combustíveis tipo gasolina
<i>Commercial demonstration plant</i>	Austrália	OP	Liquefação Hidrotermal	Pinheiro Radiata, Grama Banna, Algas	Bio-óleo
<i>Demo</i>	Canadá	CAN	Fermentação	Madeira pura	Butanol, etanol
<i>Longlive</i>	China	OP	Fermentação	Espiga de milho	Etanol
<i>Flagship integrated biorefinery</i>	Dinamarca	ESP	Fermentação	Matéria seca da planta, estrume	Etanol, biogás, lignina
<i>commercial</i>	Canadá	CAN	Fermentação	Madeira	Etanol
<i>Integrated Biorefinery Research Facility (IBRF)</i>	Estados Unidos	OP	Fermentação		Etanol
<i>Jedlicze Site</i>	Polônia	PL	Fermentação	Palha de trigo	Etanol
<i>Scotland</i>	Estados Unidos	OP	Fermentação	Fibra de milho, espigas de milho e talos de milho	Etanol
<i>2G ethanol demo plant</i>	Índia	OP	Fermentação	Bagaço de cana, palha de arroz, resíduos agrícolas	Etanol

<i>Mackay Renewable Biocommodities Pilot Plant</i>	Austrália	OP	Fermentação	Bagaço de cana, palha de milho, produtos florestais	Etanol, lignina, químicos variados
<i>Brasil</i>	Brasil	OP	Fermentação	Resíduo de cana-de-açúcar	Etanol
<i>RE Energy</i>	Dinamarca	PL	Fermentação	Lignocelulósicos	Etanol, lignina, outros
<i>RenFuel Backhammer</i>	Suécia	OP	Despolimerização de lignina	Lignina, ácido graxo misto	Bio-óleo
<i>Demonstration Plant</i>	Estados Unidos	PAR	Fermentação	Lascas de madeira, Switchgrass (gramínea de pradaria) e outras matérias-primas	Etanol, lignina
<i>Pilot</i>	Suécia	OP	Centrífuga	Variados	Óleo de pirólise, vários produtos químicos
<i>2G bioethanol refinery</i>	França	PL	Fermentação	Açúcares residuais do processamento de polpa de celulose	Etanol
<i>Cordoba</i>	Espanha	PL	Fermentação	Resíduos de oliveiras	Etanol, lignina
<i>Biorefinery Demo Plant</i>	Suécia	OP	Fermentação	Cavacos de madeira primária; bagaço de cana, trigo, palha de milho, erva energética, resíduos reciclados etc.	Etanol
<i>Zesheng</i>	China	OP	Fermentação	Palha	Etanol
<i>Synthesis Tembec Chemical Quebec</i>	Canadá	OP		Matéria-prima de licor de sulfito gasto	Etanol
<i>Ambigo</i>	Holanda	OP	Síntese de Combustível	Biomassa	SNG, calor
<i>BioTfuel demo</i>	França	OP	Gaseificação	Palha, resíduos florestais, culturas energéticas dedicadas	Líquidos FT, combustíveis de aviação sustentável
<i>SkyFuel H2</i>	Suécia	PL	Híbridos de biomassa e-fuels	Carbono da biomassa, hidrogênio da eletrólise	Combustíveis de aviação sustentáveis
<i>Vaerlandsmetanol Hagfors</i>	Suécia	PL		Biomassa lenhosa	Metanol
<i>Versa Pyrolysis</i>	Estados Unidos	OP	Pirólise Rápida	Variados	Produtos químicos variados
<i>Commercial scale biorefinery</i>	Estados Unidos	CAN	Fermentação	Álamos, palha de trigo	Etanol, produtos químicos variados
<i>ALTACA ENERGY</i>	Turquia	OP	Outra tecnologia de pirólise	Várias fontes de biomassa	Bio-óleo

Legenda: OP-Operacional, CAN- Cancelado, PL-Planejamento, CONST- Em construção, PAR-Parado, ESP- Em espera.
Fonte: Elaboração própria a partir de (IEA Bioenergy, 2022).

Ao analisar a Tabela 1, observa-se a presença significativa de fermentação como tecnologia principal, sendo citada 42 vezes em um número total de 72 refinarias pesquisadas. A fim de simplificar a compreensão, a Tabela 1 traz apenas uma operação como tecnologia, mas na verdade se trata de um conjunto de métodos para formar um processo de conversão, sendo que cada um deles possui suas particularidades. No projeto *biorefinery* de origem austríaca, por exemplo, utiliza-se o licor gasto de sulfito (SSL- Sulphite Spent Liquor, 33% de teor seco) da polpa de madeira de abeto para a produção de etanol, fermentando os açúcares da solução para posterior destilação, na planta de destilação. Na etapa seguinte, o etanol 96% é desidratado por peneiras moleculares para obtenção de etanol anidro. A segunda tecnologia mais citada foi a gaseificação, com 8 referências, sendo implementada no projeto de nome *Synthesis Enerkem Sherbrooke*. A Enerkem desenvolveu uma tecnologia de processo baseada em gaseificação que transforma resíduos sólidos urbanos, resíduos das indústrias florestais e agrícolas em etanol, metanol e SNG (Synthetic Natural Gas). Na planta produtora de etanol 2G o processo ocorre nas seguintes etapas: primeiro, pré-tratamento de matéria prima (secagem, triagem e trituração); segundo, gaseificação (conversão de resíduos ricos em carbono em gás sintético); terceiro, condicionamento de gás sintético (processo de limpeza e condicionamento); quarto, conversão em combustível líquido (conversão catalítica do gás de síntese).

Com relação às matérias primas, devido ao escopo da pesquisa foram escolhidas apenas iniciativas que transformam materiais lignocelulósicos. Ainda assim, foram localizadas empresas que transformam uma mistura entre biomassa e carvão de biomassa. Notou-se que 93% das empresas trabalham apenas com lignocelulósicos, enquanto 7% usam essa mistura. Os materiais lignocelulósicos são os mais variados, sendo principalmente as palhas, os bagaços e os resíduos florestais, de serralheria e lenhosos. No entanto, doze biorrefinarias empregam madeira não residual em seus processos, mesmo que parcialmente. Apenas duas usam resíduo da produção de papel e celulose.

O Gráfico 1 mostra os principais produtos sintetizados pelas biorrefinarias que constam na Tabela 1. As substâncias que mais se destacaram foram o etanol (48%), o bio-óleo e o SNG (6% cada) e o querosene de aviação (1%), no caso de refinarias que trabalham com um único produto final. Mas algumas refinarias entregam múltiplos produtos (36%), o que revela duas tendências: uma é a da consolidação do etanol no

processo produtivo 2G, e outra tendência é a de cada vez um número maior de empresas buscarem entregar múltiplos produtos, assim como acontece normalmente nas refinarias de petróleo, sendo que, em muitos casos, estes múltiplos produtos são espécies de alto valor agregado, como é o exemplo do furfural, do ácido acético, da xilose e da própria glicose.

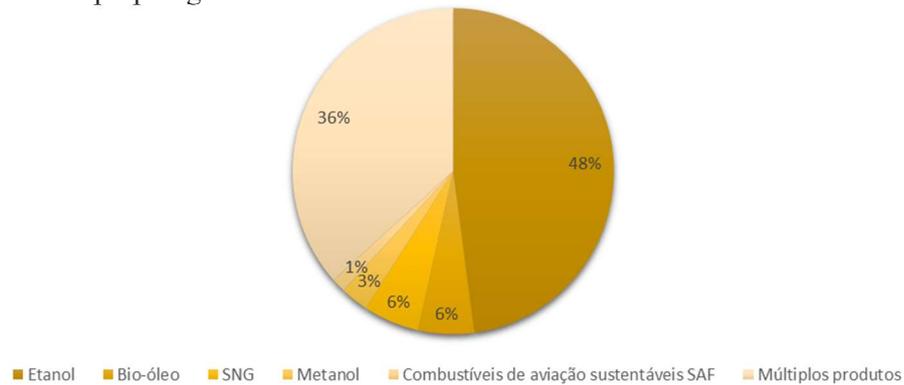


Gráfico 1: Principais produtos destacados na Tabela 1.

O Gráfico 2 mostra a distribuição por continente das biorrefinarias envolvendo biomassa lignocelulósica ao redor do mundo de acordo com o website do TCP, da *IEA Bioenergy*.

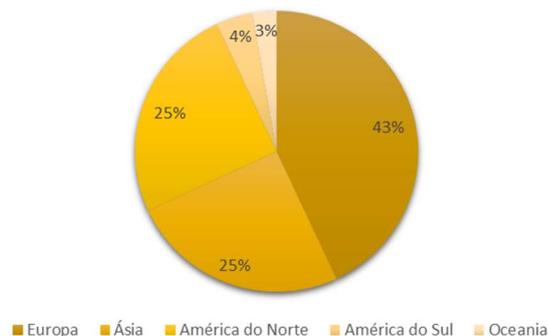


Gráfico 2: Distribuição de biorrefinarias por continente de acordo com a Tabela 1.

A maior parte das iniciativas atuam no continente europeu. Foi feita uma pesquisa, aplicando os filtros de busca supracitados na Metodologia, com o intuito de limitar os resultados aos programas que envolvem este tipo de matéria-prima. Foram encontradas 72 iniciativas, dentre as quais 31 atuam na Europa. A América do Norte e a Ásia vêm em segundo lugar, com 18 biorrefinarias cada. Entre as instalações na América do Norte, 10 estão nos Estados Unidos e 8 no Canadá, ao passo que na Ásia conta com nove produtoras na China, oito na Índia e uma no Japão. Em números absolutos, os Estados Unidos são o país que apresenta o maior número de iniciativas. A Austrália (Oceania) também conta com duas biorrefinarias. A América do Sul conta com 3, todas localizadas no Brasil.

As iniciativas brasileiras têm em comum a matéria-prima utilizada, que é o resíduo de cana-de-açúcar (uma delas também usa a palha como material precursor). Todas as três biorrefinarias localizadas no Brasil produzem etanol como único produto, via processos de fermentação, sendo que duas delas estão em operação atualmente. De fato, foi observado que a grande maioria das iniciativas têm combustíveis como produtos, principalmente o etanol (cerca de 70% dos resultados apontaram o álcool etílico como pelo menos uma das substâncias sintetizadas).

Quando a análise se volta para a Europa, que concentra o maior número de iniciativas em biorrefinarias, alguns pontos são notórios: Das trinta e uma refinarias presentes no continente, dezesseis tem como output produtos variados, em seguida temos a produção exclusiva de etanol (sete refinarias), e por último o bio-óleo, o metanol, o SNG e os combustíveis de aviação SAF, com duas refinarias de cada tipo. Isto nos mostra que mais da metade das biorrefinarias da Europa já estão ou pretendem se preparar para fornecer materiais variados.

Na América do Norte o cenário é semelhante ao da Europa, com oito biorrefinarias mistas, sete com capacidade de produzir apenas bioetanol, duas produzindo SNG e uma produzindo bio-óleo. Na Ásia a predominância absoluta é do bioetanol, com dezessete refinarias contra uma mista, capaz de produzir Etanol, combustíveis de aviação sustentáveis SAF e outros.

4 Conclusões

De acordo com as informações compiladas na Tabela 1 sobre biorrefinarias de base lignocelulósica:

- a) A tecnologia de fermentação é apresentada como principal em 42 biorrefinarias;
- b) O continente europeu conta com 43% das biorrefinarias;
- c) Em números absolutos, os Estados Unidos são o país que apresenta mais instalações, contando com 10, seguido da China, que conta com 9;
- d) A maioria das refinarias trabalha com etanol ($\approx 70\%$);
- e) Materiais considerados resíduos de agricultura (palha de trigo e milho, bagaço de cana, entre outros) são utilizados em grande escala em para conversão de biomassa.

Agradecimentos

Os autores agradecem a orientação aos professores Luiz Antônio Magalhães Pontes, Ronaldo Costa Santos e Manuela Lisboa de Oliveira, a colaboração do grupo de pesquisa CATAM e o financiamento do órgão CNPq - Fundação Escola Politécnica.

Referências bibliográficas

Aristizábal-Marulanda, V and Cardona Alzate, CA (2018) “Methods for designing and assessing biorefineries: Review: The Potential of Biorefineries: Review”, *Biofuels, bioproducts & biorefining: Biofpr*, v.13, p. 789–808. <doi: 10.1002/bbb.1961>.

Cai, J et al. (2017) “Review of physicochemical properties and analytical characterization of lignocellulosic biomass”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v.76, p. 309–322. <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.072>>

Capolupo, L, and Faraco, V (2016) ‘Green methods of lignocellulose pretreatment for biorefinery development’, *Applied microbiology and biotechnology*, v. 100, n. 22, p. 9451-9467. <<https://doi.org/10.1007/s00253-016-7884-y>>.

Chiappini, G. (2022) “Vibra Energia fecha parceria com BBF para vender SAF a partir de 2025”, Agência EPBR | política e mercado de energia, [online]. Available at: <<https://epbr.com.br/vibra-energia-fecha-parceria-com-bbf-para-vender-saf-a-partir-de-2025/>> (accessed 10 November 2022).

De Jong, E and Jungmeier, G (2015) “Biorefinery concepts in comparison to petrochemical refineries”, *Industrial Biorefineries & White Biotechnology*. Elsevier, p. 3–33.

Donate, PM (2014) "Síntese ambientalmente correta a partir de biomassa." *Orbital: the electronic journal of chemistry*, v.6, n.2, p. 101-117.

Do Brasil, CI (2022) “IBGE estima safra de 261,4 milhões de toneladas em 2022”, Agência Brasil. <<https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2022-07/ibge-estima-safra-de-2614-milhoes-de-toneladas-em-2022>> (accessed: 9 November 2022).

FitzPatrick, M, Champagne, P, Cunningham, MF and Whitney, RA (2010) ‘A biorefinery processing perspective: treatment of lignocellulosic materials for the production of value-added products’, *Bioresource technology*, v. 101, n. 23, p. 8915-8922. <<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.06.125>>.

Graça, I et al. (2018) “Desilicated NaY zeolites impregnated with magnesium as catalysts for glucose isomerisation into fructose”, *Applied catalysis. B, Environmental*, 224, p. <<https://dx.doi.org/10.1016/j.apcatb.2017.11.009>>.

Hassan, SS, Williams, GA and Jaiswal, AK (2019) ‘Lignocellulosic biorefineries in Europe: current state and prospects’, *Trends in biotechnology*, v. 37, n. 3, p. 231-234. <<https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2018.07.002>>.

IBP (2022). “Evolução do consumo aparente e da dependência externa”. <<https://www.ibp.org.br/observatorio-do-setor/snapshots/consumo-aparente-e-dependencia-externa/>> (accessed 15 October 2022).

- IEA Bioenergy (2022) ‘Facilities’, Bioenergy [Preprint]. IEA. Available at: <<https://www.ieabioenergy.com/installations/>> (accessed 30 October 2022).
- Joly, C and Verdade, LM (2015) ‘Bioenergy & Sustainability: bridging the gaps’, *SCOPE, Paris, France*.
- Koppejan, J, Lönnermark, A, Persson, H, Larsson, I, Blomqvist, P, Arshadi, M, Valencia-Reyes, E, Melin, S, Howes, Pat, Wheeler, P, Baxter, D and Nikolaisen, L (2013) ‘Health and safety aspects of solid biomass storage, transportation and feeding’.
- Li, S et al. (2017) “The origin of selectivity in the conversion of glucose to fructose and mannose in Sn-BEA and Na-exchanged Sn-BEA zeolites”, *Journal of catalysis*, 355, p. 11–16. <<https://doi.org/10.1016/j.jcat.2017.09.001>>
- Machado, N. (2022) “Nuseed e GranBio querem impulsionar biorrefinarias para SAF e etanol 2G”, Agência EPBR | política e mercado de energia, [online]. Available at: <<https://epbr.com.br/nuseed-e-granbio-querem-impulsionar-biorrefinarias-para-saf-e-etanol-2g/>> (accessed 10 November 2022).
- Rodrigues, C. et al. (2017) “Materiais lignocelulósicos como matéria-prima para a obtenção de biomoléculas de valor comercial”, *Biotecnologia Aplicada à Agro&Indústria* - Vol. 4. Editora Blucher, p. 283–314.
- De Oliveira, GKC et al. (2019). “Resíduos agrícolas do nordeste brasileiro e seu potencial lignocelulósico.” *Energias alternativas: tecnologias sustentáveis para o nordeste brasileiro*.
- Panoutsou, C, Langeveld, H, Vis, M, Lammens, TM, Askew, M, Carrez, D, Elbersen, B, Annevelink, B, Staritsky, I, van Stralen, J, Pelkmans, L e Alakangas, E (2016) ‘D8. 2 Vision for 1 billion dry tonnes lignocellulosic biomass as a contribution to biobased economy by 2030 in Europe’, *S2Biom*.
- Piotrowski, S, Carus, M and Carrez, D (2018) ‘European Bioeconomy in Figures 2008-2015’, *Nova-Institute for Ecology and Innovation, Hurth, Germany*, p. 18.
- Ravindran, R and Jaiswal, AK (2016) ‘Exploitation of food industry waste for high-value products’, *Trends in biotechnology*, v. 34, n. 1, p. 58-69. <<https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2015.10.008>>.
- Roitman, T (2019). “Programas internacionais de incentivo aos biocombustíveis e o renovabio”, *FGV Energia*, p. 4-10.
- Rosário, FJP, Soutinho, LC e Silva, NKH da (2016) ‘A inovação como alternativa para a indústria sucroalcooleira de Alagoas: o caso GranBio’, *Revista FAE*, 19(1), pp. 130–137.
- Schultz, EL, Belém, DL e Braga, M (2022) Mapa de rotas tecnológicas da conversão da lignina em intermediários químicos, combustíveis e materiais. 1st edn. Brasília: Embrapa Agroenergia. Available at: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1146185/1/Mapa-de-rotas-tecnologicas.pdf>> (accessed 16 October 2022).
- Star-Colibri (2011) ‘European biorefinery joint strategic research roadmap for 2020’.
- Valdivia, M, Galan, JL, Laffarga, J and Ramos, JL (2016) ‘Biofuels 2020: biorefineries based on lignocellulosic materials’, *Microbial biotechnology*, v. 9, n. 5, p. 585-594. <<https://doi.org/10.1111/1751-7915.12387>>.
- Yousuf, A, Pirozzi, D and Sannino, F (2020) “Fundamentals of lignocellulosic biomass”, *Lignocellulosic Biomass to Liquid Biofuels*. Elsevier, p. 1–15.
- Zhao, L, Sun, ZF, Zhang, CC, Nan, J, Ren, NQ, Lee, DJ and Chen, C (2022) ‘Advances in pretreatment of lignocellulosic biomass for bioenergy production: Challenges and perspectives’, *Bioresource Technology*, v. 343, p. 126123. <<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126123>>.