

Química e Circularidade

Chemistry and Circularity

Ana Lúcia de Lima,^a Aline Domingos Gonçalves,^a Daniella Rodrigues Fernandes,^a Thiago Custódio dos Santos,^a Claudio J. A. Mota^{a,b,c,*}

^a Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Química. Av Athos da Silveira Ramos 149, CT BI A, CEP 21949-909, Rio de Janeiro-RJ, Brasil

^b Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química. Av Athos da Silveira Ramos 149, CT BI E, CEP 21949-909, Rio de Janeiro-RJ, Brasil

^c Universidade Federal do Rio de Janeiro, INCT Energia e Ambiente, CEP 21949-909, Rio de Janeiro-RJ, Brasil

*E-mail: cmota@iq.ufrj.br

Recebido em: 16 de Fevereiro de 2023

Aceito em: 4 de Setembro de 2023

Publicado em: 3 de Outubro de 2023

The global productive system works mostly linearly, completely disconnected from trends towards a sustainable world. In this context, chemistry plays a crucial role in changing the production and consumption paradigm, developing innovative solutions for a more sustainable world. This contribution points out possible paths, barriers and challenges in the transition from linear to circular economy, as well as different examples of successful application of circularity. Initiatives of several companies that adopt production processes based on the principles of sustainability will be listed throughout this manuscript, in addition to relevant academic projects on the subject, especially in the area of CO₂ use and biomass valuation. In this context, the contribution of chemistry is strongly highlighted in topics such as capture and use of CO₂, as well as biofuels and chemical processes derived from biomass.

Keywords: Economia circular; química verde; economia linear; CO₂; biomassa.

1. Introdução

Alguns fatores como o crescimento populacional, a urbanização e o desenvolvimento industrial aumentaram exponencialmente o consumo de bens naturais, gerando uma vasta quantidade de resíduos. Atualmente, o sistema produtivo global funciona, majoritariamente, de forma linear; ou seja, a matéria prima é explorada de suas reservas ou fontes naturais e bens são produzidos e descartados após seu uso. Neste modelo de produção os bens naturais são explorados excessivamente, quase até a sua total depleção, e o descarte de produtos pós consumo promove o acúmulo de resíduos sólidos em aterros sanitários e lixões ou, como no caso dos combustíveis fósseis, na elevação da concentração de gases do efeito estufa na atmosfera.^{1,2}

Uma via alternativa e necessária para mudar esse cenário é a produção de bens de consumo envolvendo materiais e insumos reutilizáveis.³ Muitos produtos podem ser retornados às fábricas, desmontados, melhorados e por fim, retornados ao consumidor, em oposição ao seu simples descarte. Nesse sistema alternativo, denominado “Economia Circular”, as práticas econômicas se baseiam no conceito de reduzir, reutilizar e reciclar (os ditos 3 Rs da sustentabilidade), minimizando o desperdício. Assim, o descarte é substituído pela realocação dos produtos em um novo ciclo; o que antes era lixo se transforma em matéria prima, realimentando o ciclo produtivo.¹

Em um contexto em que o limite do sistema linear de produção se aproxima, é necessário compreender e disseminar modelos de circularidade buscando benefícios sociais, econômicos e ambientais. Diante da necessidade de reflexões sobre a elaboração de projetos com foco em processos sustentáveis, o ano de 2022 foi proclamado pela Assembleia Geral das Nações Unidas (AGNU), como o Ano Internacional das Ciências Básicas para o Desenvolvimento Sustentável, que busca a conexão entre as ciências fundamentais, que estão relacionadas com o acesso a alimentos, energia, saúde e tecnologias de comunicação, e os objetivos do desenvolvimento sustentável descritos pela Agenda 2030.⁴

Essa contribuição busca esclarecer particularidades da economia linear que devem ser substituídas pelo modelo de economia circular, visando o uso sustentável dos recursos do planeta. Também serão apresentadas algumas iniciativas de empresas que adotam processos produtivos com base nos princípios da sustentabilidade. No âmbito acadêmico, serão listados projetos científicos relevantes sobre o assunto, com ênfase na captura, estocagem e utilização de CO₂ e na aplicação da biomassa como matéria-prima para processos produtivos circulares.

2. Economia Linear x Economia Circular

O modelo de economia linear (EL) consiste em *extrair, transformar, produzir, utilizar e*

descartar. Os resíduos sólidos gerados são, na maioria dos casos, acumulados em aterros sanitários ou simplesmente descartados no meio ambiente, afetando a flora e a fauna. De fato, 95% de todo o plástico contido em embalagens é descartado, anualmente, sem qualquer cuidado causando danos à vida marinha e aos demais ecossistemas. Estima-se que 150 milhões de toneladas de resíduos plásticos residem nos oceanos.⁵ Este modelo, também conhecido como produção-consumo-descarte, não é eficiente na sociedade moderna, que apresenta diversos desafios a serem superados, tais como mudanças climáticas e escassez de bens naturais.

Neste contexto, busca-se um modelo econômico que permita conciliar prosperidade com sustentabilidade, resultando em impactos ambientais, sociais e econômicos positivos.^{1,3} O modelo circular associa crescimento econômico a um ciclo de desenvolvimento com foco na reutilização de resíduos e rejeitos. No entanto, para esse processo funcionar é necessária a participação não apenas da academia e do governo, mas também o envolvimento e incentivo de empresas e da população em geral.⁶ A Figura 1 apresenta um comparativo entre os fluxos de economia linear (EL) e economia circular (EC).

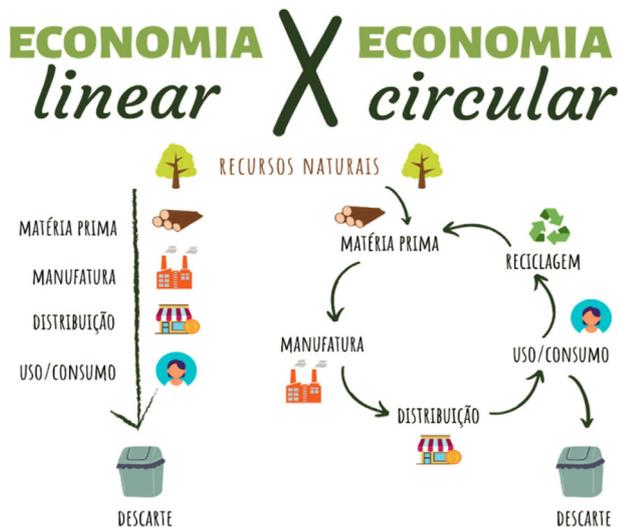


Figura 1. Comparação entre os modelos da economia linear e economia circular

O termo EC foi conceitualizado por Pearce e Turner⁷ em 1990, com o intuito de chamar a atenção da sociedade para a necessidade de ações direcionadas aos resíduos gerados pelo consumismo em crescimento. Trata-se de um modelo alternativo à economia linear; ou seja, é uma nova abordagem onde os bens naturais são utilizados por maior tempo, minimizando a geração de resíduos descartáveis (Figura 1). Nessa abordagem, os recursos são usados, recuperados e renovados em ciclos internos o maior tempo possível, formando um sistema complexo com muitas interrelações e interdependências.⁷

Com a adesão à economia circular, as companhias podem poupar custos expressivos através de estratégias como eficiência de recursos, reutilização e reciclagem.

Regiões como a China e a Europa, onde o objetivo de uma economia circular já está estabelecido por mais de uma década, têm motivado intervenções políticas direcionadas para transformações econômicas e ambientais.^{7,8}

Cobo e colaboradores⁹ destacam o gerenciamento de recursos e resíduos como a chave para uma sociedade sustentável e transição para a economia circular. Desta forma, são obtidas vantagens não apenas minimizando a exploração do meio ambiente e de reservas naturais, mas também por minimizar o uso de materiais virgens para o desenvolvimento de atividades econômicas. Dessa forma, tem-se um modelo de crescimento econômico que visa à proteção ambiental, à prevenção da poluição e o desenvolvimento sustentável.⁹

3. Barreiras, Desafios e Facilitadores para a Economia Circular

Setores empresariais, governos e academia demonstram crescente interesse na busca por alternativas sustentáveis ao modelo econômico linear predominante. Diversos são os desafios e barreiras que devem ser considerados nesse caminho. Preston¹⁰ afirma que a implantação de uma economia circular requer profundas mudanças nas práticas industriais e nos padrões de consumo, destacando alguns obstáculos, tais como: complexas cadeias internacionais de fornecimento de produtos, não cooperação entre as empresas, falta de entusiasmo dos consumidores, além da disseminação limitada de inovação tanto em economias emergentes quanto em países desenvolvidos.¹⁰

Outros fatores são mencionados na literatura como limitantes para a evolução da economia circular, tais como: investimentos insuficientes em tecnologia, indicativos econômicos que não encorajam o uso eficiente dos recursos, falta de conhecimento e informação, incentivos públicos limitados, cultura ambiental precária, falta de legislações efetivas, falta de fiscalizações de leis existentes e carência de habilidades técnicas.^{11,12}

De Jesus e Mendonça¹³ realizaram um levantamento bibliográfico sobre as alavancas e barreiras para a EC. Baseado em uma amostragem de 141 artigos revisados, os autores salientaram uma grande parte de estudos com origem na Europa e apenas 4% das publicações acadêmicas oriundas da América Latina, destacando assim a necessidade de aprofundamento desse assunto no continente.¹³ A pesquisa categorizou tanto as barreiras quanto as alavancas em 4 categorias: a) tecnológicas; b) econômicas/financeiras/mercado; c) institucional e d) social/cultural.

Nesse sentido, novas tecnologias sustentáveis de produção e consumo são necessárias para que a mudança seja possível. Esta se torna uma barreira a partir do momento em que o desenvolvimento de recursos tecnológicos ou o compartilhamento de informações e habilidades técnicas é ineficiente.¹⁴ Na categoria econômica, Kirchherr e colaboradores¹⁵ destacam a demanda de altos investimentos

iniciais e linhas de crédito limitadas para modelos de negócios circulares. A pesquisa também destaca a concorrência entre os materiais reciclados e virgens, pois os baixos custos para os materiais virgens se tornam um obstáculo para a adoção do material reutilizado.

A categoria institucional está relacionada com a criação de fundos de apoio, políticas de tributação e subsídios, ordenamento jurídico, normas e leis ambientais além de diretrizes para a gestão de resíduos; medidas estas que viabilizam a implantação da EC. Por fim, a categoria cultural envolve a responsabilidade e conscientização de produtores e consumidores. A sociedade precisa estar ciente dos problemas ambientais e ter consciência de que apenas uma mudança na forma de consumo dos produtos pode minimizar problemas como a escassez de recursos para as gerações futuras.¹⁵⁻¹⁷

Os desafios para a sociedade atual, onde o modelo econômico linear necessita de mudanças que tragam prosperidade em termos sociais e ambientais, são muito grandes. É necessário um pensamento a longo prazo, com foco na reutilização dos recursos. Essa ação envolve um olhar inovador, não apenas para as tecnologias já existentes, mas especialmente para os novos modelos de negócios, com perspectivas de agregar valor a estes recursos e trazer impactos positivos.¹⁸

4. Empresas e a Circularidade

É imperativo reduzir o desperdício não circulado em qualquer processo. Diversas empresas estão focando seus processos produtivos com base nos princípios da sustentabilidade e da economia circular. Por exemplo, as

florestas da Faber-Castell®, localizadas em Prata, Minas Gerais, capturam 900.000 toneladas de CO₂. Isso significa que os 10.000 hectares de florestas não apenas garantem a madeira para a produção de lápis e papel, como também ajudam a reduzir o teor de CO₂ na atmosfera por meio da fotossíntese, convertendo o CO₂ em biomassa. Considerada uma empresa neutra em emissões de carbono, a Faber-Castell além de utilizar madeira de reflorestamento para a confecção dos produtos, também investe em programas de reciclagem em parceria com a TerraCycle, evitando o descarte de resíduos no meio ambiente, conforme apresentado na Figura 2.¹⁹

Eleita a 14ª empresa mais sustentável do mundo, segundo o *ranking* da companhia canadense de mídia e pesquisa *Corporate Knights*, a multinacional de cosméticos brasileira, Natura®, apresenta uma série de iniciativas sustentáveis tais como, portfólio com 90,4% de produtos naturais ou renováveis, utilização de embalagens recicláveis e comercialização dos resíduos de óleo e álcool, que podem ser empregados na fabricação de produtos de limpeza e biodiesel. Assim, o que é resíduo para uma indústria pode se tornar matéria-prima para outra. A Natura® ainda cria campanhas para estimular caronas entre os colaboradores, reduzindo o impacto causado pelos combustíveis fósseis. Outra iniciativa é a eliminação dos copos plásticos, que representa uma economia de 13 milhões de copos descartáveis a cada ano, evitando o consequente descarte no meio ambiente.²⁰

Uma ação que depende fundamentalmente dos consumidores é o programa de logística reversa. Nesse caso, os consumidores entregam as embalagens vazias nos centros de coleta e a recicladora TerraCycle é responsável por recolher as embalagens e dar sequência ao processo



Figura 2. Esquema adotado pela Faber-Castell em parceria com a TerraCycle. Instrumentos de escrita de material plástico não recarregáveis são coletados e transformados em novas matérias-primas. Adaptado da Ref. 19

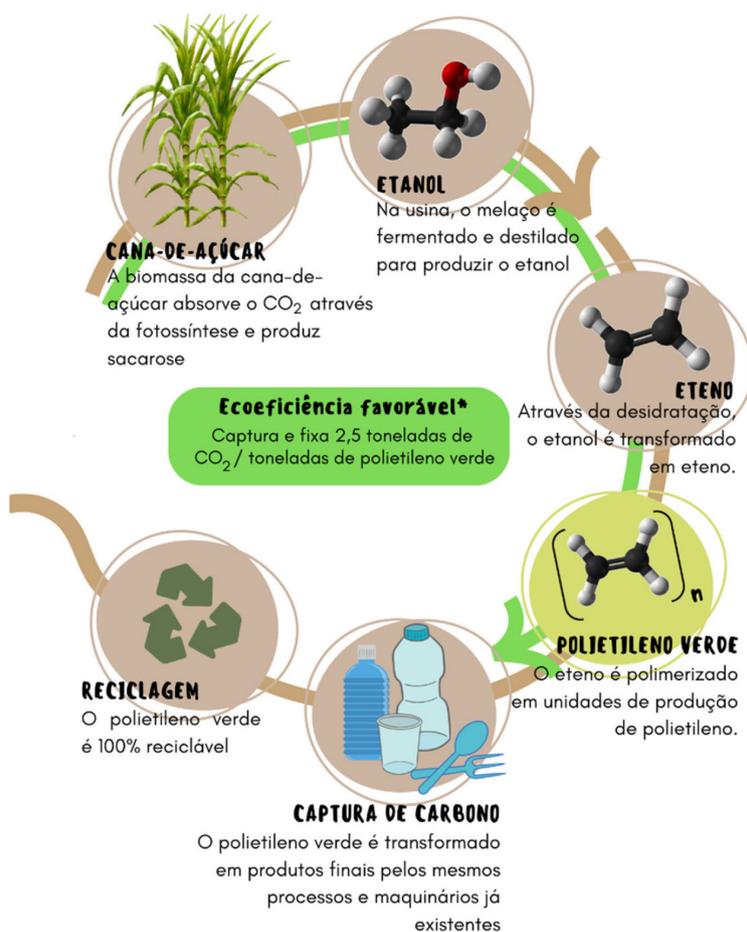
de reciclagem. Em 2020, em torno de 10 mil toneladas de material reciclado pós-consumo foram utilizados pela Natura no Brasil. O volume é 11% maior que o registrado em 2019. A produção de embalagens confeccionadas a partir de plástico reciclado retirado do litoral brasileiro, também, é uma ação importante desenvolvida pela marca, e mostra a urgência em adotar estratégias para diminuir o volume de resíduos que podem poluir os oceanos.²⁰

A Braskem®, 6ª maior petroquímica do mundo, é a principal fabricante mundial de polímeros de base renovável, se destacando na produção do polietileno verde, denominado *Ím green*, produzido a partir de etanol proveniente da cana-de-açúcar.²¹ A produção de polietileno verde foi reconhecida pela CEPAL (Comissão Econômica para a América Latina e o Caribe), em 2020, como uma das iniciativas mais transformadoras em desenvolvimento sustentável na América Latina. O polietileno convencional é produzido a partir da polimerização do etileno, que por sua vez, é obtido, majoritariamente, do craqueamento da nafta proveniente do refino do petróleo. O polietileno não é biodegradável, e uma vez descartado permanece no meio ambiente durante décadas ou séculos, agravando ainda mais o acúmulo de lixo e a poluição ambiental.^{21,22}

O polietileno verde produzido pela Braskem® tem origem na produção de etanol a partir da cana-de-açúcar. O etanol sofre desidratação dando origem ao eteno que, por sua vez, é polimerizado resultando no polietileno verde, o qual é utilizado para uma infinidade de aplicações industriais, desde embalagens até produtos do setor automotivo. Além disso, o plástico verde tem a vantagem de não contribuir para o acréscimo de CO₂ na atmosfera, principal responsável pelo aquecimento global. A Figura 3 ilustra o ciclo de vida de produção de polietileno verde.^{21,22}

Vale ressaltar que o polietileno verde é considerado um plástico *drop in*; ou seja, sua estrutura e propriedades são exatamente as mesmas do polietileno obtido a partir de fontes fósseis. Com isso, não é necessária qualquer modificação dos processos de utilização desse plástico, haja vista que se trata do mesmo polímero.

A Nike®, empresa americana de calçados e equipamentos esportivos, desenvolveu uma iniciativa que tem sido mantida desde 1990, conhecida como *Reuse-a-Shoe*. Trata-se de um programa de reciclagem, que coleta os calçados esportivos velhos e desgastados e os transforma em materiais que podem ser usados para diversas finalidades, como a confecção de outros calçados de alto desempenho e a



*Análise preliminar de Ecoeficiência

Figura 3. Ciclo de vida de produção do polietileno verde. Adaptado da Ref. 21

doação. Nesse processo, o material reciclado é utilizado como matéria-prima para a confecção de tapetes, pneus, entre outros produtos. O programa foi criado em 2021 e conta com cerca de 30 mil pares coletados globalmente em sua primeira implementação.²⁶

Alguns produtos da marca apresentam 60% da sola e 50% do cabedal feitos de materiais renováveis e reciclados. O cabedal é composto por uma tela de algodão e resíduos de garrafa PET; o solado possui resíduos de outras solas e de itens como luvas descartáveis, cascas de arroz e óleo vegetal. Além disso, 97% das sandálias da marca são produzidas com cerca de 40% de borracha reutilizada e cada sacola de compra da loja é, atualmente, resultado do reaproveitamento de 75 garrafas plásticas.²⁶

Apesar de ser considerada relativamente nova no Brasil, a economia circular já está mais amadurecida na Europa e nos Estados Unidos. No Brasil, há necessidade de mudança de postura, pois muitas empresas ainda focam na disposição final ou na remediação, ao invés de atuar em medidas preventivas de eliminação ou minimização de resíduos. Nesse sentido, ainda existe um grande desafio para desenvolver alternativas e estratégias direcionadas de gerenciamento de resíduos e proteção ambiental.²⁷

5. Pesquisas e a Circularidade

Na área acadêmica, diversos pesquisadores têm pautado suas pesquisas com base nos 12 princípios da química

verde (Figura 5), em sustentabilidade e na economia circular.^{28,29} Questões relacionadas ao aquecimento global, à crescente geração de resíduos, sobretudo os sólidos, e ao uso de biomassa nos processos industriais são alguns temas que impulsionam essas pesquisas. Nesse contexto, serão abordados alguns estudos relevantes sobre o assunto, especialmente na área de utilização de CO₂ e valorização da biomassa.

5.1. Utilização de CO₂

O CO₂ é um gás responsável pelo efeito estufa e relacionado ao aquecimento global. Ele possui relevância na indústria alimentícia para a produção de bebidas gaseificadas e, também, encontra uso como gás refrigerante em frigoríficos para congelamento de produtos. O CO₂ supercrítico é utilizado na extração de aromas e no processo de descafeinação com eficiência de 97%. A indústria petrolífera também utiliza o CO₂ de forma direta na recuperação avançada de petróleo (EOR – do inglês, *Enhanced Oil Recovery*), com o intuito de aumentar a eficiência de deslocamento e reduzir a saturação de óleo residual no interior do reservatório.^{30,31} Entretanto, a EOR não pode ser considerada um uso do CO₂ no sentido de mitigar as mudanças climáticas, pois o armazenamento subterrâneo desse gás é feito às custas da produção de mais combustível fóssil e o balanço total não é favorável.

A sociedade moderna é responsável pelo aumento da concentração de CO₂ na atmosfera. Desde o início

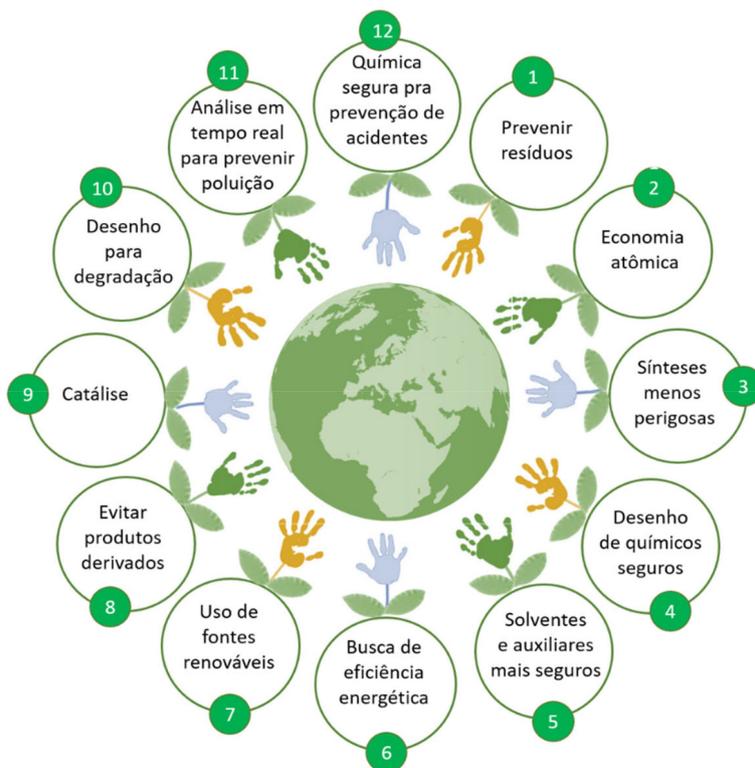


Figura 5. Os 12 princípios da química verde: direcionamentos para o desenvolvimento de uma química mais sustentável. Adaptado das Ref. 28,29

da revolução industrial, em meados do século XVIII, a concentração do CO_2 na atmosfera aumentou mais de 40% em função da queima de combustíveis fósseis, como o petróleo e o carvão. Em termos de emissões estacionárias e industriais, as termelétricas são as responsáveis por mais de 75% das emissões de CO_2 na atmosfera, seguida das indústrias cimenteira, siderúrgica e refinarias de petróleo. Em menor proporção estão as indústrias petroquímicas, de processamento de óleo e gás, biomassa e bioenergia, além de outras fontes.³² A queima indiscriminada de fontes fósseis leva ao aumento da concentração de CO_2 na atmosfera elevando, também, a temperatura média do planeta e provocando as mudanças climáticas. Algumas tecnologias promissoras para mitigação das emissões antrópicas de CO_2 consistem em processos de captura e estocagem de CO_2 (CCS – do inglês, *Carbon Capture and Storage*) e captura e utilização de CO_2 (CCU – do inglês, *Carbon Capture and Utilization*).^{33,34}

A CCS é uma tecnologia mais imediata, uma vez que é possível implantar uma unidade para CCS em uma termelétrica convencional reduzindo as emissões de CO_2 entre 80-90%.^{32,35} A integração da CCS à uma indústria pode refletir em ganho de eficiência de processo e menor custo de produção.³⁵ De acordo com o Instituto Global de CCS, há 21 plantas de grande escala no mundo, onde 4 estão em vias de operação. O Brasil possui um campo de óleo gigantesco que está esgotado e pode servir para o armazenamento de CO_2 na Bacia do Pré-Sal de Santos.³⁶ Por outro lado, há um risco ainda incerto associado ao emprego da CCS para o homem e o meio ambiente.

Os processos CCS são conhecidos desde 1929 e empregam, principalmente, a tecnologia de absorção química como método de separação de CO_2 . Nesta tecnologia ocorre a reação química entre o CO_2 e uma solução aquosa 30% (v/v) de amino-álcool, originando espécies carbamatos, carbonatos e bicarbonatos. Esses compostos seguem para um tanque onde a solução é aquecida e o CO_2 é liberado, sendo comprimido, transportado e armazenado em formações geológicas ou para utilização em EOR.³⁷⁻⁴⁰

Outra alternativa é a captura e utilização de CO_2 (CCU), além do híbrido de captura, estocagem e utilização de CO_2 (CCUS – do inglês, *Carbon Capture, Utilization and Storage*), que tem demonstrado vantagens tecnológicas e econômicas em relação a CCS, pois o CO_2 capturado pode ser aproveitado e utilizado para produzir *commodities*, por exemplo, agregando valor econômico e contextualizando essas tecnologias no cenário da economia circular (Figura 6).⁴¹ Ou seja, a utilização de CO_2 foca no conceito de economia circular, onde os resíduos de um processo se transformam em matéria-prima para produção de outros bens.^{42,43-45} Sistemas de captura e conversão integrada de CO_2 dispensam as etapas de dessorção, compressão e transporte, o que resulta em benefícios econômicos, sociais e ambientais.⁴⁶⁻⁴⁹ Na América do Norte, por exemplo, onde o CO_2 está sendo utilizado para fins comerciais, há grandes investimentos em novos projetos para CCU.⁴⁴

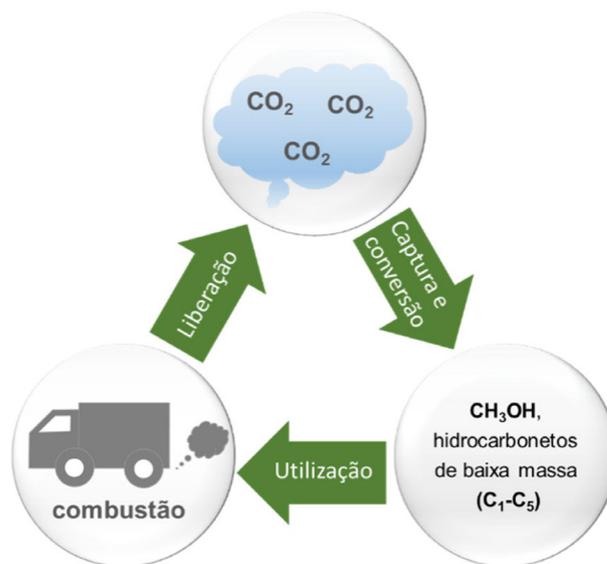


Figura 6. Exemplo da aplicação do conceito de economia circular na mitigação de CO_2

No contexto da CCU, os sistemas bifásicos são particularmente interessantes por possibilitarem a captura e conversão integradas do CO_2 . Estes sistemas propõem o emprego de aminas aquosas para capturar o CO_2 e o uso de um composto organometálico que estará imobilizado na fase orgânica e atuará como catalisador. A Figura 7(a) mostra um sistema bifásico para captura e conversão integrada de CO_2 . A Figura 7(b) apresenta alguns exemplos de catalisadores utilizados neste método.^{46,50-52} Leitner e colaboradores usaram tolueno, ciclopentil-metil-éter, 2-metil-tetra-hidrofurano, metil-isobutil-carbinol e os líquidos iônicos hidrofóbicos ([EMIM][NTf₂], [OMIM][NTf₂] ([NTf₂] = bis(trifluorometilsulfonil)imida, EMIM = 1-etil-3-metilimidazol, OMIM = 1-octil-3-metilimidazol) para imobilização do catalisador. Como soluções aquosas para captura de CO_2 se destacam a trietilamina, dimetilamina e a monoetanolamina.⁵² Os testes catalíticos para a produção de ácido fórmico, usando o catalisador cis-[Ru(dppm)₂Cl] (dppm = bis-difenilfosfinometano), mostraram alta estabilidade para a monoetanolamina e a metil-dietanolamina. Essas aminas já são comercialmente utilizadas em CCS, o que pode acelerar o emprego desses compostos em maior escala para a conversão integrada de CO_2 .

A utilização de CO_2 como matéria-prima na indústria química para a síntese de certos produtos químicos oferece uma opção para evitar milhões de toneladas de emissões do gás a cada ano. A Figura 8 apresenta, de forma resumida, alguns exemplos de produtos de maior valor comercial obtidos a partir de CO_2 . Nesse caso, é relevante avaliar os benefícios ambientais da redução de CO_2 atmosférico, além dos possíveis benefícios econômicos dessas sínteses.^{43,53,54}

A transformação do CO_2 em outros produtos, geralmente, requer alto gasto energético, pois a molécula de CO_2 é termodinamicamente estável e apresenta baixa reatividade. Nesse sentido, torna-se necessário o uso de catalisadores e

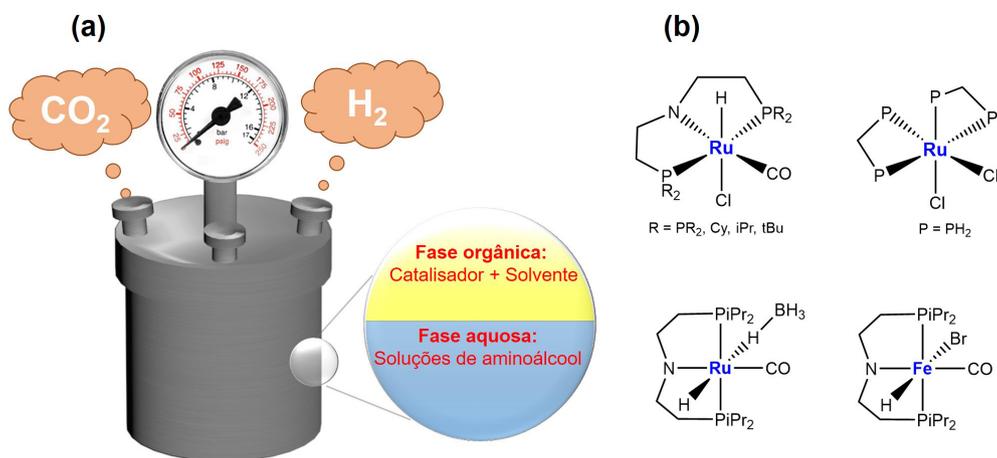


Figura 7. (a) Representação esquemática de captura e conversão integrada de CO_2 , utilizando solventes imiscíveis sob alta pressão. (b) Exemplos de catalisadores organometálicos para hidrogenação de CO_2 em sistemas de captura e conversão integrada.⁵⁰⁻⁵²

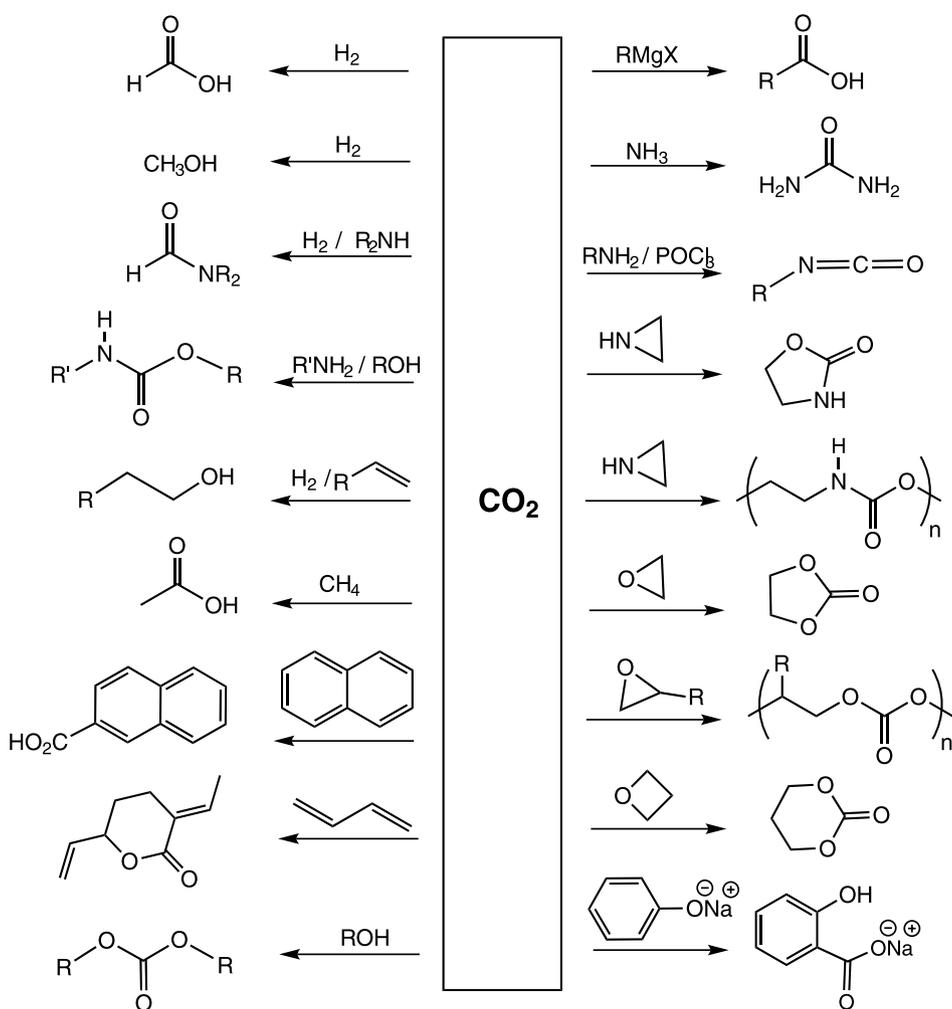


Figura 8. Potenciais produtos químicos obtidos a partir do CO_2

condições reacionais severas para obter-se boas conversões. Ademais, muitas reações são limitadas pela termodinâmica e o equilíbrio precisa ser deslocado para se alcançar altos rendimentos de produtos. Atualmente, alguns processos

químicos industriais utilizam CO_2 como matéria-prima, como a produção de ureia, metanol, ácido salicílico, e carbonatos orgânicos. Globalmente, esses processos envolvem aproximadamente 116 milhões de toneladas de

consumo anual de CO_2 , dos quais 94% são direcionados à produção de ureia.^{55,56}

A hidrogenação do CO_2 possibilita a obtenção de uma variedade de produtos.⁵⁷ Estudos sobre a hidrogenação de CO_2 são relatados desde o início do século XX com ênfase em catalisadores baseados em cobalto, níquel e ferro. Embora diversos estudos tenham sido feitos sobre a reatividade do CO_2 sob diferentes condições reacionais, os produtos prioritários geralmente consistem em CH_4 , CO e hidrocarbonetos leves. Ainda que as condições operacionais possam ser ajustadas, o controle da seletividade continua sendo uma questão crítica.⁵⁸

Embora a produção de CH_4 a partir do CO_2 apresente alta conversão entre 25 e 400 °C, podendo atingir 99% de seletividade com a utilização de catalisadores baseados em Co, Ni Ru, Rh e Pd, a produção de hidrocarbonetos de cadeia longa a partir da hidrogenação do CO_2 tem atraído muita atenção, pois os produtos obtidos podem ser usados como combustíveis e matéria-prima para muitas aplicações. A Figura 9 ilustra as diversas rotas de hidrogenação do CO_2 utilizando diferentes tipos de catalisadores.⁵⁹

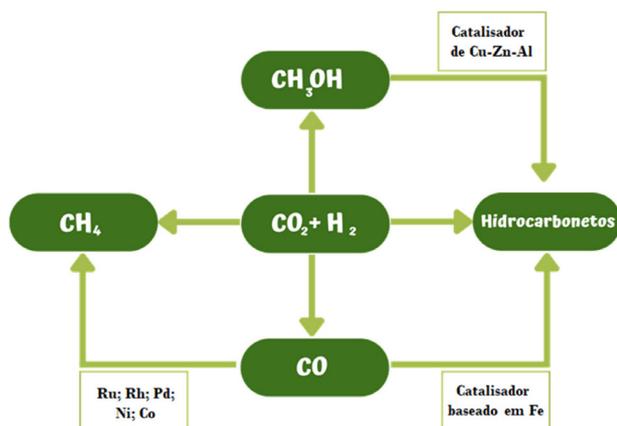


Figura 9. Diferentes produtos obtidos a partir da hidrogenação de CO_2

Outra reação de grande interesse é para a formação de carbonatos orgânicos, que apresentam diversas aplicações tais como solventes, aditivos de combustível, monômeros para polímeros, eletrólitos para baterias de íons de lítio e intermediários na produção fármacos e produtos de química fina.^{42,60,61}

Carbonatos orgânicos cíclicos são formados por meio da cicloadição de CO_2 a um epóxido na presença de catalisadores ácidos de Lewis e um cocatalisador, que normalmente é um sal de amônio quaternário (Figura 10). Recentemente, a busca por sistemas heterogêneos tem se intensificado na literatura. Um exemplo interessante é o uso de zeólitas impregnadas com halogenetos metálicos como catalisadores, que se mostraram bastante ativos para essa reação.^{62,63}

O carbonato de dimetila (DMC) é um composto químico muito versátil podendo ser utilizado como reagente ou solvente com diversas aplicações industriais, tais como monômeros para a produção de resinas de policarbonatos. O DMC é também um bom substituto para o éter metil-terc-butilíco (MTBE) como aditivo oxigenado para combustível.⁶⁴ A tecnologia antiga de síntese de DMC empregava o fosgênio, um composto altamente tóxico. Atualmente, a companhia química japonesa Asahi Kasei produz o DMC através de um processo em duas etapas: inicialmente, o CO_2 reage com o óxido de etileno para produzir o carbonato de etileno que, na sequência, reage com excesso de metanol para produzir o DMC e etileno glicol (Figura 11). Nessa rota, para cada 10.000 toneladas de policarbonato produzidas são consumidas 1780 toneladas de CO_2 .^{65,66}

A rota direta de produção de DMC a partir da reação de metanol e CO_2 tem atraído bastante interesse nos últimos anos. Entretanto, a reação é fortemente limitada pela termodinâmica (Figura 12). Para se obter maiores rendimentos de produto é necessária alguma estratégia para deslocar o equilíbrio. Em geral, são adicionados agentes desidratantes no meio reacional, sendo a 2-ciano piridina um dos mais utilizados na literatura.⁶⁷ Porém, a hidrólise desse composto gera inúmeros outros produtos sem valor comercial e que acabam diminuindo a sustentabilidade e circularidade da reação. O tricloroacetato de metila foi testado como um agente desidratante potencialmente circular nessa reação. Esse reagente hidrolisa mais rapidamente que o DMC e o ácido tricloroacético formado pode ser recuperado ao final da reação e convertido ao éster em uma etapa posterior (Figura 13).⁶⁸ Além do uso de reagentes desidratantes, a escolha do catalisador é de extrema importância. Óxidos metálicos, como o CeO_2 têm se mostrado bastante ativos para a reação de CO_2 e metanol

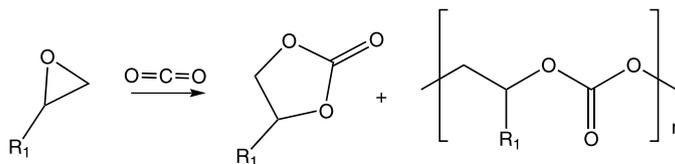


Figura 10. Produtos da reação de epóxidos com CO_2 , carbonato cíclico e policarbonato

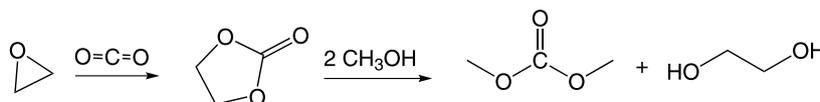


Figura 11. Rota de produção de DMC via tecnologia Asahi Kasei

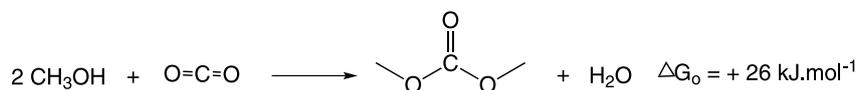


Figura 12. Reação direta de produção de DMC a partir de metanol

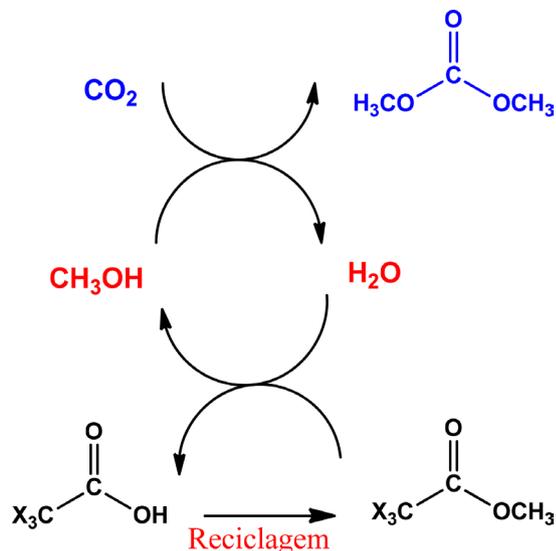


Figura 13. Uso de tricloroacetato de metila como agente desidratante na síntese de DMC. Recuperação do ácido tricloroacético para reconversão ao éster. Adaptado da Ref. 68

para produzir DMC. A presença de vacâncias de oxigênio na estrutura do CeO_2 é fundamental para a obtenção de maiores rendimentos de produto.^{69,70}

O metanol é uma *commodity* com produção mundial acima de 100 milhões de toneladas anuais. Além do uso na produção de biodiesel, o metanol é um insumo importante na produção de plásticos, como eteno, propeno, formaldeído e ácido acético, entre outros.⁷¹ A rota mais tradicional envolve o gás de síntese, produzido, sobretudo, a partir da reforma do gás natural. Entretanto, a rota via hidrogenação de CO_2 vem ganhando importância, e já existe uma planta industrial na Islândia que utiliza hidrogênio produzido por energia geotérmica.⁷⁰

O grande desafio na hidrogenação de CO_2 a metanol é a formulação de catalisadores ativos e seletivos em condições de menores temperaturas, já que o equilíbrio reacional é mais favorecido para a produção de metanol em temperaturas mais baixas e maiores pressões. Muitas pesquisas estudam catalisadores de $\text{Cu}\cdot\text{ZnO}$ com diversos promotores metálicos com o objetivo de chegar próximo do rendimento termodinâmico de metanol a 250°C ou menores temperaturas.

O dimetil éter (DME) é conhecido como um combustível sintético limpo para motores a diesel, pois sua combustão produz quantidades mínimas de material particulado, NO_x e CO quando comparado ao diesel ou à gasolina. A produção de DME a partir de gás natural é uma rota bem estabelecida.⁷² Entretanto, sua produção a partir de CO_2 vem ganhando destaque, especialmente pelo uso de catalisadores bifuncionais, baseados em $\text{Cu}\cdot\text{ZnO}$ suportados em alumina

ou sílica alumina.^{65,73,74,75}

Outro produto obtido a partir do dióxido de carbono é a ureia, que é amplamente utilizada como fertilizante nitrogenado. Além de ser matéria-prima para a produção de muitos compostos químicos importantes, como vários plásticos, resinas e adesivos. Atualmente, cerca de 180 milhões de toneladas de ureia são produzidas anualmente no mundo; para produzir essa quantidade de ureia são necessárias 132 milhões de toneladas de CO_2 .^{56,76}

Uma tecnologia que está em franca expansão é a captura direta de CO_2 do ar atmosférico.⁷⁷ A grande vantagem é a descentralização dos processos produtivos, pois a concentração de CO_2 no ar é praticamente constante em todo o planeta. Por outro lado, os desafios tecnológicos são imensos, devido à baixa concentração do gás no ar, na faixa de 415 a 420 ppm, o que requer soluções específicas e forte integração energética.

No Brasil, a *CarbonAir Energy* é uma *startup* criada especificamente para a captura e utilização de CO_2 .⁷⁸ Ela desenvolve sistemas para a captura do CO_2 de diferentes correntes gasosas, desde o ar de ambientes confinados (captura *indoor*), correntes gasosas industriais e até mesmo do ar atmosférico. O CO_2 capturado pode ser transformado em carbonatos inorgânicos nos dispositivos já desenvolvidos, mas outros produtos de interesse, como metanol e hidrocarbonetos, também podem ser produzidos com adaptações da tecnologia.

5.2. Uso de biomassa no conceito da economia circular

A biomassa também é importante para a consolidação de um processo produtivo circular em termos de produtos, materiais e fornecimento de energia. Nesse sentido, o Brasil apresenta uma posição de destaque por possuir um agronegócio muito forte economicamente e, como consequência, é um dos maiores geradores de resíduos da agroindústria, os quais podem servir como matéria-prima abundante e barata para os processos de transformação química, contribuindo para a aplicação dos princípios da química verde e sustentabilidade.⁷⁹

O biodiesel, um dos principais biocombustíveis usados no mundo, é produzido principalmente pela reação de transesterificação de óleos e gorduras na presença de catalisadores, produzindo glicerol como subproduto (Figura 14). A possibilidade do uso de óleo residual para a produção de biodiesel merece destaque, pois cerca de 15 milhões de toneladas de óleo residual e óleo de fritura são eliminados anualmente em todo o mundo.⁸⁰

Matérias-primas de baixo custo podem ser utilizadas para produção de biodiesel, atendendo uma parcela da demanda atual. Entretanto, os altos teores de ácidos graxos

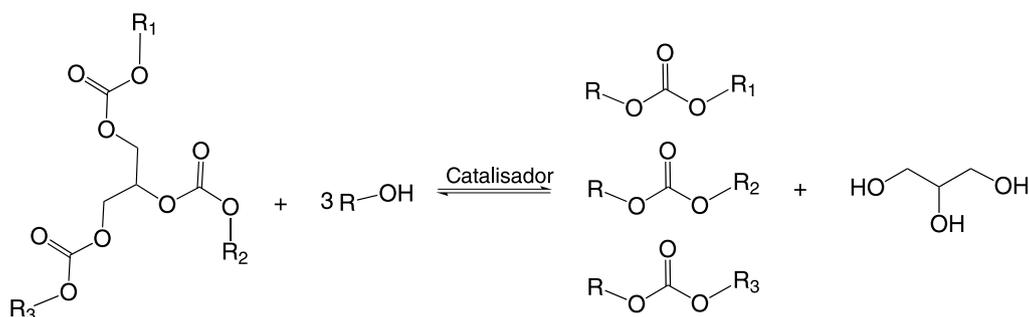


Figura 14. Transesterificação de óleos e gorduras para produção de biodiesel

livres e o alto teor de umidade da matéria-prima devem ser levados em consideração durante a síntese, pois neste caso, são necessários alguns cuidados, como o uso de catalisadores ácidos.^{80,81}

O sebo bovino era considerado um resíduo da indústria de carnes e queimado em caldeiras, usado na fabricação de sabões ou até mesmo descartado.⁸² Atualmente, este insumo encontra no biodiesel um importante mercado, representando 15,6% da matéria-prima utilizada na produção desse biocombustível no país. Estima-se que no Brasil sejam abatidas mais de 40 milhões de cabeças de gado por ano, das quais se extrai aproximadamente 800 milhões de quilos de sebo.^{83,84} Em 2015, mais de 675 milhões de quilos de sebo foram utilizados na produção de biodiesel.^{81,84} A Tabela 2 lista alguns catalisadores e condições reacionais para a produção de biodiesel a partir de óleo residual.

Os catalisadores homogêneos ainda são empregados na produção industrial de biodiesel. Porém, apesar da alta atividade, eles possuem desvantagens devido à perda do catalisador ao final do processo, que ocasiona muitas etapas de purificação do produto final, gerando resíduos indesejáveis. A pesquisa em catalisadores heterogêneos para a produção de biodiesel vem avançando em todo o mundo, porque eles podem ser filtrados e reutilizados em reações subsequentes, além de resultar em produtos e subprodutos com maior grau de pureza. Entretanto, esses materiais ainda não são viáveis para aplicação industrial em larga escala

devido ao alto custo e atividade catalítica inferior quando comparados à catálise homogênea.^{96,97}

O glicerol, coproduto da produção de biodiesel, é considerado uma matéria-prima abundante e de baixo custo com potencial para o desenvolvimento de novos produtos de maior valor agregado. Com múltiplas aplicações, o glicerol é utilizado na produção de diversos produtos alimentícios, cosméticos, farmacêuticos, assim como na área de polímeros, resinas, tintas entre outros.^{98,99}

Mota e colaboradores desenvolveram diversas rotas tecnológicas de transformação do glicerol, bem como a aplicação dos derivados gerados. Por exemplo, a reação do glicerol com aldeídos e cetonas produz acetais e cetais, respectivamente, que podem ser utilizados como aditivos para combustíveis^{100,101} e antioxidantes.¹⁰² Éteres do glicerol têm aplicação como aditivos para melhorar as propriedades de fluxo a frio do biodiesel.¹⁰³ A desidratação oxidativa do glicerol produz acroleína e ácido acrílico^{78,104} e um processo pioneiro de hidrogenólise do glicerol é uma das poucas rotas tecnológicas conhecidas para a produção de propeno a partir de matérias-primas renováveis.¹⁰⁵ Vale salientar que a produção de epiclorigrina a partir do glicerol tem deslocado a rota tradicional de produção desse produto, que parte do propeno (Figura 15).¹⁰⁶ A Figura 16 apresenta algumas dessas transformações químicas.

O etanol é outro biocombustível amplamente utilizado no Brasil. Obtido por fermentação de açúcares simples,

Tabela 2. Produção metilica de biodiesel a partir de óleo residual.

Catalisador (%)	Razão molar (álcool:óleo)	Temperatura (°C)	Tempo (h)	Rendimento (%)	Referência
CaO (7,5)	15:1	65	6	90	85
TiO ₂ /MgO (10)	50:1	160	6	92,3	86
KBr/CaO (3)	12:1	65	~ 2	83,6	87
KOH/Al ₂ O ₃ (15)	9:1	70	2	96,8	88
ZnAl ₂ O ₄ (5)	18:1	100	3	94,8	89
Fe-MMT K10 (4,68)	77:1	134	~ 6	92,7	90
Cu-MOF + Ca-MOF (1)	20:1	60	1	84,5	91
CuFe ₂ O ₄ (3)	18:1	60	0,5	90,2	92
CaO (4)	8:1	65	1,25	98,2	93
Na ₂ O/CNTs (3)	20:1	65	3	97	94
BaSnO ₃ (2,5)	16:1	65	0,42	98	95

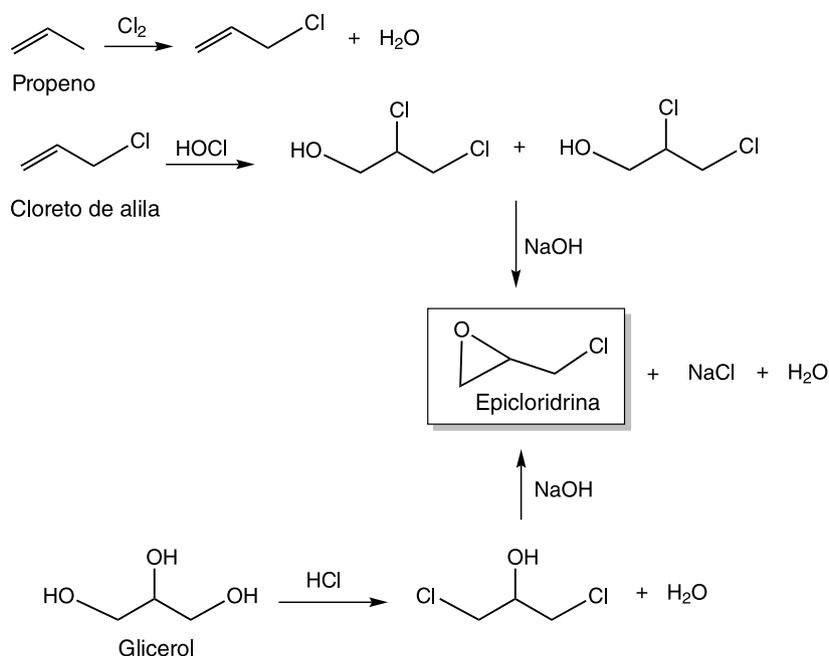


Figura 15. Rotas de produção de epicloridrina a partir de propeno e de glicerol

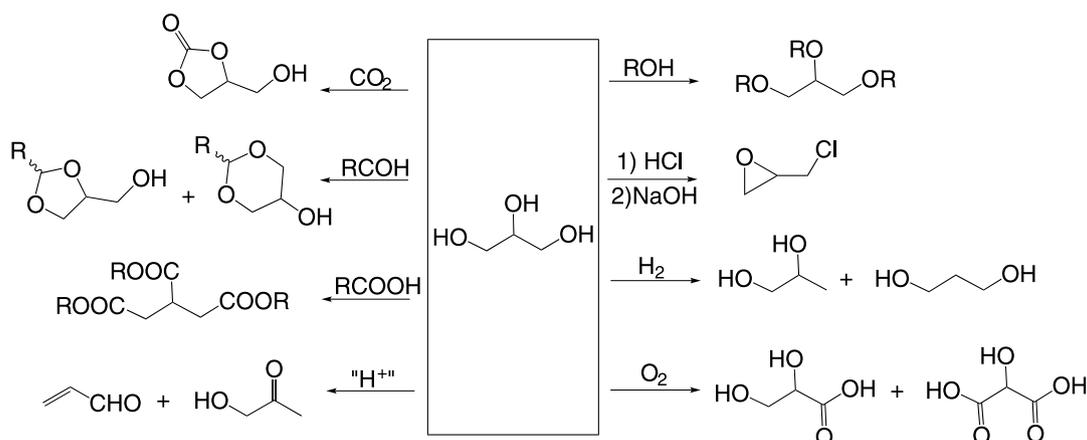


Figura 16. Diferentes produtos obtidos a partir do glicerol

sobretudo oriundos da cana-de-açúcar e do milho, o etanol pode ser, também, matéria-prima para processos químicos industriais. O etanol de 2^a geração, produzido a partir da hidrólise de material lignocelulósico, permitirá um maior uso industrial desse produto, evitando os problemas de entressafra que impactam o preço de venda.

A Braskem® já produz o eteno verde a partir da desidratação do etanol sobre catalisadores ácidos, em especial a alumina. Outro produto interessante no contexto da economia circular é o etilenoglicol, um dos componentes do tereftalato de etileno (PET), muito usado em garrafas descartáveis e, também, na indústria têxtil. A principal rota verde para obtenção do etilenoglicol, atualmente, passa pela desidratação do etanol e subsequente oxidação do eteno formado ao óxido de etileno. Por fim, este último produto é hidrolisado ao etilenoglicol, que pode ser empregado na produção do PET (Figura 17).

Mota e colaboradores estudaram uma rota direta de

produção de óxido de etileno e etilenoglicol a partir do etanol empregando catalisadores bifuncionais nanoestruturados.¹⁰⁷ A concepção do catalisador é de extrema importância, pois as reações precisam acontecer em cascata. Ou seja, inicialmente, o etanol precisa ser desidratado a eteno nos sítios ácidos da superfície externa do catalisador. Na sequência, o eteno formado difunde juntamente com o ar atmosférico para o interior dos poros do catalisador, onde é oxidado a óxido de etileno sobre os sítios metálicos internos. Por fim, o óxido de etileno difunde para fora dos poros e pode ser hidrolisado ao etilenoglicol sobre os sítios ácidos da superfície externa, quando da saída dos poros do catalisador (Figura 18).

O desenvolvimento de um novo processo ou produto sob o conceito da química sustentável deve considerar os três pilares da sustentabilidade: econômico, social e ambiental (Figura 19). Um exemplo de grande relevância desse contexto são as biorrefinarias, que utilizam diferentes

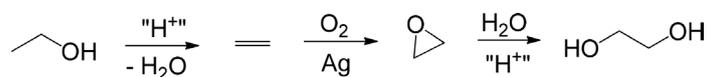


Figura 17. Produção de etileno glicol a partir de etanol

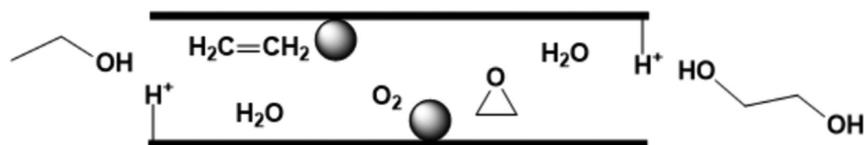


Figura 18. Representação de catalisador bifuncional nanoestruturado para a conversão direta de etanol em etileno glicol. As esferas representam sítios metálicos internos



Figura 19. Os pilares da sustentabilidade e suas dimensões

processos de transformação da biomassa em produtos de maior valor comercial.^{108,109} Há duas grandes classes de biomassa: aquelas que são destinadas ao consumo humano e animal e as que não têm valor alimentício. Os produtos energéticos como os biocombustíveis, por exemplo, quando gerados a partir de biomassa alimentícia são chamados de primeira geração, enquanto os de segunda geração são provenientes de uma biomassa mais atrativa do ponto de vista da sustentabilidade, como resíduos agrícolas, florestais, industriais, entre outros.^{109,110} A possibilidade de utilização de biomassa lignocelulósica e/ou produtos marinhos, como as algas, apresentam grande potencial para o setor industrial, especialmente para a produção de produtos químicos e energia.¹¹¹⁻¹¹³

As algas são organismos marinhos e podem ser classificadas em micro e macroalgas. Elas são importantes fontes de carboidratos, lipídios e proteínas.¹¹³ As macroalgas, por exemplo, são importantes fontes de proteínas, com muitos aminoácidos essenciais, polissacarídeos que formam ficocolóides, como ágar e carragenina, vitaminas e minerais, além de grande quantidade de fibras solúveis e insolúveis.¹¹⁴ Já a lignocelulose é composta basicamente por celulose, hemiceluloses, lignina e outros componentes em menores proporções (< 5%), como óleos, gorduras, proteínas, entre outros. Diferentemente das fontes fósseis, essas biomassas apresentam composição diferenciada, o que traz vantagens

e desvantagens. A biorrefinaria pode projetar a máxima valorização da biomassa, com a produção de diferentes classes de produtos químicos de maior valor agregado, o que ajuda a reduzir a demanda energética, maximizar a rentabilidade e a autossuficiência, pois a biorrefinaria não estaria mais sujeita a oscilações de preços para um único produto. Outra característica interessante é a estrutura, que pode envolver unidades de produção de pequeno a médio porte e adaptável a qualquer local, dependendo da demanda de matéria-prima da região.¹¹⁰

Em contrapartida, há um maior número de etapas, principalmente porque a biomassa requer um pré-tratamento para a posterior despolimerização e desoxigenação, além das inúmeras possibilidades de transformações químicas para obtenção de produtos comerciais. Ademais, os processos podem ser biotecnológicos, envolvendo rotas enzimáticas; ou químicos, incluindo a gaseificação, pirólise e liquefação.¹¹⁵ Para alguns tipos de produtos, como os biocombustíveis, a desoxigenação é necessária porque a biomassa contém frações significativas de compostos oxigenados, o que reduz o conteúdo energético e dificulta sua solubilidade em combustíveis tradicionais. Por outro lado, como as tecnologias das biorrefinarias estão nos estágios iniciais de desenvolvimento, elas podem ser melhor adaptadas e projetadas para atenderem ao contexto da química sustentável e economia circular.

O fracionamento da biomassa envolve tratamentos físicos, químicos, termoquímicos e biológicos. Em geral, os métodos convencionais requerem condições drásticas de temperatura e pressão, uso de ácidos e bases inorgânicas fortes e bens de capital caros. No entanto, alternativas mais sustentáveis envolvem o uso de tecnologias mais verdes, como o uso de líquidos iônicos, fluidos supercríticos e solventes eutéticos.¹¹⁵ O uso desses solventes também tem sido associado a diferentes técnicas de processamento, como agitadores mecânicos, extrusoras, micro-ondas, e ultrassom, melhorando a eficiência do pré-tratamento, reduzindo tempo, custos e desperdícios.^{116,117}

A valorização da biomassa residual é, de fato, uma área em franco desenvolvimento. Muitas pesquisas estão sendo realizadas visando agregar valor a um resíduo que seria descartado. Dessa forma, minimiza-se a exploração dos bens naturais para sanar as demandas da sociedade. A Figura 20 mostra as 12 opções promissoras de produtos provenientes da biomassa de acordo com o Departamento de Energia dos EUA.¹¹⁸

As pesquisas sobre valorização da biomassa envolvem estratégias mais sustentáveis, como avanços no processamento de biomassa,^{115,119,120} reações em uma única etapa,^{115,121} uso de líquidos iônicos,^{115,122} emprego de catalisadores heterogêneos,^{115,123,124} aplicação de sistemas com solventes bifásicos,¹²⁵ entre outros. Embora não

destacado entre os 12 produtos de interesse mundial, o furfural e seus derivados têm sido amplamente estudados como bloco de construção para formação de outros produtos comerciais relevantes, como por exemplo, o ácido levulínico.^{126,127} Além disso, a valorização do furfural também inclui estudos sobre a produção de bioquerosene de aviação e diferentes tipos de aditivos.¹²⁸⁻¹³⁰

Os assuntos tratados nesse artigo demonstram uma grande mudança global de paradigma nas pesquisas. De fato, há uma preocupação real da academia com o desenvolvimento de pesquisas tecnológicas visando a inovação e o desenvolvimento sustentável. Os princípios da química verde estão cada vez mais inseridos nos projetos acadêmicos, assim como a adoção de uma visão de modelos de negócios que foquem na economia circular. Entretanto, essa mudança requer uma transição gradativa dos atores envolvidos, academia, governo e o setor industrial, sem contar a participação decisiva e preponderante da sociedade, que ditará os rumos e a dinâmica com que esse processo de transição ocorrerá.

6. Considerações Finais

A química é fundamental para o desenvolvimento da economia circular. Nos últimos anos, inúmeras ações

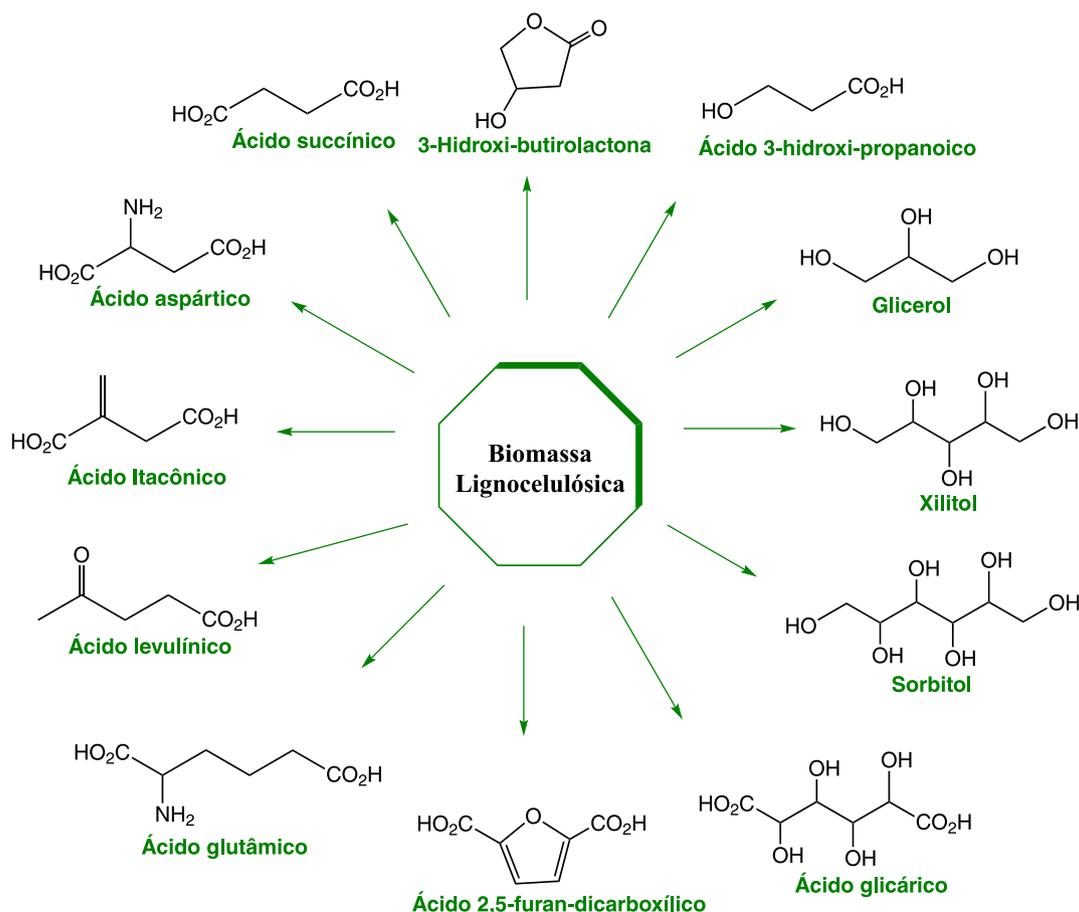


Figure 20. Os 12 produtos rentáveis de interesse mundial obtidos a partir de biomassa

de empresas e da academia têm sido direcionadas ao desenvolvimento de modelos de negócio e tecnologias para alavancar a economia circular, onde os bens naturais são usados, reutilizados e reciclados, enquanto se criam valores adicionais aos produtos durante seu ciclo de vida, minimizando os desperdícios. Entretanto, para substituir totalmente o modelo de economia linear, que esgota os recursos do planeta de forma desenfreada e desorganizada, é preciso um esforço coletivo. A sociedade precisa conscientizar-se dos problemas ambientais mundiais e promover mudanças de hábitos, especialmente na forma de consumo dos produtos, pois pequenas atitudes quando somadas, contribuem mesmo que minimamente para retardar e/ou evitar problemas que afetarão as gerações futuras. A união da indústria, academia e governo é fundamental para que a economia circular atinja níveis mais significativos no país a curto e médio prazo. As empresas precisam investir em novas formas de produção, valorizando os resíduos como fontes de matérias-primas para seus produtos. A academia deve centrar esforços no desenvolvimento de pesquisas disruptivas, que venham a agregar valor aos resíduos e contribuir para a circularidade da economia. O governo deve estabelecer políticas para facilitar a implantação desse conceito inovador e sustentável, motivando os novos modelos de negócio, atuando mais severamente na implementação das políticas públicas já existentes, pois as Leis Ambientais Brasileiras são bastante avançadas. Entretanto, é preciso atuar de forma mais efetiva na fiscalização do exercício dessas leis e, especialmente, na penalização das entidades civil e jurídica que atuam de forma ilícita. Por fim, a sociedade deve ter consciência de que o consumo de bens e produtos não pode se dar a qualquer preço; a valorização de práticas da circularidade deve ser incrementada, com a escolha de produtos e empresas que as pratiquem.

Agradecimentos

FAPERJ, CNPq e Finep.

Referências Bibliográficas

- Sheldon, R. A.; Green chemistry and resource efficiency: Towards a green economy. *Green Chemistry* **2016**, *18*, 3180. [Crossref]
- Castellet-Viciano, L.; Hernández-Chover, V.; Hernández-Sancho, F.; The benefits of circular economy strategies in urban water facilities. *Science of the Total Environment* **2022**, *844*, 157172. [Crossref]
- Ferreira, P. G. .; da Silva, F. C. .; Ferreira, V. F.; A Importância da Química para a Economia Circular. *Revista Virtual de Química*. **2017**, *9*, 452. [Crossref]
- Tavares, M. J. F.; Ferraz, J. M. S.; Júnior, C. A. da S.; Souza, N. S.; Figueirêdo, A. M. T.; A importância do ano internacional das ciências básicas para o desenvolvimento sustentável. *Brazilian Journal of Development* **2022**, *8*, 11243. [Crossref]
- Ellen Macarthur Foundation. Uma economia circular no Brasil: uma exploratória inicial. 2017. Disponível em: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/languages/UmaEconomia-Circular-no-Brasil_Uma-Exploração-Inicial.pdf>. Acesso em: 19 Abril 2017.
- Chen, T. L.; Kim, H.; Pan, S. Y.; Tseng, P. C.; Lin, Y. P.; Chiang, P. C.; Implementation of green chemistry principles in circular economy system towards sustainable development goals: Challenges and perspectives. *Science of the Total Environment* **2020**, *716*, 136998. [Crossref] [PubMed]
- Economia Circular Holanda Brasil: da teoria à prática*, 1ª. ed., Rio de Janeiro : Exchange 4 Change Brasil, 2017. [Link]
- Huesemann, M. H.; The failure of eco-efficiency to guarantee sustainability: Future challenges for industrial ecology. *Environmental Progress* **2004**, *23*, 264. [Crossref]
- Cobo, S.; Dominguez-Ramos, A.; Irabien, A.; From linear to circular integrated waste management systems: a review of methodological approaches. *Resources Conservation and Recycling* **2018**, *135*, 279. [Crossref]
- Preston, F; A global redesign? Shaping the circular economy. *Chatam House* **2012**. [Link]
- Vanner, R.; Bicket, M.; Withana, S.; Ten Brink, P.; Razzini, P.; Van Dijn, E.; Watikins, E.; Hestin, M.; Tan, A.; Guilcher, S.; Hudson, C.; Scoping study to identify potential circular economy actions, priority sectors, material flows & value chains. Institute for Environmental Studies, Vrije Universiteit, 2014. [Link]
- Rizos, V.; Behrens, A.; Kafyke, T.; Hirschnitz-Garbers, M.; Ioannou, A.; The circular economy: barrier and opportunities for SMEs. *Centre for European Policy Studies*, *412*, 2015. [Link]
- de Jesus, A.; Mendonça, S.; Lost in Transition? Drivers and Barriers in the Eco-innovation Road to the Circular Economy. *Ecological Economics* **2018**, *145*, 75. [Crossref]
- Tura, N.; Hanski, J.; Ahola, T.; Stähle, M.; Piiparinen, S.; Valkokari, P.; Unlocking circular business: A framework of barriers and drivers. *Journal of Cleaner Production* **2019**, *212*, 90. [Crossref]
- Kirchherr, J.; Piscicelli, L.; Bour, R.; Kostense-Smir, E.; Muller, J.; Huibrechtse-Truijens, A.; Hekkert, M.; Barriers to the circular economy: evidence from the European Union (EU). *Ecological Economics* **2018**, *150*, 264. [Crossref]
- Fischer, A.; Pascucci, S.; Institutional incentives in circular economy transition: The case of material use in the Dutch textile industry. *Journal of Cleaner Production* **2017**, *155*, 17. [Crossref]
- Ghisellini, P.; Cialani, C.; Ulgiati, S. A review on circular economy: The expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner Production* **2016**, *114*, 11. [Crossref]
- Confederação Nacional da Indústria. Economia circular: oportunidades e desafios para a indústria brasileira. Brasília : CNI, 2018. [Link]
- Faber-Castell., R. A. Disponível em <https://www.faber-castell.com.br/>. Acesso em: 21 agosto 2023.

20. Natura., R. A. Disponível em <<https://www.natura.com.br/>>. Acesso em: 21 agosto 2023.
21. Braskem., R. A. Disponível em <<https://www.braskem.com.br/>>. Acesso em: 21 agosto 2023.
22. Ribeiro, A. M.; Machado Júnior, H. F.; Costa, D. A.; Craqueamento catalítico de polietileno em condições de refinaria: produção de frações combustíveis. *Polímeros* **2006**, *16*, 312. [[Crossref](#)]
23. Site Nike. Disponível em: <<https://recyclenation.com/2012/08/nike-reuse-shoe-program/>>. **2012**. Acesso em: 21 agosto 2023.
24. Site Apple. Disponível em: < <https://www.apple.com/br/environment/>>. Acesso em: 21 agosto 2023.
25. Relatório Anual de Sustentabilidade. Disponível em < <https://www.ambev.com.br/>>. Acesso em: 21 agosto 2023.
26. Havaianas Relatório Anual da Sustentabilidade 2021 – Alpargatas Havaianas. **2021**. [[Link](#)]
27. Simão, J.; Gerenciamento de Resíduos Sólidos Industriais em uma Empresa de Usinagem sobre o enfoque da Produção mais Limpa. *Escola de Engenharia de São Carlos* **2011**. [[Crossref](#)]
28. Ferreira, V. F. .; da Rocha, David R.; da Silva, F. de C.; Química Verde, Economia Sustentável e Qualidade de Vida. *Revista Virtual de Química* **2014**, *6*, 85. [[Crossref](#)]
29. Guarieiro, L. L. N. .; Rezende, M. J. C. .; Barbosa, W. T.; da Rocha, G. O. .; Pereira, P. A.P.; Fernandes, D. F. .; Lopes, W. A. .; Mota, C. J. A. .; de Andrade, J. B.; Reaching Circular Economy through Circular Chemistry: The Basis for Sustainable Development. *Journal of the Brazilian Chemical Society* **2022**, *33*, 1353. [[Crossref](#)]
30. Marsal, A.; Celma, P. J.; Cot, J.; Cequier, M.; Supercritical CO₂ extraction as a clean degreasing process in the leather industry. *The Journal of Supercritical Fluids* **2000**, *16*, 217. [[Crossref](#)]
31. Miranda, J. L.; Moura, L. C.; de Ferreira, de H. B. P.; Abreu, T. P.; O Antropoceno e o CO₂: Processos de Captura e Conversão. *Revista Virtual de Química* **2018**, *10*, 6. [[Crossref](#)]
32. Song, C.; Liu, Q.; Deng, S.; Li, H. L.; Kitamura, Y.; Cryogenic-based CO₂ capture technologies: State-of-the-art developments and current challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2019**, *101*, 265. [[Crossref](#)]
33. Leung, D. Y. C.; Caramanna, G.; Maroto-Valer, M. M. An overview of current status of carbon dioxide capture and storage Technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2014**, *39*, 426. [[Crossref](#)]
34. Figueroa, J. D.; Fout, T.; Plasynski, S.; McIlvried, H.; Sirivastava, R. D.; Advances in CO₂ capture technology—The U.S. Department of Energy’s Carbon Sequestration Program. *International Journal of Greenhouse Gas Control* **2008**, *2*, 9. [[Crossref](#)]
35. Chisalita, D.-A.; Petrescu, L.; Cobden, P.; Dijkstra, H. A. J. (Eric) van; Cormos, A.-Ma.; Cormos, C.-C.; Assessing the environmental impact of an integrated steel mill with post-combustion CO₂ capture and storage using the LCA methodology. *Journal of Cleaner Production* **2019**, *211*, 1015. [[Crossref](#)]
36. Global CCS Institute, The Global Status of CCS: 2017, Summary Report, Australia, 2017. [[Link](#)]
37. Dos Santos, T. C.; Ronconi, C. M.; CO₂ capture in hybrid materials. *Revista Virtual de Química* **2014**, *6*, 112. [[Crossref](#)]
38. Ribeiro, M. G.; Hisse, D.; Prado, M. L.; Dos Santos, T. C.; Ronconi, C. M.; Tecnologias Sustentáveis de Captura de CO₂: Uma Breve Revisão. *Revista Virtual de Química* **2022**, *14*, 517. [[Crossref](#)]
39. Furtado, I. O.; Santos, T. C. dos; F.Vasconcelos, L.; T.Costa, L.; G.Fiorot, R.; Ronconi, C. M.; Carneiro, J. W. de M.; Combined theoretical and experimental studies on CO₂ capture by amine-activated glycerol. *Chemical Engineering Journal* **2021**, *408*, 128002. [[Crossref](#)]
40. Dos Santos, T. C.; Lage, M. R.; Silva, A. F. M. da; Fernandes, T. S.; José Walkimar de M. Carneiro; Ronconi, C. M.; Supramolecular dimers drive the reaction between CO₂ and alkanolamines towards carbonate formation. *Journal of CO₂ Utilization* **2022**, *61*, 102054. [[Crossref](#)]
41. Ra, E. C.; Kim, K. Y.; Kim, E. H.; Lee, H.; An, K.; Lee, J. S.; Recycling Carbon Dioxide through Catalytic Hydrogenation: Recent Key Developments and Perspectives. *ACS Catalysis* **2020**, *10*, 11318. [[Crossref](#)]
42. Kothandaraman, J.; Zhang, J.; Glezakou, V. A.; Mock, M. T.; Heldebrant, D. J.; Chemical transformations of captured CO₂ into cyclic and polymeric carbonates. *Journal of CO₂ Utilization* **2019**, *32*, 196. [[Crossref](#)]
43. Mota, C. J. A.; Monteiro, R. S.; Química e Sustentabilidade: Novas Fronteiras em Biocombustíveis. *Química Nova* **2013**, *36*, 1483. [[Crossref](#)]
44. Tapia, J. F. D.; Lee, J.-Y.; Ooi, R. E. H.; Foo, D. C. Y.; Tan A review of optimization and decision-making models for the planning of CO₂ capture, utilization and storage (CCUS) systems. *Sustainable Production Consumption* **2018**, *13*, 1. [[Crossref](#)]
45. Koysoumpa, E. I.; Bergins, C.; Kakaras, E.; The CO₂ economy: Review of CO₂ capture and reuse Technologies. *The Journal of Supercritical Fluids* **2018**, *132*, 3. [[Crossref](#)]
46. Kar, S.; Sen, R.; Goeppert, A.; Prakash, G. K. S.; Integrative CO₂ Capture and hydrogenation to methanol with reusable catalyst and amine: Toward a carbon neutral methanol economy. *Journal of the American Chemical Society* **2018**, *140*, 1580. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
47. Kar, S.; Goeppert, A.; Prakash, G. K. S.; Integrated CO₂ Capture and Conversion to Formate and Methanol: Connecting Two Threads. *Accounts of Chemical Research* **2019**, *52*, 2892. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
48. Liu, M.; Gadikota, G.; Integrated CO₂ Capture, Conversion, and Storage to Produce Calcium Carbonate Using an Amine Looping Strategy. *Energy and Fuels* **2019**, *33*, 1722. [[Crossref](#)]
49. Kim, S. M.; Abdala, P. M.; Broda, M.; Hosseini, D.; Copéret, C.; Müller, C.; Integrated CO₂ Capture and Conversion as an Efficient Process for Fuels from Greenhouse Gases. *ACS Catalysis* **2018**, *8*, 2815. [[Crossref](#)]
50. Schaub, T.; Paciello, R. A.; A Process for the Synthesis of Formic Acid by CO₂ Hydrogenation: Thermodynamic Aspects and the Role of CO. *Angewandte Chemie* **2011**, *50*, 7278. [[Crossref](#)]
51. Kothandaraman, J.; Goeppert, A.; Czaun, M.; George A Olah; Prakash, G. K. S.; CO₂ capture by amines in aqueous media and its subsequent conversion to formate with reusable ruthenium and iron catalysts. *Green Chemistry* **2016**, *18*, 5831. [[Crossref](#)]

52. Scott, M.; Molinos, B. B.; Westhues, C.; Franciò, G.; Leitner, W.; Aqueous Biphasic Systems for the Synthesis of Formates by Catalytic CO₂ Hydrogenation: Integrated Reaction and Catalyst Separation for CO₂-scrubbing Solutions. *ChemSusChem* **2017**, *10*, 1085. [Crossref]
53. Sakakura, T.; Choi, J. C.; Yasuda, H.; Transformation of carbon dioxide. *Chemical Reviews* **2007**, *107*, 2365. [Crossref] [PubMed]
54. Fujita, S.; Em *New and Future Developments in Catalysis, Activation of Carbon Dioxide. Chapter 5 - Catalytic Transformation of CO₂ into Value-Added Organic Chemicals*; Fujita, S.; Yoshida, H.; Liu, R.; Arai, M.; Hokkaido University: Sapporo, 2013, cap. 5.
55. Schilling, W.; Das, S.; CO₂-catalyzed/promoted transformation of organic functional groups. *Tetrahedron Letters* **2018**, *59*, 3821. [Crossref]
56. Koohestanian, E.; Sadeghi, J.; Mohebbi-Kalhor, D.; Shahraki, F.; Samimi, A.; A novel process for CO₂ capture from the flue gases to produce urea and ammonia. *Energy* **2018**, *144*, 279. [Crossref]
57. Xiong, S.; Lian, Y.; Xie, H.; Liu, B.; Hydrogenation of CO₂ to methanol over Cu/ZnCr catalyst. *Fuel* **2019**, *256*, 115975. [Crossref]
58. Fiato, R. A.; Iglesia, E.; Rice, G. W.; Soled, S. L.; Iron catalyzed CO₂ hydrogenation to liquid hydrocarbons. *Studies in Surface Science and Catalysis* **1998**, *114*, 339. [Crossref]
59. Koschany, F.; Schlereth, D.; Hinrichsen, O.; On the kinetics of the methanation of carbon dioxide on coprecipitated NiAl(O)x. *Applied Catalysis B: Environment*. **2016**, *181*, 504. [Crossref]
60. Pan, S. Y.; Chiang, P. C.; Pan, W.; Kim, H.; Advances in state-of-art valorization technologies for captured CO₂ toward sustainable carbon cycle. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* **2018**, *48*, 471. [Crossref]
61. Marciniak, A. A.; Lamb, K. J.; Ozório, L. P.; Mota, C. J. A.; North, M.; Heterogeneous catalysts for cyclic carbonate synthesis from carbon dioxide and epoxides. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry* **2020**, *26*, 100365. [Crossref]
62. Ozório, L. P. ; da Silva, F. J. ; Comerford, J. ; North, M. ; Mota, C. J. A.; Zeolite-Mediated Production of Cyclic Organic Carbonates: Reaction of CO₂ with Styrene Oxide on Zeolite Y Impregnated with Metal Halides. *Reaction Chemistry & Engineering* **2021**, *6*, 672. [Crossref]
63. Henrique, F. J. F. S. ; Barbosa, P. A. S. ; Grisolia, L. M.; Silva, R. J. ; Mota, C. J. A.; Evidence for Supramolecular Catalysis in the Synthesis of Cyclic Organic Carbonates over Zeolite Y Impregnated with Metal Iodides. *Molecular Catalysis* **2022**, *522*, 112216. [Crossref]
64. Sánchez, A.; Gil, L. M.; Martín, M.; Sustainable DMC production from CO₂ and renewable ammonia and methanol. *Journal of CO₂ Utilization* **2019**, *33*, 521. [Crossref]
65. Tan, H. Z.; Wang, Z. Q.; Xu, Z. N.; Sun, J.; Xu, Y. P.; Chen, Q. S.; Chen, Y.; Guo, G. C.; Review on the synthesis of dimethyl carbonate. *Catalysis Today* **2018**, *316*, 2. [Crossref]
66. Fukuoka, S.; Kawamura, M.; Komiyama, K.; Tojo, M.; Hachiya, H.; Hasegawa, K.; Aminaka, M.; Okamoto, H.; Fukawa, I.; Konno, S.; A novel non-phosgene polycarbonate production process using by-product CO₂ as starting material. *Green Chemistry* **2003**, *5*, 497. [Crossref]
67. Honda, M.; Tamura, M.; Nakagawa, Y.; Sonehara, S.; Suzuki, K.; Fujimoto, K. I.; Tomishige, K.; Ceria-catalyzed conversion of carbon dioxide into dimethyl carbonate with 2-cyanopyridine. *ChemSusChem* **2013**, *6*, 1341. [Crossref] [PubMed]
68. Marciniak, A.; Mota, C. J. A.; Methyl Trihaloacetic Esters as Efficient and Sustainable Water Suppressors in the Synthesis of Dimethyl Carbonate from CO₂. *Chemistry Select* **2017**, *2*, 1808. [Crossref]
69. Marciniak, A. A.; Alves, O. C.; Appel, L. G.; Mota, C. J. A.; Synthesis of Dimethyl Carbonate from CO₂ and Methanol over CeO₂: Role of Copper as Dopant and the Use of Methyl Trichloroacetate as Dehydrating Agent. *Journal of Catalysis* **2019**, *371*, 88. [Crossref]
70. Marciniak, A. A.; Henrique, F. J. F. S.; de Lima, A. F. F.; Alves, O. C.; Appel, L. G.; Mota, C. J. A.; What Are the Preferred CeO₂ Exposed Planes for the Synthesis of Dimethyl Carbonate from CO₂ and Methanol? Answers from Theory and Experiments. *Molecular Catalysis* **2020**, *493*, 111053. [Crossref]
71. Goepfert, A.; Em Green Chemistry; *Toward a Sustainable Carbon Cycle: The Methanol Economy*; Goepfert, A.; Olah, G. A.; Surya Prakash, G. K.; Elsevier Inc., 2018, cap. 3.26.
72. Fernandes, D. R.; Rosenbach, N.; Mota, C. J. A.; Catalytic conversion of chloromethane to methanol and dimethyl ether over metal-exchanged zeolite Y. *Applied Catalysis A: General* **2009**, *367*, 108. [Crossref]
73. Bian, J.; Xiao, M.; Wang, S. J.; Lu, Y. X.; Meng, Y. Z.; Carbon nanotubes supported Cu-Ni bimetallic catalysts and their properties for the direct synthesis of dimethyl carbonate from methanol and carbon dioxide. *Applied Surface Science* **2009**, *255*, 7188. [Crossref]
74. da Silva, R. J.; Pimentel, A. F.; Monteiro, R. S.; Mota, C. J. A.; Synthesis of Methanol and Dimethyl Ether from the CO₂ Hydrogenation over Cu/ZnO supported on Al₂O₃ and Nb₂O₅. *Journal of CO₂ Utilization* **2016**, *15*, 83. [Crossref]
75. Carvalho, D. F.; Almeida, G. C.; Monteriro, R. S.; Mota, C. J. A.; Hydrogenation of CO₂ to Methanol and Dimethyl Ether over Bifunctional Cu.ZnO Catalyst Impregnated on Modified γ -Alumina. *Energy Fuels* **2020**, *34*, 7269. [Crossref]
76. Al-Mamoori, A.; Krishnamurthy, A.; Rownaghi, A. A.; Rezaei, F.; Carbon Capture and Utilization Update. *Energy Technology* **2017**, *5*, 834. [Crossref]
77. Chagas, J. A. O.; Marciniak, A. A.; Mota, C. J. A.; Trends in Carbon Dioxide Capture and Conversion. *Journal of the Brazilian Chemical Society* **2022**, *33*, 801. [Crossref]
78. Site Carbon Air Energy. Disponível em: <<https://carbonairenergy.com.br/>>. Acesso em: 21 de agosto de 2023.
79. Awasthi, M. K.; Sarsaiya, S.; Patel, A.; Juneja, A.; Singh, R. P.; Yan, B.; Awasthi, S. K.; Jain, A.; Liu, T.; Duan, Y.; Pandey, A.; Zhang, Z.; Taherzadeh, M. J.; Refining biomass residues for sustainable energy and bio-products: An assessment of technology, its importance, and strategic applications in circular bio-economy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2020**, *127*, 109876. [Crossref]

80. Lee, A. F.; Bennett, J. A.; Manayil, J. C.; Wilson, K.; Heterogeneous catalysis for sustainable biodiesel production via esterification and transesterification. *Chemical Society Reviews* **2014**, *43*, 7887. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
81. UBRABIO – União brasileira de biodiesel e bioquerosene; Relatório anual de atividades, 2016. [[Link](#)]
82. Site CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/consumosustentavel/wp-content/uploads/sites/20/2013/11/abate.pdf>>. Acesso em: 10 08 2023.
83. Site ABRA – Associação Brasileira de Reciclagem animal. Disponível em: <<https://abra.ind.br/sebo-bovino-e-apontado-como-uma-das-materias-primas-mais-sustentaveis-para-biodiesel/>>. Acesso em: 10 08 2023.
84. MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Secretaria Executiva, Coordenação Geral de apoio às câmaras setoriais e temáticas, Câmara setorial de cadeia produtiva de oleaginosas e biodiesel. Usos de biodiesel no Brasil e no Mundo, 1ª edição, MAPA/ACE : Brasília, 2015.
85. Maneerung, T.; Kawi, S.; Dai, Y.; Wang, C. H.; Sustainable biodiesel production via transesterification of waste cooking oil by using CaO catalysts prepared from chicken manure. *Energy Conversion and Management* **2016**, *123*, 487. [[Crossref](#)]
86. Wen, Z.; Yu, X.; Tu, S. T.; Yan, J.; Dahlquist, E.; Biodiesel production from waste cooking oil catalyzed by TiO₂-MgO mixed oxides. *Bioresource Technology* **2010**, *101*, 9570. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
87. Mahesh, S. E.; Ramanathan, A.; Begum, K. M. M. S.; Narayanan, A.; Biodiesel production from waste cooking oil using KBr impregnated CaO as catalyst. *Energy Conversion and Management* **2015**, *91*, 442. [[Crossref](#)]
88. Agarwal, M.; Chauhan, G.; Chaurasia, S. P.; Singh, K.; Study of catalytic behavior of KOH as homogeneous and heterogeneous catalyst for biodiesel production. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers* **2012**, *43*, 89. [[Crossref](#)]
89. Shaban, M.; Hosny, R.; Rabie, A. M.; Shim, J. J.; Ahmed, S. A.; Betiha, M. A.; Negm, N. A.; Zinc aluminate nanoparticles: Preparation, characterization and application as efficient and economic catalyst in transformation of waste cooking oil into biodiesel. *Journal of Molecular Liquids* **2020**, *302*, 112377. [[Crossref](#)]
90. Yahya, S.; Muhamad Wahab, S. K.; Harun, F. W.; Optimization of biodiesel production from waste cooking oil using Fe-Montmorillonite K10 by response surface methodology. *Renewable Energy* **2020**, *157*, 164. [[Crossref](#)]
91. Jamil, U.; Husain Khoja, A.; Liaquat, R.; Raza Naqvi, S.; Nor Nadyaini Wan Omar, W.; Aishah Saidina Amin, N.; Copper and calcium-based metal organic framework (MOF) catalyst for biodiesel production from waste cooking oil: A process optimization study. *Energy Conversion and Management* **2020**, *215*, 112934. [[Crossref](#)]
92. Ali, R. M.; Elkatory, M. R.; Hamad, H. A.; Highly active and stable magnetically recyclable CuFe₂O₄ as a heterogenous catalyst for efficient conversion of waste frying oil to biodiesel. *Fuel* **2020**, *268*, 117297. [[Crossref](#)]
93. Hsiao, M. C.; Kuo, J. Y.; Hsieh, S. A.; Hsieh, P. H.; Hou, S. S.; Optimized conversion of waste cooking oil to biodiesel using modified calcium oxide as catalyst via a microwave heating system. *Fuel* **2020**, *266*, 117114. [[Crossref](#)]
94. Ibrahim, M. L.; Nik Abdul Khalil, N. N. A.; Islam, A.; Rashid, U.; Ibrahim, S. F.; Sinar Mashuri, S. I.; Taufiq-Yap, Y. H.; Preparation of Na₂O supported CNTs nanocatalyst for efficient biodiesel production from waste-oil. *Energy Conversion and Management* **2020**, *205*, 1124445. [[Crossref](#)]
95. Roy, T.; Sahani, S.; Madhu, D.; Chandra Sharma, Y.; A clean approach of biodiesel production from waste cooking oil by using single phase BaSnO₃ as solid base catalyst: Mechanism, kinetics & E-study. *Journal of Cleaner Production* **2020**, *265*, 121440. [[Crossref](#)]
96. Calero, J.; Luna, D.; Sancho, E. D.; Luna, C.; Bautista, F. M.; Romero, A. A.; Posadillo, A.; Verdugo, C.; Development of a new biodiesel that integrates glycerol, by using CaO as heterogeneous catalyst, in the partial methanolysis of sunflower oil. *Fuel* **2014**, *122*, 94. [[Crossref](#)]
97. De Lima, A. L.; Ronconi, C. M.; Mota, C. J. A. Heterogeneous basic catalysts for biodiesel production. *Catalysis Science and Technology* **2016**, *6*, 2877. [[Crossref](#)]
98. Mota, C. J. A.; Pinto, B. P.; de Lima, A. L.; *Glycerol: A Versatile Renewable Feedstock for the Chemical Industry*, 1a. ed., ISBN: 978-3-319-59374-6, Springer, 2017.
99. Mota, C. J. A.; da Silva, C. X. A.; Gonçalves, V. L. C.; Glicerol: Química: Novos Produtos e Processos a partir da Glicerina de Produção de Biodiesel. *Química Nova* **2009**, *32*, 639. [[Crossref](#)]
100. Silva, P. H. R.; Gonçalves, V. L. C.; Mota, C. J. A.; Glycerol Acetals as Antifreezing Additives for Biodiesel. *Bioresource Technology* **2010**, *101*, 6225. [[Crossref](#)]
101. Mota, C. J. A.; da Silva, C. X. A.; Rosenbach, N.; Costa, J.; da Silva, F.; Glycerin Derivatives as Fuel Additives: The addition of Glycerol/Acetone Ketal (Solketal) in Gasolines. *Energy Fuels* **2010**, *24*, 2733. [[Crossref](#)]
102. Dodson, J. R.; Avellar, T.; Athayde, J.; Mota, C. J. A.; Glycerol Acetals with Antioxidant Properties. *Pure and Applied Chemistry* **2014**, *86*, 905. [[Crossref](#)]
103. Pinto, B. P.; de Lyra, J. T.; Nascimento, J. A. C.; Mota, C. J. A.; Ethers of glycerol and ethanol as bioadditives for biodiesel. *Fuel* **2016**, *168*, 76. [[Crossref](#)]
104. Pestana, C. F. M.; Gerra, A. C. O.; Ferreira, G. B.; Turci, C. C.; Mota, C. J. A.; Oxidative Dehydration of Glycerol to Acrylic Acid over Vanadium-Impregnated Zeolite Beta. *Journal of the Brazilian Chemical Society* **2013**, *24*, 100. [[Crossref](#)]
105. Mota, C. J. A.; Gonçalves, V. L. C.; Mellizo, J. E.; Rocco, A. M.; Fadigas, J. C.; Gambetta, R.; Green Propene through the Selective Hydrogenolysis of Glycerol over Supported Iron-Molybdenum Catalyst: The Original History. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical* **2016**, *422*, 158. [[Crossref](#)]
106. Prete, P.; Cespi, D.; Passarini, F.; Capacchione, C.; Proto, A.; Cucciniello, R. Glycidol syntheses and valorizations: Boosting the glycerol biorefinery. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry* **2022**, *35*, 100624. [[Crossref](#)]

107. Martins, C. X.; Mota, C. J. A.; Estudos sobre Conversão Direta de Etanol a Óxido de Etileno sobre Catalisadores Zeolíticos. *Revista Virtual de Química* **2014**, *6*, 1282. [Crossref]
108. Alvim, J. C.; Alvim, F. A. L. S.; Sales, V. H. G.; Oliveira, E. M. de; Sales, P. V. G.; Costa, A. C. R.; Biorefineries: concepts, classification, raw materials and products. *Journal of Bioenergy and Food Science* **2014**, *1*, 61. [Crossref]
109. Ptasiniski, K. J.; Efficiency of Biomass Energy: An Exergy Approach to Biofuels, Power, and Biorefineries, Wiley, 2016.
110. Rodrigues, J. A. R.; Do engenho a biorrefinaria: a usina de açúcar como empreendimento industrial para a geração de produtos bioquímicos e biocombustíveis. *Química Nova* **2011**, *34*, 1242. [Crossref]
111. Shen, Y.; Sun, J.; Wang, B.; Xu, F.; Sun, R.; Catalytic Approaches to the Production of Furfural and Levulinates From Lignocelluloses, Elsevier B.V., 2018.
112. Shinde, S. H.; Hengne, A.; Rode, C. V.; Lignocellulose-derived platform molecules: An introduction, Elsevier B.V., 2019.
113. Chen, H.; Xia, A.; Zhu, X.; Huang, Y.; Zhu, X.; Liao, Q.; Hydrothermal hydrolysis of algal biomass for biofuels production: a review. *Bioresource Technology* **2021**, 126213. [Crossref]
114. Foppa, C. C.; Em *Fronteiras do conhecimento em ciências do mar*; Foppa, C. C.; Moura, G. G. M.; Isaguirre, K. R.; Ed. da FURG : Rio Grande, 2020, cap. 9.
115. Fernandes, D. R.; Evangelista, B. D. V.; Pinto, B. P.; Rocha, A. S.; de Andrade, D. F.; Rezende, M. J. C.; Mota, C. J. A.; Panorama Geral da Utilização de Líquidos Iônicos para Fracionamento e Transformação da Biomassa Lignocelulósica. *Revista Virtual de Química* **2021**, *2*, 1431. [Crossref]
116. Sposina Sobral Teixeira, R.; Sant'Ana da Silva, A.; Kim, H. W.; Ishikawa, K.; Endo, T.; Lee, S. H.; P.S. Bon, E.; Use of cellobiohydrolase-free cellulase blends for the hydrolysis of microcrystalline cellulose and sugarcane bagasse pretreated by either ball milling or ionic liquid [Emim][Ac]. *Bioresource Technology*. **2013**, *149*, 551. [Crossref] [PubMed]
117. Flores, E. M. M.; Cravotto, G.; Bizzi, C. A.; Santos, D.; Iop, G. D.; Ultrasound-assisted biomass valorization to industrial interesting products: state-of-the-art, perspectives and challenges. *Ultrasonics Sonochemistry* **2021**, *72*, 105455. [Crossref]
118. Werpy, T.; Petersen, G.; Top Value Added Chemicals from Biomass: Volume I -- Results of Screening for Potential Candidates from Sugars and Synthesis Gas. U.S. *Department of Energy, Office of Scientific and Technical Information (OSTI)* **2004**, 69. [Crossref]
119. Hoang, A. T.; Ong, H. C.; Fattah, I. M. R.; Chong, C. T.; Cheng, C. K.; Sakthivel, R.; Ok, Y. S.; Progress on the lignocellulosic biomass pyrolysis for biofuel production toward environmental sustainability. *Fuel Processing Technology* **2021**, *223*, 106997. [Crossref]
120. Ansari, K. B.; Kamal, B.; Beg, S.; Wakeel Khan, M. A.; Khan, M. S.; Al Mesfer, M. K.; Danish, M.; Recent developments in investigating reaction chemistry and transport effects in biomass fast pyrolysis: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2021**, *150*, 111454. [Crossref]
121. Ro, B. S.; Kumari, P. K.; Lakshmi, D. D.; Lingaiah, N.; One pot selective transformation of biomass derived chemicals towards alkyl levulinates over titanium exchanged heteropoly tungstate catalysts. *Catalysis Today* **2018**, *309*, 269. [Crossref]
122. Khan, A. S.; Man, Z.; Bustam, M. A.; Nasrullah, A.; Ullah, Z.; Sarwono, A.; Shah, F. U.; Muhammad, N.; Efficient conversion of lignocellulosic biomass to levulinic acid using acidic ionic liquids. *Carbohydrate Polymers* **2018**, *181*, 208. [Crossref]
123. Romero, A.; Alonso, E.; Sastre, Á.; Nieto-Márquez, A.; Conversion of biomass into sorbitol: Cellulose hydrolysis on MCM-48 and d-Glucose hydrogenation on Ru/MCM-48. *Microporous and Mesoporous Materials* **2016**, *224*, 1. [Crossref]
124. Kang, S.; Fu, J.; Zhang, G. F.; From lignocellulosic biomass to levulinic acid: A review on acid-catalyzed hydrolysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2018**, *94*, 340. [Crossref]
125. Tyagi, U.; Anand, N.; Kumar, D.; Simultaneous pretreatment and hydrolysis of hardwood biomass species catalyzed by combination of modified activated carbon and ionic liquid in biphasic system. *Bioresource Technology* **2019**, *289*, 121675. [Crossref]
126. Chen, Z.; Bai, X.; Lusi, A.; Jacoby, W. A.; Wan, C.; One-pot selective conversion of lignocellulosic biomass into furfural and co-products using aqueous choline chloride/methyl isobutyl ketone biphasic solvent system. *Bioresource Technology* **2019**, *289*, 121708. [Crossref]
127. Luo, Y.; Li, Z.; Li, X.; Liu, X.; Fan, J.; Clark, J. H.; Hu, C.; The production of furfural directly from hemicellulose in lignocellulosic biomass: A review. *Catalysis Today* **2019**, *319*, 14. [Crossref]
128. Wu, L.; Moteki, T.; Gokhale, A. A.; Flaherty, D. W.; Toste, F. D.; Production of Fuels and Chemicals from Biomass: Condensation Reactions and Beyond. *Chem* **2016**, *1*, 32. [Crossref]
129. Zhu, S.; Cen, Y.; Guo, J.; Chai, J.; Wang, J.; Fan, W.; One-pot conversion of furfural to alkyl levulinate over bifunctional Au-H₄SiW₁₂O₄₀/ZrO₂ without external H₂. *Green Chemistry* **2016**, *18*, 5667. [Crossref]
130. Faria, V. W.; Almeida, G. C.; Mota, C. J. A.; Condensação aldólica de furfural e acetona catalisada por bases orgânicas nitrogenadas: um estudo preliminar de desempenho catalítico visando a produção de bioquerosene de aviação. *Química Nova* **2018**, *41*, 601. [Crossref]