

Revista
Ciência, Tecnologia & Ambiente

Produção biotecnológica de 2,3-butanodiol no contexto de Biorrefinaria

Biotechnological 2,3-butanediol production in the context of biorrefinery

Izabella Zabot Assis¹, Estela Marisutti¹, Daniele Misturini Rossi^{1*}

¹ Laboratório de Bioprocessos – LABIO, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil. *Autor para correspondência: daniele.misturini@ufrgs.br

Como citar: ASSIS, I.Z.; MARISUTTI, E.; ROSSI, D.M., 2021. Produção biotecnológica de 2,3-butanodiol no contexto de Biorrefinaria. *Revista Ciência, Tecnologia & Ambiente*, vol. 11, e11197. https://doi.org/10.4322/2359-6643.11197

RESUMO

Os sistemas de biorrefinarias que integram processos de conversão de biomassa para a produção de combustíveis, energia e produtos químicos a partir de recursos renováveis estão cada vez mais ganhando espaço no desenvolvimento industrial, devido a crescente busca por inovação e sustentabilidade de processos, visto à menor disponibilidade de combustíveis fósseis. As biomassas lignocelulósicas são resíduos com vasta abundância e baixo custo no mercado, o que as torna atrativas fontes de carbono para as indústrias de produtos químicos e energéticos. O 2,3-butanodiol (2,3-BD) é considerado um produto químico e um combustível promissor com extensas aplicações na indústria. Além disso, pode ser produzido a partir da conversão biotecnológica com fontes de carbono alternativas. Dessa maneira, no presente trabalho, foi feita uma pesquisa sistemática da literatura, nas bases de dados Science Direct e Google acadêmico, incluindo artigos, teses e trabalhos acadêmicos entre os anos de 2004 até 2020, a fim de revisar o desenvolvimento geral de processos produtivos de biorrefinarias voltadas a produção de 2,3-BD. Estratégias para sua produção biotecnológica eficiente foram analisadas através de uma revisão delimitada do processo fermentativo de microrganismos capazes de sintetizar o 2,3-BD a partir de diferentes substratos empregados e das condições de operação necessárias para sua produção. Esta revisão também abrange as distintas estratégias aplicadas para a recuperação e purificação de 2,3-BD, pois, atualmente o processamento *downstream* é uma das principais barreiras para a sua produção industrial eficiente e econômica.

Palavras-chave: biorrefinaria, 2,3-butanodiol, fermentação, downstream, resíduos lignocelulósicos.

ABSTRACT

Biorefinery systems that integrate biomass conversion processes for the production of fuels, energy and chemicals from renewable resources are increasingly gaining ground in industrial development, due to the growing search for process innovation and sustainability, given the lower fuel availability. Lignocellulosic biomasses are energy residues with vast abundance and low cost in the market, which makes them attractive carbon sources for the chemical and energy products industries. 2,3-Butanediol (2,3-BD) is considered a chemical and a promising fuel with extensive applications in industry. Furthermore, it can be produced from biotechnological conversion with alternative carbon sources. Thus, in the present work, a systematic literature search was made in Science Direct and Google academic databases, including articles, theses and academic papers between the years 2004 until 2020, in order to review the general development of biorefinery production processes aimed at 2,3-BD production. Strategies for its efficient biotechnological production were analyzed through an outlined review of the fermentative process of microorganisms capable of synthesizing 2,3-BD



from different substrates employed and the operating conditions required for its production. This review also covers the different strategies applied for the recovery and purification of 2,3-BD, since downstream processing is currently one of the main barriers to its efficient and economical industrial production.

Keywords: biorefinery, 2,3-butanediol, fermentation, downstream, lignocelulosic biomass.

INTRODUÇÃO

As preocupações mundiais com a exploração das reservas de petróleo, que estão cada vez mais escassas, e as questões ambientais envolvidas neste processo, têm aumentado o interesse por processos de conversão de matéria-prima renovável para a produção de combustíveis, energia e intermediários da indústria química. Assim, surge o conceito de biorrefinaria, como o processo sustentável da biomassa lignocelulósica em vários produtos de base biológica (alimentos, rações, produtos químicos e materiais) e bioenergia (biocombustíveis, energia e/ou calor) (Kim et al., 2016, IEA Bioenergy, 2009). O desenvolvimento destes sistemas de conversão de substâncias será a chave para o acesso a uma produção integrada de alimentos, produtos químicos, materiais, bens e combustíveis do futuro (Kamm e Kamm, 2004).

Em uma biorrefinaria, o uso de matéria-prima alternativa e sustentável derivada de biomassa é priorizada para a síntese de produtos a partir de rotas de conversão, geralmente classificadas como rotas químicas, biológicas ou termoquímicas. A biomassa necessária para o processo pode ser obtida de qualquer matéria orgânica de origem animal ou vegetal, e ao ser decomposta, torna-se um interessante insumo devido à sua rica composição em carbono, vasta disponibilidade e baixo preço de mercado. Assim, diferentes resíduos, tanto não-celulósicos quanto lignocelulósicos, são utilizados como substrato, como por exemplo resíduos agrícolas, alimentares, industriais, entre outros (Hazeena et al., 2020; Jönsson e Martín, 2016).

Nesse contexto, a produção biotecnológica de 2,3-BD em biorrefinarias vem se destacando e recebendo atenção devido às aplicações industriais multifacetadas deste produto (Hazeena et al., 2020). Porém, apesar de promissor, este processo encontra desafios na etapa de pré-tratamento e de recuperação e purificação em larga escala. O presente trabalho tem como objetivo apresentar uma revisão atual da literatura realizada entre os anos de 2004 a 2020, sobre o estudo de biorrefinarias com

ênfase na produção biotecnológica de 2,3-BD a partir da fermentação de açúcares derivados de diferentes resíduos de biomassas.

BIORREFINARIAS

Atualmente, uma biorrefinaria integra principalmente três rotas de conversão em busca do melhor aproveitamento e aumento de rendimento da biomassa e da energia nela contida, sendo ainda destacado por Cristóbal et al. (2018), que a maioria dessas rotas de conversão da biomassa são únicas para se chegar a produtos finais distintos. São elas: rotas químicas, termoquímicas e biológicas.

A rota química utiliza diferentes produtos químicos, como ácidos, álcalis ou solventes para que o processo de hidrólise se torne mais eficiente para a conversão das matérias-primas em produtos e combustíveis (Nizami et al., 2017). As tecnologias termoquímicas envolvem processos como pirólise, gaseificação por arco de plasma, incineração, liquefação e carbonização com altas temperaturas para a conversão de matéria-prima. A rota biológica engloba a fermentação por diferentes microrganismos, como fungos e bactérias, além de processos como digestão anaeróbia, compostagem e também a partir de enzimas para a conversão de diferentes tipos de matérias-primas em combustíveis e produtos químicos (Nizami et al., 2017).

A rota biotecnológica fermentativa para a produção de 2,3-BD, geralmente é dividida em duas etapas principais, onde a primeira engloba todo o seu processo de produção, desde a escolha da biomassa até a produção do caldo fermentado contendo o álcool desejado (Haider et al., 2018), e a segunda etapa abrange os processos de separação sólido-líquido, remoção de impurezas e a recuperação primária de 2,3-BD do caldo de fermentação, assim como sua purificação final (Dai et al., 2015; Sabra et al., 2011). Os próximos tópicos deste trabalho abordarão as principais características dessas etapas, explanando de maneira concisa o processo de uma biorrefinaria para a produção de 2,3-BD.

2,3-butanodiol

O 2,3-BD trata-se de um diálcool com duas hidroxilas ligadas à cadeia carbônica. Possui peso molecular de 90,121 g.mol⁻¹, fórmula molecular C₄H₁₀O₂ e, além disso, pode existir em três formas isoméricas: D(-), L(+) e meso. Apesar do seu alto potencial industrial, uma grande quantidade de água é necessária para sua separação do meio de cultivo, pois seus isômeros possuem pontos de ebulição maiores que o da água, variando entre 177 e 182°C. Assim, recuperar o 2,3-BD via fermentação torna-se complexo e custoso (Hazeena et al., 2020). Mesmo com esse impasse, suas amplas aplicações como composto químico são de extrema utilidade na indústria devido às suas propriedades físico-químicas (Figura 1). Geralmente é usado como matéria-prima para a conversão de outros produtos finais (Schilling et al., 2020), se mostrando um composto versátil não só para a indústria de alimentos, mas também para a indústria química e farmacêutica.

Geralmente sintetizado por rota petroquímica, o 2,3-BD pode ser produzido organicamente por alguns microrganismos via fermentação de açúcares, sendo também considerado um composto orgânico biodegradável, aspecto positivo para seu uso. Sua produção biotecnológica

tem seu primeiro registro datado no ano de 1906, por Harden e Walpole e em 1912 por Harden e Norris, onde relataram sua produção usando *Klebsiella pneumoniae* (Hazeena et al., 2020; Ji et al., 2011; Campos Neto, 2017).

Microrganismos e metabolismo para a produção de 2,3-butanodiol

Diversas espécies de bactérias são capazes de sintetizar o 2,3-BD via fermentação. Dados experimentais comprovam a presença de 2,3-BD em rotas metabólicas de diferentes substratos nos seguintes grupos taxonômicos: *Bacillus subtilis*, *Brevibacillus brevis* SI, *Corynebacterium glutamicum*, *Enterobacter aerogenes*, *Klebsiella pneumoniae*, *Klebsiella Oxytoca*, *Bacillus polymyxa*, *Klebsiella terrigena*, *Streptococcus faecalis*, *Enterobacter cloacae*, *Bacillus amyloliquefaciens*, *Aerobacter indologenes*, *Enterobacter ludwigii* (Liakou et al., 2018; Psaki et al., 2019), *Bacillus licheniformis*, *Bacillus velezensis* 5RB, *Bacillus toyonensis* 11RA, *Bacillus safensis* 14A (Petrova et al., 2020). Segundo Celińska e Grajek (2009), várias espécies diferentes de bactérias são capazes de transformar o piruvato em 2,3-BD, porém destacam que nem todas essas espécies realizam o processo até o final e às vezes um intermediário pode ser acumulado na ausência de 2,3-BD.

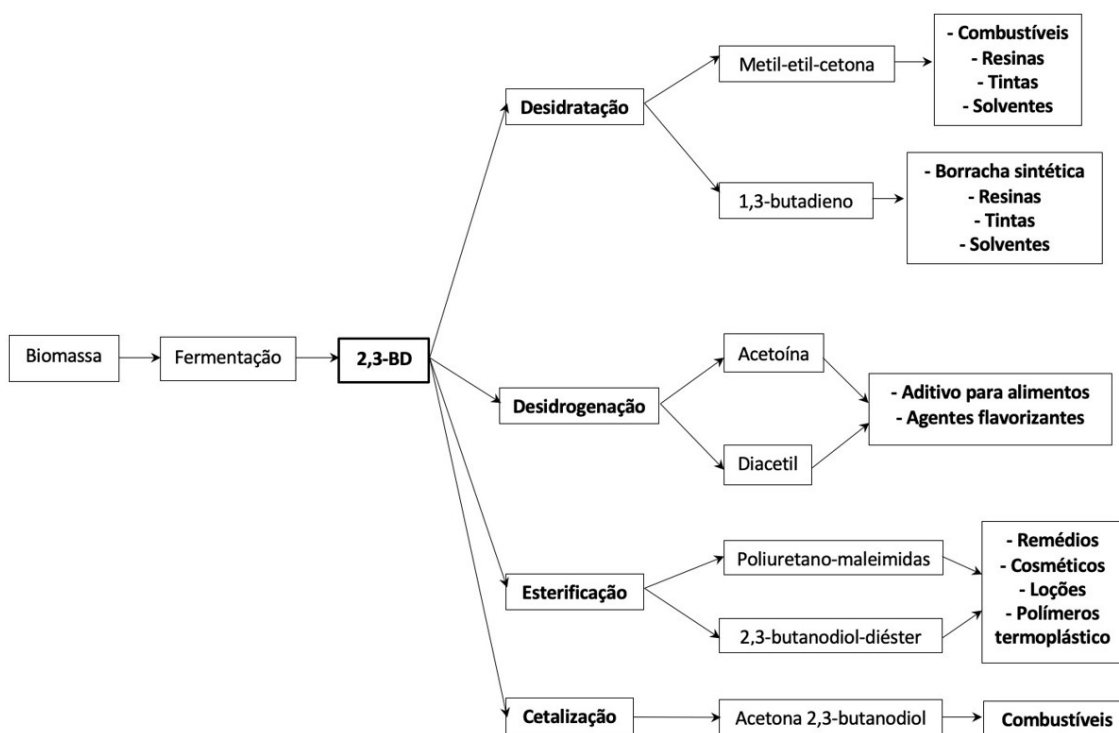


Figura 1. Exemplos de aplicação do 2,3-BD. Adaptado de (Machado, 2018; Silva, 2020).

É importante salientar que mesmo que o rendimento e a produtividade dessas bactérias para a produção de 2,3-BD sejam relevantes e hajam processos otimizados para sua produção industrial econômica, o cumprimento das normas de segurança para o uso dessas cepas devem ser avaliados e considerados (Hazeena et al., 2019). *Klebsiella pneumoniae* é uma das mais utilizadas como agente fermentadora na maioria dos estudos sobre fermentação, possuindo os títulos mais altos de 2,3-BD até agora encontrados, pois apresenta estabilidade genética, ausência de produção de subprodutos indesejados e capacidade de metabolizar a maioria dos açúcares presentes em hidrolisados de celulose e hemicelulose em diferentes substratos. No entanto, sua maior restrição encontra-se no fato dela ser considerada um microrganismo patogênico (Agliardi, 2018; Hazeena et al., 2020).

O 2,3-BD é sintetizado por meio de uma via de fermentação conhecida como ácido-mista (Celińska e Grajek, 2009) ou butileno-glicólica (Campos Neto, 2017) sob crescimento anaeróbico ou microaeróbico, que dependendo do microrganismo utilizado e das condições de cultivo do processo, pode ser produzido, além do 2,3-BD, outros produtos finais, como etanol, acetato, lactato, formato e succinato (Moo-Young, 2011). Cada microrganismo apresenta sua rota e sua atividade metabólica, logo a via biotecnológica pode diferir conforme a espécie de bactéria utilizada. Entretanto, a maioria desses produtos são sintetizados biologicamente a partir do piruvato (derivado da glicose ou biomassa).

Até o momento, a função metabólica da síntese de 2,3-BD ainda é pouco conhecida, porém, há hipóteses de que a biossíntese de 2,3-BD tem uma importância fisiológica essencial para os microrganismos produtores. Essa condição está associada ao fato de o 2,3-BD contribuir para a acidificação intracelular preventiva, contribuindo para a regulação celular da razão NADH/NAD⁺ no interior das células, ajudando a compensar a perda de energia associada à glicólise. Além disso, ele ajuda no armazenamento de carbono e energia para o crescimento microbiano (Hakizimana et al., 2019; Campos Neto, 2017). Assim, os principais fatores para aumentar o rendimento 2,3-BD incluem a seleção de estirpes apropriadas de alto rendimento e otimização das condições de cultivo, tais como temperatura, aeração

e controle de subprodutos. Além disso, a escolha de uma estratégia de cultivo eficiente, especialmente por batelada, batelada alimentada ou fermentação contínua são fatores importantes para o aumento da produção (Hakizimana et al., 2019).

Biomassas como substrato

Os materiais lignocelulósicos são os materiais orgânicos mais abundantes da biosfera, representando aproximadamente 60% da biomassa vegetal. Esses materiais apresentam uma rede complexa e resistente composta principalmente por lignina (10% a 30%), hemicelulose (15% a 35%) e celulose (30% a 50%), sendo a concentração de cada um desses elementos variáveis de acordo com o tipo de matéria-prima em questão. Dessa maneira, a exploração de seu potencial energético vem sendo amplamente incentivado (Attard et al., 2020; Resende, 2017).

Atualmente, há diversos e abundantes estoques de biomassas capazes de atuar como matéria-prima para a produção de 2,3-BD. A Tabela 1 mostra a produção de 2,3-BD usando diferentes biomassas, microrganismos e estratégias de operação.

Bagaço e melão da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar (*Saccharum* sp) é a maior cultura de biomassa do mundo. Produzida comercialmente em mais de 100 países, com mais de 1,91 bilhão de toneladas produzidas em 2018, Brasil, Índia e China são seus maiores produtores (White Junior et al., 2020). Sendo assim, a cana-de-açúcar e seus resíduos, como bagaço e melão, possuem potencial para atuar como matéria-prima para a geração de biocombustíveis e produtos químicos.

O hidrolisado do bagaço gerado após a extração do caldo do caule da cana-de-açúcar é um resíduo rico em conteúdo de celulose e hemicelulose (White Junior et al., 2020). Um exemplo de produção eficiente de 2,3-BD a partir da assimilação simultânea desses dois açúcares fermentescíveis foi descrita por Um et al. (2017) utilizando *E. Aerogenes* modificada geneticamente para aumentar a capacidade de produção de 2,3-BD. Os autores usaram bagaço de cana pré-tratado com licor verde e hidrolisado com enzimas celulósicas como fonte

Tabela 1. Produção de 2,3-BD a partir de diferentes microrganismos, biomassas e condições de processo.

Microrganismo	Tipo de biomassa	Tipo de fermentação	2,3-BD			Referências
			Título (g.L ⁻¹)	Rendimento (g.g ⁻¹)	Produtividade [g.(L.h) ⁻¹]	
<i>B. velezensis</i> 5RB			18,10	0,80	0,36	
<i>B. toyonensis</i> 11RA			12,00	0,69	0,45	
<i>B. licheniformis</i> 24	Resíduos agroindustriais	Batelada	20,70	0,82	0,78	(Petrova et al., 2020)
<i>B. safensis</i> 14A			13,90	0,58	0,20	
<i>B. subtilis</i> 35			12,00	0,61	0,24	
<i>Enterobacter cloacae</i> SGI	Biomassa de dendê	SSF ¹	30,74	-	-	(Hazeena et al., 2019)
<i>K. pneumoniae</i> KMK-05	Hidrolisado de palha de arroz	Batelada	11,54	0,38	0,48	(Saratale et al., 2016)
<i>Paenibacillus polymyxa</i>	Hidrolisado de palha de milho	Contínua	18,80	0,31	1,13	(Ma et al., 2018)
<i>K. pneumoniae</i> BLH-1	Hidrolisado de casca de soja	SHF ²	21,90	0,30	0,40	(Machado, 2018)
<i>Pantoea agglomerans</i> BLI	Pó de núcleo de knaf	SHF ²	20,50	0,28	0,44	
<i>K. pneumoniae</i> KMK-05	Melaço de cana-de-açúcar	Batelada	10,42	0,38	-	(Saratale et al., 2018)
<i>E. ludwigii</i>		alimentada	50,60	0,31	-	(Psaki et al., 2019)
<i>Pantoea agglomerans</i> BLI	Hidrolisado de casca de soja	Batelada	14,02	0,53	1,17	(Ourique et al., 2020)
<i>Enterobacter cloacae</i> TERI BD 18	Glicerol residual	Batelada	41,44	0,48	-	(Priya e Lal, 2019)
<i>E. ludwigii</i>	Resíduo de frutas	Batelada	50,00	0,40	0,41	(Liakou et al., 2018)
	Resíduo de vegetais	alimentada	17,60	0,32	0,39	
<i>E. coli</i> W	Melaço de beterraba sacarina	Batelada	68,00	-	4,50	(Erian et al., 2018)
<i>S. cerevisiae</i>		alimentada com pouco oxigênio				
	Hidrolisado de mandioca	Batelada	81,20	0,30	1,89	(Lee e Seo, 2019)
		Batelada	132,00	0,32	1,92	
<i>Bactéria psicrófila</i> GA0F	Soro de leite em pó	Batelada	5,30	0,42	-	(Alvarez-Guzmán et al., 2020)
	Hidrolisado de palha de trigo	Batelada	3,70	0,23	-	
	Melaço de cana-de-açúcar		4,40	0,24	-	

¹SSF: Sacarificação e fermentação simultâneas; ²SHF: Sacarificação e fermentação separadas.

de carbono e verificaram um aumento do consumo de xilose e aumento de produtividade de 70% em 12 horas de cultivo. O melaço de cana-de-açúcar também é visto como uma fonte promissora para biorrefinarias devido ao seu alto teor de sacarose e baixo preço, podendo ser gerados de 3 a 7 toneladas de melaço a partir de 100 toneladas de cana-de-açúcar (Psaki et al., 2019).

Casca de soja

A soja é o grão oleaginoso mais cultivado no mundo, com uma produção global de aproximadamente 336,7 milhões de toneladas, sendo o Brasil o maior produtor de soja do mundo, com 33% de toda a produção mundial. A casca do grão é o principal subproduto industrial do processamento e pesquisas mostram a possibilidade de sua utilização em bioprocessos para a produção de produtos biotecnológicos importantes (Cortivo et al., 2019). Machado (2018) avaliou em seu estudo a produção de 2,3-BD a partir da fermentação de hidrolisados da casca de soja por duas enterobactérias isoladas, *Klebsiella pneumoniae* e *Pantoea agglomerans*, em frascos agitados a partir da sacarificação e fermentação separadas. A maior produção de 2,3-BD foi obtida por *K. pneumoniae*, com um valor de 21,9 g.L⁻¹. Ourique et al. (2020) investigaram o uso de hidrolisado de casca de soja como substrato em reatores em batelada pela bactéria *Pantoea agglomerans* cepa BL1. Através de um meio de cultivo contendo uma mistura de xilose, arabinose e glicose, os melhores resultados mostraram produção de até 14,02 g.L⁻¹ de 2,3-BD com rendimento de 0,53 g.g⁻¹ e uma produtividade de 1,17 g.(L.h)⁻¹.

Palha e sabugo de milho

A produção de milho é relativamente concentrada em poucos países, com destaque para os Estados Unidos e China, que juntos produzem mais de 600 milhões de toneladas de milho por ano (Guth, 2020). Da cultura do milho, há a geração de resíduos do caule, folhas, sabugo e palha, onde esses possuem potencial como fonte de biomassa, em especial a palha de milho, por possuir alto teor de celulose (Neves Filho, 2019).

Li et al. (2014) utilizaram hidrolisado de palha de milho suplementado para produção de 2,3-BD por

fermentação com cepas recém isoladas de *B. Licheniformis* e obtiveram 74 g.L⁻¹ de produto, com produtividade de 2,1 g.(L.h)⁻¹ e rendimento de 94,60%.

Casca e palha de arroz

A casca e a palha de arroz são outros subprodutos renováveis, fartos e prontamente disponíveis advindos da produção de arroz. A produção mundial de arroz para a safra de 2021/2022 foi estimada em 502,63 milhões de toneladas, sendo 11,74 milhões de toneladas produzidas no Brasil (Companhia Nacional de Abastecimento, 2021a, 2021b). Por isso, também é um interessante substrato renovável para biorrefinarias. Hidrolisados de casca de arroz integral pré-tratados a partir de resíduos de produtos químicos de licor verde foram utilizados para a produção de 2,3-BD por *K. pneumoniae* KMK-05 via fermentação em batelada, resultando numa produção de 11,54 g.L⁻¹, rendimento de 0,38 g.g⁻¹ de açúcar e produtividade 0,48 g.(L.h)⁻¹, respectivamente (Saratale et al., 2016). Outro estudo que mostra a síntese de 2,3-BD a partir da celulose e da hemicelulose de palha de arroz, envolve a fermentação de três cepas isoladas: duas cepas de *Klebsiella sp.* e uma cepa de *Serratia sp.* Tanto a biomassa da celulose quanto a da hemicelulose de palha de arroz foram fermentadas com sucesso para a produção de 2,3-BD pelos isolados, com rendimentos entre 0,32 e 0,41 g.g⁻¹ (Huang et al., 2013).

Glicerol

Santos et al. (2020) relataram em seu estudo a produção de 2,3-BD a partir da fermentação do glicerol e glicose usando seis diferentes bactérias isoladas do solo. Apenas a cepa *S. marcescens* LQOB-SE6 foi capaz de produzir 2,3-BD de glicose e glicerol e esse processo foi otimizado por mudanças nos parâmetros de fermentação, onde as melhores condições para a fermentação com o glicerol foram: pH 7,0, 8 g.L⁻¹ de caldo nutriente, 50 g.L⁻¹ de substrato com rendimento de 2,3-BD de 0,30 g.g⁻¹. Foi previamente demonstrado que o pH afeta o metabolismo 2,3-BD e, conseqüentemente, sua produção a partir do glicerol. Além disso, os valores de pH no início da fermentação podem alterar a produção do composto desejado, como com 2,3-BD e 1,3-propanodiol, produtos da fermentação

do glicerol, que são favorecidos de acordo com o controle ou não deste parâmetro. Contudo, o 2,3-BD é produzido principalmente a partir da fermentação do glicerol quando o valor inicial de pH é ligeiramente alcalino (Petrov e Petrova, 2009). A valorização eficiente de glicerol residual para a produção de 2,3-BD também foi avaliada por Priya e Lal. (2019) usando *Enterobacter cloacae* TERI BD 18 como biocatalisador. Esse microorganismo pode crescer em resíduos com altas concentrações de impurezas. Assim, alcançou-se a produção de 41,44 g.L⁻¹ de 2,3-BD com um rendimento de 0,48 g.g⁻¹ em uma fermentação em batelada alimentada em biorreator de 13 litros usando glicerol residual sem suplementação como fonte única de carbono.

Recuperação e Purificação de 2,3-butanodiol

A recuperação e a purificação são as últimas etapas do processo para que, de fato, seja obtido o produto 2,3-BD. No entanto, apesar do seu potencial e confiabilidade como produto biocombustível e químico, há poucos estudos que abordam a viabilidade eficiente desse processo. Após a fermentação, o meio contém uma variedade de compostos como fonte de carbono, minerais, nitrogênio, os quais podem interferir na recuperação do 2,3-BD. Com isso, o *downstream* do processo, atualmente é o maior desafio para a sua produção. Este visa 3 principais objetivos:

- (i) Separação sólido-líquido, com remoção das células microbianas e das impurezas sólidas do caldo de fermentação, a partir de técnicas de filtração por membrana ou centrifugação de alta velocidade, onde é incluído também nessa etapa ajustes necessários de pH por base ou adição de floculantes ao caldo (Sabra et al., 2011);
- (ii) Remoção de impurezas e a recuperação primária de 2,3-BD do caldo de fermentação empregando técnicas de recuperação (Dai et al., 2015; Sabra et al., 2011), como tecnologias de extração, como extração por solvente, extração *salting-out*, extração reativa (Haider et al., 2018) e sistema aquoso bifásico (Silva, 2020) e tecnologias por membranas, como pervaporação, nanofiltração, osmose reversa (Dai et al., 2015) e evaporação;

- (iii) Purificação final do 2,3-BD por destilação (Dai et al., 2015; Sabra et al., 2011).

Apesar do 2,3-BD possuir vantagens, como maior produtividade e menor toxicidade em relação aos organismos fermentadores de álcool, seu ponto de ebulição (177-182 °C) maior que o da água (100 °C) faz com que seja necessário muito consumo de energia para que a água seja removida do caldo de fermentação. Essa necessidade leva a altos custos de energia e de capital necessários para que concentrações relativamente pequenas do produto desejado seja recuperado, tendo em vista ainda sua baixa concentração no caldo fermentativo, sendo assim, tecnologias mais aprimoradas são necessárias para que seja possível e vantajoso economicamente recuperar e purificar o 2,3-BD do processo (Haider et al., 2018).

Entre os métodos utilizados para a recuperação de 2,3-BD, destaca-se a extração líquido-líquido que tem se mostrado próspero para processos de recuperação, a extração *salting-out*, que consiste na mistura de um solvente hidrofílico e sal inorgânico com o caldo de fermentação que contém o 2,3-BD, e a destilação, que ainda é uma tecnologia imprescindível de separação em processos industriais (Haider et al., 2018, Sabra et al., 2011).

CONCLUSÕES

Através da revisão realizada acerca da produção de 2,3-BD no contexto de biorrefinarias, pode-se concluir que a sua produção tem grande potencial através de fontes renováveis em substituição a síntese química, com a utilização de substratos alternativos e por rota biológica. Com isso, se reduz os impactos ambientais, sociais e econômicos vigentes podendo substituir o uso de fontes fósseis usadas atualmente. Os resíduos de biomassa escolhidos como substratos certamente se destacaram como uma alternativa promissora, apresentando resultados significativos de concentração, rendimento e produtividade de 2,3-BD em caldos fermentativos.

AGRADECIMENTOS

A FAPERGS pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

AGLIARDI, C.B., 2018. *Produção biotecnológica de 2,3-butanodiol a partir de diferentes fontes de carbono.*

Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 50 p. Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Química.

ALVAREZ-GUZMÁN, C.L., BALDERAS-HERNÁNDEZ, V.E. & DE LEON-RODRIGUEZ, A., 2020. Coproduction of hydrogen, ethanol and 2,3-butanediol from agro-industrial residues by the Antarctic psychrophilic GAOF bacterium. *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 5, no. 49, pp. 26179-26187. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.02.105>.

ATTARD, T.M., CLARK, J.H. & MCELROY, C.R., 2020. Recent developments in key biorefinery areas. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, vol. 21, pp. 64-74. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cogsc.2019.12.002>.

CAMPOS NETO, D. T., 2017. *Produção de (2r,3r)-butanediol por Paenibacillus polymyxa pm 3605 utilizando substratos alternativos como fontes de carbono*. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro. 123 p. Mestrado em Engenharia Química.

CELIŃSKA, E. & GRAJEK, W., 2009. Biotechnological production of 2,3-butanediol—Current state and prospects. *Biotechnology Advances*, vol. 27, no. 6, pp. 715-725. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biotechadv.2009.05.002>. PMID:19442714.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB, 2021a [acesso em 6 setembro 2021]. *Safra Brasileira de grãos* [online]. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos>

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB, 2021b [acesso em 6 setembro 2021]. *Perspectivas para a Agropecuária - Safra 2021/2022* [online]. Brasília: CONAB, vol. 9, pp. 1-85. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/perspectivas-para-a-agropecuaria>

CORTIVO, P.R.D., MACHADO, J., HICKERT, L.R., ROSSI, D.M. & AYUB, M.A.Z.. 2019. Production of 2,3-butanediol by *Klebsiella pneumoniae* BLh-1 and *Pantoea agglomerans* BL1 cultivated in acid and enzymatic hydrolysates of soybean hull. *Biotechnology Progress*, vol. 35, no. 3, pp. e2793. <http://dx.doi.org/10.1002/btpr.2793>. PMID:30815989.

CRISTÓBAL, J., CALDEIRA, C., CORRADO, S. & SALA, S., 2018. Techno-economic and profitability analysis of food waste biorefineries at European level.

Bioresource Technology, vol. 259, pp. 244-252. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2018.03.016>. PMID:29567596.

DAI, J.Y., LIU, C.J. & XIU, Z.L., 2015. Sugaring-out extraction of 2,3-butanediol from fermentation broths. *Process Biochemistry*, vol. 50, no. 11, pp. 1951-1957. <http://dx.doi.org/10.1016/j.procbio.2015.08.004>.

ERIAN, A.M., GIBISCH, M. & PFLÜGL, S., 2018. Engineered *E. coli* W enables efficient 2,3-butanediol production from glucose and sugar beet molasses using defined minimal medium as economic basis. *Microbial Cell Factories*, vol. 17, no. 1, pp. 1-17. <http://dx.doi.org/10.1186/s12934-018-1038-0>. PMID:30501633.

GUTH, T.L.F., 2020 [acesso em 31 outubro 2021]. *Milho – Análise Mensal - Fevereiro/março - 2020* [online]. Brasília: CONAB. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/analises-do-mercado-agropecuaria-e-extrativista/analises-do-mercado/historico-mensal-de-milho>
HAIDER, J., QYYUM, M.A., HUSSAIN, A., YASIN, M. & LEE, M., 2018. Techno-economic analysis of various process schemes for the production of fuel grade 2,3-butanediol from fermentation broth. *Biochemical Engineering Journal*, vol. 140, pp. 93-107. <http://dx.doi.org/10.1016/j.bej.2018.09.002>.

HAKIZIMANA, O., MATABARO, E. & LEE, B.H., 2019. The current strategies and parameters for the enhanced microbial production of 2,3-butanediol. *Biotechnology Reports (Amsterdam, Netherlands)*, vol. 25, pp. e00397. <http://dx.doi.org/10.1016/j.btre.2019.e00397>. PMID:31853445.

HAZEENA, S.H., NAIR SALINI, C., SINDHU, R., PANDEY, A. & BINOD, P., 2019. Simultaneous saccharification and fermentation of oil palm frond for the production of 2,3-butanediol. *Bioresource Technology*, vol. 278, pp. 145-149. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2019.01.042>. PMID:30685618.

HAZEENA, S.H., SINDHU, R., PANDEY, A. & BINOD, P., 2020. Lignocellulosic bio-refinery approach for microbial 2,3-Butanediol production. *Bioresource Technology*, vol. 302, pp. 122873. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122873>. PMID:32019707.

HUANG, C.F., JIANG, Y.-F., GUO, G.L. & HWANG, W.S., 2013. Method of 2,3-butanediol production from glycerol and acid-pretreated rice straw hydrolysate by

- newly isolated strains: Pre-evaluation as an integrated biorefinery process. *Bioresource Technology*, vol. 135, pp. 446-453. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2012.10.141>. PMID:23186656.
- IEA BIOENERGY, 2009 [acesso em 25 agosto 2021]. *Report: IEA Bioenergy Task 42 on Biorefineries* [online]. Disponível em: www.iea-bioenergy.task42-biorefineries.com
- JI, X.J., HUANG, H. & OUYANG, P.K., 2011. Microbial 2,3-butanediol production: a state-of-the-art review. *Biotechnology Advances*, vol. 29, no. 3, pp. 351-364. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biotechadv.2011.01.007>. PMID:21272631.
- JÖNSSON, L.J. & MARTÍN, C., 2016. Pretreatment of lignocellulose: formation of inhibitory by-products and strategies for minimizing their effects. *Bioresource Technology*, vol. 199, pp. 103-112. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2015.10.009>. PMID:26482946.
- KAMM, B. & KAMM, M., 2004. M. Principles of biorefineries. *Applied Microbiology and Biotechnology*, vol. 64, no. 2, pp. 137-145. <http://dx.doi.org/10.1007/s00253-003-1537-7>. PMID:14749903.
- KIM, J.S., LEE, Y.Y. & KIM, T.H., 2016. A review on alkaline pretreatment technology for bioconversion of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*, vol. 199, pp. 42-48. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2015.08.085>. PMID:26341010.
- LEE, Y.G. & SEO, J.H., 2019. Production of 2,3-butanediol from glucose and cassava hydrolysates by metabolically engineered industrial polyploid *Saccharomyces cerevisiae*. *Biotechnology for Biofuels*, vol. 12, pp. 204. <http://dx.doi.org/10.1186/s13068-019-1545-1>. PMID:31485270.
- LI, L., LI, K., WANG, K., CHEN, C., GAO, C., MA, C. & XU, P., 2014. Efficient production of 2,3-butanediol from corn stover hydrolysate by using a thermophilic *Bacillus licheniformis* strain. *Bioresource Technology*, vol. 170, pp. 256-261. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2014.07.101>. PMID:25151068.
- LIAKOU, V., PATERAKI, C., PALAIOGEOURGOU, A.-M., KOPSAHELIS, N., MACHADO DE CASTRO, A., GUIMARÃES FREIRE, D.M., NYCHAS, G.-J.E., PAPANIKOLAOU, S. & KOUTINAS, A., 2018. Valorization of fruit and vegetable waste from open markets for the production of 2,3-butanediol. *Food and Bioproducts Processing*, vol. 108, pp. 27-36. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fbp.2017.10.004>.
- MA, K., HE, M., YOU, H., PAN, L., WANG, Z., WANG, Y., HU, G., CUI, Y. & MAEDA, T., 2018. Improvement of (R,R)-2,3-butanediol production from corn stover hydrolysate by cell recycling continuous fermentation. *Chemical Engineering Journal*, vol. 332, pp. 361-369. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2017.09.097>.
- MACHADO, J., 2018. Produção biotecnológica de 2,3-butanodiol a partir de hidrolisados de casca de soja. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 45 p. Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Química.
- MOO-YOUNG, M., 2011. *Comprehensive biotechnology*. Oxford: Pergamon, 4870 p.
- NEVES FILHO, A.O., 2019. *Biomassa de resíduos da produção agrícola brasileira do cafeeiro, milho e soja*. Três Corações: Universidade Vale do Rio Verde. 80 p. Dissertação Profissional Sustentabilidade em recursos hídricos.
- NIZAMI, A.S., REHAN, M., WAQAS, M., NAQVI, M., OUDA, O.K.M., SHAHZAD, K., MIANDAD, R., KHAN, M.Z., SYAMSIRO, M., ISMAIL, I.M.I. & PANT, D., 2017. Waste biorefineries: Enabling circular economies in developing countries. *Bioresource Technology*, vol. 241, pp. 1101-1117. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2017.05.097>. PMID:28579178.
- OURIQUE, L.J., ROCHA, C.C., GOMES, R.C.D., ROSSI, D.M. & AYUB, M.A.Z., 2020. Bioreactor production of 2,3-butanediol by *Pantoea agglomerans* using soybean hull acid hydrolysate as substrate. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, vol. 43, no. 9, pp. 1689-1701. <http://dx.doi.org/10.1007/s00449-020-02362-0>. PMID:32356215.
- PETROV, K. & PETROVA, P., 2009. High production of 2,3-butanediol from glycerol by *Klebsiella pneumoniae* G31. *Applied Microbiology and Biotechnology*, vol. 84, no. 4, pp. 659-665. <http://dx.doi.org/10.1007/s00253-009-2004-x>. PMID:19396438.
- PETROVA, P., PETLICHKA, S. & PETROV, K., 2020. New *Bacillus* spp. with potential for 2,3-butanediol production from biomass. *Journal of Bioscience and*

Bioengineering, vol. 130, no. 1, pp. 20-28. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jbiosc.2020.02.009>. PMID:32169317.

PRIYA, A. & LAL, B., 2019. Efficient valorization of waste glycerol to 2,3-butanediol using *Enterobacter cloacae* TERI BD 18 as a biocatalyst. *Fuel*, vol. 250, pp. 292-305. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2019.03.146>.

PSAKI, O., MAINA, S., VLYSIDIS, A., PAPANIKOLAOU, S., DE CASTRO, A.M., FREIRE, D.M.G., DHESKALI, E., KOOKOS, I. & KOUTINAS, A., 2019. Optimization of 2,3-butanediol production by *Enterobacter ludwigii* using sugarcane molasses. *Biochemical Engineering Journal*, vol. 152, pp. 1-11. <http://dx.doi.org/10.1016/j.bej.2019.107370>.

RESENDE, R.R., 2017. *Biocologia Aplicada à Agro & Indústria*. São Paulo: Editora Blucher, vol. 4, 1069 p.

SABRA, W., QUITMANN, H., PENG, A-P, DAI, J.-Y. & XIU, Z.-L., 2011. Microbial production of 2,3-butanediol. *Comprehensive biotechnology*, vol. 3, pp. 147-157. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64046-8.00153-1>.

SANTOS, D.A., CASARI, L.P., LUCAS, S.C.O., ROMÃO, L.P.C. & PORTO, A.L.M., 2020. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology Butanediol production from glycerol and glucose by *Serratia marcescens* isolated from tropical peat soil. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, vol. 26, pp. 101-115. <http://dx.doi.org/10.1016/j.bcab.2020.101615>.

SARATALE, G.D., JUNG, M.Y. & OH, M.K., 2016. Reutilization of green liquor chemicals for pretreatment of whole rice waste biomass and its application to 2,3-butanediol production. *Bioresource Technology*,

vol. 205, pp. 90-96. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2016.01.028>. PMID:26820921.

SARATALE, R.G., SHIN, H.S., GHODAKE, G.S., KUMAR, G., OH, M.K. & SARATALE, G.D., 2018. Combined effect of inorganic salts with calcium peroxide pretreatment for kenaf core biomass and their utilization for 2,3-butanediol production. *Bioresource Technology*, vol. 258, pp. 26-32. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2018.02.115>. PMID:29518688.

SCHILLING, C., CICCONE, R., SIEBER, V. & SCHMID, J., 2020. Engineering of the 2,3-butanediol pathway of *Paenibacillus polymyxa* DSM 365. *Metabolic Engineering*, vol. 61, pp. 381-388. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ymben.2020.07.009>. PMID:32771627.

SILVA, F.L., 2020. Extração e purificação de 2,3-butanediol utilizando sistemas aquosos bifásicos e processos de separação por membranas. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina. 94 p. Tese de Doutorado em Engenharia de Alimentos.

UM, J., KIM, D.G., JUNG, M.Y., SARATALE, G.D. & OH, M.-K., 2017. Metabolic engineering of *Enterobacter aerogenes* for 2,3-butanediol production from sugarcane bagasse hydrolysate. *Bioresource Technology*, vol. 245, Pt B, pp. 1567-1574. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2017.05.166>.

WHITE JUNIOR, P.M., VIATOR, R.P. & WEBBER 3rd, C.L., 2020. Temporal and varietal variation in sugarcane post-harvest residue biomass yields and chemical composition. *Industrial Crops and Products*, vol. 154, pp. 1-6. <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112616>.