
Ciências Biológicas

Gustavo Rodrigues de Castro

**Produção e aplicações do ácido láctico: Uma
revisão bibliográfica**



Rio Claro - SP
ano 2024

Gustavo Rodrigues de Castro

Produção e aplicações do ácido láctico: Uma revisão bibliográfica

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Biociências – Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, para obtenção do grau de Bacharelado em Ciências Biológicas.

Orientador: Prof. Dr. Jonas Contiero

Rio Claro - SP
2024

C355p Castro, Gustavo Rodrigues de
Produção e aplicações do ácido láctico: Uma
revisão bibliográfica / Gustavo Rodrigues de Castro.
-- Rio Claro, 2024
30 p.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado -
Ciências Biológicas) - Universidade Estadual
Paulista (UNESP), Instituto de Biociências, Rio Claro
Orientador: Jonas Contiero

1. Ácido láctico. 2. Produção. 3. Fermentação. 4.
Sustentabilidade. 5. Bioplástico. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp.
Biblioteca da Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de
Biociências, Rio Claro. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

Gustavo Rodrigues de Castro

Produção e aplicações do ácido láctico: Uma revisão bibliográfica

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Biociências – Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, para obtenção do grau de Bacharelado em Ciências Biológicas.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Jonas Contiero

Dra. Rayane da Silva Vale

Dra. Graciely Gomes Corrêa

Aprovado em: 04 de Junho de 2024

Assinatura do discente

Assinatura do(a) orientador(a)

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer minha mãe Cleonice e meus irmãos, Luiz, Carla e Robson, meu grande amigo Gabriel e meu orientador Jonas Contiero, por seu apoio incondicional durante este trabalho. Obrigado por me ajudarem, sendo inspiração, fonte de encorajamento e orientação. Este trabalho não teria sido possível sem vocês. Agradeço também a todos os professores, colegas e funcionários da instituição pelo ambiente de aprendizado.

RESUMO

O ácido láctico, um composto orgânico versátil, encontra diversas aplicações na indústria, abrangendo setores têxteis, farmacêuticos e alimentícios. Além disso, é crucial na fabricação do bioplástico poli-ácido láctico (PLA), potencial substituto de derivados de petróleo. Sua produção sustentável é objeto de pesquisa, visando reduzir custos e atender à crescente demanda por soluções ecologicamente viáveis. O ácido láctico, também conhecido como ácido hidroxipropânico, apresenta isômeros ópticos L(+) e D(-). A produção ocorre por rotas metabólicas homoláticas e heteroláticas, envolvendo enzimas como lactato desidrogenase. Síntese química e fermentação microbiana são os métodos de fabricação, resultando em misturas racêmicas ou formas opticamente ativas. Bactérias gram-positivas predominam na fermentação anaeróbica de carboidratos para gerar ácido láctico, requerendo controle de pH, temperatura e nutrientes. Diversos substratos são usados, incluindo resíduos alimentares, biomassa e microalgas, promovendo uma economia circular. Embora a fermentação de L(+) ácido láctico seja avançada, melhorias econômicas são objetos de estudos para a produção de D(-) ácido láctico. O mercado global do ácido láctico cresce rapidamente, com projeções de grande aplicação do PLA. Muitas patentes estão sendo criadas, principalmente para usos humanos, especialmente na área de alimentos e na medicina. A síntese de compostos macromoleculares é uma área em crescimento nas patentes e é previsto que metade da produção mundial de ácido láctico até 2025 seja destinada ao PLA.

Palavras chave: Ácido láctico; Bioplástico; Fermentação; Sustentabilidade

ABSTRACT

Lactic acid, a versatile organic compound, finds various applications in the industry, spanning textiles, pharmaceuticals, and food. Furthermore, it is crucial in the manufacturing of the bioplastic poly-lactic acid (PLA), a potential substitute for petroleum derivatives. Sustainable production is a subject of research, aiming to reduce costs and meet the growing demand for environmentally viable solutions. Lactic acid, also known as hydroxypropanoic acid, presents optical isomers L(+) and D(-). Production occurs through homolactic and heterolactic metabolic pathways involving enzymes such as lactate dehydrogenase. Chemical synthesis and microbial fermentation are the manufacturing methods, resulting in racemic mixtures or optically active forms. Gram-positive bacteria predominate in anaerobic carbohydrate fermentation to produce lactic acid, requiring pH, temperature, and nutrient control. Various substrates are used, including food waste, biomass, and microalgae, promoting a circular economy. While L(+) lactic acid fermentation is advanced, economic improvements are sought for D(-) lactic acid production. The global lactic acid market is growing rapidly, with projections of extensive PLA applications. Many patents are being created, primarily for human uses, especially in the food and medical industry. Macromolecular compound synthesis is a growing area in patents, and it is expected that half of the world's lactic acid production by 2025 will be dedicated to PLA.

Keywords: Lactic Acid; Bioplastic; Fermentation; Sustainability.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	8
2	OBJETIVOS.....	9
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	10
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	10
4.1	HISTÓRICO.....	10
4.2	PROPRIEDADES.....	10
4.3	PRODUÇÃO.....	12
4.3.1	PRODUÇÃO VIA FERMENTAÇÃO.....	13
4.3.2	PRODUÇÃO VIA SÍNTESE QUÍMICA.....	17
4.4	APLICAÇÕES.....	18
4.4.1	INDÚSTRIA ALIMENTÍCIA.....	19
4.4.2	INDÚSTRIA FARMACÊUTICA.....	21
4.4.3	INDÚSTRIA QUÍMICA.....	22
4.4.4	POLI-ÁCIDO LÁTICO (PLA).....	23
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	25

1 INTRODUÇÃO

O ácido láctico é um composto orgânico muito versátil utilizado em diversas áreas como têxtil, farmacêutica, couro e alimentícia. Além disso, através deste ácido é possível produzir um tipo de bioplástico, o poli-ácido láctico (PLA), capaz de substituir derivados do petróleo, o que leva a um grande interesse para sua produção e pesquisa, no qual estudos vem tentando diminuir o custo de produção para que se torne mais viável a sua utilização, visto que, ao passar dos anos a busca por meios mais sustentáveis aumenta (PINHO et al., 2019).

Também chamado de ácido hidroxipropânico ($C_3H_6O_3$), o ácido láctico possui um carbono assimétrico e é encontrado na forma de dois isômeros ópticos, o L(+) ácido láctico ou S-ácido láctico e o D(-) ácido láctico ou R-ácido láctico (OLIVEIRA et al., 2021).

As rotas metabólicas que resultam na produção do ácido láctico são as homoláticas e heteroláticas. Na homolática, a glicose convertida em ácido pirúvico com o auxílio da enzima lactato desidrogenase forma o ácido láctico, já na heterolática, ocorre através da rota da pentose em que é formada a xilulose-5-fosfato, antes do ácido láctico (FREIRE-ALMEIDA & MALDONADO-ALVARADO., 2022).

A produção pode ser realizada por meio de síntese química ou por fermentação microbiana. Na síntese química, uma mistura racêmica é produzida, consistindo em 50% de L(+) ácido láctico e 50% de D(-) ácido láctico, enquanto que na fermentação para a produção de ácido láctico, é obtida apenas uma forma opticamente ativa L(+) ou D(-) (OLIVEIRA et al., 2021).

As bactérias utilizadas na indústria para a produção deste composto orgânico são em grande maioria bactérias gram-positivas. A síntese ocorre na via glicolítica em condições anaeróbicas com o metabolismo de carboidratos como hexoses e pentoses. Durante a fermentação é necessário controlar o pH, manter uma temperatura adequada e fornecer nutrientes para que as bactérias se multipliquem de maneira satisfatória para a produção de ácido láctico (ABEDI & HASHEMI., 2020).

Um importante aspecto a se considerar na produção de ácido láctico, é o substrato que será utilizado. São usados diversos tipos como resíduos da produção de comida, biomassa e resíduos de usinas de açúcar, resíduos de laticínios, resíduos da indústria, microalgas entre outros (ABEDI & HASHEMI., 2020). O uso de materiais que geralmente seriam descartados faz com que a produção do ácido láctico entre em uma economia circular, reduzindo aspectos negativos como poluição e custo de todo o processo, tornando-a mais sustentável (FREIRE-ALMEIDA & MALDONADO-ALVARADO., 2022).

A tecnologia de fermentação em grande escala de L(+) ácido láctico, já está bem desenvolvida, mas ainda é necessário mais estudos para melhorar a produção de D(-) ácido láctico nos quesitos econômicos e de aprimoramentos (BEITEL., 2016). Segundo, Alexandri *et al.*, (2020) o tamanho do mercado global do ácido láctico em 2018 foi avaliado em 2.64 bilhões de dólares, prevendo-se uma taxa anual de crescimento (CAGR - Compound Annual Growth Rate) de 18,7% entre os anos de 2019 a 2025.

Em um levantamento feito pela Espacenet de 2009 a 2018, mostrou que 3141 patentes relacionadas ao ácido láctico foram criadas, sendo 30,1% (947) aplicações à necessidades humanas, sobretudo na indústria alimentícia, na qual tiveram 502 patentes, além de medicina, ciências veterinária e higiene com 432 patentes. A área que mais cresce em relação ao número de patentes em aplicações deste ácido é a síntese de compostos macromoleculares. Até 2025 é esperado que 50% do ácido láctico produzido no mundo seja aplicado para a produção de PLA (DJUKIC-VUKOVIC *et al.*, 2019).

2 OBJETIVOS

Este trabalho de conclusão de curso tem como objetivo realizar uma revisão bibliográfica sobre a produção e aplicações do ácido láctico na indústria, biomedicina e pesquisa, utilizando artigos acadêmicos.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Serão utilizados como materiais para este trabalho de conclusão de curso artigos científicos de plataformas como Google acadêmico, Scielo, Science Direct e revistas científicas.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 HISTÓRICO

O ácido láctico foi descoberto em 1780, pelo químico sueco Scheele (LAUFFER., 2019). Foi descoberto através do soro de leite, de onde surgiu o nome para o ácido (MARTINEZ et al., 2013). Por aproximadamente 80 anos, o ácido láctico foi considerado um componente do leite, porém em 1857, Pasteur descobriu que este ácido é um metabólito fermentativo gerado por microrganismos (LAUFFER., 2019). Anteriormente, em 1817, o químico alemão J. Vogel provou a identidade e a composição química do ácido descoberto por Scheele. Em 1839, E. Fremy produziu o ácido láctico pela fermentação de carboidratos como a sacarose, lactose, manitol, amido e dextrina (TRINDADE., 2002) e somente em 1881, Frémy deu início a produção industrial deste componente orgânico (LAUFFER., 2019).

Quando Scheele descobriu a substância, diversos cientistas levantaram a hipótese de que o ácido láctico poderia ser uma mistura de outros compostos já existentes. Então J. Berzelius, também químico sueco, refez os experimentos e chegou à conclusão de que a substância encontrada por Scheele era um composto simples e ainda encontrou o ácido em outros lugares como na carne bovina, no sangue, leite fresco e em outros fluidos de origem animal (TRINDADE., 2002).

4.2 PROPRIEDADES

Ácido láctico é um composto orgânico de função mista ácido carboxílico - álcool facilmente solúvel em água, encontrado na natureza e considerado o ácido carboxílico de baixo teor de hidroxila mais simples (LI et al., 2021). Também

chamado de ácido hidroxipropanóico ($C_3H_6O_3$) (**Figura 1**), possui um carbono assimétrico e é encontrado na forma de dois isômeros ópticos, o L(+) ácido láctico ou S-ácido láctico e o D(-) ácido láctico ou R-ácido láctico (OLIVEIRA et al., 2021).

Em seu estado puro, o ácido se apresenta como um líquido incolor e pode ser definido como um ácido fraco devido à sua dissociação parcial em água e à constante de dissociação ácida correlacionada ($K_a = 1,38 \times 10^{-4}$) (AMEEN & CARUSO., 2017).

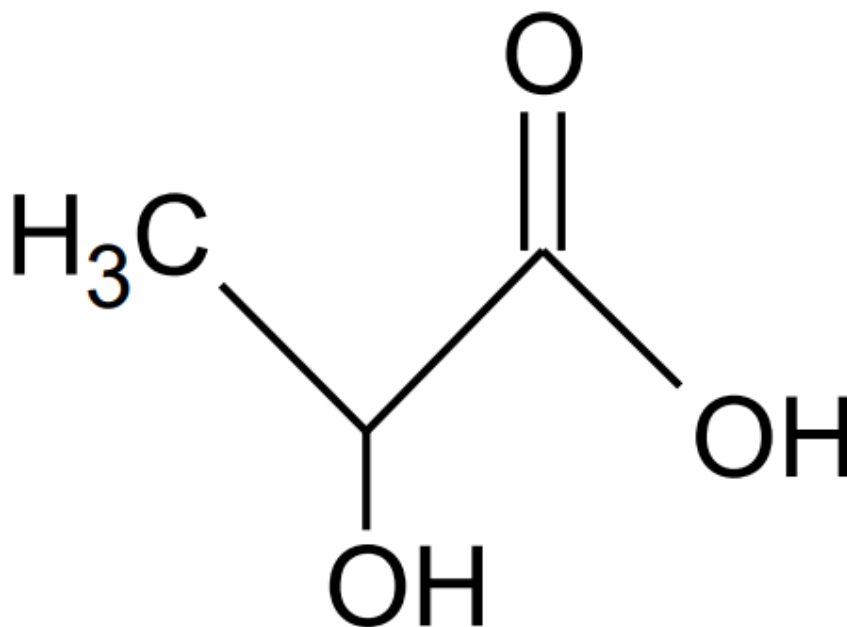


Figura 1: Molécula do ácido láctico (OLIVEIRA & BORGES., 2020).

O ácido láctico é um composto quiral com uma cadeia de carbono composta por um átomo central (quiral) e dois átomos de carbono terminais. Um grupo hidroxila está ligado ao átomo de carbono quiral, enquanto um dos átomos de carbono terminais faz parte do grupo carboxílico e o outro átomo faz parte do grupo metila. Fazendo com que existam as duas formas isoméricas opticamente ativas (**Figura 2**) (AMEEN & CARUSO., 2017).

As propriedades físico-químicas do ácido láctico determinam o comportamento químico do composto, como a propriedade ácida em meio aquoso, a reatividade bifuncional, uma vez que o ácido contém um grupo carboxila e um grupo hidroxilo, o ácido láctico tem uma versatilidade reacional muito grande e a atividade óptica assimétrica do carbono C2 (MARTINEZ et al., 2013).

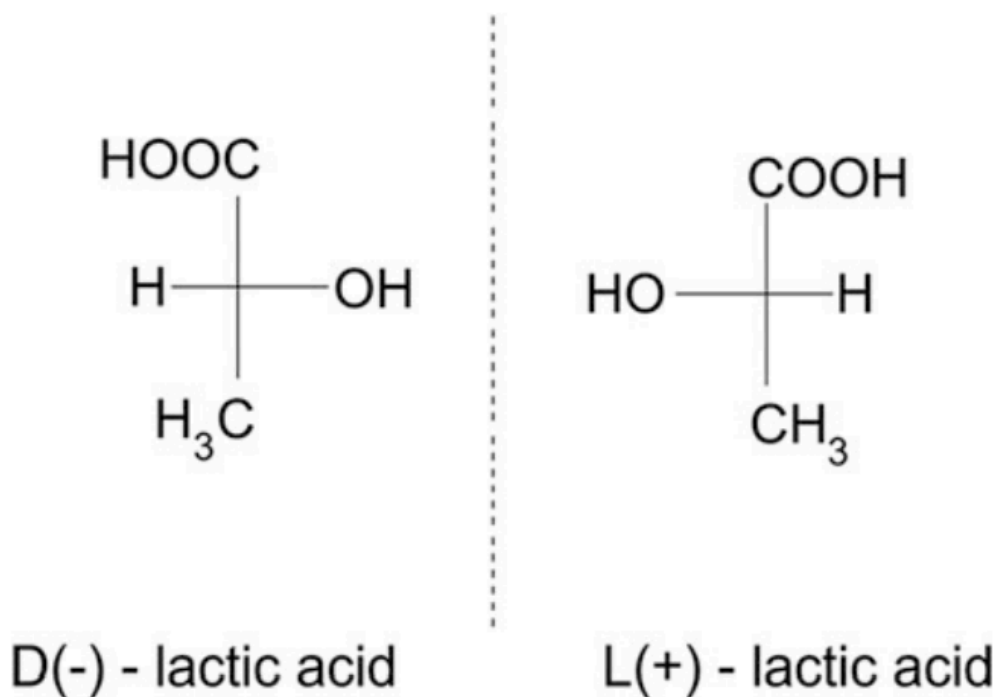


Figura 2: Moléculas dos isômeros D (-) ácido láctico e L (+) ácido láctico (AMEEN & CARUSO., 2017)

4.3 PRODUÇÃO

A produção do ácido láctico pode ser realizada por meio de síntese química ou por fermentação microbiana. Na síntese química, uma mistura racêmica é produzida, consistindo em 50% de L(+) ácido láctico e 50% de D(-) ácido láctico, enquanto que na fermentação para a produção de ácido láctico, é obtida apenas uma forma opticamente ativa, L(+) ou D(-) (OLIVEIRA et al., 2021). As rotas metabólicas que resultam na produção do ácido láctico são as homoláticas e heteroláticas. Na homolática, a glicose convertida em ácido pirúvico com o auxílio da enzima lactato desidrogenase forma o ácido láctico, já na heterolática, ocorre através da rota da pentose, em que é formada a xilulose-5-fosfato, antes do ácido láctico (FREIRE-ALMEIDA & MALDONADO-ALVARADO., 2022).

A indústria, de um modo geral, prioriza a utilização de isômeros puros, e para isso, tem sido relatado cepas microbianas como as bactérias lácticas (LAB), no qual produzem o ácido láctico como produto metabólico principal. (OLIVEIRA et al., 2021).

Bactérias lácticas (LAB) são bactérias gram-positivas que não possuem citocromos, anaeróbicas, geralmente imóveis, não esporulantes, catalase-negativas, tolerante à acidez e estritamente fermentativas. Essas bactérias possuem como metabólito principal, o ácido láctico, ou até mesmo o único metabólito a ser sintetizado. Possuem forma de bastonete (bacilos) ou esféricas (cocos) (NGASOTTER et al., 2021).

As LAB são divididas em grupos homofermentativos e heterofermentativos. No grupo homofermentativo, se utiliza a via metabólica Embden-Meyerhof-Parnas (glicolítica) para transformar a fonte de carbono em ácido láctico. Já as heterofermentativas, produzem quantidades equivalentes de lactato, CO₂, etanol ou acetato a partir de glicose na via da fosfocetolase. Como exemplos de bactérias homofermentativas, pode-se citar as *Lactococcus*, *Pediococcus*, *Enterococcus* e *Streptococcus*, e as heterofermentativas, *Leuconostoc* e *Weissella*. As LAB são um dos grupos de bactérias mais importantes para a indústria alimentícia (NGASOTTER et al., 2021).

Segundo, Alexandri et al., (2020) o tamanho do mercado global do ácido láctico em 2018 foi avaliado em 2.64 bilhões de dólares, possuindo uma taxa anual de crescimento (CAGR - Compound Annual Growth Rate) de 18,7% entre os anos de 2019 a 2025.

4.3.1 PRODUÇÃO VIA FERMENTAÇÃO

A produção de ácido láctico via fermentação (**Figura 3**) é um processo rápido e eficiente. Para realizar a fermentação é necessário preparar um substrato contendo características apropriadas para o crescimento do microrganismo, adicionar nutrientes em soluções com carboidratos e então realizar a inoculação de micro-organismos selecionados. É essencial proporcionar as condições ideais para a fermentação, incluindo temperatura, pH, aeração e agitação, em que variam conforme o tipo de microrganismo escolhido. A busca por matérias-primas de baixo

custo impulsiona o desenvolvimento de processos competitivos, com os materiais mais comuns sendo os monossacarídeos, dissacarídeos e substratos poliméricos (MARTINEZ et al., 2013).

Quase todo ácido láctico produzido no mundo é via fermentação microbiana e apesar de a maioria dos microrganismos produtores de ácido láctico necessitarem de oxigênio para seu crescimento, a sua síntese, através da conversão do carboidrato em ácido láctico, acontece sem oxigênio. Essa conversão envolve várias etapas enzimáticas que levam à formação de piruvato, seguida pela sua conversão em ácido láctico. O ácido láctico é essencial para manter os processos celulares em andamento. Existem diferentes rotas metabólicas envolvidas na produção de ácido láctico, como a via glicolítica e da fosfocetolase. Acreditavam que as bactérias heterofermentativas utilizam exclusivamente o caminho da fosfocetolase, enquanto as bactérias homofermentativas exclusivamente a glicólise, que divide C_6 em duas moléculas de C_3 . Na via fosfocetolase, um açúcar de seis carbonos é transformado em um açúcar de cinco carbonos e CO_2 , e então dividido em uma molécula de dois carbonos o acetato ou etanol, como subprodutos, e uma molécula de três carbonos que é o ácido láctico. Após a fermentação é necessário realizar a remoção da biomassa, passar pela etapa de acidificação, polimento, concentração e por fim, a purificação (AURAS et al., 2022).

Um importante aspecto a se considerar na produção de ácido láctico via fermentação, é o substrato que será utilizado. São usados diversos tipos como resíduos da produção de comida, biomassa e resíduos de usinas de açúcar, resíduos de laticínios, resíduos da indústria, microalgas entre outros (ABEDI & HASHEMI., 2020). O uso de materiais que geralmente seriam descartados faz com que a produção do ácido láctico entre em uma economia circular, reduzindo aspectos negativos como poluição e custo de todo o processo, tornando-a mais sustentável (FREIRE-ALMEIDA & MALDONADO-ALVARADO., 2022).

Produzir o ácido láctico utilizando subprodutos da agroindústria, como resíduos de plantas açucareiras, biomassa amilácea e lignocelulósica, vem mostrando ser uma estratégia promissora na economia circular. Esses subprodutos, como melaço e suco de beterraba açucareira, são ricos em açúcares fermentecíveis, fazendo com que sejam ótimos como substratos para a fermentação láctica. Além disso, há um

interesse crescente em utilizar materiais celulósicos e amiláceos devido à sua grande quantidade, baixo custo e origem renovável. Resíduos agrícolas, resíduos industriais e até mesmo subprodutos da indústria láctea, como soro de leite e iogurte vencido, podem ser aproveitados como fontes de carbono para a produção de ácido láctico. A hidrólise enzimática é um método eficaz para converter biomassa lignocelulósica em açúcares fermentescíveis, enquanto tratamentos físicos e químicos também atuam em um papel importante na preparação desses substratos. Esses métodos levam a uma utilização sustentável de recursos e a redução do desperdício alimentar, contribuindo para a economia, ecologia e aspectos sociais (ABEDI & HASHEMI., 2020).

Outra etapa de grande importância para a produção do ácido láctico é a neutralização. Durante a fermentação, é inevitável que ocorra a diminuição do pH e o meio se torne muito ácido. Muitas bactérias não conseguem continuar a produzir o ácido láctico após a queda do pH, tornando um impasse para a síntese do composto orgânico. Para resolver este problema, diversas bases podem ser utilizadas e a escolha interfere no processo *downstream* da produção. O grande desafio é encontrar um microrganismo capaz de continuar a produção do ácido láctico após a queda do pH sem a necessidade de neutralização. As LABs são capazes de crescer em pH baixo, porém encontrar um micro-organismo capaz de produzir ácido láctico em quantidades significantes em pH próximo ao pK_a do ácido láctico é muito difícil (AURAS et al., 2022).

Durante todo processo de produção deste composto orgânico, a recuperação do ácido láctico do caldo de fermentação é considerada outro desafio para se obter um produto de alta qualidade. O processo de separação e purificação do ácido láctico do caldo de fermentação influencia diretamente a qualidade e o rendimento dos produtos. Aproximadamente 50% do custo total da produção de ácido láctico é devido à recuperação e purificação do ácido, tornando uma etapa de grande relevância (LI et al., 2021).

Muitas técnicas têm sido utilizadas na separação e purificação do ácido láctico, incluindo precipitação, extração por solvente, adsorção, destilação molecular, separação por membrana, esterificação e eletrodialise. A precipitação é um processo de purificação que utiliza a cristalização do lactato de cálcio e a acidólise,

muito usado na indústria do ácido láctico. A extração por solvente ocorre na fase de separação de ácidos carboxílicos em soluções aquosas. Nesse caso, agentes complexantes, como aminas alifáticas de alto massa molar, são utilizados para a separação eficiente do ácido láctico. A adsorção é um método de separação mais promissor do ácido láctico, devido à alta seletividade, baixo consumo de energia e à natureza de fácil regeneração desses processos. A adsorção usa carvão ativado e resina de permuta iônica adsorventes. A destilação é feita por técnica de separação líquido-líquido que ocorre em baixa temperatura de destilação e tempo de reação reduzido. A destilação molecular é muito difundida no refinamento de substâncias sensíveis ao calor, e as etapas de filtração do ácido láctico são etapas cruciais para sua separação, geralmente usado em conjunto com outras técnicas visando um ácido láctico de alta pureza. Membranas de microfiltração e nanofiltração são usadas para remover as impurezas e reduzir a poluição da membrana. A esterificação é usada para isolar o ácido láctico através da produção de ésteres de ácido láctico com a ajuda de um catalisador (LI et al., 2021). A eletrodialise transforma uma solução aquosa em duas, através de separação por membranas. Uma das soluções formadas é mais concentrada, enquanto que a outra é mais diluída em eletrólitos, comparada com a original. Esta técnica utiliza um campo elétrico para promover a migração de íons na solução e através de membranas seletivas de íons por ação de uma diferença de potencial elétrico (OBERHERR., 2019). Durante o processo de produção do ácido láctico via fermentação, é gerado gesso como subproduto, devido a adição do ácido sulfúrico e de dióxido de cálcio para o controle de pH (DORNELLES., 2021). O gesso é um subproduto indesejável, e para solucionar este problema, pode-se utilizar a técnica de eletrodialise, tornando um processo livre de gesso, porém a eletrodialise é uma técnica cara devido seu alto custo de eletricidade e necessidade de uma grande área para membranas (AURAS et al., 2022). Quando usados corretamente, esses métodos melhoram muito a produção de ácido láctico puro e de alta qualidade (LI et al., 2021).

A tecnologia de fermentação em grande escala de L(+) ácido láctico, já está bem desenvolvida, mas ainda é necessário mais estudos para melhorar a produção de D(-) ácido láctico nos quesitos econômicos e de aprimoramentos (BEITEL., 2016).

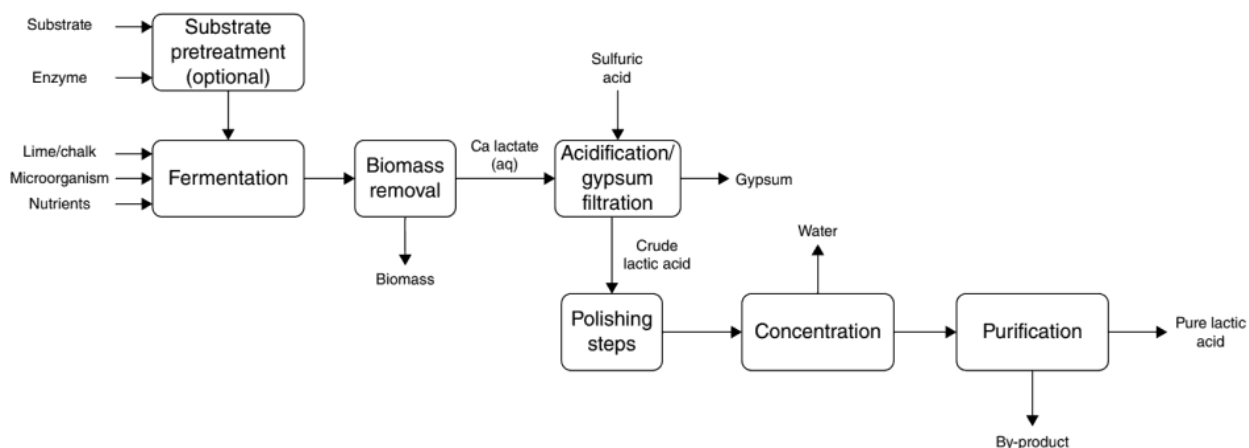


Figura 3: Esquema simplificado da produção do ácido láctico via fermentação (AURAS et al., 2022)

4.3.2 PRODUÇÃO VIA SÍNTESE QUÍMICA

Uma das maneiras de se realizar a síntese química é através da rota da lactonitrila (**Figura 4**), subproduto da tecnologia do acrilonitrila. Para realizar a síntese, ácido cianídrico (HCN) é adicionado a acetaldeído líquido (CH_3CHO) na presença de uma base catalisadora sobre alta pressão quando lactonitrila é produzida. A lactonitrila é recuperada, purificada por destilação, e hidrolizada usando ácido sulfúrico (H_2SO_4) para obter o ácido láctico e sal de amônia ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$). O ácido láctico então é esterilizado com metanol (CH_3OH) e o metil lactato ($\text{CH}_3\text{CHOHCOOCH}_3$) formado é recuperado, purificado por destilação e hidrolisado com água acidificada para produzir ácido láctico e metanol, em seguida o metanol é separado por destilação e reciclado (KOMESU et al., 2017).

Além da rota da lactonitrila, existem diversas maneiras de se obter o ácido láctico por processos químicos, porém nenhuma delas são viáveis economicamente. Devido ao fato de ter um processo caro, ser dependente de subprodutos de outras indústrias que são derivados de combustíveis fósseis, e para vários usos na indústria, é necessário que o ácido láctico seja puro, fazendo com que a produção via síntese química não seja vantajosa, já que através deste método, é gerado uma forma racêmica (KOMESU et al., 2017).

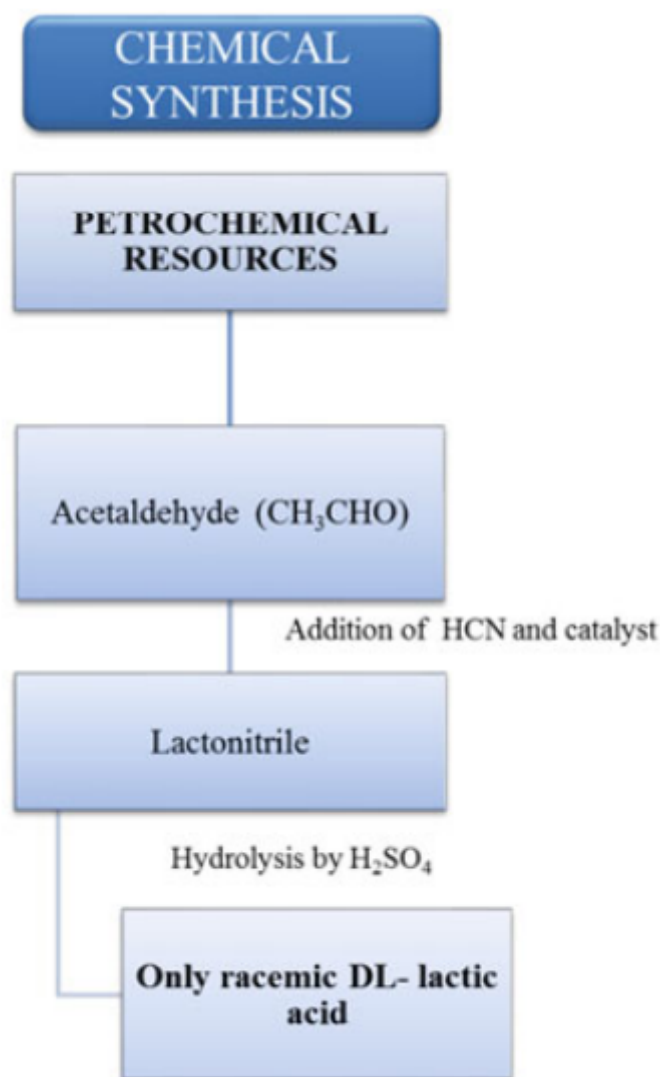


Figura 4: Esquema simplificado da produção de ácido láctico via síntese química.
Adaptado de Kumar et al., 2020.

4.4 APLICAÇÕES

O ácido láctico é um composto orgânico muito versátil utilizado em diversas áreas como têxtil, farmacêutica, couro e alimentícia (**Figura 5**). Além disso, através deste ácido é possível produzir um tipo de bioplástico, o poli-ácido láctico (PLA) (PINHO et al., 2019). Também pode ser utilizado na indústria química na formulação de repelentes, reguladores de pH, neutralizadores. Na indústria cosmética em produtos como hidratantes, agentes clareadores e rejuvenescedores de pele, cremes anti-acnes. Até mesmo na medicina o ácido láctico é utilizado como

componente de soluções de diálise, comprimidos, próteses e suturas cirúrgicas, imunoestimulantes e muito mais (ABEDI & HASHEMI., 2020).



Figura 5: Esquema demonstrativo das aplicações do ácido láctico (DORNELLES., 2021)

4.4.1 INDÚSTRIA ALIMENTÍCIA

O ácido láctico é considerado um composto não tóxico e seguro pela Administração de Alimentos e Medicamentos (FDA) dos Estados Unidos, para o uso como aditivo na indústria alimentícia. Pode ser usado na produção de produtos de panificação, bebidas, carne fermentada, confeitaria, produtos lácteos, saladas, molhos e refeições prontas. Devido a suas propriedades físico-químicas, o ácido láctico tem capacidade de conservar os alimentos, com sua ação antimicrobiana, aumentando a vida útil do produto, como por exemplo em picles e chucrute, que muitas vezes são conservados em vinagre e a conservação em vinagre pode ser feita usando culturas de bactérias ácido lácticas, como *Lactobacillus sp.* Também possui a função aromatizantes em algumas comidas, além de ser um agente acidificante. Em geral, o ácido láctico pode ser encontrado na produção dos seguintes alimentos:

- Bebidas e ingredientes para bebidas

- Alimentos enlatados
- Produtos lácteos e creme, nata coalhada (simples), manteiga, gordura da manteiga, soro de leite fluido (simples), sobremesas à base de laticínios
- Ovos e produtos de ovos (congelados, líquidos)
- Massas e macarrão frescos
- Frutas e produtos de frutas fermentadas
- Sobremesas congeladas e sorvete
- Vegetais fermentados (cenoura, rabanete, molhos de pepino, etc.) e alimentos vegetais não tratados (frescos)
- Carne processada não tratada termicamente fermentada, aves, etc.
- Fórmulas infantis, fórmulas para fins médicos especiais para bebês
- Leite e produtos lácteos, incluindo alimentos secos e bebidas de leite fluido aromatizadas
- Substitutos de sal
- Queijos não maturados, queijo de proteína de soro de leite
- Vinhos (AMEEN & CARUSO., 2017).

Ao adicionar o ácido láctico ao leite, ocorre a coagulação e precipitação de um grupo específico de proteínas do leite, a caseína, em que se pode utilizar para a produção de coalhadas e posteriormente alguns tipos de queijo. Além da coalhada e de alguns queijos, se usa o ácido láctico para fazer iogurtes e kefir, melhorando a consistência e dando o sabor azedo. Na panificação, o ácido láctico está correlacionado a fermentação da massa e controle enzimático, dando sabor, aroma, inibindo fungos e microrganismos indesejáveis, como por exemplo no pão de centeio, em que sua massa é azeda (AMEEN & CARUSO., 2017).

Como vários aditivos são derivados quimicamente do ácido láctico, as aplicações deste composto orgânico podem ser muito mais amplas. A categoria mais importante de derivados do ácido láctico com possíveis aplicações alimentícias

é certamente o grupo de "ésteres de ácido láctico e ácidos graxos de glicerol", usados para emulsificação, sequestro, e estabilização (AMEEN & CARUSO., 2017).

Ainda dentro da indústria alimentícia, também pode-se citar o Poli-ácido láctico para embalagens. O consumo de plástico no mundo vem aumentando cada vez mais e substitutos para produtos derivados do petróleo estão ganhando força no mercado. Na indústria alimentícia o uso de plástico para embalagens possui um agravante, que é o seu longo ciclo de vida. Para tentar amenizar este problema, o mercado vem procurando novas alternativas, e o PLA surge como uma ótima opção. Estudos mostraram que o PLA é economicamente viável para a confecção de embalagens e ainda em questão de saúde, o ácido láctico que migra da embalagem para a comida, não é maior do que o ácido láctico utilizado na produção do alimento. Portanto, o poli-ácido láctico pode ser um ótimo substituto para embalagens plásticas de origem não renováveis (OLIVEIRA & BORGES., 2020).

4.4.2 INDÚSTRIA FARMACÊUTICA

Na indústria farmacêutica, é preferencialmente desejável que o ácido láctico utilizado em seus produtos, sejam na forma isomérica L(+), já que o D (-) ácido láctico não é metabolizado pelo corpo humano (ALSAHEB et al., 2015). O ácido láctico e o PLA desempenham papéis significativos, principalmente na área de medicina regenerativa e entrega de fármacos (*drug delivery*). O biopolímero pode ser usado em implantes médicos que se degradam no interior do corpo ao longo do tempo (SINGH et al., 2020). Em um estudo realizado por Luchesi *et al.*, (2005) foi avaliado uma membrana que usa a combinação de PLA e ácido glicólico (poli ácido láctico-co-ácido glicólico) como curativos para pele e demonstrou que a membrana ajuda na manutenção da hidratação, induz o processo inflamatório mais rápido e proporciona proteção a ferimentos ao paciente.

O PLA é uma escolha comum em sistemas de entrega de medicamentos, onde diversos tipos de polímeros são utilizados combinados. Sua aplicação nesses sistemas é crucial devido à sua biocompatibilidade e capacidade de degradação, que geram a liberação controlada e eficaz dos medicamentos. Também possui uma grande importância na engenharia de tecidos, contribuindo para a restauração

funcional de tecidos comprometidos (SINGH et al., 2020). Além disso, o ácido láctico e seus sais possuem a capacidade de fornecer energia e volume para o sangue, além de regular o pH. Diversos compostos como cálcio, ferro, sódio e outros sais derivados do ácido láctico são utilizados em diferentes formulações devido à sua atividade antitumoral comprovada e ainda, o ácido láctico e seus sais podem ser utilizados para ajustar o pH de preparações e estão presentes em medicamentos destinados ao tratamento de verrugas tropicais (ALSAHEB et al., 2015).

Também se encontra aplicação em distúrbios dermatológicos, especialmente para pele seca, onde o lactato de amônio, que é preparado pela mistura do ácido láctico com hidróxido de amônia, se destaca como um ótimo hidratante. Também é empregado em formulações de lactato mineral para tratar várias condições, como anemia, hipertensão e osteoporose. Essas formulações, devido à aceitação do corpo humano ao ácido láctico e seus sais, proporcionam uma maneira eficaz de introduzir minerais terapêuticos no organismo. Estudos recentes destacam benefícios do ácido láctico na renovação celular e no tratamento de descolorações da pele e destaca sua importância na indústria farmacêutica, onde é garantido altos padrões de qualidade exigidos pelo setor. No entanto, mesmo apresentando vantagens, como a promoção da produção de colágeno e elastina, o ácido láctico também apresenta algumas desvantagens, como a sensibilidade aumentada quando exposto ao sol e a possibilidade de irritação na pele. Portanto, o ácido láctico, mesmo com suas desvantagens, mostra ser um ótimo aliado no cuidado da pele e um grande produto para as indústrias farmacêuticas e de cosméticos. (ALSAHEB et al., 2015).

4.4.3 INDÚSTRIA QUÍMICA

Na indústria química, o ácido láctico possui diversas utilidades, e uma das principais é sua transformação em intermediários de grande valor, como ácido acrílico, propilenoglicol e 2,3-pentanodiona. Esses intermediários desempenham um papel crucial em processos de síntese química para a fabricação de vários produtos, desde plásticos e polímeros até produtos farmacêuticos e cosméticos. Além disso, o ácido láctico é utilizado como acidulante em indústrias de curtimento de couro, auxiliando no controle do pH dos banhos de processamento. Ele também tem importância como agente terminante em resinas fenol-formaldeído, contribuindo para

a formação e endurecimento desses materiais. Em aplicações de impressão litográfica e têxtil, o ácido láctico é usado como revelador, ajudando a fixar padrões e imagens nos substratos. Também é usado como componente em formulações adesivas, colaborando na aderência de diversos materiais em contextos industriais e comerciais. Além disso, ele é aplicado em banhos de electrodeposição e eletropolimento para limpar e polir superfícies metálicas. Na produção de detergentes, o ácido láctico atua como agente removedor auxiliando na remoção de sujeira e gordura das superfícies. O ácido láctico também pode ser aplicado na extração da gelatina proveniente dos resíduos da pesca. Isso mostra como o ácido láctico é utilizado em diversos processos industriais, desde a criação de materiais de construção até a fabricação de alimentos e medicamentos fazendo com que o ácido láctico tenha uma função muito relevante na indústria química, sendo fundamental para uma variedade de processos e produtos (KIM et al., 2022).

O ácido láctico vem ganhando grande destaque na indústria química por ser um composto orgânico muito versátil e com diversas aplicações. Nos dias de hoje, se tem buscado cada vez mais uma indústria mais responsável ambientalmente e para termos uma indústria química cada vez mais sustentável, é necessário a utilização de recursos renováveis, e a transformação do ácido láctico a partir de recursos renováveis como lignina e seus derivados, possuem grande interesse pela indústria química. Um processo sustentável que ocorre nas biorrefinarias é o desenvolvimento de técnicas eficientes para a produção do ácido láctico e lactatos através de biomassa lignocelulósica, fazendo com que diminua a dependência de fontes de petróleo e não renováveis. Para aprimorar este processo sustentável, vêm sendo realizados a aplicação da quimiocatálise, permitindo que ocorra a valorização da biomassa celulósica e supere problemas do tradicional método de obtenção do ácido láctico através da fermentação (ZHANG et al., 2018).

4.4.4 POLI-ÁCIDO LÁCTICO (PLA)

Plásticos produzidos a partir do petróleo possuem muitas aplicações, versatilidade, durabilidade e resistência, e devido a estas características, são comumente presentes em nossas vidas. Desde 1950 a produção destes plásticos cresceu anualmente 1,5 milhões de toneladas até alcançar no ano de 2018

aproximadamente 359 milhões de toneladas (COBO et al., 2021). A população mundial tem aumentado a utilização deste material, gerando enormes quantidades de resíduos, no qual se acumulam por longos períodos em lixões e aterros sanitários, trazendo assim, diversos problemas ambientais (OLIVEIRA & BORGES., 2020). Para tentar contornar este problema, surge a necessidade de utilizar materiais biodegradáveis, como os bioplásticos. Os bioplásticos ou biopolímeros, são geralmente produzidos a partir de fontes renováveis naturais ou sintetizados de monômeros bioderivados, como o PLA que possui o ácido láctico como seu monômero. No processo de biodegradação, os polímeros biodegradáveis são quebrados em componentes mais simples e distribuídos através de ciclos elementares, como os ciclos do carbono e do nitrogênio. Sob condições aeróbicas, os produtos finais da degradação incluem dióxido de carbono, água e biomassa, enquanto em condições anaeróbicas, os produtos finais são hidrocarbonetos, metano e biomassa. (KARAMANLIOGLU et al., 2017).

O poli-ácido láctico (PLA) é um poliéster biodegradável sintético produzido a partir do ácido láctico que possui uma estrutura hidrolisável. O PLA é sintetizado a partir de recursos renováveis, tornando-o uma importante alternativa para os plásticos derivados do petróleo (KARAMANLIOGLU et al., 2017). É um polímero semi-cristalino, biocompatível, um poliéster termoplástico alifático linear, no qual a fonte e as condições de seu processamento determinam sua cristalinidade. É insolúvel em água, etanol, metanol, e hidrocarbonetos alifáticos, porém é solúvel em clorofórmio, benzeno, acetonitrila, que são tóxicos, mas também é solúvel em acetona, acetato de etila e diclorometano. Pode ser degradado entre seis meses a dois anos, dependendo de sua estereoquímica e massa molar, no entanto, alguns aditivos podem ser usados para acelerar o processo de degradação em 94% em 60 dias na compostagem (PENS., 2022).

A produção do PLA pode acontecer de três formas, sendo elas: condensação direta, a desidratação azeotrópica, e a polimerização pela formação de lactídeo. Para efetuar a polimerização, é necessário que o ácido láctico seja o mais puro possível, já que impurezas impossibilitam a reação e geram um produto com qualidade inferior (SILVESTRINI., 2020).

O PLA apresenta uma ampla gama de polímeros e copolímeros com variações na cristalinidade, peso molecular e proporções de PLLA, derivado do L(+) ácido láctico e PDLA, derivado do D(-) ácido láctico. Isso se deve à sua capacidade de ser sintetizado por diferentes rotas e ao fato de que o monômero pode apresentar arranjos ópticos distintos. Pode ser usado em diversas ocasiões como na produção de embalagens, utensílios domésticos, peças biomédicas e também pode ser usado em suturas e na substituição de tecidos animais (OLIVEIRA & BORGES., 2020).

A mistura de PLLA e PDLA apresenta vantagens em relação aos polímeros com apenas um dos isômeros, formando o poli (DL-ácido láctico) (PDLA). Em uma mesma cadeia, os diferentes isômeros juntos, diminuem a cristalização do polímero, tornando-o amorfo em uma certa concentração. Além disso, o PDLA pode atuar como agente nucleante do PLLA, gerando uma estrutura mais compacta na mistura. Esta mistura de PLLA e PDLA possui uma temperatura de fusão cristalina (T_m) superior aos enantiômeros puros, alcançando aproximadamente 230 °C para a blenda em comparação com cerca de 180 °C para os homopolímeros individuais. Quando adicionado uma pequena quantidade de isômero diferente é modificada a janela de processamento do material, uma vez que as temperaturas de fusão cristalina e de transição vítrea são determinantes. Essas características fazem com que a mistura de PLLA e PDLA seja uma opção muito atraente para as diversas aplicações do PLA, gerando propriedades mecânicas e térmicas aprimoradas (BIAZIN., 2021).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através desta revisão bibliográfica, foi possível contextualizar o ácido láctico e suas diversas aplicações na indústria. Foi possível concluir que é um composto orgânico muito versátil e de grande relevância para diversos setores e que apesar da necessidade de mais estudos para uma melhor utilização e otimização da produção do ácido, já é previsto e avaliado com um grande futuro no ramo biotecnológico.

O desenvolvimento e avanços tecnológicos na produção de ácido láctico podem trazer grandes benefícios em termos de sustentabilidade, desde a utilização de resíduos que seriam descartados por várias indústrias, até com materiais biodegradáveis, no qual é importante para sociedade, economia e meio ambiente.

O ácido láctico possui um potencial de crescimento enorme, grande parte graças ao poli-ácido láctico, seguindo o grande crescimento da indústria dos bioplásticos e interesse da população em se adequar a um consumo mais consciente e menos agressivo à natureza.

Diante de todas as possibilidades de uso do ácido láctico deve-se destacar a importância da pesquisa. Não somente do ácido láctico, mas também de outras moléculas de interesse para o desenvolvimento da indústria, buscando sempre melhorias nos processos, otimização, qualidade dos produtos, economia e sustentabilidade fazendo com que a população se beneficie com os avanços. Além disso, o ácido láctico obtido por fermentação está atrelado à bioeconomia circular, uma vez que sua produção pode ser considerada sustentável e atendendo às ODS (Objetivos de Desenvolvimento Sustentável), focando em temas como: Sustentabilidade, Bioeconomia, Saúde e bem estar, materiais e Tecnologias.

REFERÊNCIAS

- ALSAHEB R. A, et al. **Lactic acid applications in pharmaceutical and cosmeceutical industries**. Journal of Chemical and Pharmaceutical Research. 2015. 729-735.
- ABEDI, E.; HASHEMI, S. M. B. **Lactic acid production - producing microorganisms and substrates sources-state of art**. Heliyon, v. 6, n. 10, p. e04974, 2020.
- ALEXANDRI, M. et al. **High L(+)-lactic acid productivity in continuous fermentations using bakery waste and lucerne green juice as renewable substrates**. Bioresource technology, v. 316, n. 123949, 2020.
- AMEEN, S. M.; CARUSO, G. **Chemistry of lactic acid**. SpringerBriefs in Molecular Science. Springer International Publishing, 2017. p. 7–17.
- AMEEN, S. M., & CARUSO, G. **Lactic acid in the food industry**. Springer International Publishing. 2017.
- AURAS, R. A. et al. **Poly(lactic acid): Synthesis, structures, properties, processing, applications, and end of life**. 2. ed. Nashville, TN: John Wiley & Sons, 2022.
- BEITEL, S. M. **Otimização da produção de D(-) ácido láctico por Sporolactobacillus nakayamae e Lactobacillus delbrueckii utilizando subprodutos agro-industriais**. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, 2016.
- BIAZIN, G. G. **Estudo da cinética de cristalização não-isotérmica de nanocompósitos de PLA/Haloisita**. Dissertação (Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais) Universidade Federal de São Carlos. 2021.
- COBO, F. N. et al. **Estudo da miscibilidade de blendas de poli (ácido láctico)/ poli (butileno adipato-co-tereftalato) preparadas pelo método de evaporação de solvente**. Matéria. Rio de Janeiro, 2021. <https://doi.org/10.1590/s1517-707620210002.1276>
- DE OLIVEIRA, J. et al. **Bioconversion of potato-processing wastes into an industrially-important chemical lactic acid**. Bioresource technology reports, v. 15, n. 100698, 2021.
- DJUKIĆ-VUKOVIĆ, A. et al. **Towards sustainability of lactic acid and poly-lactic acid polymers production**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 108, p. 238–252, 2019.
- DORNELLES, E. S. **Produção de ácido láctico: panorama de melhorias de processos**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Química) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Francisco Beltrão. 2021.

FREIRE-ALMEIDA, E.; MALDONADO-ALVARADO, P. **Use of *Lactobacillus* for lactic acid production from Agro-industrial by-products.** *Lactobacillus - A Multifunctional Genus* IntechOpen. 2022.

KARAMANLIOGLU, M. et al. **Abiotic and biotic environmental degradation of the bioplastic polymer poly(lactic acid): A review.** *Polymer Degradation and Stability*, 137, 122–130. 2017 <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2017.01.009>

KIM, J. et al. **Lactic acid for green chemical industry: Recent advances in and future prospects for production technology, recovery, and applications.** *Fermentation*, 8(11), 609. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/fermentation8110609>

LAUFFER, O. L. **Produção biotecnológica de ácido láctico a partir de diferentes fontes de carbono.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul, p. 41. 2019. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/231027>

LI, C. et al. **Recent advances in the separation and purification of lactic acid from fermentation broth.** *Process biochemistry*. Londres, Inglaterra. v. 104, p. 142–151, 2021.

LUCHESI, C, A et al. **Membranas de poli (ácido láctico-co-ácido glicólico) como curativos para pele: degradação in vitro e in vivo.** *Polímeros*, 15(3), 232–238. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0104-14282005000300015>

MARTINEZ, F. C. A. et al. **Lactic acid properties, applications and production: A review.** *Trends in food science & technology*, v. 30, n. 1, p. 70–83, 2013.

NGASOTTER, S. et al. **Diversity of lactic acid bacteria (LAB) in fermented fish products: A review.** *International journal of current microbiology and applied sciences*, v. 9, n. 5, p. 2238–2249, 2021.

OLIVEIRA, A. C. & BORGES, S. V. **Poli (ácido láctico) aplicado para embalagens de alimentos: uma revisão.** *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, v. 15, n. 1, p. 1-10, 2020.

OBERHERR, R. **Aplicação das tecnologias conjugadas de ultrafiltração e eletrodialise ao soro de leite proveniente da indústria láctea para posterior reuso.** 2019. Dissertação (Mestrado) – Curso de Sistemas Ambientais Sustentáveis, Universidade do Vale do Taquari - Univates. Lajeado. 26 fev. 2019. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10737/2518>.

PENS, C. J. S. **Desenvolvimento de filmes bioativos a partir de poli (ácido Láctico) incorporados com oleoresina de páprica.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2022. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/248913>

PINHO, C. L. C. DE et al. **Produção de ácido láctico em meio à base de efluentes da indústria de alimentos por cultura láctea mista imobilizada.** *Brazilian journal of food technology*. v. 22, n. 0, 2019.

TRINDADE, C. M. **Estudo da recuperação de ácido láctico proveniente do soro de queijo pela técnica de membranas líquidas surfatantes.** Dissertação de

Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais. p. 106. 2002. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/456>

SILVESTRINI, R. **Síntese e caracterização de poli(ácido láctico) (PLA) via micro-ondas**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2020. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/219154>

SINGH, J. et al. ***Bioactive Natural products in Drug Discovery***. Springer Singapore. cap. 16 p. 467-484. 2020.

ZHANG, H. et al. **Chemocatalytic production of lactates from biomass-derived sugars**. International Journal of Chemical Engineering. 2018, p1–18. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2018/7617685>