

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

LEANDRO BAPTISTELLA MALDONADO

**POTENCIAL DE VALORIZAÇÃO DO SORO DE LEITE COMO RECURSO
ENERGÉTICO E INDUSTRIAL: UMA ANÁLISE SISTEMÁTICA DA
LITERATURA**

SÃO CARLOS - SP

2025

LEANDRO BAPTISTELLA MALDONADO

**POTENCIAL DE VALORIZAÇÃO DO SORO DE LEITE COMO RECURSO
ENERGÉTICO E INDUSTRIAL: UMA ANÁLISE SISTEMÁTICA DA
LITERATURA**

Trabalho de Conclusão de Curso da Universidade
Federal de São Carlos como requisito para
obtenção do título de Bacharel em Engenharia
Química.

Orientador: Prof. Dr. Edson Luiz Silva

SÃO CARLOS - SP

2025

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e Tecnologia

Folha de Aprovação

Assinatura dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a defesa de Trabalho de Graduação do candidato Leandro Baptistella Maldonado, realizada em 15/07/2025:

Prof. Dr. Edson Luiz Silva

Universidade Federal de São Carlos

Prof. Dr. Fábio Bentes Freire

Universidade Federal de São Carlos

Prof. Dr. Wu Hong Kwong

Universidade Federal de São Carlos

Dedico este trabalho aos meus pais, que abriram caminhos com o próprio suor para que eu pudesse trilhar o meu. Cada conquista minha carrega o esforço silencioso de vocês. Obrigado por tudo.

AGRADECIMENTO

Concluir este trabalho é, para mim, um marco de superação, aprendizado e crescimento. No entanto, essa conquista não seria possível sem o apoio de pessoas fundamentais que estiveram comigo em diferentes momentos dessa jornada.

Aos meus pais, José Carlos e Eliana, minha eterna gratidão. Foram vocês que, com amor, dedicação e incentivo incondicional, me mostraram que os desafios da vida podem ser superados com esforço, honestidade e perseverança. Obrigado por sempre estarem ao meu lado, mesmo nos momentos mais difíceis, e sempre acreditarem em mim, vocês são a base de tudo.

À minha namorada, Isabela “Linduca”, que chegou nos momentos finais dessa caminhada, mas rapidamente se tornou parte essencial dela. Mesmo sem estar presente desde o início, você esteve ao meu lado nos capítulos mais desafiadores, oferecendo apoio, amor e tranquilidade quando eu mais precisei. Seu carinho e sua presença tornaram leve o que parecia pesado, e sua forma de cuidar me fez enxergar a beleza até nos dias mais difíceis.

Agradeço também aos meus amigos Felipe e Murilo, que se tornaram verdadeiros irmãos ao longo da graduação. Compartilhamos grandes momentos, noites mal dormidas, risadas, frustrações e conquistas, e cada um desses momentos foi essencial para tornar essa caminhada mais leve e significativa. Espero que nossa amizade ultrapasse o final da graduação, afinal Murilo ainda me deve uma pipoca.

Sou grato aos colegas que cruzaram meu caminho na universidade, seja por meio da Engenharia Química ou projeto de extensão, como a Operação Natal, que contribuíram, direta ou indiretamente, para minha formação. As conversas, os trabalhos em grupo e experimentos, os conselhos e o apoio mútuo fizeram toda a diferença.

Por fim, não poderia deixar de reconhecer os professores que me acompanharam ao longo do curso, pela paciência, empenho e compromisso em transmitir não apenas conteúdo técnico, mas também valores importantes para a vida pessoal e profissional. Em especial, agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Edson Luiz Silva, que além de ter papel fundamental ao longo da graduação, guiou este trabalho com sabedoria, clareza e respeito. Obrigado por todas as conversas, conselhos, e ensinamentos, seja em relação aos estudos ou a vida.

A todos que fizeram parte dessa caminhada, o meu muito obrigado.

RESUMO

Diante dos desafios ambientais contemporâneos e da crescente demanda por soluções sustentáveis, a valorização de resíduos orgânicos industriais tem ganhado destaque como estratégia para a transição energética e para a economia circular. Neste contexto, o soro de leite, coproduto gerado em larga escala pela indústria de laticínios, apresenta elevado potencial poluente quando descartado inadequadamente, mas também uma composição rica em nutrientes que o torna matéria-prima viável para a geração de compostos de valor agregado. Dessa forma, este trabalho apresenta uma análise bibliográfica da literatura sobre o aproveitamento biotecnológico do soro de leite para a produção de biogás, hidrogênio, etanol e ácido láctico, com foco nos princípios das rotas metabólicas, nos microrganismos envolvidos e nas condições operacionais ideais. Além disso, foram utilizadas bases de dados internacionais para identificar os avanços científicos, os principais autores, as áreas de pesquisa mais ativas, as tendências de publicação e os desafios enfrentados. Os resultados evidenciam não apenas o potencial técnico do soro de leite para substituição de recursos fósseis e mitigação ambiental, mas também a necessidade de políticas públicas, incentivos econômicos e inovação tecnológica para viabilizar sua aplicação em escala industrial. Assim, a valorização desse subproduto se mostra uma estratégia eficaz para transformar passivos ambientais em ativos econômicos, integrando sustentabilidade, energia limpa e desenvolvimento industrial.

Palavras-chave: resíduos orgânicos; digestão anaeróbia; fermentação; biogás; hidrogênio; ácido láctico; etanol; economia circular.

ABSTRACT

Amid contemporary environmental challenges and the growing demand for sustainable solutions, the valorization of industrial organic waste has gained prominence as a key strategy for energy transition and the advancement of a circular economy. In this context, whey, a by-product generated on a large scale by the dairy industry, poses a significant pollution risk when improperly discarded, but also has a nutrient-rich composition that makes it a viable raw material for the production of value-added compounds. This study presents a literature-based bibliographic analysis of the biotechnological utilization of whey for the production of biogas, hydrogen, ethanol, and lactic acid, focusing on the principles of the metabolic pathways, the microorganisms involved, and the optimal operational conditions. International scientific databases were used to identify technological advances, leading authors, active research areas, publication trends, and major challenges. The results reveal not only the technical potential of whey as a substitute for fossil-based resources and a means of environmental mitigation, but also the urgent need for public policies, economic incentives, and technological innovation to enable its industrial-scale application. Therefore, the valorization of this by-product stands out as an effective strategy to transform environmental liabilities into economic assets, promoting sustainability, clean energy, and industrial development.

Keywords: organic waste; anaerobic digestion; fermentation; biogas; hydrogen; lactic acid; ethanol, circular economy.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Metas globais de desenvolvimento sustentável estabelecidas pela ONU.....	26
Figura 2 - Esquematização simplificada do processo de fermentação alcoólica.....	28
Figura 3 - Esquematização simplificada do processo de fermentação láctica.	29
Figura 4 - Fluxograma da digestão anaeróbia evidenciando suas etapas e compostos.	31
Figura 5 - Influência da temperatura na taxa de crescimento relativo de metanógenos psicrofílicos, mesófilos e termofílicos.....	33
Figura 6 - Matriz energética do Brasil.....	38
Figura 7 - Aplicações do hidrogênio verde.....	41
Figura 8 - Etapas de produção do etanol 2G.	44
Figura 9 - Fórmula molecular dos isômeros do ácido láctico.	48
Figura 10 - Aplicações do ácido láctico na indústria química.....	49
Figura 11 - Esquematização das rotas de síntese de ácido láctico.	50
Figura 12 - Reações envolvidas na obtenção do ácido láctico via rota química.	50
Figura 13 - Rotas fermentativas homoláctica e heteroláctica.	52
Figura 14 - Fluxo da metodologia utilizada para elaboração deste trabalho.	55
Figura 15 - Quantidade de publicações relacionadas às palavras-chave ao longo do tempo, via Scopus.....	57
Figura 16 - Quantidade de publicações relacionadas às palavras-chave ao longo do tempo, via Web of Science.	58
Figura 17 - Quantidade de publicações relacionadas às palavras-chave ao longo do tempo: abordagem individual.	59
Figura 18 - Distribuição e percentual referente a áreas de estudo para o tema "whey".	61
Figura 19 - Principais autores referentes a publicações associadas ao tema "whey".	62
Figura 20 - Quantidade de documentos e citações de David Julian McClements.....	63
Figura 21 - Principais países referentes a publicações associadas ao tema "whey".	63
Figura 22 - Quantidade de publicações ao longo do tempo associadas ao tema "whey" no Brasil.	64
Figura 23 - Principais autores referentes a publicações associadas ao tema "whey" no Brasil.	65
Figura 24 - Distribuição e percentual referente a áreas de estudo para o tema "anaerobic digestion".....	66

Figura 25 - Principais autores referentes a publicações associadas ao tema "anaerobic digestion"	67
Figura 26 - Quantidade de documentos e citações de Irini Angelidaki.	68
Figura 27 - Principais países referentes a publicações associadas ao tema "anaerobic digestion".	69
Figura 28 - Quantidade de publicações ao longo do tempo associadas ao tema "anaerobic digestion" no Brasil.	70
Figura 29 - Principais autores referentes a publicações associadas ao tema "anaerobic digestion" no Brasil.....	71
Figura 30 - Distribuição e percentual referente a áreas de estudo para o tema "biogas".	72
Figura 31 - Principais autores referentes a publicações associadas ao tema "biogas" no cenário mundial.	73
Figura 32 - Distribuição e percentual referente a áreas de estudo para o tema "hydrogen"	76
Figura 33 - Principais autores referentes a publicações associadas ao tema "hydrogen" no cenário mundial.	77
Figura 34 - Quantidade de documentos e citações de Hoongkun Kunh Fun.	78
Figura 35 - Principais países referentes a publicações associadas ao tema "hydrogen".	78
Figura 36 - Quantidade de publicações ao longo do tempo associadas ao tema "hydrogen" no Brasil.....	79
Figura 37 - Principais autores referentes a publicações associadas ao tema "hydrogen" no Brasil.	80
Figura 38 - Distribuição e percentual referente a áreas de estudo para o tema "ethanol".	82
Figura 39 - Principais autores referentes a publicações associadas ao tema "ethanol" no cenário mundial.	83
Figura 40 - Quantidade de documentos e citações de Charles Lieber.	83
Figura 41 - Principais países referentes a publicações associadas ao tema "ethanol".....	84
Figura 42 - Quantidade de publicações ao longo do tempo associadas ao tema "ethanol" no Brasil.....	85
Figura 43 - Principais autores referentes a publicações associadas ao tema "ethanol" no Brasil.	86
Figura 44 - Distribuição e percentual referente a áreas de estudo para o tema "acid lactic". ..	87
Figura 45 - Principais autores referentes a publicações associadas ao tema "acid lactic" no cenário mundial.	88
Figura 46 - Quantidade de documentos e citações de Marco Gobetti.	88

Figura 47 - Principais países referentes a publicações associadas ao tema "acid lactic".	89
Figura 48 - Quantidade de publicações ao longo do tempo associadas ao tema "acid lactic" no Brasil.	90
Figura 49 - Principais autores referentes a publicações associadas ao tema "acid lactic" no Brasil.	91
Figura 50 - Quantidade de publicações ao longo do tempo para cada combinação de palavras-chave no contexto global.	94
Figura 51 - Distribuição e percentual referente a áreas de estudo para cada combinação de palavras-chave.	95
Figura 52 - Principais autores referentes as associações de palavras-chave no cenário mundial.	96
Figura 53 - Principais países referentes as associações de palavras-chave.	98
Figura 54 - Quantidade de publicações ao longo do tempo referentes as associações de palavras-chave no contexto brasileiro.	100
Figura 55 - Principais autores referentes as associações de palavras-chave no contexto brasileiro.	102
Figura 56 - Quantidade de documentos associados ao tema de codigestão aneróbia.	104
Figura 57 - Produção anual de biometano no contexto mundial.	105
Figura 58 - Produção anual de biometano no Brasil em m ³ .	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição do leite e dos soros doce e ácido.....	20
Tabela 2 - Composição mineral dos soros doce e ácido.	21
Tabela 3 - Principais tratamentos do soro de leite, suas vantagens e desvantagens.	24
Tabela 4 - Compostos gerados a partir de processos fermentativos.	27
Tabela 5 - Rendimento de metano e biogás em função de diversas matérias-primas.	36
Tabela 6 - Variação do poder calorífico do biogás em relação à sua composição.....	37
Tabela 7 - Matérias-primas e métodos de produção de hidrogênio.	42
Tabela 8 - Produção mundial de etanol por país.....	46
Tabela 9 - Quantidade de publicações obtidas a partir das palavras-chave na base de dados Scopus.....	56
Tabela 10 - Quantidade de publicações obtidas a partir das palavras-chave na base de dados Web of Science.	57
Tabela 11 - Quantidade de publicações obtidas a partir da combinação de palavras-chave na base de dados Scopus.	92
Tabela 12 - Quantidade de publicações obtidas a partir da combinação de palavras-chave na base de dados Web of Science.	93

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIOGAS	Associação Brasileira de Biogás
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ATP	Adenosina Trifosfato
CAGR	Taxa de Crescimento Anual Composta
CH ₄	Metano
CNR	Conselho Nacional de Pesquisas
CO ₂	Dióxido de Carbono
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CSTR	Reator de Tanque Agitado Contínuo
CTBE	Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
E1G	Etanol de Primeira Geração
E2G	Etanol de Segunda Geração
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EUA	Estados Unidos da América
GEE	Gases de Efeito Estufa
H ₂	Hidrogênio
H ₂ O	Água
H ₂ S	Sulfeto de Hidrogênio
IDF	Conselho Italiano da Federação Leiteira Internacional
IoT	Internet das Coisas
ISI	Institute for Scientific Information
ISO	International Organization for Standardization
IUPAC	União Internacional de Química Pura e Aplicada
N ₂	Nitrogênio

NAD	Nicotinamida Adenina Dinucleotídeo
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
PET	Polietileno Tereftalato
pH	Potencial Hidrogeniônico
PLA	Poliácido Lático
SAC	Sistemas Alagados Construídos
SIMTREA	Sociedade Italiana de Agricultura, Microbiologia Ambiental e Alimentar
UASB	Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente e Manta de Lodo
EU	União Europeia
UFSCar	Universidade Federal de São Carlos
Unicamp	Universidade Estadual de Campinas
USP	Universidade de São Paulo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1	RESÍDUOS ORGÂNICOS.....	19
2.1.1	Soro de Leite.....	20
2.2	PROCESSOS FERMENTATIVOS	26
2.2.1	Fermentação Alcoólica	27
2.2.2	Fermentação Lática	29
2.3	DIGESTÃO ANAERÓBIA	30
2.4	FATORES QUE INFLUENCIAM NOS PROCESSOS FERMENTATIVOS.....	32
2.5	BIOGÁS.....	35
2.5.1	Aplicações	38
2.6	HIDROGÊNIO	40
2.6.1	Aplicações	40
2.6.2	Rotas de Produção	41
2.7	ETANOL.....	43
2.7.1	Etanol de Primeira Geração (E1G).....	43
2.7.2	Etanol de Segunda Geração (E2G)	44
2.7.3	Aplicações	45
2.7.4	Mercado	46
2.8	ÁCIDO LÁTICO	47
2.8.1	Aplicações	48
2.8.2	Mercado	49
2.8.3	Rotas de Produção	49
3	BASES DE PESQUISA BIBLIOGRÁFICA E ÍNDICE-H.....	53
3.1	WEB OF SCIENCE.....	53
3.2	PLATAFORMA SCOPUS	53
3.3	ÍNDICE-H.....	53
4	METODOLOGIA.....	54
5	RESULTADOS.....	56
5.1	SORO DE LEITE	60
5.2	DIGESTÃO ANERÓBIA	66

5.3	BIOGÁS.....	71
5.4	HIDROGÊNIO	76
5.5	ETANOL.....	81
5.6	ÁCIDO LÁTICO	86
5.7	COMBINAÇÃO DE PALAVRAS-CHAVE	91
5.8	DESAFIOS E PERSPECTIVAS FUTURAS.....	103
6	CONCLUSÃO.....	109
	REFERÊNCIAS.....	111

1 INTRODUÇÃO

O século XXI tem sido marcado por desafios ambientais sem precedentes. A intensificação da atividade industrial, o crescimento populacional e o modelo econômico linear baseado na extração, produção, consumo e descarte têm contribuído significativamente para o esgotamento de recursos naturais, a geração excessiva de resíduos e a intensificação das mudanças climáticas. Diante desse cenário, torna-se imprescindível repensar práticas produtivas e implementar soluções que integrem sustentabilidade, inovação tecnológica e uso eficiente dos recursos (SACHS, 2000).

Neste contexto, o reaproveitamento de resíduos orgânicos industriais surge como uma estratégia promissora, tanto para mitigar impactos ambientais quanto para agregar valor econômico a materiais antes considerados descartáveis. Entre esses resíduos, destaca-se o soro de leite, coproduto da fabricação de queijos, que representa aproximadamente 90% do volume original do leite utilizado no processo (MOREIRA et al., 2010). Apesar de sua composição rica em lactose, proteínas e minerais, características que conferem alto potencial nutricional e energético, grande parte do soro de leite produzido no Brasil ainda é descartada de forma inadequada, especialmente por pequenas e médias queijarias. Dessa forma, estima-se que cerca de 40% desse subproduto seja desperdiçado, contrariando legislações ambientais e contribuindo significativamente para a poluição hídrica devido à sua elevada carga orgânica, cuja DBO pode ser até 100 vezes maior que a de esgoto doméstico (PAULA et al., 2011; MARQUARDT et al., 2012).

Paradoxalmente, o que hoje representa um passivo ambiental pode se tornar um ativo estratégico. O soro de leite, quando tratado com a abordagem certa, é capaz de ser transformado em biogás, hidrogênio, etanol e ácido lático, produtos de grande valor agregado com aplicações nos setores energético, químico, farmacêutico e alimentício (FLORENCIO et al., 2013). Essa transformação é viabilizada por rotas biotecnológicas, como fermentações específicas e digestão anaeróbia, que além de reduzir a carga poluente do resíduo, geram produtos de alto interesse comercial. Assim, a aplicação desses processos está diretamente relacionada aos princípios da bioeconomia e da economia circular, que propõem o uso sustentável dos recursos naturais, o reaproveitamento de resíduos e a redução da dependência de fontes fósseis (GEISSDOERFER et al., 2017).

Além disso, vale destacar que no cenário brasileiro existem condições particularmente favoráveis à implementação dessas soluções. Com uma das maiores indústrias de laticínios do mundo e uma abundância de biomassa residual, o país reúne todos os elementos para liderar a transição para uma matriz energética mais limpa e descentralizada (EPE, 2023). No entanto, a aplicação prática dessas alternativas ainda é limitada por barreiras tecnológicas, econômicas e regulatórias, já que faltam incentivos, políticas públicas eficazes e infraestrutura apropriada para que a valorização do soro de leite se torne realidade em escala industrial, especialmente nas regiões produtoras mais vulneráveis (REGHELIM et al., 2018).

Neste contexto, este trabalho busca preencher lacunas importantes na compreensão sobre o potencial do soro de leite como matéria-prima estratégica, por meio de uma análise sistemática da literatura científica sobre sua utilização em processos biotecnológicos. A pesquisa está centrada na produção de quatro compostos de destaque: biogás, hidrogênio, etanol e ácido láctico, avaliando os fundamentos bioquímicos envolvidos, os microrganismos mais utilizados, as condições operacionais ideais e os desafios técnicos enfrentados em cada rota produtiva. Além disso, o trabalho faz uso de ferramentas bibliométricas para mapear os avanços recentes na área, identificar os principais centros de pesquisa e avaliar as tendências e lacunas existentes na literatura nacional e internacional.

O diferencial desta pesquisa está em sua abordagem abrangente e integrada. Ao reunir dados técnicos, análises científicas e considerações estratégicas sobre viabilidade e sustentabilidade, o presente trabalho propõe uma visão holística do reaproveitamento do soro de leite, destacando como sua valorização pode atuar como catalisadora de mudanças nos setores energético e industrial. Em outras palavras, o que se propõe aqui não é apenas estudar uma aplicação isolada para um resíduo, mas sim reconfigurar a percepção desse subproduto, demonstrando como ele pode ser inserido de forma inteligente e inovadora em cadeias produtivas de alto valor.

Outro ponto importante a ser ressaltado é o alinhamento do tema com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) estabelecidos pela ONU. A valorização do soro de leite contribui diretamente para metas como o acesso à energia limpa (ODS 7), o consumo e produção responsáveis (ODS 12), a ação contra a mudança global do clima (ODS 13) e o uso sustentável dos ecossistemas aquáticos (ODS 14), entre outros (TUGUME et al., 2025; ONU, 2024). Com isso, reforça-se o papel estratégico da engenharia química e das ciências aplicadas na construção de soluções sustentáveis que atendam simultaneamente às demandas sociais, ambientais e econômicas.

Diante de tudo isso, o presente Trabalho de Graduação tem como objetivo principal realizar uma análise sistemática da literatura científica sobre o potencial de valorização do soro de leite como recurso energético e industrial, com foco na geração de biogás, hidrogênio, etanol e ácido láctico por meio de processos biotecnológicos. Os objetivos específicos incluem:

- Apresentar as principais características do soro de leite e seu impacto ambiental quando descartado de forma inadequada;
- Explorar as bases bioquímicas das rotas fermentativas e da digestão anaeróbia;
- Identificar os microrganismos utilizados e as condições operacionais ideais para a conversão do soro em produtos de valor agregado;
- Realizar uma análise bibliométrica sobre o estado da pesquisa científica nessa área;
- Avaliar os avanços tecnológicos, os gargalos existentes e as perspectivas futuras para a aplicação industrial dessas rotas de valorização.

Em suma, este trabalho pretende demonstrar, com base na literatura científica, que o soro de leite não é um resíduo qualquer, é uma oportunidade estratégica ainda subexplorada, capaz de gerar energia, reduzindo os impactos ambientais, impulsionar a inovação e contribuir para um modelo de desenvolvimento mais limpo, inclusivo e circular. Dessa forma, ao dar visibilidade a esse potencial, espera-se contribuir para o avanço das discussões e ações práticas em torno de uma nova lógica produtiva, mais eficiente, mais sustentável e mais inteligente.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esta seção tem como propósito apresentar os principais conceitos, estudos e abordagens científicas que embasam a análise proposta. Dessa forma, serão abordados os fundamentos relacionados à geração e ao impacto ambiental do soro de leite, bem como as tecnologias disponíveis para seu reaproveitamento, com ênfase nos processos biotecnológicos de conversão em biogás, hidrogênio, etanol e ácido lático. Além disso, serão discutidos os princípios da economia circular e da bioeconomia como pilares para o desenvolvimento sustentável da indústria de laticínios. A compreensão desses elementos é essencial para contextualizar o problema, identificar as oportunidades de valorização do soro e justificar a relevância das alternativas tecnológicas exploradas neste estudo.

2.1 RESÍDUOS ORGÂNICOS

Resíduos orgânicos são materiais de origem biológica descartados como subproduto de atividades humanas, especialmente aquelas ligadas à agroindústria, ao setor alimentício e ao tratamento de efluentes urbanos, o que inclui restos de alimentos, resíduos agrícolas, esterco animal, biomassa vegetal e subprodutos industriais.

Entre as diversas atividades industriais, o ramo alimentício se sobressai como um dos que mais consome água e gera efluentes em relação à quantidade de produto fabricado. No caso específico da indústria de laticínios, esse cenário é ainda mais evidente, uma vez que processos como a higienização de equipamentos, incluindo silos, tanques, tubulações, pasteurizadores e homogeneizadores, resultam na produção de grandes volumes de efluente com alta carga orgânica, que é, em grande parte, proveniente do leite e seus derivados, e confere ao efluente características como elevados níveis de Demanda Química de Oxigênio (DQO), Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), além da presença significativa de óleos, graxas, nitrogênio e fósforo (BRIÃO, 2000).

Dessa forma, devido a esta elevada carga orgânica e à facilidade de decomposição, esses resíduos são altamente suscetíveis à biodegradação, o que os torna fontes potenciais de energia renovável e compostos de valor agregado, como biogás, biofertilizantes e ácidos orgânicos. No caso do soro de leite sua composição rica em lactose, proteínas e minerais confere alto potencial para aproveitamento biotecnológico em processos fermentativos e de digestão anaeróbia.

2.1.1 Soro de Leite

O soro de leite pode ser definido como um coproduto gerado a partir da coagulação do leite durante a produção de queijos, representando um subproduto significativo das indústrias de laticínios (BRASIL, 2013). Destaca-se que, para se obter um quilo de queijo, geralmente são utilizados cerca de 10 litros de leite, dos quais aproximadamente 9 litros correspondem ao soro (MOREIRA et al., 2010). Com base nessa proporção, nota-se que há geração de um volume expressivo de soro, que deve ser tratado de forma a evitar grandes impactos ambientais.

Em relação a sua composição, pode variar com a qualidade do leite e com o tipo de queijo produzido (MADRID, 1995). O soro de leite, resíduo da produção de queijos, é chamado de soro doce, pois possui valores de pH entre 5,9 e 6,6; já o soro advindo da produção de caseína precipitada por ácidos possui valores de pH entre 4,3 e 4,6 e é considerado soro ácido (BYLUND, 2015 apud MARIOT et al., 2017). Neste âmbito, soros ácidos e doces diferem bastante no conteúdo de sais minerais, porém não apresentam grandes variações nas quantidades de gordura, umidade e proteínas. Na sequência é apresentada a caracterização do soro de leite realizadas por Antunes (2003), na qual observa-se variações significativas da porcentagem de lactose nos soros ácido e doce.

Tabela 1 - Composição do leite e dos soros doce e ácido.

	Leite (% ST)	Doce (% ST)	Ácido (% ST)
Sólidos totais	13,0	6,40	6,20
Proteína	3,6	0,80	0,75
Gordura	3,9	0,50	0,04
Lactose	4,6	4,60	4,20
Cinza	0,8	0,50	0,40
Ácido láctico	-	0,05	0,40

Fonte: Antunes, 2003.

Já em relação à composição mineral, percebe-se que o soro ácido mantém maior quantidade em relação ao soro doce.

Tabela 2 - Composição mineral dos soros doce e ácido.

	Soro doce (mg Kg ⁻¹)	Soro ácido (mg Kg ⁻¹)
Cinzas totais	5.252	7.333
Fósforo	412	649
Cálcio	466	1.251
Potássio	1.455	1.485
Sódio	505	528
Cloretos (NaCl)	2.195	2.208

Fonte: Antunes, 2003.

Nota-se que o soro é um coproduto rico em nutrientes, composto por uma pequena fração de gordura (0,2 a 0,5%), geralmente extraída por centrifugação, além de proteínas de alto valor biológico como a β -lactoglobulina, α -lactoalbumina, albumina, imunoglobulina G e proteose peptonas, que desempenham funções essenciais na nutrição e no sistema imunológico (MARIOT et al., 2017). Além disso, contém também minerais importantes como sódio, potássio, fósforo, magnésio e zinco, que contribuem para a regulação osmótica e o equilíbrio mineral do organismo. Por fim, a lactose, principal carboidrato presente, é um dissacarídeo energético com papel fundamental na absorção de cálcio, sendo também um componente de grande interesse industrial para obtenção de derivados como etanol e ácido láctico.

Devido a esta rica composição nutricional, o soro possui potencial para ser transformado em produtos com alto valor agregado, o que reforça seu valor econômico e funcional (TEIXEIRA; FONSECA, 2008). Apesar disso, grande parte das pequenas e médias empresas no Brasil ainda realiza o descarte inadequado do soro, estimando-se que cerca de 40% do total produzido seja eliminado sem o devido tratamento (MARQUARDT et al., 2012), o que representa uma ameaça ambiental significativa, visto que o soro possui uma carga orgânica extremamente elevada, podendo ser até 100 vezes superior à de esgotos domésticos (MOREIRA et al., 2010; PAULA et al., 2011).

Em contrapartida, diferentemente do cenário brasileiro, países como os Estados Unidos e Irlanda utilizam praticamente 100% do soro de leite gerado na cadeia produtiva, aproveitando-o como matéria-prima em novos produtos (BIEGER; LIMA, 2008). No Brasil, porém, a busca por soluções eficazes para o reaproveitamento desse resíduo industrial ainda é um desafio, sobretudo no que diz respeito às alternativas de tratamento e valorização (FLORÊNCIO et al., 2013). Porém, vale ressaltar que a identificação de alternativas para o adequado aproveitamento

do soro de leite é de fundamental importância, em função da qualidade nutricional, do volume gerado e da capacidade poluente desse subproduto.

2.1.1.1 Fatores de Impactos Ambientais

Durante muito tempo, o meio ambiente foi visto como uma fonte inesgotável de recursos, sendo classificado como um bem livre, que não exigia esforço direto para sua obtenção. Essa percepção contribuiu para a ausência de regulamentações sobre seu uso, favorecendo práticas que levaram à degradação ambiental, o que gerou sérios problemas relacionados à poluição do ar, da água e do solo.

O CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) define impacto ambiental como qualquer modificação nas características físicas, químicas ou biológicas do meio ambiente resultante de atividades humanas que, direta ou indiretamente, comprometam a saúde pública, o bem-estar social, a fauna, a flora, os recursos naturais ou a estética e a higiene dos ecossistemas. Já a norma ISO 14001 também adota uma definição semelhante, considerando como impacto ambiental qualquer alteração, positiva ou negativa, causada pelas operações de uma organização sobre o meio natural.

Nesse contexto, muito dos danos ambientais causados pelas indústrias de laticínios poderiam ser significativamente reduzidos com a adoção de tecnologias adequadas, além de um controle mais eficiente dos processos produtivos. Ademais, ações como a racionalização do uso de água, energia e produtos de limpeza, bem como o reaproveitamento de subprodutos como o soro de leite, se fazem fundamentais para a minimização destes impactos (MACHADO, 2001).

Nas pequenas e médias indústrias, é comum observar negligência quanto à infraestrutura básica relacionada à sustentabilidade. Elementos críticos como abastecimento hídrico, consumo energético, tratamento de efluentes e destinação de resíduos sólidos são frequentemente deixados de lado, o que é ainda mais preocupante quando se considera que muitos dos insumos manipulados nessas fábricas são altamente perecíveis e exigem cuidados rigorosos desde a manipulação até o armazenamento.

Um dos maiores desafios ambientais enfrentados por esse setor está relacionado ao destino do soro de leite, subproduto gerado em grandes quantidades durante a fabricação de queijos. Dados apontam que, para cada quilo de queijo produzido, são gerados de 9 a 12 litros de soro. Segundo a Associação Brasileira das Indústrias de Queijos a produção de queijo anual é

estimada em cerca de 540 mil toneladas, o que gera aproximadamente 5,4 milhões de toneladas de soro por ano. Porém, apesar de existirem aplicações viáveis, como a produção de bebidas lácteas, estima-se que apenas 15% desse volume seja aproveitado adequadamente, enquanto o restante é comumente descartado junto aos efluentes industriais, o que representa um grande problema ambiental devido à elevada carga orgânica do soro, com valores de DBO que podem variar entre 25.000 e 80.000 mg/L (REGHELIM et al., 2018).

Para mitigar esses efeitos, o setor industrial tem investido em tecnologias de tratamento e em práticas voltadas à redução na fonte, que consistem em mudanças no processo produtivo para diminuir a geração de resíduos. Além disso, considerando a sua composição e volume, o soro de leite e seus tratamentos têm sido cada vez mais estudados, já que sua adequada valorização pode trazer benefícios tanto ambientais quanto econômicos.

2.1.1.2 Formas de Tratamento

Entre as alternativas tecnológicas voltadas ao reaproveitamento do soro, destaca-se a transformação do produto líquido em pó. Contudo, essa forma exige infraestrutura tecnológica avançada e representa um investimento elevado, o que só se justifica em contextos de alta demanda e com planejamento estratégico adequado (NUNES, 2016).

Quanto à utilização direta do soro ácido em alimentos, seja em sua forma líquida, condensada ou desidratada, existem limitações sensoriais, já que esse tipo de soro pode conferir sabores desagradáveis aos produtos finais. Assim, há esforços voltados à melhoria de sua aplicabilidade para garantir aceitação do consumidor (OLIVEIRA, 2011).

Em uma revisão sobre as tecnologias de tratamento de efluentes de laticínios, Carvalho et al. (2013) identificaram três categorias principais: tratamentos biológicos, físico-químicos e sistemas de pantanais construídos.

Os processos biológicos são divididos em digestão anaeróbia e aeróbia. A digestão anaeróbia é amplamente utilizada para resíduos com alta carga orgânica, não exigindo oxigênio e podendo ser realizada em reatores como os UASB ou os de tanque continuamente agitado (CSTR), favorecendo inclusive a geração de energia a partir do biogás (DEBOWSKI et al., 2014; FLORENCIO et al., 2013; KELLY; HE, 2014). Já a digestão aeróbia, realizada por meio de sistemas de lodos ativados, promove a decomposição da matéria orgânica com o uso de micro-organismos dependentes de oxigênio (CARVALHO et al., 2013).

Por outro lado, os tratamentos físico-químicos envolvem a oxidação e a coagulação/floculação. A oxidação, realizada com ozônio, pode ocorrer de forma simples ou catalítica, que aumenta a eficiência na remoção de compostos orgânicos (ASSELIN et al., 2008). Já o processo de coagulação/floculação consiste na adição de reagentes que desestabilizam partículas em suspensão, facilitando sua aglutinação e posterior remoção (GUGLIELMOTTI et al., 2011).

Por fim, outra abordagem promissora é o uso dos pantanais construídos, também conhecidos como Sistemas Alagados Construídos (SAC) ou Wetlands. Esses sistemas utilizam áreas controladas para tratamento de efluentes, promovendo a filtração, degradação microbiana da matéria orgânica e absorção de nutrientes por meio de macrófitas aquáticas (MENDONÇA et al., 2015; MATOS et al., 2010). Ainda segundo Mendonça et al. (2015), essa técnica tem se tornado cada vez mais popular em países estrangeiros, destacando-se pela sua eficiência na remoção de DBO e pelo custo relativamente baixo de instalação e operação.

O quadro 1 apresentado na sequência sintetiza os principais métodos de tratamento do soro de leite, destacando suas vantagens, desvantagens e grau de aplicação.

Tabela 3 - Principais tratamentos do soro de leite, suas vantagens e desvantagens.

Tratamentos	Vantagens	Desvantagens
Anaeróbico	Alta decomposição do resíduo; Capacidade de recebimento de alta carga orgânica; Pode produzir energia.	Produção de lodo/lama; Exige manutenção e custos de limpeza;
Aeróbico	Remoção de compostos orgânicos.	Produção de lodo/lama; Exige manutenção e custos de limpeza; Custos energéticos.
Físico-Químico	Pré-tratamento; Eficiente para redução de DBO; Utilização dos flocos com biofertilizante.	Não é suficiente para utilização isolada no tratamento das águas residuais.
Pantanais Construídos	Eficiente para redução de DBO; Baixo custo de implementação.	Pequenas vazões de resíduos; Exige análises laboratoriais constantes.

Fonte: Adaptado de Revista em Agronegócio e Meio Ambiente, 2016.

Além das formas de tratamento anteriormente citadas, vale destacar os meios de valorização deste subproduto, que pode ser aproveitado na alimentação humana, na alimentação animal, na agricultura e na geração de energia.

Nesse contexto, dentre os diversos aproveitamentos possíveis para o soro de leite, uma alternativa que tem se destacado e sido amplamente estudada ao longo dos anos é sua aplicação como meio de cultivo microbiológico, já que apresenta composição rica em nutrientes e elevado teor de lactose, características que tornam o soro um substrato promissor para processos biotecnológicos baseados em fermentação. Dessa forma, a partir dessa matéria-prima, é possível obter diversos compostos de valor industrial, como etanol, ácido láctico, biogás, entre outros (FLORENCIO et al., 2013).

Por fim, destaca-se que a gestão sustentável de águas residuais de queijarias contribui significativamente para o cumprimento de diversos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), promovendo benefícios ambientais, como redução da carga orgânica e dos poluentes nas águas (ODS 6 e 14), mitigação das emissões de gases de efeito estufa (GEE) e sequestro de carbono (ODS 13), além da valorização de resíduos em sistemas circulares (ODS 12). Ademais, socialmente, impulsiona a geração de empregos e renda (ODS 1 e 8), melhora o acesso à energia limpa (ODS 7) e apoia práticas agrícolas sustentáveis que fortalecem a segurança alimentar (ODS 2). Por fim, também estimula a industrialização sustentável (ODS 9) e reduz desigualdades sociais ao democratizar o acesso a recursos energéticos e hídricos (ODS 10 e 11) (TUGUME et al., 2025), ou seja, a valorização do soro de leite tem impacto fundamental no desenvolvimento sustentável. Na sequência são apresentados os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, coleção de 17 metas globais, estabelecidas pela Assembleia Geral das Nações Unidas.

Figura 1 - Metas globais de desenvolvimento sustentável estabelecidas pela ONU.



Fonte: Nações Unidas Brasil.

2.2 PROCESSOS FERMENTATIVOS

A fermentação é um processo bioquímico no qual microrganismos promovem transformações químicas em compostos orgânicos por meio da ação de enzimas específicas. Dessa forma, trata-se de um mecanismo metabólico em que substâncias orgânicas sofrem degradação enzimática, resultando na formação de diversos produtos, dependendo do microrganismo envolvido e do substrato utilizado (AQUINO, 2012).

Historicamente, o termo "fermentação" deriva do latim *fermentare*, que significa "ferver", em referência à efervescência observada durante a produção de bebidas alcoólicas como o vinho, o que se deve a liberação de dióxido de carbono, dando a impressão de ebulição. No século XIX, os estudos de Gay-Lussac associaram esse fenômeno à conversão de açúcares em etanol e CO₂ e, posteriormente, as investigações de Pasteur foram cruciais para revelar o papel dos microrganismos nessas reações, consolidando a associação entre fermentação, vida microbiana e atividade enzimática (GAVA; SILVA; FRIAS, 2009).

Atualmente, o termo é amplamente utilizado para descrever processos em que ocorra a decomposição de compostos orgânicos mediada por enzimas de microrganismos, o que inclui uma variedade de rotas metabólicas, como a fermentação láctica, alcoólica, butírica, propiônica,

entre outras. Vale ressaltar que, além de sua importância histórica na produção de alimentos e bebidas, a fermentação é cada vez mais valorizada em processos biotecnológicos, incluindo a geração de biocombustíveis e o tratamento de resíduos (GAVA; SILVA; FRIAS, 2009). Na sequência é apresentada uma tabela referente aos compostos que podem ser gerados nos processos fermentativos.

Tabela 4 - Compostos gerados a partir de processos fermentativos.

Ácidos orgânicos	Álcoois	Aldeídos e cetonas	Compostos carbonílicos
Butírico	Etanol	Acetaldeído	Furfural
Succínico	<i>n</i> -propanol	Formaldeído	Metional
Propiônico	Isobutanol	Isovaleraldeído	Glioxal
<i>n</i> -butírico	álcool Amil	<i>n</i> -Valeraldeído	3-Metil butanol
Isobutírico	álcool Isoamil	2-Metil butanol	2-Metil butanol
Isovalérico	2,3-Butanediol	<i>n</i> -hexaldeído	Hidróximetil
Heptanóico	B-álcool feniletil	Acetona	furfural
Pelargônico		Propionaldeído	
Piruvico		Isobutiraldeído	
Palmitico		Metil etil cetona	
Crotonico		3-butanona	
Itaconico		Diacetil	
Levulinico		Acetoina	
Acético			
Lático			
Fórmico			
Valérico			
Capróico			
Caprilico			
Laurico			
Mirístico			
Hidrocinamico			
Benzílico			

Fonte: Pyler; Gordon, 2008.

Por fim, destaca-se que a compreensão moderna da fermentação inclui também seu papel em sistemas anaeróbios e sua aplicação em ambientes industriais controlados, nos quais variáveis como pH, temperatura e composição do meio são ajustadas para maximizar a eficiência do processo e a produtividade dos compostos de interesse.

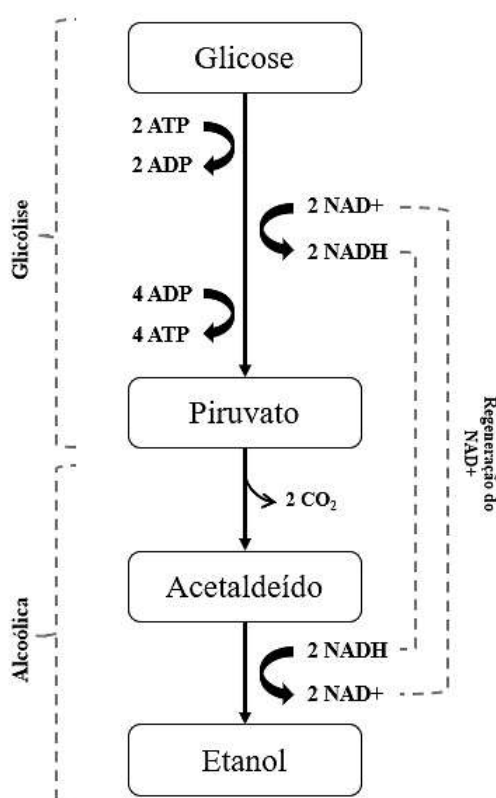
2.2.1 Fermentação Alcoólica

A fermentação alcoólica é o processo bioquímico no qual açúcares, como a glicose, frutose e sacarose, são convertidos em energia celular com produção de dióxido de carbono e etanol,

sendo amplamente aplicada tanto na indústria de biocombustíveis quanto em diversos setores como o químico, cosmético, farmacêutico, médico, automotivo e de bebidas (VIERHOUT, 2014).

Em relação ao processo metabólico, simplificado, o início se dá com a glicólise, etapa que ocorre no citoplasma celular e consiste na quebra da glicose ($C_6H_{12}O_6$) em duas moléculas de piruvato, com a produção líquida de 2 ATP e 2 NADH. Posteriormente, na ausência de oxigênio, o piruvato segue para a fermentação, cuja principal função é regenerar o NAD^+ consumido na glicólise, permitindo que esta continue. Nesta etapa, típica de leveduras, o piruvato é convertido em etanol e CO_2 . Na sequência é apresentado o esquema referente a este processo.

Figura 2 - Esquematização simplificada do processo de fermentação alcoólica.



Fonte: Autor, 2025.

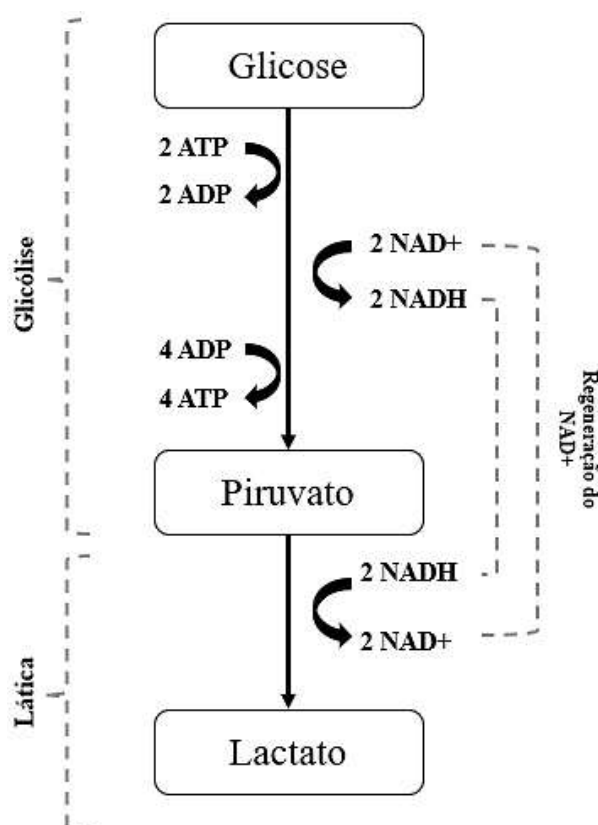
Por fim, vale ressaltar que a fermentação alcoólica ocorre em algumas bactérias e leveduras, entre elas a *Saccharomyces cerevisiae*, amplamente utilizada na produção de bebidas alcoólicas e na panificação (PINHEIRO, 2021).

2.2.2 Fermentação Láctica

A fermentação láctica é um processo metabólico caracterizado pela conversão do piruvato, originado da glicólise, em ácido láctico, sendo comum em bactérias lácticas e em células musculares sob condições anaeróbicas. No contexto industrial, este processo apresenta ampla aplicação, especialmente na indústria alimentícia, mas também nos setores de saúde, cosméticos e biomateriais (ABREU, 2014).

Em relação ao processo metabólico, primeiramente ocorre a glicólise e depois, na ausência de oxigênio, o piruvato segue para a fermentação, etapa no qual será convertido em ácido láctico. Na sequência é apresentado o esquema referente a este processo.

Figura 3 - Esquematização simplificada do processo de fermentação láctica.



Fonte: Autor, 2025.

Dessa forma, a partir dos esquemas de processos fermentativos apresentados, nota-se que fermentação láctica se assemelha a fermentação alcoólica quanto a glicólise, mas se diferencia pela descarboxilação (liberação de CO_2), que ocorre na conversão de piruvato a acetaldeído, e em relação ao produto gerado.

Por fim, destaca-se que as bactérias do gênero *Lactobacillus* são os principais microrganismos responsáveis pela fermentação láctica, embora algumas leveduras, como *Lachancea fermentati*, também possam realizá-la (VON WRIGHT e AXELSSON, 2012). Além disso, dependendo da via metabólica adotada, a fermentação láctica pode ser classificada como homofermentativa, quando o ácido láctico é o único produto, ou heterofermentativa, quando há produção adicional de substâncias como ácido acético, etanol e dióxido de carbono. Em ambos os casos, quando substratos como pentoses são utilizados, os produtos formados geralmente incluem ácido láctico e ácido acético, sem liberação de CO₂ (WOOLFORD, 1984).

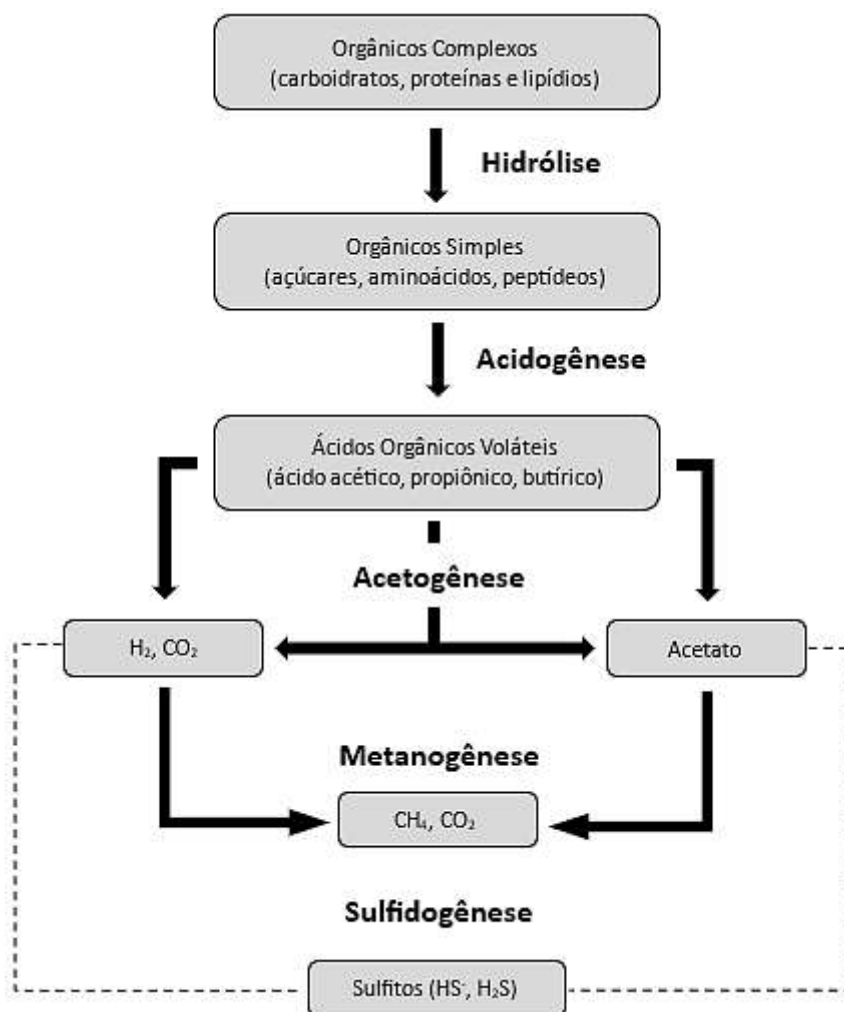
2.3 DIGESTÃO ANAERÓBIA

A digestão anaeróbia consiste em um processo bioquímico, que ocorre na ausência de oxigênio, em que grupos de microrganismos convertem compostos orgânicos complexos em moléculas mais simples, além de gerar o biogás, composto principalmente por metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂). Vale ressaltar que estes microrganismos formam um ecossistema altamente interdependente, no qual cada grupo desempenha funções essenciais à continuidade do processo, em especial, destacam-se as arqueias metanogênicas, responsáveis pela conversão de intermediários como ácido acético, hidrogênio e dióxido de carbono em metano. Ao consumir o hidrogênio presente no meio, essas arqueias também favorecem o ambiente para que bactérias acidogênicas possam atuar de forma eficiente na degradação de compostos orgânicos (CHERNICHARO, 1997).

Dessa forma, essa técnica é amplamente utilizada no tratamento de efluentes líquidos e resíduos sólidos orgânicos, auxiliando não só a reduzir a poluição, mas também a gerar energia renovável e subprodutos de valor agregado, como fertilizantes, ou seja, a digestão anaeróbia se apresenta com uma solução sustentável de reaproveitamento de resíduos orgânicos, assim, em sintonia com os princípios da economia circular e do desenvolvimento sustentável.

Este processo ocorre em quatro principais etapas bioquímicas sequenciais: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. Porém, vale destacar que pode haver uma quinta, chamada sulfetogênese, que ocorre em processos que lidam com substratos que contêm enxofre. Na sequência é apresentado um fluxograma que sintetiza a biodigestão anaeróbia, de forma a evidenciar suas etapas e compostos presentes no processo.

Figura 4 - Fluxograma da digestão anaeróbia evidenciando suas etapas e compostos.



Fonte: Adaptado de Moraes, 2015.

Na primeira etapa da digestão anaeróbia, a hidrólise, moléculas complexas, como proteínas, carboidratos e lipídios são degradadas em moléculas mais simples, menores e solúveis, como aminoácidos, açúcares simples e ácidos graxos (DE OLIVEIRA, 2023). Essa fase é considerada a mais lenta do processo e sua duração pode ser influenciada por parâmetros como composição do substrato, temperatura (ideal entre 30 e 50°C) e pH (entre 5,0 e 7,0) (MEEGODA et al., 2018).

Já a acidogênese é a etapa em que os compostos hidrolisados na primeira fase são convertidos em produtos de cadeias ainda mais curtas, como ácidos graxos voláteis (ácido acético, butírico e propiônico), além de álcoois, hidrogênio, dióxido de carbono, amônia e sulfeto de hidrogênio, por bactérias fermentativas acidogênicas. Essa fase é considerada rápida, pois essas bactérias se multiplicam rapidamente (BENGTTSSON et al., 2008).

Na acetogênese, bactérias sintróficas acetogênicas transformam os produtos da acidogênese, etapa anterior, em acetato, H_2 e CO_2 , compostos essenciais para a próxima etapa, já que são substratos apropriados para as bactérias metanogênicas (CHERNICHARO, 1997). Destaca-se também que, em contrapartida, a sobrevivência destas bactérias depende da atividade das arqueias metanogênicas, que consomem o hidrogênio produzido, criando condições favoráveis para a acetogênese.

Por fim, a etapa final do processo, chamada metanogênese, é realizada por arqueobactérias metanogênicas, que convertem ácido acético e hidrogênio (junto com CO_2) em metano, o que pode ser realizado por meio de dois mecanismos: o primeiro gera metano e água a partir de CO_2 e H_2 , e o segundo, a partir do acetato. Essa fase é a mais lenta e delicada do processo, exigindo condições estáveis de pH, temperatura e nutrientes (ADEKUNLE; OKOLIE, 2015). Vale ressaltar que a eficiência dessa etapa é crucial, pois determina a qualidade e a quantidade de biogás que será produzido.

Além das quatro etapas principais, pode haver uma quinta, chamada sulfetogênese, que ocorre em processos que lidam com substratos que contêm enxofre. Nessa fase, bactérias redutoras de sulfato transformam íons sulfato (SO_4^{2-}) em sulfetos (H_2S), que são os responsáveis pelo odor desagradável que alguns processos anaeróbios podem ter (VISSER, 1995).

Nesse contexto, parâmetros operacionais como a demanda química de oxigênio (DQO) e a demanda bioquímica de oxigênio (DBO) são fundamentais para monitorar a eficiência da digestão, pois mostram, respectivamente, a quantidade total de matéria orgânica presente e a parte que é biodegradável. Já a diminuição desses parâmetros ao longo do processo reflete a eficácia na degradação da matéria orgânica (VALENTE, 1997). Por fim, destaca-se ainda que o controle da taxa de carregamento orgânico, do tempo de retenção hidráulica, além do pH e da temperatura, são fatores determinantes para o desempenho estável do sistema.

2.4 FATORES QUE INFLUENCIAM NOS PROCESSOS FERMENTATIVOS

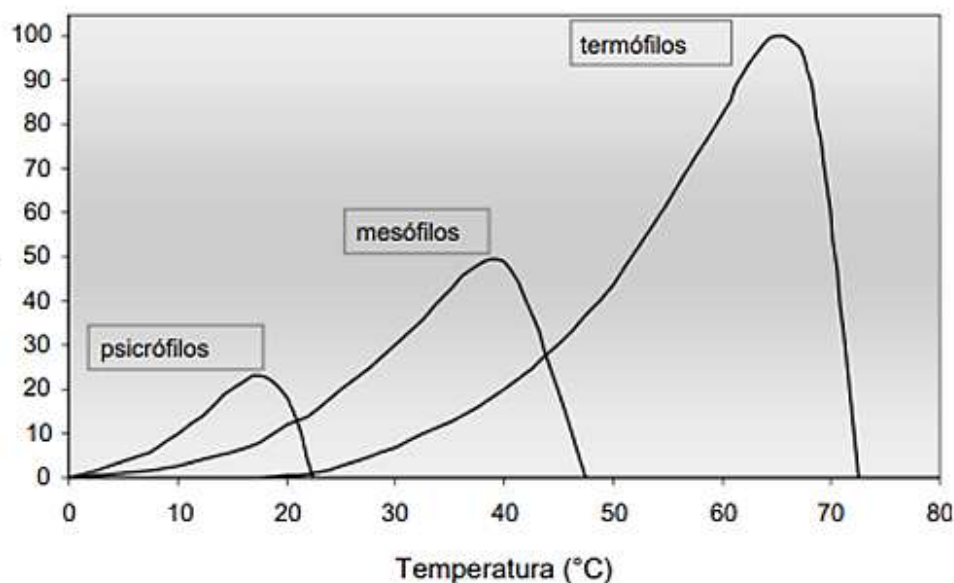
A eficiência dos processos fermentativos está diretamente relacionada a diversos fatores operacionais e ambientais, que determinam a atividade metabólica dos microrganismos e, consequentemente, a produtividade dos produtos gerados. Dentre os fatores mais relevantes

destacam-se a temperatura, o pH, a disponibilidade de nutrientes, a concentração de substrato e a presença de inibidores. Dessa forma, a compreensão e o controle desses parâmetros são fundamentais para otimizar a produção de compostos de interesse como biogás, hidrogênio, etanol e ácido lático.

2.4.1.1 Temperatura

A temperatura exerce forte influência sobre o crescimento microbiano e a velocidade das reações bioquímicas. Dessa forma, processos fermentativos podem ser classificados em relação a sua faixa de temperatura: psicrófilos (abaixo de 20 °C), mesófilos (25–45 °C) e termófilos (acima de 45 °C). Destaca-se que a faixa ideal depende do tipo de microrganismo envolvido (LETTINGA et al., 2021) e temperaturas fora da faixa ótima podem causar redução na taxa de crescimento ou desnaturação enzimática. Para exemplificar, na sequência é apresentado o gráfico da influência da temperatura na taxa de crescimento relativo de metanógenos psicrófilos, mesófilos e termófilos.

Figura 5 - Influência da temperatura na taxa de crescimento relativo de metanógenos psicrófilos, mesófilos e termófilos.



Fonte: Chernicharo, 1997.

2.4.1.2 pH

O pH é outro fator crucial nos processos fermentativos, pois influencia diretamente a atividade enzimática e a permeabilidade da membrana celular. Assim, a maioria dos processos fermentativos ocorre em faixas ligeiramente ácidas a neutras, sendo necessário manter esse parâmetro estável para evitar a inibição metabólica.

2.4.1.3 Concentração do substrato

Por fim, a concentração de substrato é outro fator importante, uma vez que impacta a taxa de consumo dos microrganismos, podendo haver saturação ou inibição por excesso. Já a presença de nutrientes como fontes de nitrogênio, fósforo, vitaminas e minerais é essencial para o metabolismo microbiano, enquanto compostos inibidores, como ácidos orgânicos, solventes e metais pesados podem prejudicar ou até cessar a atividade fermentativa (LAMAISON et al., 2009). Dessa maneira, nota-se a importância do controle deste parâmetro.

2.4.1.4 Condições ideais de produção de biogás, hidrogênio, etanol e ácido lático

Na digestão anaeróbia para produção de biogás, parâmetros como temperatura e pH são determinantes para a estabilidade dos quatro estágios do processo: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. Neste caso, a faixa mesofílica (cerca de 35 °C) é amplamente utilizada devido à estabilidade e menor exigência energética, uma vez que a faixa de temperatura ótima para a produção de metano varia de 30°C a 55°C (LAZARO, 2014). Já o pH ideal pode variar em relação a etapa do processo, porém, de forma geral, situa-se entre 6,0 e 8,0, conforme apontado por Paes (2003). Vale destacar também que desequilíbrios podem levar ao acúmulo de ácidos voláteis e à inibição do processo, dessa forma, a razão carbono/nitrogênio adequada varia de 20:1 a 30:1, favorecendo o desenvolvimento microbiano e evitando a produção excessiva de amônia ou ácidos orgânicos inibidores.

Já o processo de fermentação para produção de hidrogênio é altamente sensível ao pH, com valores ideais variando entre 5,0 e 6,5, uma vez que condições muito ácidas ou básicas inibem a ação dos microrganismos hidrogenotróficos, podendo afetar tanto a atividade da hidrogenase, quanto as rotas metabólicas (FANG et al., 2002). Além disso, a temperatura ideal também está na faixa mesofílica, já que as melhores eficiências do processo ocorrem entre 25°C e 40°C, favorecendo a atividade de bactérias como *Clostridium* spp. (ZHANG e SHEN, 2005). Destaca-se ainda que o tipo de substrato utilizado influencia diretamente o rendimento do hidrogênio.

Substratos mais simples, como glicose, geralmente apresentam melhores resultados, enquanto resíduos complexos podem exigir pré-tratamento.

A produção de etanol ocorre principalmente por fermentação alcoólica de açúcares simples, como a glicose, sendo realizada por leveduras como *Saccharomyces cerevisiae*. Neste processo, o aumento da temperatura leva ao aumento da velocidade de fermentação, porém favorece a contaminação bacteriana e as leveduras ficam mais suscetíveis à toxidez do etanol, assim, a temperatura ideal varia entre 26 e 35 °C. Já o pH ótimo está entre 4,0 e 5,0 (LIMA et al., 2001). Ademais, a concentração de açúcares e a presença de oxigênio também afetam o rendimento, já que altas concentrações de substrato podem causar efeito osmótico negativo ou inibição por etanol acumulado.

Por fim, a produção de ácido lático é conduzida por bactérias lácticas, como *Lactobacillus* spp., sendo também altamente influenciada pelo pH e temperatura. O pH ideal varia entre 5,0 e 6,5, e a temperatura ótima geralmente situa-se entre 30 e 42 °C, dependendo da cepa. Neste processo, a presença de substratos fermentáveis, como lactose e glicose, é essencial, assim como o controle da acidez acumulada, pois a alta concentração de ácido lático pode inibir a atividade celular, assim, a adição de agentes tamponantes ou a remoção contínua do produto são estratégias utilizadas para manter o rendimento (LEITE, 2006).

2.5 BIOGÁS

Com o aumento da demanda energética global e as crescentes preocupações relacionadas ao esgotamento de combustíveis fósseis e às emissões de gases poluentes, alternativas sustentáveis vêm sendo intensamente estudadas. Nesse cenário, o biogás surge como uma fonte promissora de energia renovável, sendo utilizado em diversas partes do mundo para geração de eletricidade, aquecimento e, inclusive, como combustível veicular (TEGHAMMAR et al., 2012).

O biogás pode ser definido como uma mistura gasosa produzida a partir da digestão anaeróbia de substratos orgânicos, podendo ser obtido a partir de diversas fontes, incluindo resíduos agrícolas, dejetos animais, lodo de esgoto e efluentes industriais com alta carga orgânica, já que qualquer tipo de biomassa pode ser empregue como substrato para a produção

da bioenergia, desde que sejam compostos por carboidratos, proteínas, gorduras, celulose e hemiceluloses (GRANDO et al., 2017). Vale ressaltar que esta composição impacta diretamente no sistema de produção de biogás e na sequência posterior de purificação (RAFIEE et.al, 2021). A Tabela apresentada na sequência apresenta o rendimento de metano e biogás obtido a partir de diferentes matérias-primas, inclusive o soro de leite, composto de estudo deste trabalho.

Tabela 5 - Rendimento de metano e biogás em função de diversas matérias-primas.

Matéria-Prima	Rendimento de Metano (Vol%)	Rendimento de Biogás (Nm ³ /tFF) (FF: Matéria-Prima Fresca)
Silagem de Capim	54	172
Esterco Suíno	60	60
Sorgo Doce	54	108
Esterco Bovino	60	45
Silagem de Milho	52	202
Polpa de Beterraba	51	111
Resíduos Orgânicos	61	100
Esterco de Aves	60	80
Soro de Leite	15	330

Fonte: Adaptado de Rafiee et.al, 2021.

Já a composição do biogás pode variar conforme o tipo de substrato utilizado e as condições operacionais do processo, como pH e temperatura. De maneira geral, é composto majoritariamente por metano (CH₄), com teor entre 50% e 70%, e dióxido de carbono (CO₂), entre 30% e 50%, além de pequenas quantidades de outros compostos, como sulfeto de hidrogênio (H₂S), nitrogênio (N₂) e vapor d'água (H₂O) (MUNÕZ et al., 2015).

No entanto, a presença dessas impurezas compromete a eficiência energética do biogás. O metano, em sua forma pura, possui um poder calorífico de aproximadamente 36 MJ/m³, enquanto o biogás impuro tem seu valor reduzido para uma faixa entre 20 e 25 MJ/m³. Além disso, compostos como o H₂S são altamente corrosivos e tóxicos, afetando o desempenho de motores e sistemas de combustão (ABATZOGLOU e BOIVIN, 2009). A tabela a seguir apresenta a variação do poder calorífico do biogás em relação à sua composição, evidenciando que à medida que a concentração de CH₄ diminui, o poder calorífico também diminui, ou seja, são diretamente proporcionais.

Tabela 6 - Variação do poder calorífico do biogás em relação à sua composição.

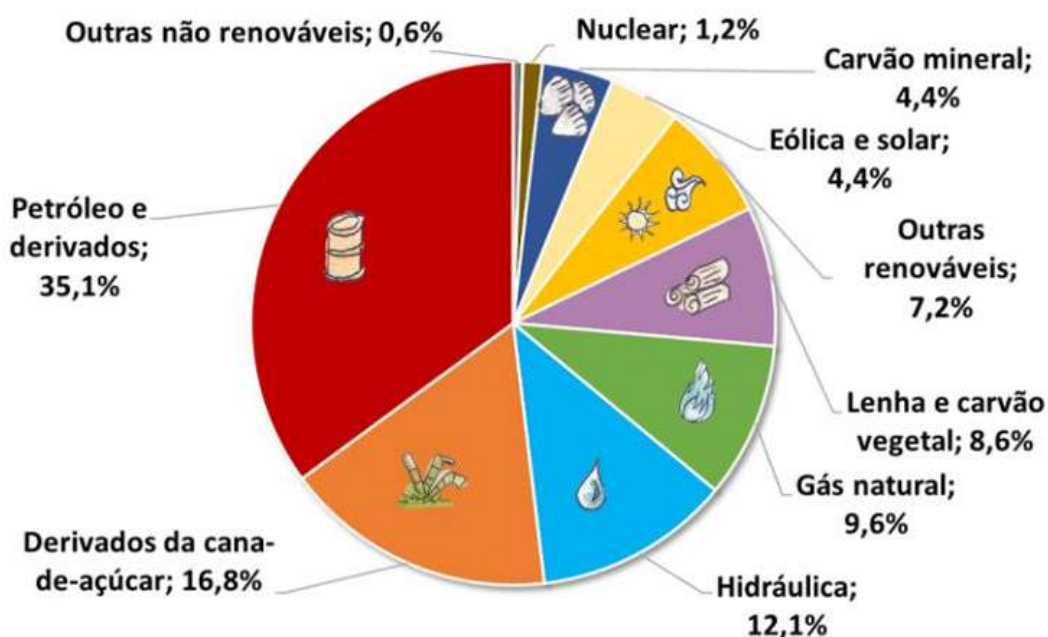
Composição Química do Biogás	Peso Específico (kg/Nm ³)	Poder Calorífico Inferior (kcal/kg)	Poder Calorífico Inferior (kcal/Nm ³)
10% CH ₄ , 90% CO ₂	1,8393	465,43	856,06
40% CH ₄ , 60% CO ₂	1,4643	2.338,52	3.424,29
60% CH ₄ , 40% CO ₂	1,2143	4.229,98	5.136,46
65% CH ₄ , 35% CO ₂	1,1518	4.831,14	5.564,50
75% CH ₄ , 25% CO ₂	1,0268	6.253,01	6.420,59
95% CH ₄ , 5% CO ₂	0,7768	10.469,60	8.132,78
99% CH ₄ , 1% CO ₂	0,7268	11.661,02	8.475,23

Fonte: Adaptado de Avellar, 2001.

Em resposta a essas limitações, foram desenvolvidas técnicas de purificação que envolvem métodos físicos e químicos para a remoção dos contaminantes, como separação por membrana, absorção física utilizando solventes orgânicos e adsorção por oscilação de pressão, o que viabiliza novas aplicações para o biogás. (ANGELIDAKI et al., 2018).

No que diz respeito ao potencial energético, o Brasil apresenta condições extremamente favoráveis à produção de biogás. Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2018), o país possui um dos maiores potenciais do mundo, estimado em 84,6 bilhões de metros cúbicos por ano, sendo oriundos principalmente de resíduos agroindustriais (45%), do setor sucroalcooleiro (48%) e de resíduos urbanos e sanitários (7%). Tal produção poderia suprir até 40% da demanda nacional de energia elétrica ou substituir cerca de 70% do consumo de óleo diesel (ABIOGÁS, 2018). Porém, apesar do seu grande potencial, o biogás ainda representa uma parcela modesta na matriz energética brasileira, conforme dados mais recentes da EPE (2023), outras fontes renováveis, como a hidráulica, solar e eólica, ocupam uma posição de maior destaque, indicando que o biogás é um recurso ainda subutilizado no país, representando apenas 1,3% das fontes renováveis, o que equivale a menos de 0,1% da matriz energética total. Esse dado reforça que, embora promissor, o biogás segue sendo um recurso subexplorado no país. No entanto, esse cenário está em transformação, a Abiogás (2023) aponta que estão em andamento projetos para a implantação de 25 novas usinas até 2030, com capacidade estimada de produção diária de 2,3 milhões de metros cúbicos de biometano. A figura na sequência traz dados referentes a matriz energética brasileira.

Figura 6 - Matriz energética do Brasil.



Fonte: EPE, 2023.

Já do ponto de vista ambiental, o biogás apresenta vantagens significativas. A substituição de combustíveis fósseis pelo metano gerado na digestão anaeróbia contribui para a redução de emissões de gases do efeito estufa, já que, embora seja um gás com potencial de aquecimento global superior ao do dióxido de carbono, seu aproveitamento energético impede que seja liberado diretamente na atmosfera (CHYNOWETH, OWENS e LEGRAND, 2001). Além disso, estudos indicam que cerca de 80% do metano atmosférico possui origem biológica, sendo formado por bactérias metanogênicas em ambientes anaeróbios (IPCC, 2006).

2.5.1 Aplicações

O biogás, composto majoritariamente por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), possui diversas possibilidades de aplicação, tanto em sua forma bruta, quanto após processos de purificação e enriquecimento. A principal utilização do metano presente no biogás ocorre por meio de três grandes frentes: geração de calor, produção de energia elétrica e uso como combustível veicular.

Na geração de calor, utilizada principalmente em sistemas de aquecimento de ambientes ou em processos industriais, o biogás pode ser diretamente queimado em caldeiras e fogões,

especialmente em sua forma purificada, conhecida como biometano. Além disso, outra aplicação relevante é a cogeração, em que o biogás é utilizado em motores Otto, motores diesel adaptados ou turbinas a gás para gerar eletricidade e calor simultaneamente. Nesses sistemas, cerca de 30 a 40% da energia do biogás é convertida em eletricidade, sendo o restante aproveitado como calor. Ademais, o biometano comprimido pode ser utilizado como combustível alternativo para veículos leves e pesados, como automóveis, ônibus e caminhões, o que contribui significativamente para a redução do consumo de combustíveis fósseis, especialmente em contextos de mobilidade urbana sustentável. Por fim, outra forma estratégica de aplicação do biogás é sua injeção em redes de distribuição de gás natural, desde que o biometano atenda a padrões técnicos específicos (RAFIEE et.al, 2021).

Já em relação ao dióxido de carbono (CO_2), frequentemente tratado como um subproduto indesejado na purificação do biogás, sua utilização vem ganhando relevância estratégica como matéria-prima para diversas aplicações industriais e ambientais. A captura e valorização desse composto alinham-se aos esforços de mitigação das mudanças climáticas, especialmente diante da implementação de políticas de precificação do carbono. Além disso, as possibilidades de uso do CO_2 englobam rotas físicas, como sua aplicação em sistemas de extinção de incêndios, produção de gelo seco, bebidas carbonatadas, cultivos de microalgas e recuperação avançada de petróleo. Já em rotas químicas, o CO_2 pode ser convertido em metanol, dimetil éter, ureia, policarbonatos e hidrocarbonetos sintéticos por meio de processos como reforma seca, hidrogenação ou rotas catalíticas específicas (RAFIEE et.al, 2021).

Por fim, além da separação e valorização de seus principais constituintes, o biogás pode ser diretamente convertido em uma gama de compostos químicos e combustíveis com alto valor agregado. Nesse contexto, tecnologias emergentes possibilitam sua transformação em hidrogênio, metanol, etanol e outros álcoois superiores por meio de rotas termoquímicas como reforma a seco, reforma a vapor e oxidação parcial, bem como por abordagens biológicas ou fotocatalíticas. Exemplificando, a combinação do biogás com hidrogênio verde viabiliza a metanação sintética, gerando gás natural renovável com especificações para injeção em gasodutos. Outras aplicações promissoras incluem a produção de ácido succínico por fermentação bacteriana e a geração de combustíveis sintéticos via rotas Fischer-Tropsch. Dessa forma, destaca-se que esses avanços não apenas ampliam o escopo do aproveitamento do biogás, mas também promovem sua inserção em contextos industriais mais amplos, indo além do uso energético convencional (RAFIEE et.al, 2021).

2.6 HIDROGÊNIO

Como já mencionado, as mudanças climáticas globais e a crescente preocupação com a segurança energética têm impulsionado o desenvolvimento de fontes alternativas aos combustíveis fósseis. Nesse cenário, o hidrogênio tem emergido como um vetor energético promissor devido às suas características físico-químicas e ao seu potencial sustentável, já que sua combustão libera apenas vapor d'água como subproduto, o que o classifica como um combustível limpo sob o ponto de vista ambiental (MATHEWS, 2009).

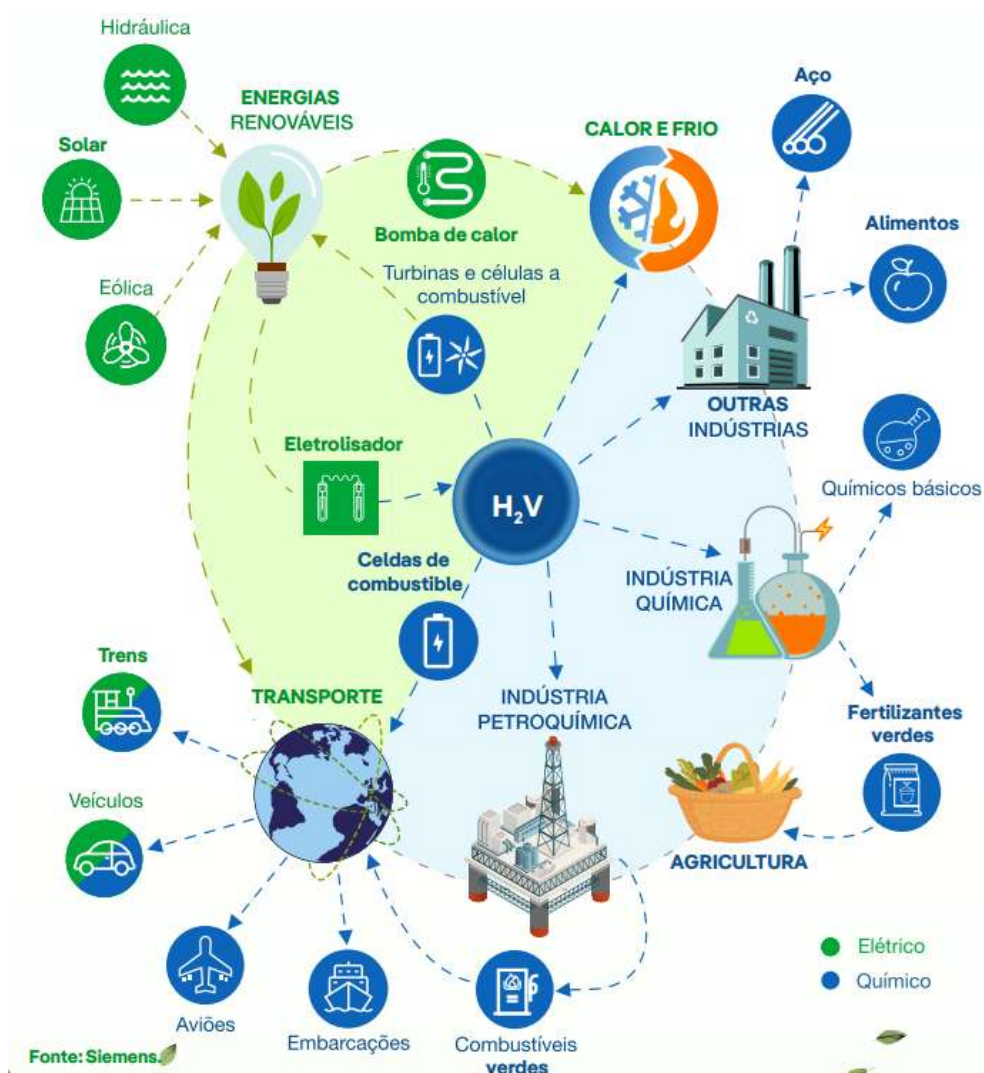
Além disso, o hidrogênio se destaca por sua elevada densidade energética, que é de aproximadamente $142 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$, sendo quase três vezes superior à capacidade energética dos hidrocarbonetos tradicionais. Essa propriedade o torna uma alternativa ideal para aplicações em motores de combustão interna e, especialmente, em células a combustível, onde sua conversão energética é altamente eficiente (KOTAY, 2008). Além disso, sua versatilidade de produção a partir de fontes renováveis e não renováveis permitem certa flexibilidade em relação à tecnologia, tornando-o uma promissora alternativa energética (PAGE, 2009).

2.6.1 Aplicações

Atualmente, embora o principal uso do hidrogênio esteja concentrado na indústria química, especialmente na produção de fertilizantes, que representa cerca de 50%, e no refino de petróleo, sua aplicação como fonte energética tem ganhado destaque frente à necessidade de mitigar emissões de gases de efeito estufa (KOTAY, 2008), já que projeções indicam que, caso não haja mudanças na matriz energética global, as emissões desses gases podem aumentar de 25 a 90% até 2030 (MCT, 2008).

Além destes processos, o hidrogênio é também utilizado como reagente nos processos de hidrogenação, como combustível para motores de foguete e como fluido de refrigeração em geradores elétricos (DAS, 2001). A figura a seguir destaca as principais aplicações do hidrogênio verde, evidenciando sua importância na indústria, no transporte, na agricultura e na geração de energia renovável.

Figura 7 - Aplicações do hidrogênio verde.



Fonte: Siemens, 2025.

2.6.2 Rotas de Produção

Os métodos de produção de hidrogênio podem ser divididos em função das três principais matérias-primas utilizadas: combustíveis fósseis, água e biomassa. Os processos mais significativos são apresentados na tabela a seguir.

Tabela 7 - Matérias-primas e métodos de produção de hidrogênio.

Matérias-primas	Métodos
Combustíveis fósseis	Reforma a vapor do gás natural
	Oxidação parcial de hidrocarbonetos pesados
	Gaseificação do carvão
Água	Eletrólise da água
	Processos foto-eletroquímicos
	Processos termoquímicos
Biomassa	Processos biológicos (biofotólise da água, foto-fermentação e fermentação anaeróbia)
	Gaseificação da biomassa
	Reforma a vapor do etanol
	Reforma em fase líquida

Fonte: Souza, 2009.

Entre estes métodos, destacam-se a reforma de gás natural (responsável por cerca de 40% da produção global), a gaseificação de carvão, a eletrólise da água e, mais recentemente, a produção biológica, que apresenta elevado potencial de crescimento, já que é uma tecnologia de baixo custo quando comparada com as outras técnicas (MIZUNO et al., 2000), além de requerer pouca energia para sua geração (LIN; LAY, 2005). Ademais, a obtenção biológica de hidrogênio, utilizando microrganismos e resíduos orgânicos, permite não apenas o aproveitamento de fontes renováveis, mas também a descentralização da geração energética, reduzindo custos logísticos e ambientais (LIN e LAY, 2003).

Este processo ocorre por meio de duas principais vias: a fotossintética e a fermentativa. A via fotossintética, que utiliza microrganismos como *Oscillatoria* sp. e *Rhodospseudomonas capsulata*, apresenta limitações econômicas devido à necessidade de grandes fotobiorreatores e meios sintéticos de cultivo (ROCHA et al., 2001; BENEMANN, 1998). Em contrapartida, a fermentação anaeróbia, realizada por microrganismos como *Clostridium butyricum* e *Escherichia coli*, tem se mostrado mais viável, principalmente quando se utilizam substratos de baixo custo (TANISHO e WAKAO, 1987).

Neste contexto, através da etapa fermentativa da digestão aneróbia de resíduos orgânicos, microorganismos acidogênicos decompõem a matéria orgânica, geralmente carboidratos como glicose e sacarose, em ácidos graxos voláteis de cadeia curta, dióxido de carbono (CO₂) e

hidrogênio (H₂) (HAN; SHIN, 2004). Um exemplo dessa reação é a conversão da sacarose em ácido acético e hidrogênio, conforme a equação:



Conclui-se assim, que a etapa fermentativa da digestão anaeróbia possibilita tanto a transformação da matéria orgânica em compostos facilmente degradáveis, quanto a produção de hidrogênio, obtendo-se, conseqüentemente, energia limpa a partir de resíduos orgânicos (SCHRÖDER; SCHOLZ, 2003). Dessa forma, o hidrogênio se insere como um componente estratégico na transição energética global, reunindo atributos de eficiência, sustentabilidade e flexibilidade tecnológica que o posicionam como uma das principais alternativas para uma economia de baixo carbono.

Por fim, vale ressaltar que um aspecto bastante atrativo na produção biológica de H₂ via fermentação anaeróbia consiste na possibilidade de utilização de vários materiais residuais como substrato. No entanto, o elevado potencial poluidor destes resíduos não é completamente reduzido durante o processo de produção de H₂ (PEIXOTO, 2011). Deste modo, uma etapa subsequente se torna necessária para diminuição do teor de matéria orgânica e posterior descarte dentro dos padrões da legislação ambiental. Nesse contexto, o processo em dois estágios para produção sequencial de H₂ e CH₄ tem sido considerado como uma alternativa para melhorar a viabilidade econômica do tratamento de resíduos (WANG, 2009).

2.7 ETANOL

O etanol é um dos principais biocombustíveis líquidos utilizados atualmente, sendo amplamente empregado como alternativa aos combustíveis fósseis, especialmente no setor de transporte. Sua produção pode ocorrer a partir de diferentes fontes de biomassa, sendo classificadas como etanol de primeira geração (E1G) e etanol de segunda geração (E2G), conforme o tipo de matéria-prima e o processo produtivo adotado (SOUZA et al., 2021).

2.7.1 Etanol de Primeira Geração (E1G)

O etanol de primeira geração é produzido, predominantemente, a partir de matérias-primas ricas em sacarose, como a cana-de-açúcar, e amido, como o milho e a mandioca. No contexto brasileiro, a cana-de-açúcar representa a principal fonte de E1G, devido à sua alta produtividade agrícola e teor de sacarose (MACEDO et al., 2020).

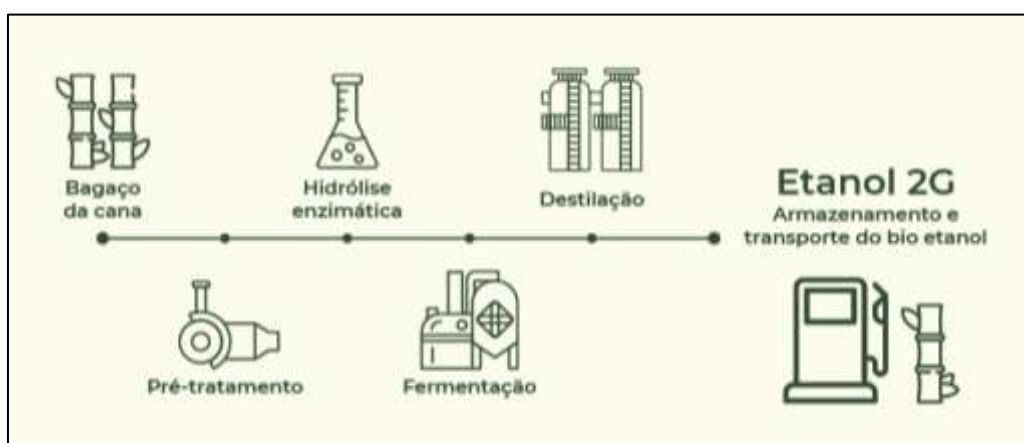
Simplificadamente, o processo produtivo consiste inicialmente na colheita e no transporte da biomassa até a unidade industrial. Em seguida, ocorre a extração do caldo, por meio de moagem, que é então tratado e enviado à etapa de fermentação alcoólica, onde a sacarose é convertida em etanol por leveduras, principalmente a *Saccharomyces cerevisiae*. Após a fermentação, o etanol é separado do meio por destilação, gerando etanol hidratado (cerca de 96% v/v) ou, por meio de processos adicionais, gerando etanol anidro (99,5% v/v), mais adequado para misturas com gasolina (SOUZA et al., 2021; MORAES et al., 2019).

2.7.2 Etanol de Segunda Geração (E2G)

Já o etanol de segunda geração é produzido a partir de materiais lignocelulósicos, como o bagaço e a palha da cana-de-açúcar, resíduos florestais e agrícolas, que são abundantes, de baixo custo e não competem diretamente com a produção de alimentos (CARVALHO et al., 2020). Porém, apesar de seu alto potencial, a produção de E2G apresenta desafios tecnológicos associados à complexidade estrutural da lignocelulose, composta por celulose, hemicelulose e lignina.

O processo produtivo do E2G envolve etapas adicionais em relação ao E1G. Inicialmente, o material lignocelulósico passa por uma etapa de pré-tratamento, que visa romper a estrutura da parede celular vegetal e aumentar a acessibilidade das enzimas às frações polissacarídicas. Posteriormente, ocorre a hidrólise enzimática, onde enzimas específicas decompõem a celulose e hemicelulose em açúcares fermentáveis, que são convertidos em etanol por microrganismos fermentadores (SILVA et al., 2022).

Figura 8 - Etapas de produção do etanol 2G.



Fonte: Elevagro.

Vale ressaltar que apesar do maior custo de implantação e da menor maturidade tecnológica em comparação ao E1G, o etanol de segunda geração é considerado uma alternativa promissora para aumentar a sustentabilidade do setor sucroenergético, com aproveitamento integral da biomassa e menor emissão de gases de efeito estufa (SOUZA et al., 2021).

Nesse contexto de valorização de resíduos agroindustriais, o soro de leite surge como uma matéria-prima promissora para a produção de etanol, devido à sua elevada concentração de lactose. Nesse caso, o etanol se enquadra como um biocombustível de segunda geração (E2G).

Para que a fermentação da lactose ocorra com eficiência, são utilizadas leveduras especializadas como *Kluyveromyces marxianus* e *Kluyveromyces lactis*, capazes de metabolizar a lactose em etanol e CO₂. A aplicação dessas cepas permite o aproveitamento do soro de leite permeado, fração resultante da ultrafiltração do soro, que é pobre em proteínas, mas rica em lactose, representando um substrato adequado para fermentação (MOLLEA et al., 2013).

Destaca-se que diversos estudos têm demonstrado que é possível alcançar rendimentos satisfatórios de etanol a partir do soro de leite, com concentrações variando entre 2% e 4% (v/v), dependendo das condições do processo, como temperatura, pH, concentração inicial de lactose e taxa de aeração (PANESAR et al., 2007). Além disso, técnicas como a fermentação contínua, imobilização celular e uso de reatores com membranas têm sido investigadas para aumentar a produtividade e viabilidade econômica do processo.

Por fim, a integração da produção de etanol em biorrefinarias lácteas pode trazer ganhos econômicos significativos, reduzindo custos com tratamento de efluentes e gerando valor agregado a partir de um passivo ambiental. Contudo, ainda existem desafios tecnológicos e logísticos a serem superados, como a adaptação de leveduras a condições industriais, o escalonamento de processos fermentativos e a viabilidade econômica em diferentes regiões produtoras. Superar esses entraves será essencial para viabilizar o uso do soro de leite como substrato em cadeias produtivas de biocombustíveis de forma competitiva e sustentável.

2.7.3 Aplicações

O etanol possui ampla aplicabilidade nos setores energético, químico e farmacêutico, sendo um dos biocombustíveis mais consolidados no cenário mundial. Sua principal aplicação é como combustível, seja em forma pura (etanol hidratado) ou adicionado à gasolina (etanol anidro), desempenhando papel fundamental na redução das emissões de gases de efeito estufa

(SILVEIRA et al., 2019). No Brasil, por exemplo, o uso do etanol combustível está amplamente disseminado no setor de transportes, especialmente devido à frota de veículos *flex*, contribuindo para a diminuição da dependência de derivados do petróleo (MACEDO et al., 2008).

Além da sua função como combustível, o etanol é também empregado como solvente industrial em processos de fabricação de tintas, vernizes, cosméticos e produtos farmacêuticos. Na indústria química, é utilizado como matéria-prima para a produção de éteres, álcoois superiores, ácidos orgânicos e plásticos biodegradáveis. Assim, com o avanço da química verde, o etanol tem ganhado destaque como insumo em sínteses mais sustentáveis, substituindo solventes tóxicos derivados do petróleo.

2.7.4 Mercado

Em relação ao mercado, no cenário global, os Estados Unidos lideram a produção de etanol, com aproximadamente 54,3% do total mundial, utilizando principalmente o milho como matéria-prima. Em seguida, vem o Brasil, com cerca de 29,5%, cuja produção é majoritariamente baseada na cana-de-açúcar (VIDAL, 2020). A tabela na sequência evidencia a produção mundial de etanol dos principais países e sua evolução ao longo dos anos.

Tabela 8 - Produção mundial de etanol por país.

Países	2016	2017	2018	2019
EUA	58.345	60.324	60.797	59.719
Brasil	25.589	25.968	29.980	32.441
União Europeia	5.213	5.300	5.413	5.451
China	3.199	3.255	3.975	3.407
Índia	1.041	795	1.514	2.006
Canadá	1.650	1.779	1.817	1.893
Tailândia	1.219	1.401	1.476	1.590
Argentina	999	1.098	1.098	1.098
Outros	1.855	1.567	2.078	2.286
Total Mundo	99.110	101.487	108.149	109.890

Fonte: Adaptado de *Renewable Fuels Association*, 2020.

O Brasil se destaca não só por sua produção, mas também pela inovação tecnológica, como a adoção em larga escala de veículos *flex* e pelo uso significativo de etanol na matriz energética de transportes. Além disso, o mercado brasileiro é predominantemente voltado ao consumo interno: em 2019, apenas 6,14% da produção total foi exportada.

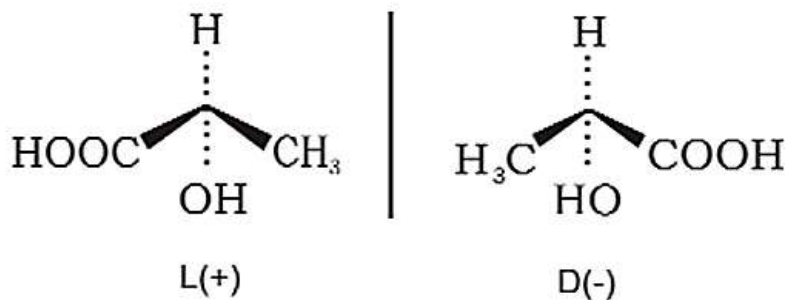
No contexto internacional, a União Europeia, China e Índia completam a lista dos cinco maiores produtores mundiais. A UE apresenta estagnação no consumo e produção devido a políticas que restringem o uso de biocombustíveis oriundos de culturas alimentícias. Já a Índia estabeleceu uma meta ambiciosa de mistura de etanol na gasolina de 20%, apesar dos desafios com matéria-prima, especialmente a limitação na produção de melaço (OCDE-FAO, 2020).

Por fim, a tendência global para os próximos anos aponta para uma valorização dos biocombustíveis avançados, como o etanol de segunda geração (E2G), produzido a partir de resíduos lignocelulósicos. No entanto, frente ao crescimento do mercado de veículos elétricos, o setor do etanol precisará se adaptar e inovar, por exemplo, com o desenvolvimento de células a combustível que utilizam etanol, o que poderia aliar as vantagens ambientais do biocombustível com a eficiência dos veículos elétricos, mantendo a relevância do etanol na transição energética global (VIDAL, 2020).

2.8 ÁCIDO LÁTICO

O ácido láctico é um composto orgânico de grande importância industrial, caracterizado pela fórmula molecular $C_3H_6O_3$ e nomeado pela União Internacional de Química Pura e Aplicada (IUPAC) como ácido 2-hidroxipropanoico. Descoberto em 1780 por Carl Wilhelm Scheele e posteriormente sintetizado por fermentação por Edmond Frémy em 1881, o ácido láctico é uma molécula com um átomo de carbono assimétrico, o que confere a existência de dois enantiômeros, que são isômeros espaciais: o L-(+)-ácido láctico e o D-(-)-ácido láctico. Esses isômeros, apesar de possuírem propriedades físicas semelhantes, desempenham funções biológicas e industriais distintas, sendo a forma levógira a mais utilizada em processos biológicos. A ilustração na sequência evidencia ambas as estruturas moleculares.

Figura 9 - Fórmula molecular dos isômeros do ácido láctico.



Fonte: Rodrigues, 2016.

Fisicamente, o ácido láctico é caracterizado por ser um líquido viscoso, cristalino e com odor levemente ácido. Já em relação a suas propriedades, apresenta ponto de fusão de aproximadamente 52,8 °C e ponto de ebulição de 122 °C sob pressão reduzida de 2 kPa, já que, à pressão atmosférica, o composto se decompõe em dióxido e monóxido de carbono. Além disso, é caracterizado também por sua alta solubilidade em água, etanol e éter dietílico, e baixa solubilidade em compostos apolares, como benzeno, o que facilita sua aplicação em diversas formulações industriais.

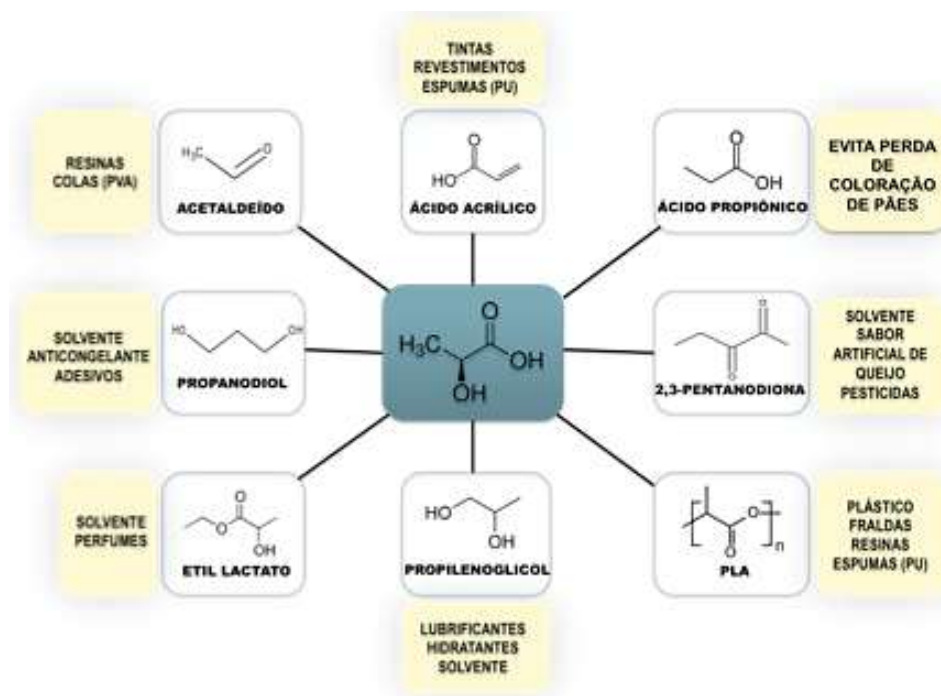
2.8.1 Aplicações

O ácido láctico apresenta um amplo espectro de aplicações em diferentes segmentos industriais. Na indústria alimentícia, pode ser utilizado como conservante, acidulante, controlador de pH e agente antimicrobiano, sendo essencial para a conservação e estabilização de produtos. Já na indústria farmacêutica e cosmética, é empregado principalmente em formulações dermatológicas, antiacne e hidratantes, devido a suas propriedades biocompatíveis e seu perfil de segurança elevado.

Outro destaque relevante é sua aplicação na indústria de polímeros, especialmente na produção de poliláctico (PLA), um bioplástico biodegradável que se destaca pela origem renovável de suas matérias-primas e pela menor dependência de combustíveis fósseis, representando uma alternativa mais sustentável em comparação a plásticos convencionais como o PET. Dentre as principais aplicações do PLA destaca-se as relacionadas a área médica, exigindo purezas superiores a 95% do ácido láctico, como suturas e implantes ortopédicos, já que apresenta capacidade de degradação controlada e biocompatibilidade.

A figura 10 apresenta diferentes utilizações do ácido láctico na indústria química, evidenciando a grande diversidade de aplicações deste composto.

Figura 10 - Aplicações do ácido láctico na indústria química.



Fonte: Benevenuti, 2016.

2.8.2 Mercado

Segundo a *Grand View Research* (2022) o mercado global de ácido láctico tem apresentado crescimento significativo, impulsionado pela demanda nas indústrias alimentícia, farmacêutica, cosmética e pela produção de ácido polilático (PLA). Além disso, as perspectivas de futuro são positivas, já que a crescente demanda por embalagens biodegradáveis e maior preocupação com a segurança alimentar pós-pandemia impulsionam esse cenário: prevê-se um crescimento a taxa anual composta de 8% até 2030, atingindo US\$ 5,8 bilhões, com destaque para a América do Norte como principal mercado.

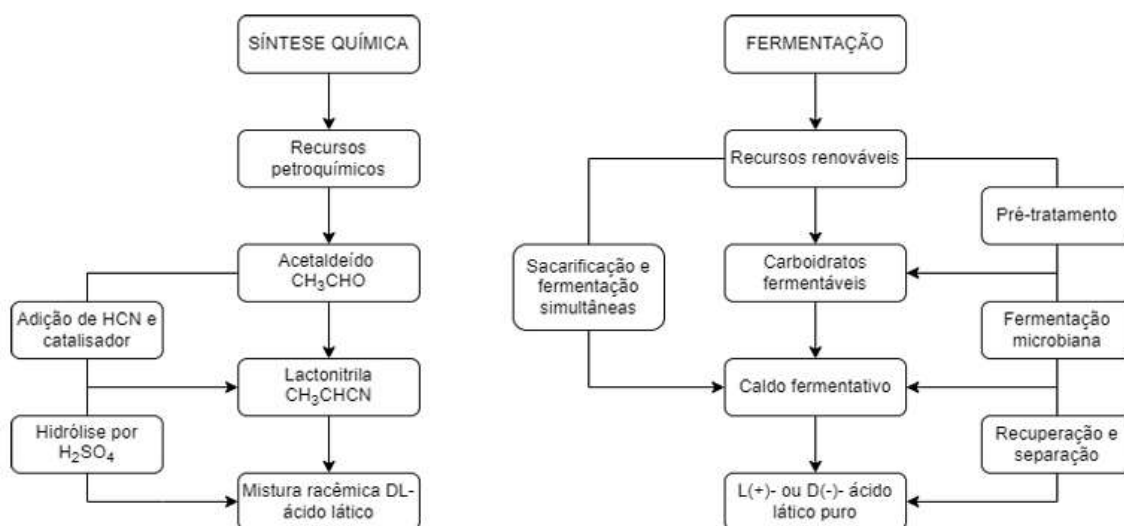
No contexto brasileiro, a balança comercial do produto foi superavitária entre 2017 e 2021, com exportações médias de US\$ 20,75 milhões e importações representando cerca de 34% desse valor, concentrando-se principalmente na região Sudeste, com destaque para São Paulo, que lidera tanto nas importações quanto nas exportações.

2.8.3 Rotas de Produção

A produção industrial do ácido láctico pode ser realizada por rotas químicas ou fermentativas. Atualmente, a síntese fermentativa predomina devido à capacidade de produzir

ácido láctico com alta pureza óptica, o que é essencial para aplicações alimentícias e biomédicas (CHAHAL et. al, 2006). Na sequência é apresentada a visão geral de síntese de ácido láctico por ambas as rotas.

Figura 11 - Esquematização das rotas de síntese de ácido láctico.

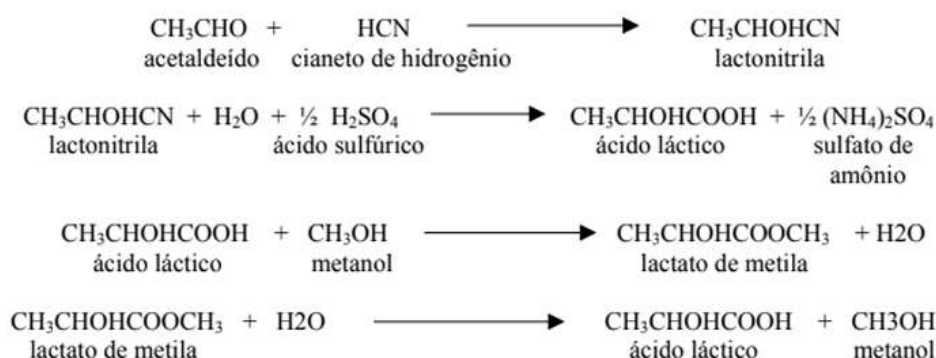


Fonte: Adaptado de Wee et al., 2006.

2.8.3.1 Produção Química

Historicamente, a rota química baseia-se principalmente pela hidrólise da lactonitrila, obtida pela reação entre acetaldeído e cianeto de hidrogênio na presença de uma base. Na sequência estão representadas as reações de obtenção do ácido láctico por meio desta rota, que, apesar da eficiência, gera uma mistura racêmica dos enantiômeros e depende de insumos petroquímicos, tornando-se menos atrativa frente a tendências de sustentabilidade e pureza específica em relação à rota fermentativa.

Figura 12 - Reações envolvidas na obtenção do ácido láctico via rota química.



Fonte: Leite, 2006.

Destaca-se ainda que, além desse processo, segundo Narayanan et al. (2004), o ácido láctico também pode ser obtido por processos como a oxidação do propilenoglicol, reação entre acetaldeído, monóxido de carbono e água, hidrólise do ácido cloropropiônico, degradação catalisada de açúcares e fermentação de carboidratos.

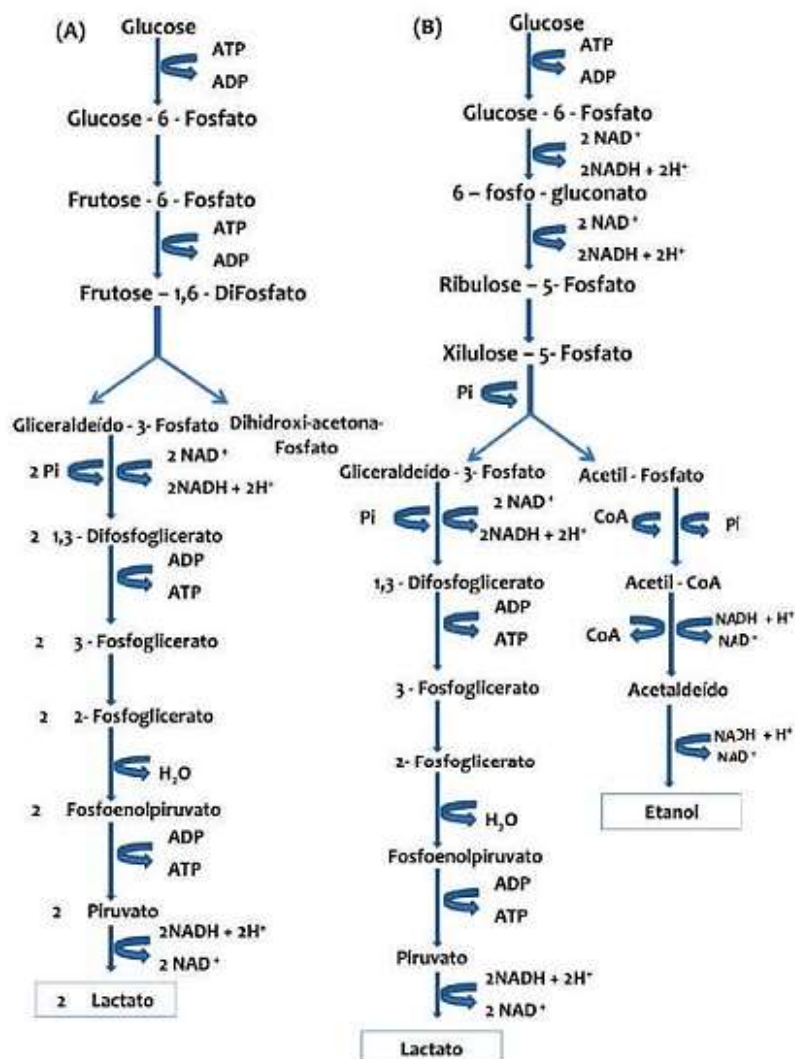
2.8.3.2 Produção Fermentativa

A fermentação microbiológica é atualmente o principal método de produção de ácido láctico, representando mais de 90% da produção mundial, já que apresenta vantagem econômica em relação a rota sintética. Esta abordagem utiliza carboidratos como substrato, com destaque para amidos, açúcares e, mais recentemente, fontes alternativas como resíduos agrícolas e soro de leite, uma matéria-prima promissora para a produção de ácido láctico devido ao seu alto teor de lactose.

Neste processo fermentativo são utilizadas bactérias lácticas, como *Lactobacillus delbrueckii* e *Lactobacillus helveticus*, que são capazes de metabolizar a lactose eficientemente por processos homoláticos ou heteroláticos, dependendo das condições de cultivo.

Na fermentação homolática, a molécula de lactose é hidrolisada em glicose e galactose, as quais entram na via glicolítica para a produção de ácido láctico como principal produto utilizando a via Embden-Meyerhof-Parnas. Esta rota é desejável pois maximiza o rendimento do ácido láctico e reduz a formação de subprodutos indesejados como etanol ou ácido acético. Assim, a utilização do soro de leite não apenas valoriza um resíduo da indústria alimentícia, mas também diminui os custos de produção e os impactos ambientais associados. Já na fermentação heterolática, produtos secundários como dióxido de carbono e etanol também são formados via rota das pentoses fosfato, o que reduz o rendimento do ácido láctico. Dessa forma, do ponto de vista industrial, a fermentação homolática é preferida para aplicações que exigem alta pureza e produtividade. Na sequência estão ilustradas as etapas presentes em ambas as rotas fermentativas.

Figura 13 - Rotas fermentativas homolática e heterolática.



Fonte: Salminen & Wright, 1998.

Historicamente, acreditava-se que a produção fermentativa de ácidos orgânicos era mais complexa em comparação à síntese química, porém, segundo Rodrigues (2016), apesar dos menores custos de purificação na rota química, os processos fermentativos são mais econômicos no geral. Ademais, a produção química de ácido lático, além de depender de derivados do petróleo, mostrou-se inviável a longo prazo devido à volatilidade do preço dessa matéria-prima (NARAYANAN et al., 2004), além de gerar uma mistura racêmica de estereoisômeros, o que compromete a pureza necessária para aplicações industriais. Dessa forma, a rota fermentativa se tornou a mais utilizada, já que permite a obtenção de ácido lático com alta pureza quiral e a utilização de fontes renováveis, reduzindo os impactos ambientais (OLIVEIRA, 2022).

3 BASES DE PESQUISA BIBLIOGRÁFICA E ÍNDICE-H

3.1 WEB OF SCIENCE

A *Web of Science* é uma plataforma de indexação científica gerida atualmente pela *Clarivate Analytics*. Com início no *Institute for Scientific Information* (ISI), oferece acesso a diversos bancos de dados especializados que abrangem áreas como ciências naturais, engenharias, ciências sociais, humanidades e saúde. Destaca-se que seu acervo inclui publicações desde o final do século XIX, permitindo o rastreamento histórico de avanços científicos e proporcionando uma base sólida para análises longitudinais de produção científica.

3.2 PLATAFORMA SCOPUS

A *Scopus*, desenvolvida pela editora Elsevier e lançada em 2004, é reconhecida como uma das mais abrangentes bases de dados acadêmicos com acesso por assinatura, contemplando conteúdos multidisciplinares e reunindo, além de artigos revisados por pares, publicações de eventos científicos, livros, registros de patentes e outros documentos técnicos de relevância. Seu escopo internacional é mais amplo do que o da *Web of Science*, destacando-se também por fornecer recursos analíticos, como métricas de desempenho de periódicos, perfis detalhados de autores e indicadores de uso de termos científicos ao longo do tempo, o que contribui significativamente para aprofundar análises bibliométricas e identificar tendências emergentes no campo de pesquisa.

3.3 ÍNDICE-H

O índice-h é uma métrica que busca mensurar tanto a produtividade quanto a relevância do trabalho de um pesquisador ou grupo de pesquisa, considerando o número de publicações e sua repercussão em termos de citações, o que é calculado com base na quantidade de artigos que receberam, cada um, um número igual ou superior de citações ao seu posicionamento no ranking de publicações. Por exemplo, um índice-h igual a 10 indica que o autor possui 10 publicações que foram citadas, no mínimo, 10 vezes cada. Essa métrica é amplamente utilizada para avaliar a consistência e o impacto da produção científica, sendo considerada um dos principais parâmetros de qualidade acadêmica (THOMAZ; ASSAD; MOREIRA, 2011).

4 METODOLOGIA

Para a elaboração deste trabalho, optou-se por uma abordagem teórico-bibliográfica com o objetivo de compreender, analisar e discutir as possibilidades de aproveitamento de resíduos orgânicos, como o soro de leite, por meio da digestão anaeróbia e suas aplicações na produção de biocombustíveis e outros subprodutos.

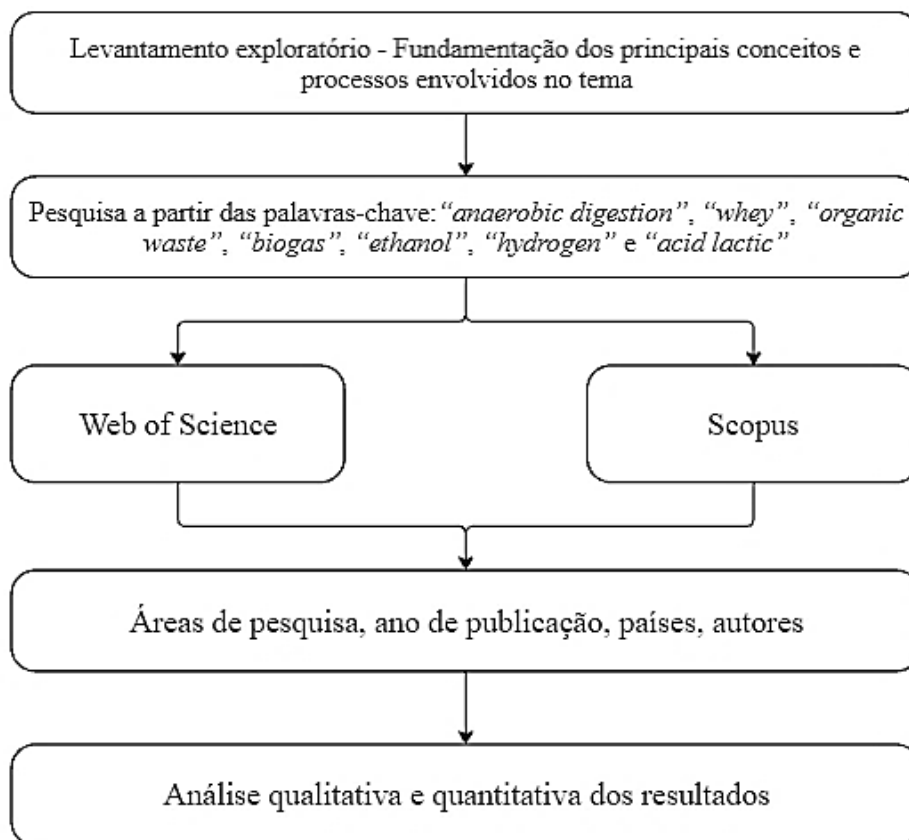
Inicialmente, foi conduzido um levantamento exploratório a fim de fundamentar os principais conceitos e processos envolvidos no tema, como os mecanismos da digestão anaeróbia, as vias metabólicas relacionadas, os parâmetros operacionais relevantes e os produtos finais do processo, como biogás, hidrogênio, etanol e ácido láctico. Essa etapa foi essencial para consolidar o embasamento teórico necessário para as análises subsequentes.

A partir disso, foi feita a seleção de fontes por meio da consulta a artigos científicos, livros técnicos e materiais acadêmicos reconhecidos na literatura nacional e internacional. As bases de dados utilizadas para o levantamento bibliográfico foram principalmente o *Scopus* e a *Web of Science*, plataformas com ampla cobertura e confiabilidade científica.

Dessa forma, foram utilizadas palavras-chave como: “*anaerobic digestion*”, “*whey*”, “*organic waste*”, “*biogas*”, “*ethanol*”, “*hydrogen*” e “*acid lactic*”, as quais foram combinadas entre si de maneira estratégica para ampliar o escopo e a relevância dos resultados encontrados. Destaca-se que essas expressões foram pesquisadas nos títulos, resumos e palavras-chave dos documentos disponíveis, permitindo identificar os principais estudos relacionados ao tema.

A análise dos dados extraídos seguiu dois enfoques principais, o quantitativo, no qual foram observadas variáveis como número de publicações por ano, países com maior produção científica na área, principais autores e áreas do conhecimento mais envolvidas com o tema; e qualitativo, no qual considerou-se o conteúdo dos artigos, suas contribuições, perspectivas futuras, avanços tecnológicos e desafios enfrentados na aplicação da digestão anaeróbia em resíduos orgânicos, com foco na valorização do soro de leite. Na sequência é apresentada a linha de metodologia utilizada.

Figura 14 - Fluxo da metodologia utilizada para elaboração deste trabalho.



Fonte: Autor, 2025.

Por fim, vale ressaltar que esse método permitiu identificar tendências de pesquisa, lacunas na literatura e oportunidades para o desenvolvimento de novas soluções sustentáveis a partir da valorização de resíduos orgânicos na indústria alimentícia.

5 RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos a partir da análise das publicações científicas encontradas nas bases de dados *Scopus* e *Web of Science*, utilizando as palavras-chave definidas previamente. Os dados refletem o volume e a evolução das publicações ao longo do tempo, os países com maior produção científica, os principais autores, bem como os temas mais recorrentes relacionados aos processos fermentativos voltados à produção de biogás, hidrogênio, etanol e ácido lático a partir do soro de leite. A seguir, os resultados são organizados e discutidos de forma a evidenciar as principais tendências e contribuições científicas nas áreas abordadas.

Inicialmente, foi feita a pesquisa das palavras-chave de maneira individual, quantificando assim os estudos para cada um dos temas abordados, o que foi realizado tanto por meio da plataforma *Scopus*, quanto da *Web of Science*. Dessa forma, nas tabelas 9 e 10 é apresentado uma síntese dos dados obtidos por meio de cada periódico, com as palavras-chave utilizadas, a quantidade de publicações disponíveis e o período de pesquisa.

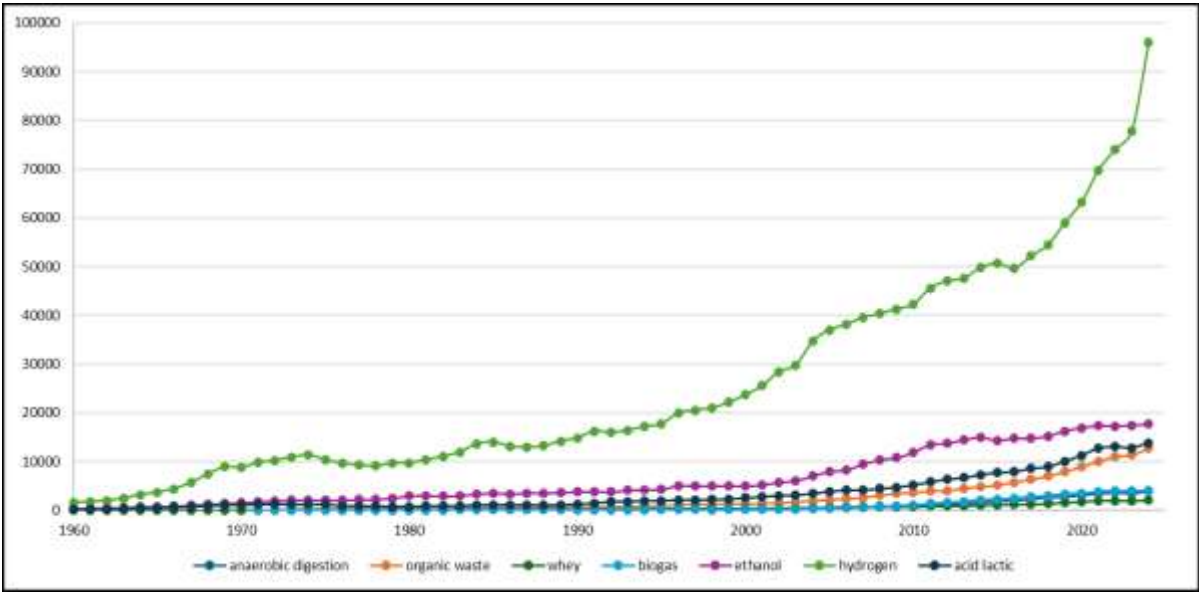
Além disso, como forma de comparar a proporção dos estudos e evidenciar a quantidade e evolução de publicações ao longo do tempo, extraiu-se os dados de ambas as plataformas e fez-se a representação gráfica, conforme apresentado nas figuras 15 e 16 na sequência.

Tabela 9 - Quantidade de publicações obtidas a partir das palavras-chave na base de dados *Scopus*.

Palavra-Chave	Período de Resultados	Quantidade de Publicações
<i>anaerobic digestion</i>	1960 - 2024	46216
<i>organic waste</i>	1960 - 2024	145747
<i>whey</i>	1960 - 2024	31784
<i>biogas</i>	1971 - 2024	48491
<i>ethanol</i>	1960 - 2024	411096
<i>hydrogen</i>	1960 - 2024	1664349
<i>acid lactic</i>	1960 - 2024	220506

Fonte: Adaptado de Scopus, 2025.

Figura 15 - Quantidade de publicações relacionadas às palavras-chave ao longo do tempo, via *Scopus*.



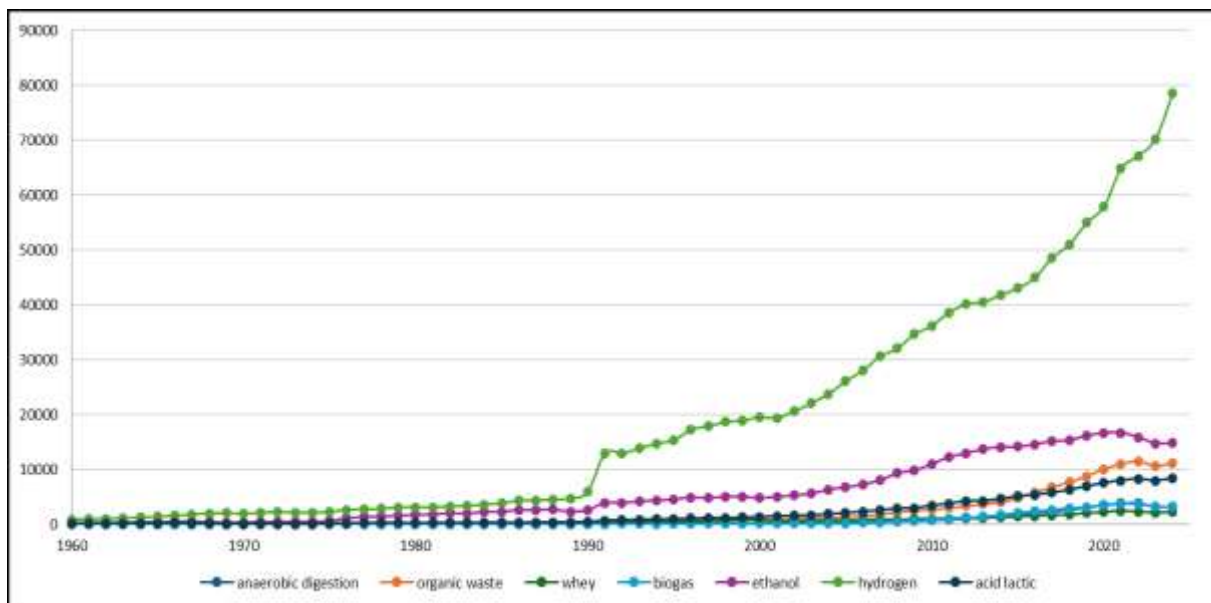
Fonte: Adaptado de Scopus, 2025.

Tabela 10 - Quantidade de publicações obtidas a partir das palavras-chave na base de dados *Web of Science*.

Palavra-Chave	Período de Resultados	Quantidade de Publicações
<i>anaerobic digestion</i>	1960 - 2024	42752
<i>organic waste</i>	1960 - 2024	128572
<i>whey</i>	1960 - 2024	39573
<i>biogas</i>	1960 - 2024	41208
<i>ethanol</i>	1960 - 2024	364798
<i>hydrogen</i>	1960 - 2024	1260782
<i>acid lactic</i>	1960 - 2024	126591

Fonte: Adaptado de Web of Science, 2025.

Figura 16 - Quantidade de publicações relacionadas às palavras-chave ao longo do tempo, via *Web of Science*.



Fonte: Adaptado de Web of Science, 2025.

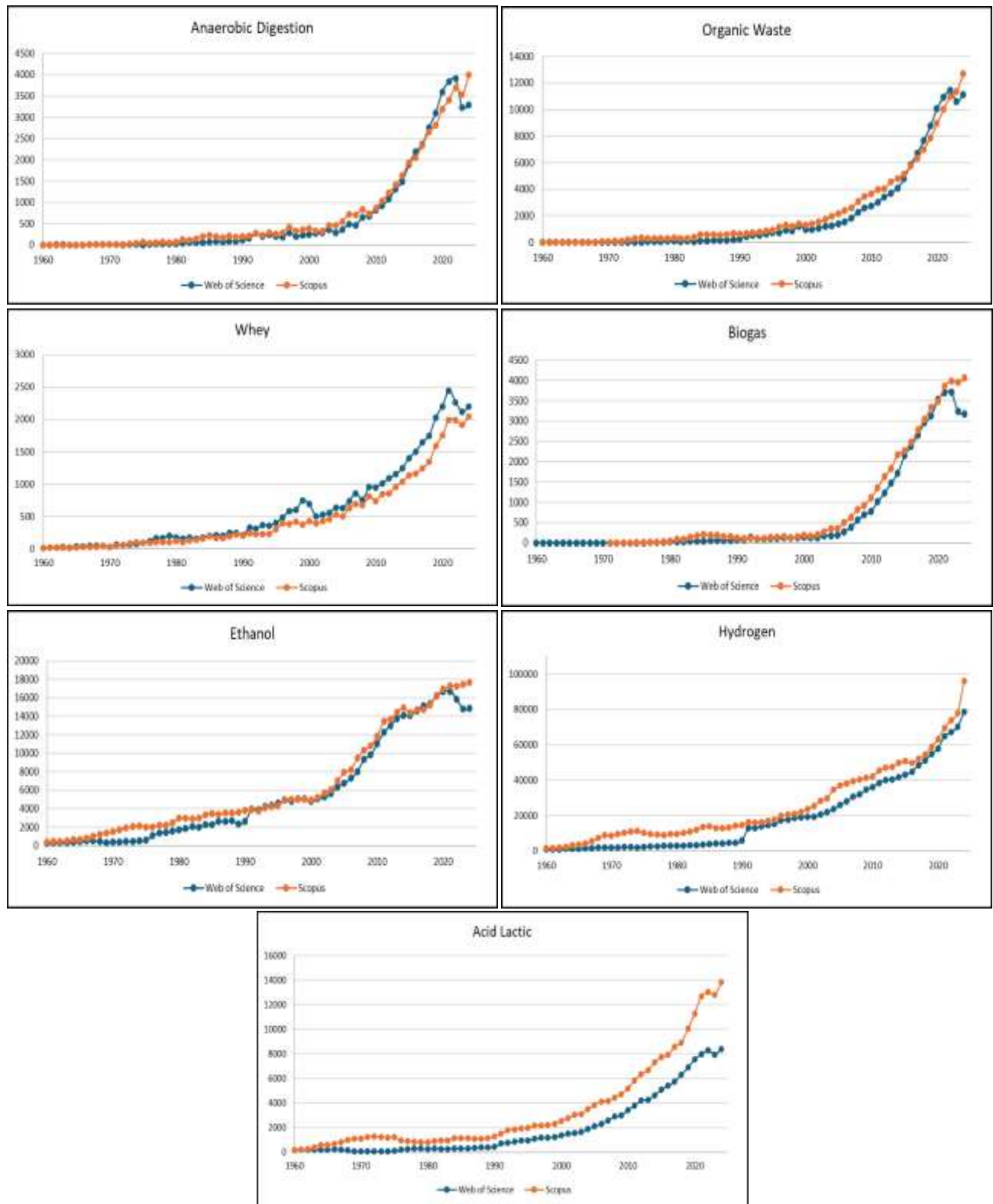
Com base nos dados presentes nas tabelas, nota-se que ambos os periódicos apresentam uma ampla quantidade de publicações relacionadas às palavras-chave pesquisadas, evidenciando a notoriedade destes temas, já que todos apresentam uma grande quantidade de publicações, envolvendo diferentes áreas, autores e países.

Vale ressaltar também que ambas as bases de dados apresentaram comportamento semelhante em relação a quantidade de publicações por palavra-chave. Já em relação ao período, observa-se que a maioria dos temas apresenta resultados a partir de 1960, o que não ocorre apenas para a temática de biogás na plataforma *Scopus*, em que os resultados iniciam a partir do ano de 1971.

Além disso, por meio dos gráficos, observa-se que todos os temas demonstraram evolução em relação a quantidade de publicações ao longo do tempo e apresentam os maiores valores na atualidade, o que reforça a relevância destes tópicos no contexto atual, em que sustentabilidade, gestão de resíduos, e fontes sustentáveis de energia são abordagens amplamente discutidas.

Por fim, os gráficos ainda permitem a comparação entre as diferentes palavras-chave, destacando principalmente o hidrogênio, que teve crescimento exponencial a partir da década de 1990 e se apresenta com o maior número de publicações dentre os temas pesquisados, seguido por etanol e resíduos orgânicos. Na sequência são apresentados gráficos abordando individualmente as palavras-chave em ambas as bases de dados.

Figura 17 - Quantidade de publicações relacionadas às palavras-chave ao longo do tempo: abordagem individual.



Fonte: Adaptado de Scopus, 2025; Web of Science, 2025.

Analisando individualmente nota-se primeiramente que o tema da digestão anaeróbia apresentou um significativo crescimento em pesquisas a partir de 2008, atingindo, no ano de 2024, mais de 3000 publicações, em ambas as plataformas. Este comportamento é semelhante para o biogás, que iniciou seu crescimento por volta de 2006, até atingir o máximo de 4062 publicações, em 2024, segundo o acervo *Scopus*.

Já os temas relacionados a resíduos orgânicos, hidrogênio e ácido lático passaram a ganhar maior relevância a partir da década de 1990, com destaque para o hidrogênio, que apresentou crescimento exponencial, até alcançar a marca de 95.960 publicações no ano de 2024, conforme dados da base *Scopus*. Vale ressaltar que resíduos orgânicos e ácido lático também apresentaram suas maiores marcas em 2024, com 12.697 e 13.836 publicações, respectivamente.

Por fim, as demais palavras-chave (etanol e soro de leite) demonstram uma antecipação no início de seu crescimento, logo na década de 1970. Porém, no caso do etanol, este crescimento foi acentuado a partir dos anos 2000, em que o etanol passou a ser a principal fonte alternativa e renovável no âmbito energético. No contexto brasileiro, carros *flex* constituíram um novo mercado para o etanol e grandes investimentos foram realizados em novas usinas, algumas exclusivamente voltadas para a produção de etanol. Destaca-se, finalmente, que, assim como as demais palavras-chave, etanol e soro de leite apresentaram seus maiores índices de publicação no ano de 2024, com 17.651 e 2.045 títulos, respectivamente.

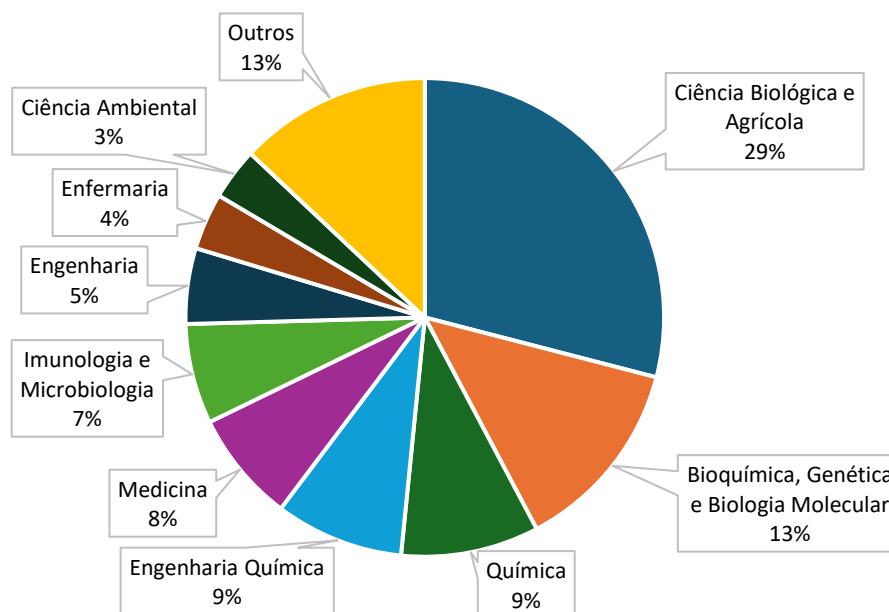
Vale ressaltar que, de forma geral, a base de dados *Scopus* possui uma maior quantidade de títulos em relação aos temas pesquisados, como evidenciado nos gráficos. Dessa maneira, esta plataforma será a principal utilizada no decorrer desta revisão sistemática.

Na sequência, as palavras-chave serão abordadas individualmente, porém com maior detalhamento, evidenciando aspectos como áreas do conhecimento, principais autores, países e contexto brasileiro.

5.1 SORO DE LEITE

Inicialmente, foram elencadas as áreas de trabalho nas quais os estudos mais se adequam. Estudos que englobam o soro de leite são, em sua maioria, relacionadas à área de ciências biológica e agrária, seguida por bioquímica, genética e biologia molecular, conforme a figura a seguir, que evidencia a distribuição deste tema entre as áreas, destacando o percentual correspondente a cada uma.

Figura 18 - Distribuição e percentual referente a áreas de estudo para o tema "*whey*".



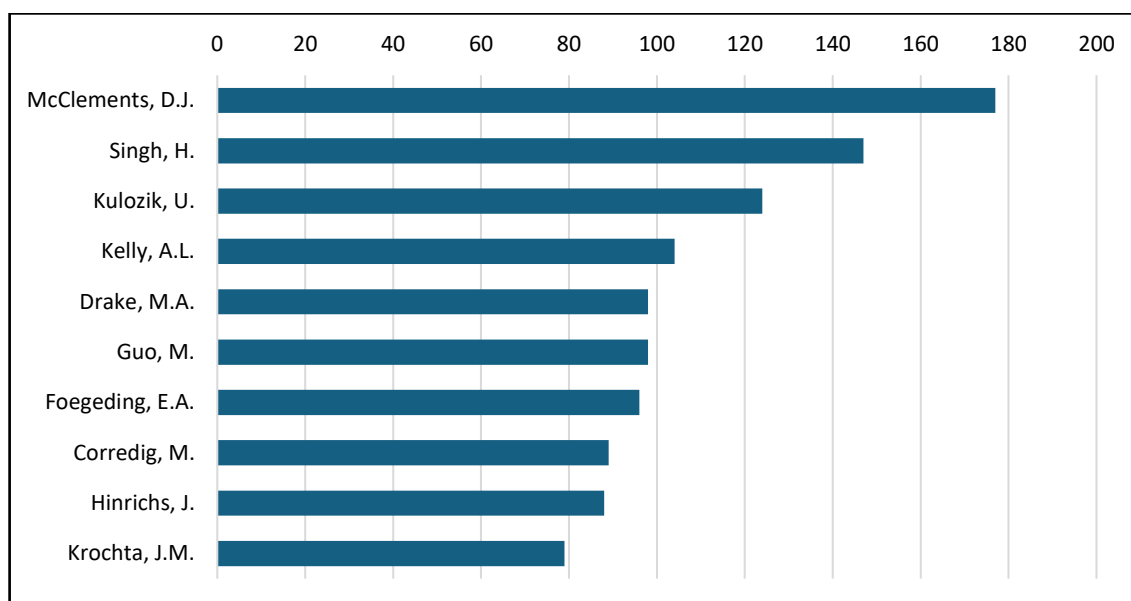
Fonte: Adaptado de Scopus, 2025.

O gráfico demonstra que a maior parte dos estudos sobre o tema soro de leite está concentrada na área de ciência biológica e agrícola (29%), o que reflete a origem deste componente como subproduto da indústria de laticínios e seu potencial biotecnológico e nutricional. Na sequência, áreas como bioquímica, genética e biologia molecular (13%) e Química (9%) também se destacam, indicando interesse na caracterização molecular e funcional das proteínas do soro, com foco em suas propriedades bioativas e efeitos fisiológicos.

Além disso, a presença de áreas aplicadas como engenharia química (9%) e medicina (8%) evidencia a relevância do soro tanto na otimização de processos industriais e gerenciamento de efluentes, quanto em estudos clínicos e terapêuticos.

Outra abordagem realizada para análise dos temas foi busca pelos principais autores, ou seja, aqueles com o maior número de publicações e maior relevância. No caso do soro de leite destaca-se David Julian McClements, com 177 publicações relacionadas a este assunto. Na sequência, é apresentado o gráfico referente aos principais autores com publicações relacionadas ao soro de leite.

Figura 19 - Principais autores referentes a publicações associadas ao tema "whey".



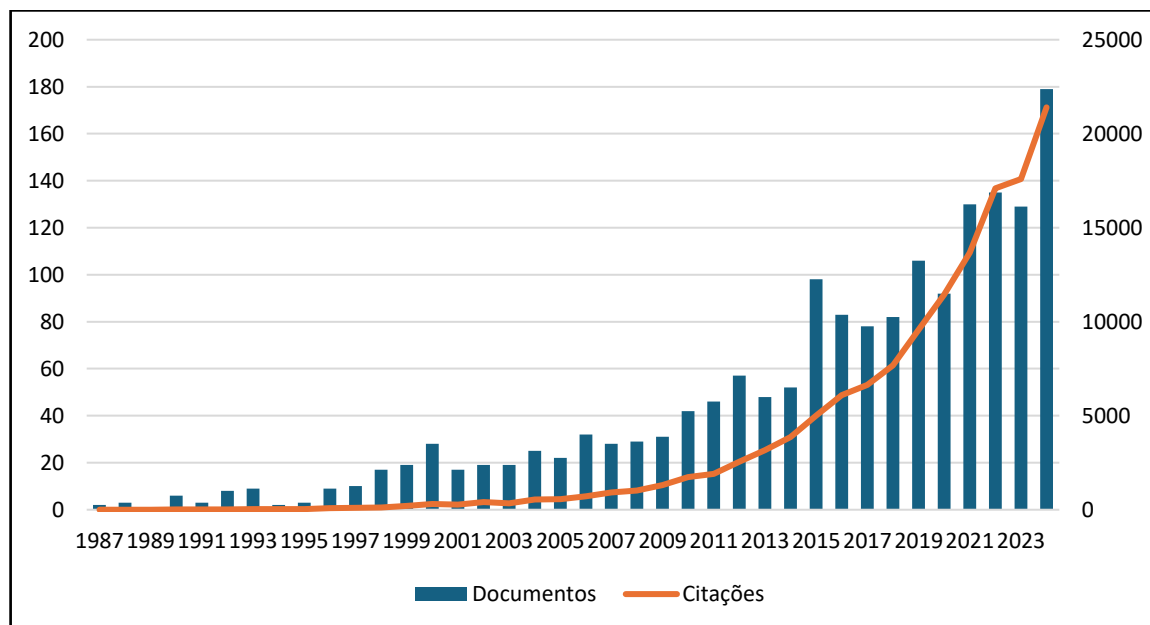
Fonte: Adaptado de Scopus, 2025.

Com base na Figura 19, observa-se que McClements, D.J. é o autor com maior número de publicações relacionadas ao tema soro de leite, como já mencionado. Em seguida, destacam-se Singh, H. e Kulozik, U., com contribuições igualmente significativas. Esses autores são referências em ciência de alimentos, o que indica que suas pesquisas estão fortemente ligadas à funcionalidade tecnológica e às propriedades físico-químicas do soro, especialmente em aplicações industriais e nutricionais.

David Julian McClements é professor do Departamento de Ciência dos Alimentos da Universidade de Massachusetts, sendo especializado nas áreas de biopolímeros e coloides alimentares, em particular, no desenvolvimento de sistemas de entrega estruturados à base de alimentos para componentes bioativos. Dentre as principais áreas relacionadas a suas produções destacam-se as ciências biológica e agrária, a química e a engenharia química, totalizando cerca de 73% de todas suas publicações.

Vale ressaltar que McClements possui no total 1.797 publicações, no período de 1987 a 2024, e 147.923 citações, apresentando assim, um índice-H de 184, segundo a plataforma *Scopus*. A figura 20 a seguir apresenta a evolução temporal de documentos e citações do autor, revelando um crescimento consistente e acentuado a partir de 2010, com destaque para os últimos cinco anos, nos quais as citações ultrapassaram a marca de 20 mil. Isso demonstra não apenas uma produção científica contínua, mas também sua alta relevância e impacto acadêmico, reforçando sua liderança nas pesquisas aplicadas ao soro de leite.

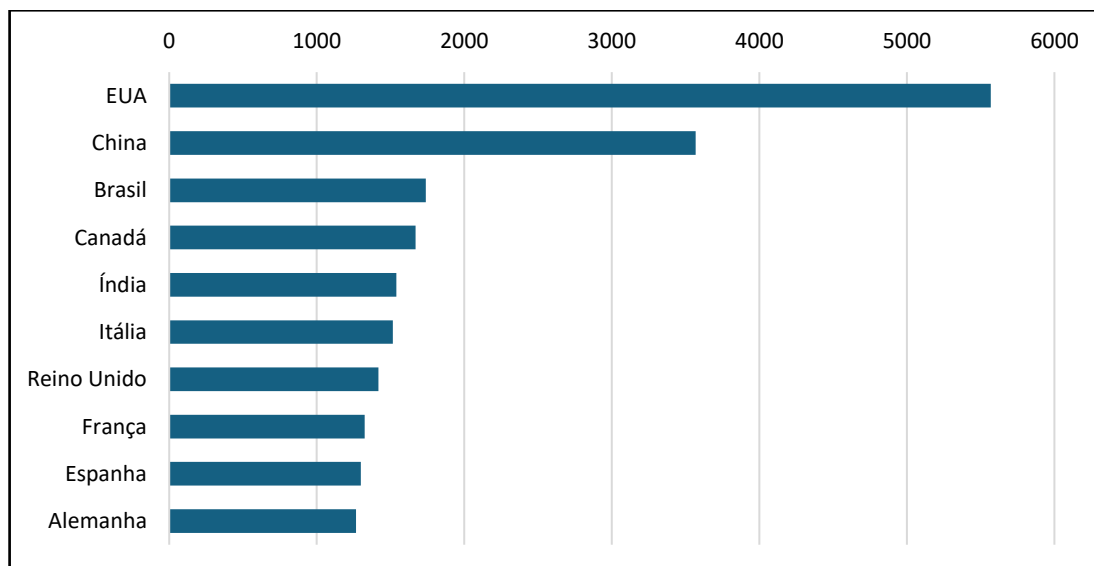
Figura 20 - Quantidade de documentos e citações de David Julian McClements.



Fonte: Adaptado de Scopus, 2025.

Por fim, analisou-se a questão territorial em relação aos documentos. Na sequência é apresentado um gráfico destacando os 10 países que geraram a maior quantidade de publicações associadas ao tema do soro de leite.

Figura 21 - Principais países referentes a publicações associadas ao tema "whey".



Fonte: Adaptado de Scopus, 2025.

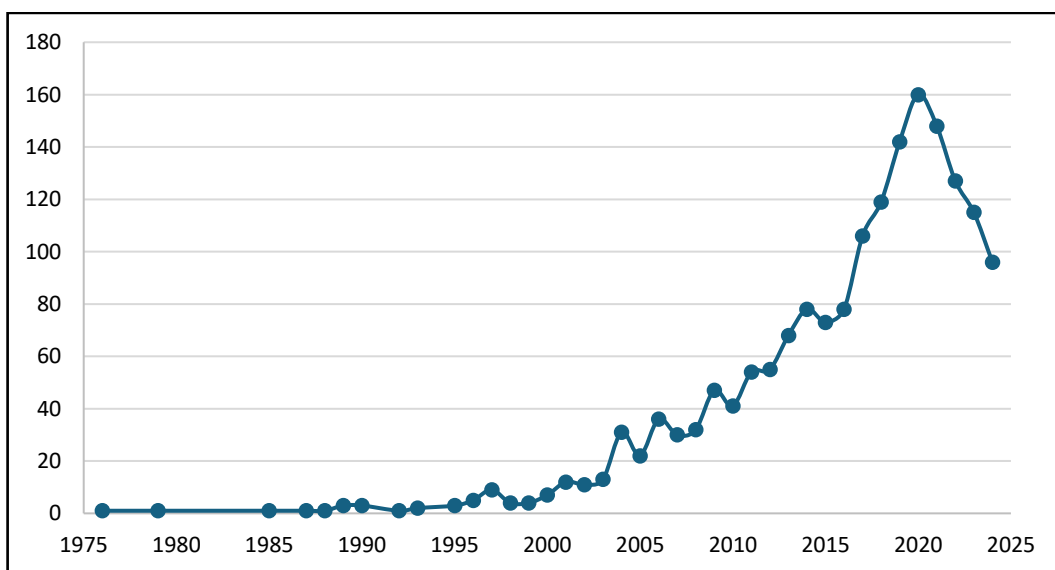
A partir do gráfico conclui-se que os Estados Unidos e a China são os líderes em número de publicações, com 5.569 e 3.569 documentos, respectivamente até o ano de 2024. A expressiva contribuição dos EUA pode ser atribuída ao seu histórico de investimentos em

pesquisa científica aplicada à nutrição, ciência dos alimentos e biotecnologia, além da forte presença de universidades e centros de excelência com parcerias com a indústria de laticínios. Vale ressaltar também que o país é um dos maiores produtores e consumidores de suplementos à base de proteína do soro, o que impulsiona a pesquisa nessa área.

Já a China, que ocupa a segunda posição, tem intensificado significativamente seus investimentos em ciência e tecnologia nas últimas décadas, com foco estratégico em segurança alimentar, valorização de subprodutos agroindustriais e inovação nutricional. Dessa forma, a crescente demanda interna por alimentos funcionais e suplementos, aliada ao aumento do consumo de produtos lácteos em sua população urbana, também contribui para o aumento das pesquisas relacionadas ao soro de leite. Além disso, destaca-se que os principais financiadores das publicações associadas a este tema são chineses: Fundação Nacional de Ciências Naturais da China e Ministério da Ciência e Tecnologia da República Popular da China, segundo a base de dados *Scopus*.

Na terceira posição figura o Brasil, totalizando 1.740 documentos e apresentando um crescimento gradual a partir dos anos 2000, com aumento mais expressivo entre 2010 e 2020, conforme evidenciado no gráfico a seguir, que apresenta a evolução temporal das publicações científicas no Brasil relacionadas ao soro de leite.

Figura 22 - Quantidade de publicações ao longo do tempo associadas ao tema "whey" no Brasil.

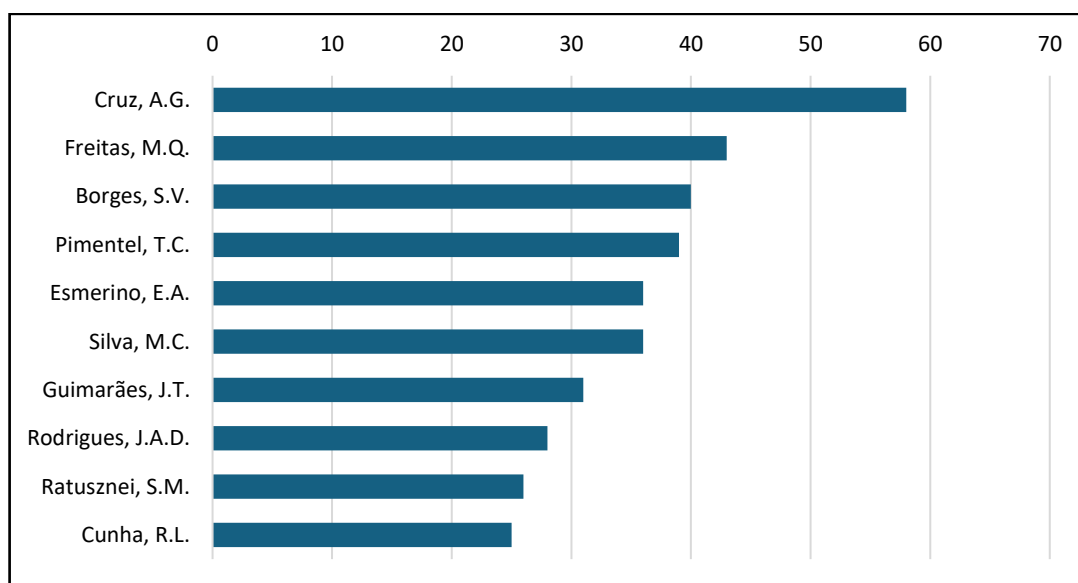


Fonte: Adaptado de Scopus, 2025.

Esse crescimento está relacionado à maior inserção do Brasil em redes científicas internacionais e à valorização do reaproveitamento de subprodutos da indústria de laticínios, como o soro de leite. Dessa forma, nota-se que o Brasil demonstra um movimento consistente de consolidação da pesquisa sobre o soro de leite, alinhando-se às tendências globais de inovação, sustentabilidade e economia circular.

Dentre os principais autores brasileiros, destaca-se Adriano G. Cruz, pesquisador e professor associado do Departamento de Alimentos no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio de Janeiro, que conta com 58 publicações a respeito do tema do soro de leite. Além disso, no geral, Adriano conta com 22.602 citações e 476 publicações, garantindo um índice-H de 81, o que mostra sua relevância no âmbito da pesquisa. Na sequência é evidenciado os 10 mais relevantes autores do Brasil em relação a esta temática.

Figura 23 - Principais autores referentes a publicações associadas ao tema "*whey*" no Brasil.



Fonte: Adaptado de Scopus, 2025.

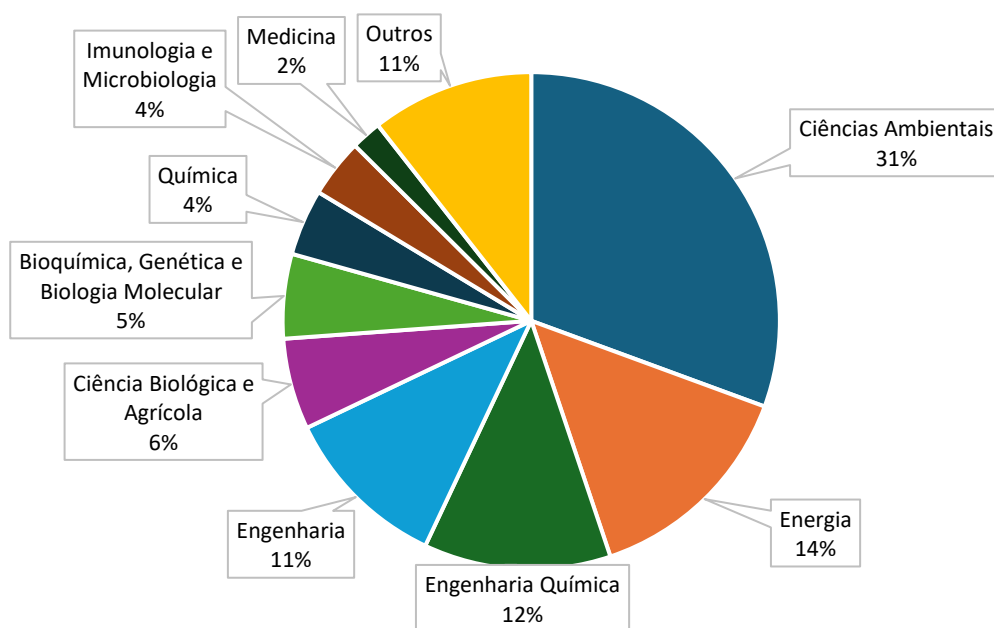
Finalmente, conclui-se que o tema soro de leite tem se consolidado como um campo de estudo multidisciplinar, com ampla relevância científica e industrial. A partir da análise das áreas do conhecimento, observa-se que a predominância de pesquisas nas ciências biológicas, agrárias e bioquímicas reflete o potencial funcional e tecnológico desse subproduto da indústria de laticínios. Já a caracterização das proteínas do soro, seus efeitos fisiológicos e aplicações em alimentos funcionais demonstram a importância crescente desse insumo na promoção da saúde e no desenvolvimento de novos produtos.

No cenário nacional, nota-se que o Brasil apresenta crescimento expressivo nas publicações, especialmente a partir da década de 2010, impulsionado por uma maior integração científica internacional, valorização de resíduos agroindustriais e incentivo à sustentabilidade. Esse panorama evidencia que o soro de leite deixou de ser apenas um resíduo da indústria de laticínios para se tornar um objeto de interesse estratégico, tanto para o desenvolvimento de soluções tecnológicas quanto para a promoção de práticas sustentáveis e de economia circular. Assim, a continuidade e ampliação das pesquisas sobre o tema são fundamentais para agregar valor à cadeia produtiva do leite e gerar inovações com impacto positivo na saúde, na indústria, na geração de energia e no meio ambiente.

5.2 DIGESTÃO ANERÓBIA

Como já apresentado, a digestão anaeróbia é um tema que tem sido cada vez mais estudado, considerando o cenário da busca por alternativas renováveis de geração de energia. Neste contexto, os estudos englobam diferentes áreas, desde ciências ambientais até medicina e microbiologia. Na sequência é apresentada a distribuição e percentual referente a áreas de estudo para o tema "anaerobic digestion".

Figura 24 - Distribuição e percentual referente a áreas de estudo para o tema "*anaerobic digestion*".



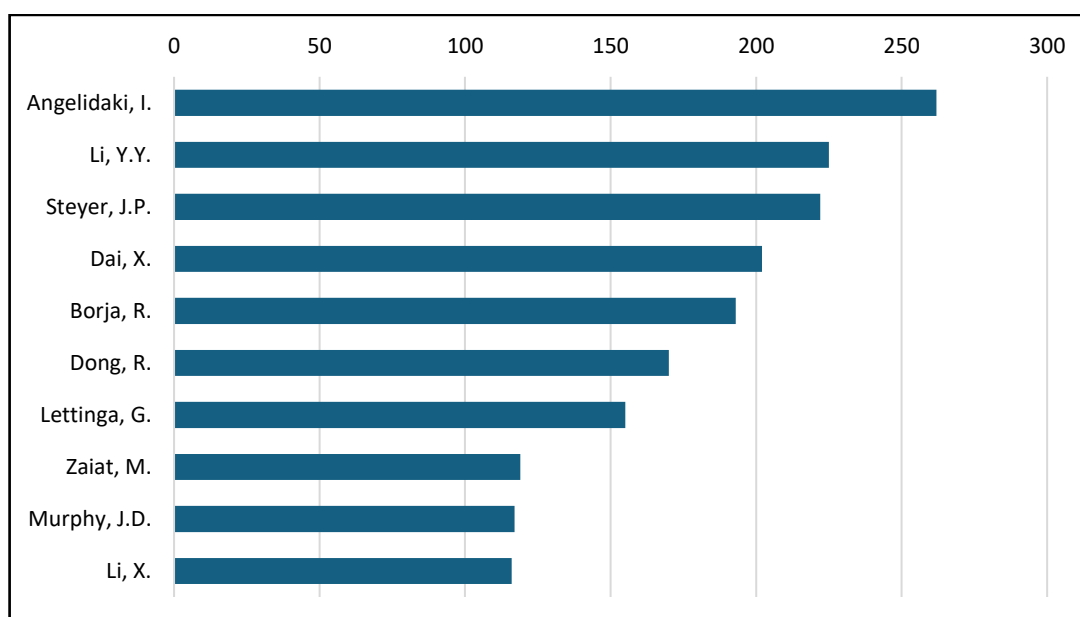
Fonte: Adaptado de Scopus, 2025.

Com base nos dados analisados, é possível observar que a digestão anaeróbia é abordada sob diversas perspectivas científicas, evidenciando seu caráter multidisciplinar. Nesse contexto, a área de ciências ambientais se sobressai, o que se justifica pelo objetivo central dessa tecnologia: mitigar a carga poluente presente nos resíduos, evitando impactos negativos ao meio ambiente. Paralelamente, cerca de 15% dos estudos concentram-se na produção de energia, com ênfase na geração de metano como fonte alternativa. Além disso, há também investigações que se dedicam a etapas específicas do processo, como a atuação de microrganismos, o que envolve diretamente campos como a microbiologia e áreas correlatas.

Esta predominância das áreas ambiental e energética está alinhada com a evolução histórica da pesquisa em digestão anaeróbia, impulsionada pela crescente demanda por soluções para o manejo de resíduos e pela busca por fontes energéticas sustentáveis. Ademais, vale ressaltar a presença das engenharias, especialmente a química, e da agricultura, considerando que muitos dos materiais utilizados como substratos derivam de resíduos industriais e da atividade agropecuária.

Partindo para outra abordagem deste tema, destacou-se os autores de maior número de publicações e maior relevância, quando se considera o tratamento de resíduos por meio da digestão anaeróbia. Tais dados são apresentados na figura 25 a seguir.

Figura 25 - Principais autores referentes a publicações associadas ao tema "*anaerobic digestion*".



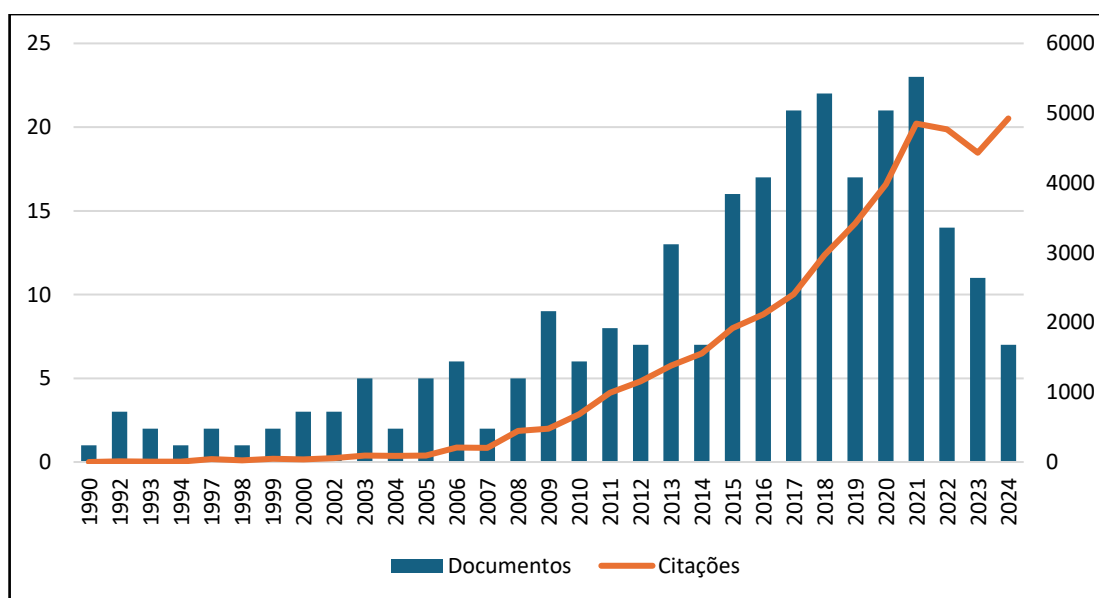
Fonte: Adaptado de Scopus, 2025.

A partir do gráfico, fica claro que a autora de maior destaque em relação ao número de publicações, baseado nas plataformas *Scopus* e *Web of Science*, é a dinamarquesa Irini Angelidaki, pesquisadora e professora na Universidade Técnica da Dinamarca, com vasta experiência em conversões de biomassa para bioprodutos, bioenergia e produção de biocombustíveis, segundo a própria universidade.

Em relação a áreas de estudo de Irini, destacam-se ciências ambientais, energia e engenharia química, áreas muito relacionadas ao tema da digestão anaeróbia, evidenciando o foco desta autora. Além disso, de acordo com a Universidade Técnica da Dinamarca, Irini tem mais de 600 artigos publicados, sendo mais de 200 relacionados ao tema de digestão anaeróbia.

Ademais, vale destacar que a autora apresenta publicações desde a década de 1990, com destaque para o ano de 2021, em que são apresentados 23 documentos relacionado à digestão anaeróbia e 4.830 citações, segundo a base de pesquisa *Scopus*. Neste contexto, o índice-H da autora, atualmente, é de 109, evidenciando sua relevância no meio acadêmica. No gráfico a seguir estão expostos os números de documentos associados a digestão anaeróbia e citações da autora.

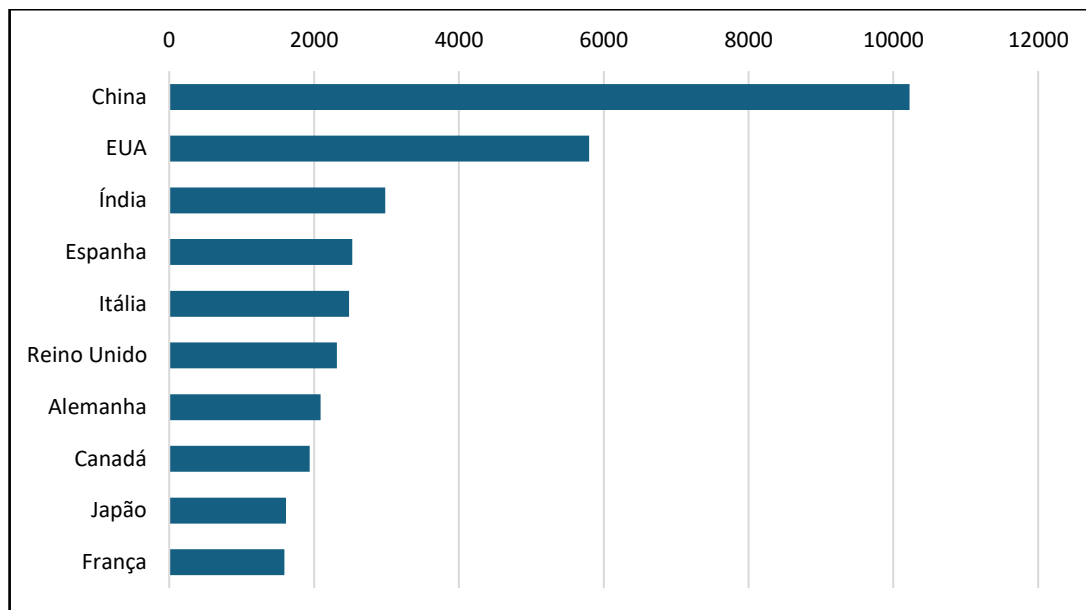
Figura 26 - Quantidade de documentos e citações de Irini Angelidaki.



Fonte: Adaptado de Scopus, 2025.

Outro parâmetro importante abordado na interpretação dos estudos sobre o tema, foi a quantidade de publicações por países, conforme apresentado na figura 27.

Figura 27 - Principais países referentes a publicações associadas ao tema "*anaerobic digestion*".



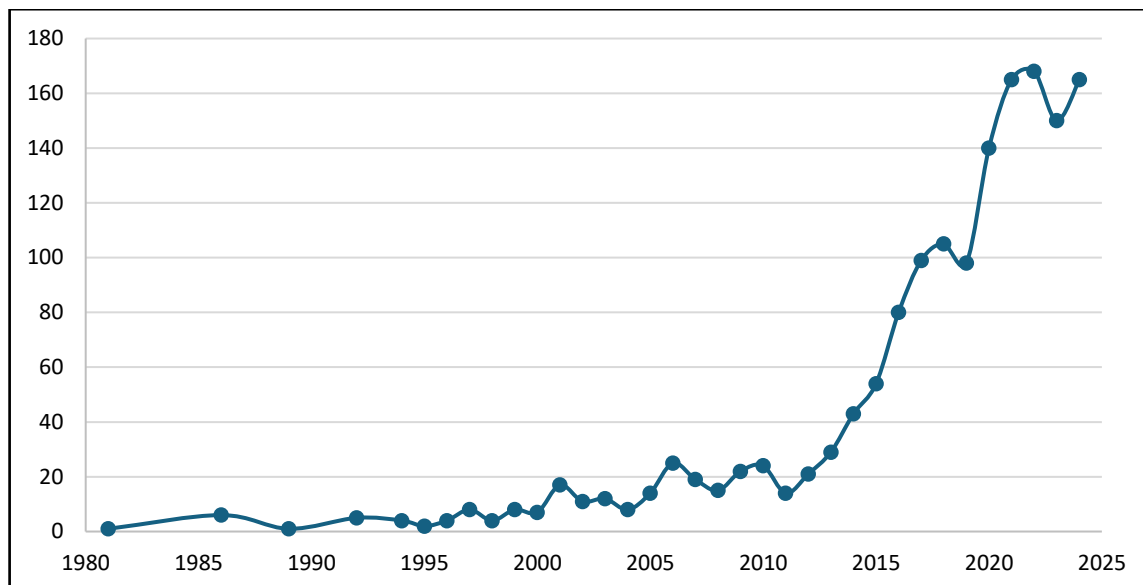
Fonte: Adaptado de Scopus, 2025.

Fica claro que o país que mais investe em pesquisa e estudos a respeito da digestão anaeróbia é a China, representando mais de 20% das publicações associadas ao tema no mundo, seguida pelos Estados Unidos e, posteriormente, a Índia. Relacionado a isso, a plataforma de pesquisa ainda destaca que os principais financiadores das publicações associadas a este tema são chineses, seguido por algumas financiadoras da União Europeia.

Este cenário é recente, até o início dos anos 2000, a produção científica de maior destaque, em escala global, era majoritariamente dominada por nações desenvolvidas, como os Estados Unidos e países da União Europeia. No entanto, esse panorama tem passado por mudanças significativas nas últimas décadas, a ascensão de novos protagonistas no cenário científico internacional, como a China, está diretamente ligada à implementação de políticas públicas voltadas ao incentivo da ciência. Desde os anos 1990, o governo chinês tem promovido reformas estruturais expressivas no setor de Ciência e Tecnologia, impulsionando avanços tanto no ensino superior quanto nas atividades de Pesquisa e Desenvolvimento.

Neste contexto, o Brasil se encontra na 11ª posição, com 1.548 documentos sobre o tema até o ano de 2024, apresentando também um crescimento significativo a partir dos anos de 2010, conforme evidenciado no gráfico a seguir.

Figura 28 - Quantidade de publicações ao longo do tempo associadas ao tema "*anaerobic digestion*" no Brasil.

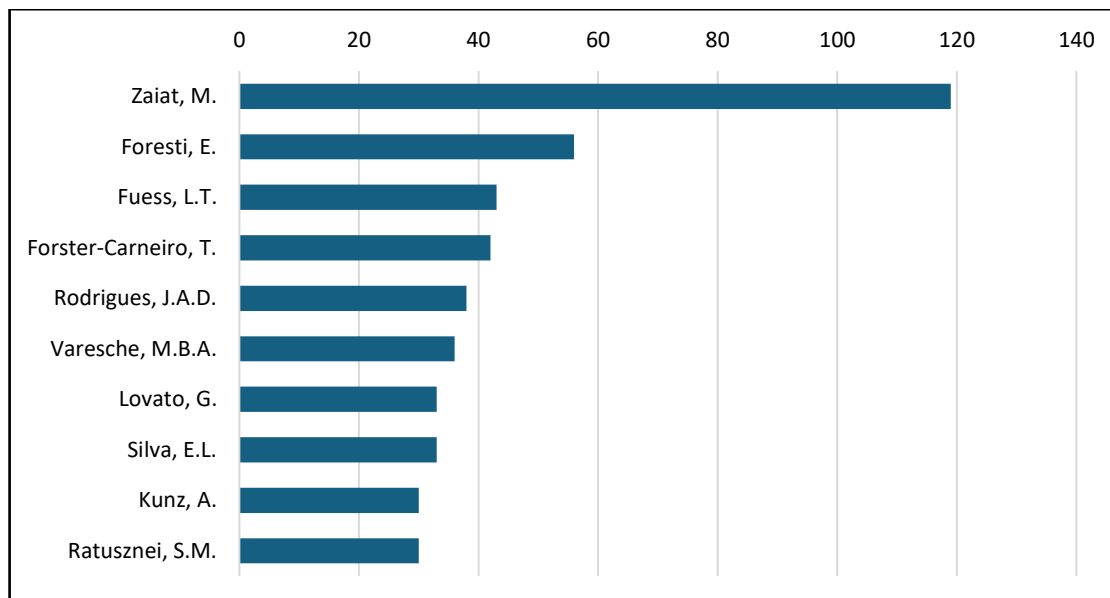


Fonte: Adaptado de Scopus, 2025.

Dentre os principais autores brasileiros, destaca-se Marcelo Zaiat, que possui uma produção acadêmica concentrada em processos anaeróbios aplicados ao tratamento de resíduos orgânicos e geração de bioenergia. Suas pesquisas abordam, com destaque, o uso da digestão anaeróbia em subprodutos da agroindústria, especialmente a vinhaça oriunda da produção de etanol de cana-de-açúcar, com enfoque em aspectos energéticos, ambientais e econômicos. Além disso, Zaiat tem uma expressiva contribuição em temas como produção de hidrogênio por fermentação escura, tratamento de águas residuárias industriais e domésticas, e desenvolvimento de biorreatores inovadores, como reatores de leito fixo e sequenciais em batelada. A diversidade de suas publicações revela também uma interface com microbiologia ambiental, biotecnologia e engenharia química, demonstrando uma abordagem multidisciplinar voltada para soluções sustentáveis e tecnologias limpas.

Em relação a números, Zaiat conta com 366 publicações no total, sendo 119 relacionadas ao tema da digestão anaeróbia, segundo a plataforma *Scopus*, o que o coloca na oitava posição mundial em termos de quantidade publicada para este tema. Além disso, conta com 10480 citações e 366 publicações, garantindo um índice-H de 53. Na sequência são apresentados os mais relevantes autores do Brasil em relação a esta temática.

Figura 29 - Principais autores referentes a publicações associadas ao tema "*anaerobic digestion*" no Brasil.



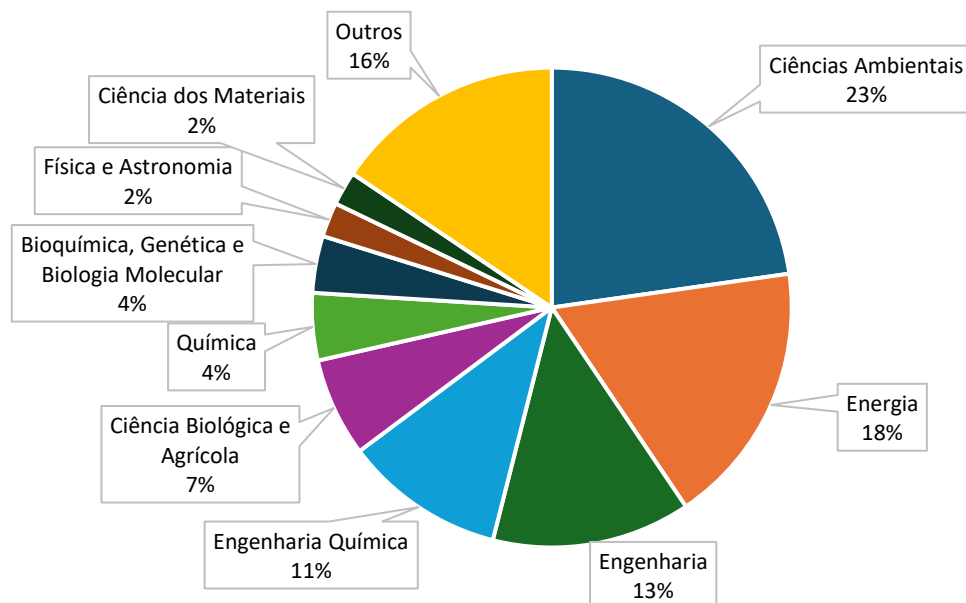
Fonte: Adaptado de Scopus, 2025.

Por fim, com base nas análises realizadas, pode-se concluir que a digestão anaeróbia se configura como um campo de estudo dinâmico, interdisciplinar e em constante expansão. A relevância científica e tecnológica dessa temática se reflete não apenas na diversidade das áreas envolvidas, mas também no crescente número de publicações e pesquisadores dedicados ao tema em âmbito global. Além disso, a predominância de estudos voltados à mitigação de impactos ambientais e à geração de bioenergia demonstra a importância da digestão anaeróbia frente aos desafios contemporâneos relacionados à sustentabilidade e à gestão de resíduos. Dessa forma, este tema consolida-se como uma tecnologia-chave no cenário da transição energética e da economia circular, representando não apenas uma solução técnica, mas também uma oportunidade estratégica para o desenvolvimento sustentável e a inovação científica global.

5.3 BIOGÁS

O biogás tem se consolidado como uma das alternativas mais promissoras no cenário da geração de energia a partir de fontes renováveis, especialmente no contexto da bioeconomia e da sustentabilidade. Nesse cenário, a análise bibliométrica realizada a partir da base de dados *Scopus* evidencia um aumento expressivo de publicações sobre o tema nas últimas décadas, com destaque para sua natureza interdisciplinar, envolvendo áreas como ciências ambientais, engenharia química, energia, microbiologia e agricultura, conforme a representação a seguir.

Figura 30 - Distribuição e percentual referente a áreas de estudo para o tema "*biogas*".



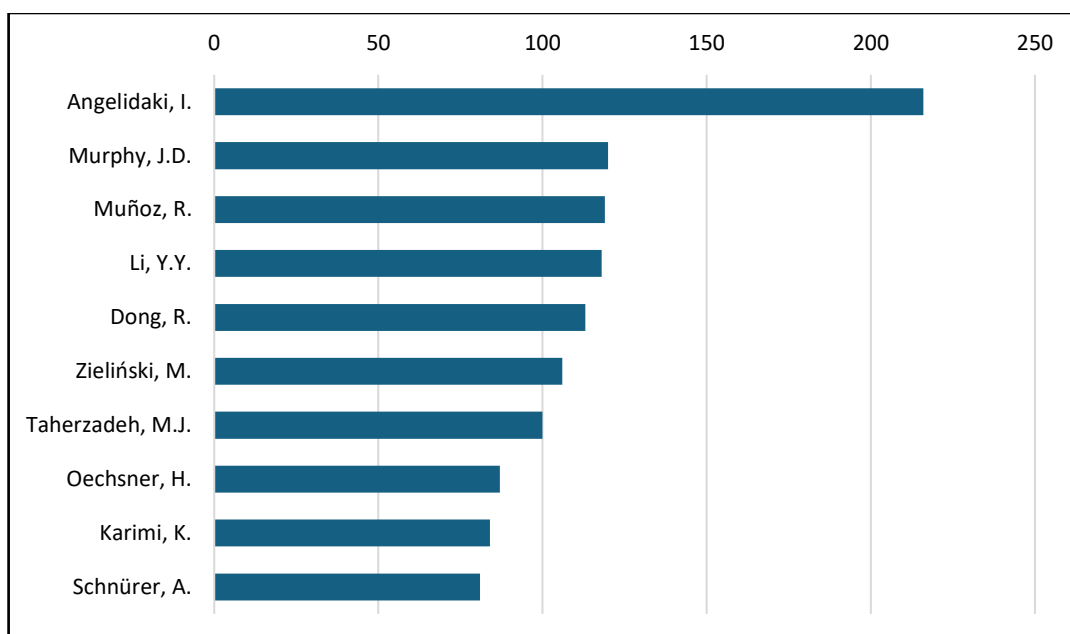
Fonte: Adaptado de Scopus, 2025.

Além disso, vale ressaltar que a distribuição temática dos estudos indica que a maior parte das pesquisas se concentra na valorização energética de resíduos, no tratamento de efluentes, na otimização de reatores e na purificação do biogás para produção de biometano. Tais investigações são fundamentais não apenas para maximizar a eficiência dos processos, mas também para atender às exigências ambientais e normativas para uso energético. Em adição, a atuação de microrganismos metanogênicos, a influência de parâmetros operacionais, a escolha dos substratos e as possibilidades de codigestão, também estão entre os temas mais explorados.

Em relação aos principais autores, a pesquisadora dinamarquesa Irini Angelidaki, já destacada na análise sobre digestão anaeróbia, também se sobressai como referência no campo do biogás, reafirmando a interdependência entre esses dois tópicos. Com publicações voltadas à conversão de biomassa e desenvolvimento de tecnologias de biorreatores, sua contribuição tem sido essencial para avanços na produção eficiente de biogás e bioprodutos associados, como biohidrogênio e biofertilizantes. A mesma situação ocorre no contexto brasileiro, em que Marcelo Zaiat também se repete como principal autor do Brasil, se destacando por estudos voltados à produção de biogás e biohidrogênio a partir de substratos “brasileiros”, especialmente em sistemas de reatores de leito fixo e batelada sequencial, já que suas pesquisas são voltadas a área de tratamento biológico de águas residuárias, com foco no desenvolvimento de biorreatores anaeróbios e aplicação do conceito de biorrefinaria a estações de tratamento biológico de águas residuárias. Na sequência, através das figuras 31 e 32, respectivamente, são

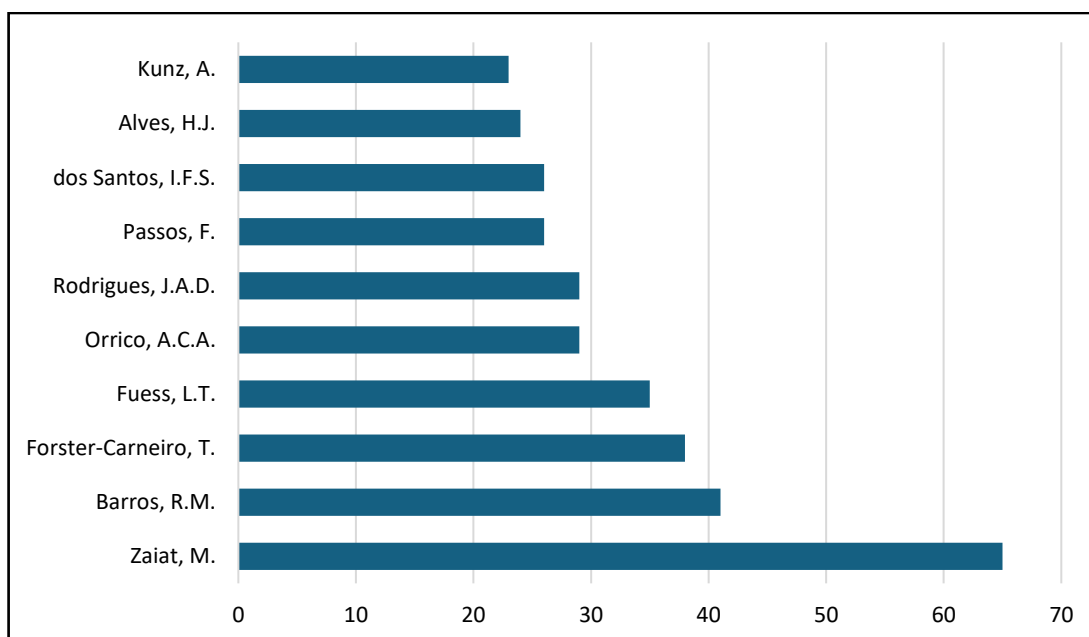
apresentados os principais autores associados a temática do biogás no cenário mundial e no contexto brasileiro.

Figura 31 - Principais autores referentes a publicações associadas ao tema "*biogas*" no cenário mundial.



Fonte: Adaptado de Scopus, 2025.

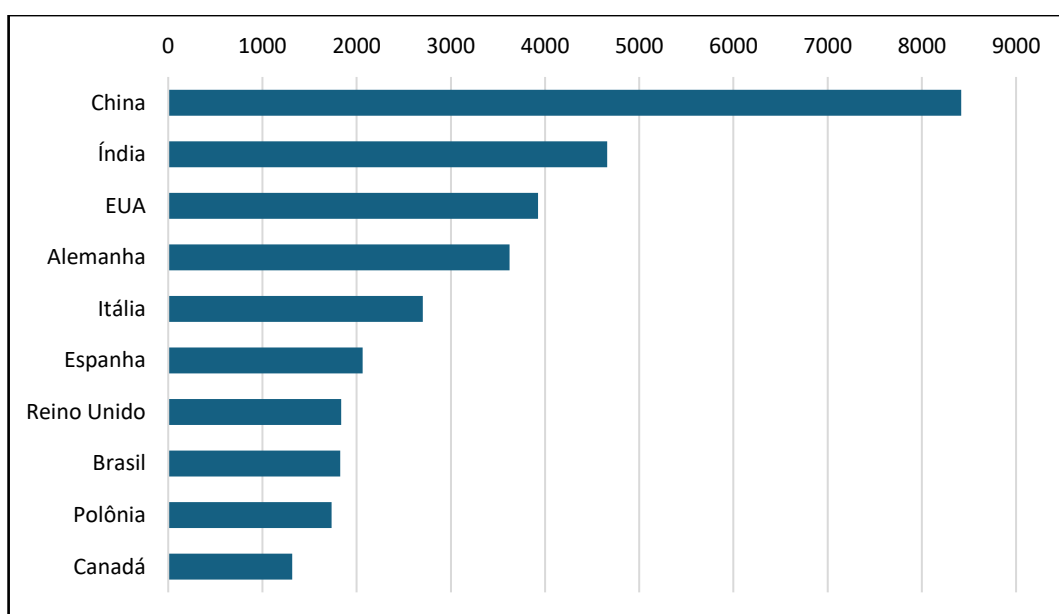
Figura 32 - Principais autores referentes a publicações associadas ao tema "*biogas*" no Brasil.



Fonte: Adaptado de Scopus, 2025.

No recorte geográfico, observa-se que China, Estados Unidos e Índia lideram a produção científica sobre biogás, resultado de políticas voltadas ao incentivo de energias limpas e manejo sustentável de resíduos. A China, em particular, destaca-se pelo volume de investimentos em infraestrutura e pesquisa, buscando reduzir sua dependência de combustíveis fósseis e ampliar a geração distribuída de energia renovável. Em termos quantitativos, a China apresenta, até o ano de 2024, uma quantidade de 8.417 documentos associados a este tema, segundo a plataforma *Scopus*, seguido pela Índia, com 4.660 publicações e EUA com 3.926. Dessa forma, nota-se a relevância do país chinês, que apresenta quase o dobro de documentos em relação ao segundo maior país. Tais dados são representados visualmente pelo gráfico a seguir.

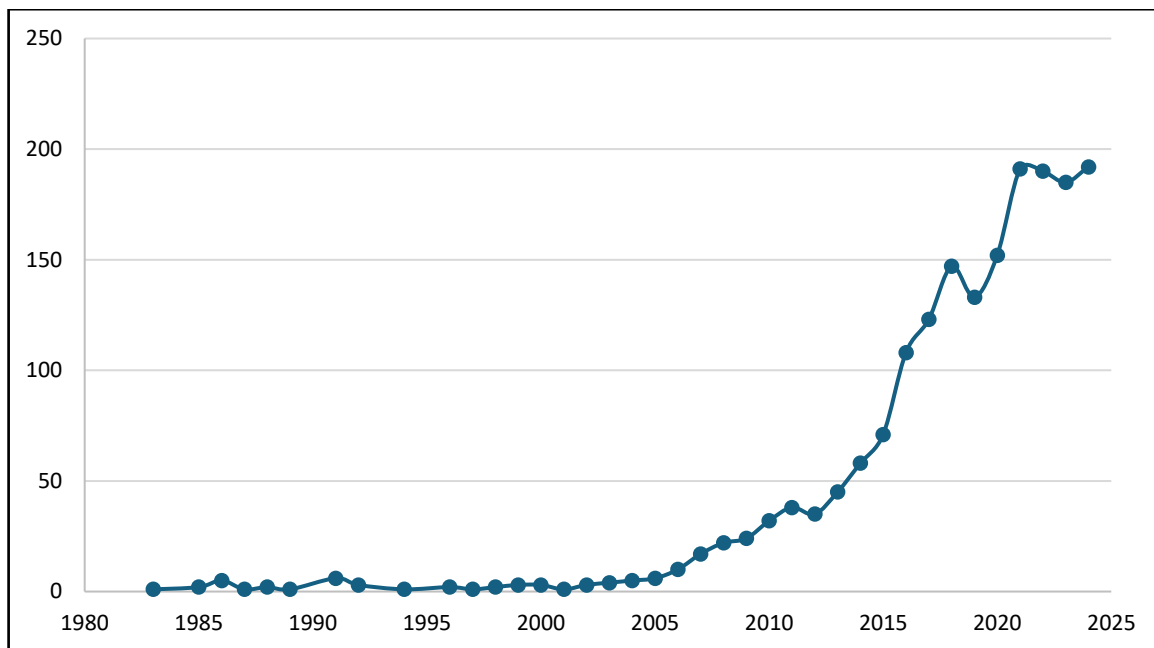
Figura 33 - Principais países referentes a publicações associadas ao tema "*biogas*".



Fonte: Adaptado de Scopus, 2025.

O Brasil, apesar de ainda não figurar entre os principais países em volume de publicações, ocupa a oitava posição e tem apresentado crescimento relevante desde 2010, impulsionado principalmente pelo setor agroindustrial. A ampla disponibilidade de resíduos orgânicos, como vinhaça, esterco, restos de alimentos e lodo de esgoto, associada ao interesse crescente por soluções de energia descentralizada e economia circular, tem motivado diversas iniciativas científicas e tecnológicas no país. Além disso, vale destacar que, apesar do avanço em relação a pesquisas sobre este tema, a implementação em larga escala desta tecnologia ainda é prematura no país. Na sequência é apresentada a quantidade de publicações ao longo do tempo associadas ao biogás no Brasil.

Figura 34 - Quantidade de publicações ao longo do tempo associadas ao tema "*biogas*" no Brasil.



Fonte: Adaptado de Scopus, 2025.

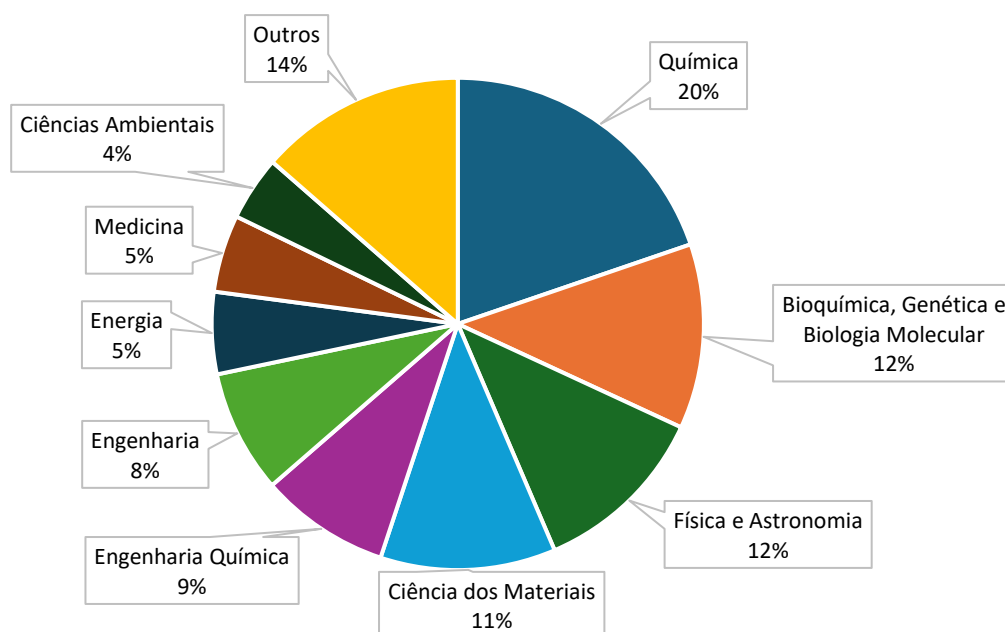
Em síntese, o biogás consolida-se como uma tecnologia estratégica na transição energética sustentável, com crescente produção científica evidenciada pela análise bibliométrica. A interdisciplinaridade do tema, abrangendo desde a otimização de reatores até a purificação para biometano, reflete sua complexidade técnica e potencial integrado à bioeconomia. Além disso, destaca-se o domínio de China e EUA no cenário global, devido a políticas de incentivo e investimentos em infraestrutura, enquanto o Brasil, embora em posição menos destacada quantitativamente, demonstra crescimento impulsionado pelo setor agroindustrial, aproveitando sua abundância de biomassa residual. Contudo, os desafios persistem, especialmente na transposição da pesquisa para a escala industrial, indicando a necessidade de maior integração entre academia, setor produtivo e regulamentações ambientais. Dessa forma, o biogás mantém-se como uma rota promissora, exigindo contínuo desenvolvimento tecnológico e sinergias multissetoriais para consolidar seu papel na matriz energética sustentável.

5.4 HIDROGÊNIO

Assim como o biogás, o hidrogênio aparece como uma alternativa de transição energética global, ganhando destaque na literatura científica por seu potencial como fonte de energia limpa e versátil. Nesse contexto, surge o conceito de “economia do hidrogênio”, que é uma proposta de economia futura baseada no uso do hidrogênio como fonte para o transporte, a geração de energia e o armazenamento de energia, podendo mitigar as mudanças climáticas e promover o crescimento econômico.

A análise sistemática realizada por meio da plataforma *Scopus* demonstra a abrangência multidisciplinar do tema, conforme exposto na Figura 32, que apresenta a distribuição percentual por áreas do conhecimento e evidencia a predominância das ciências químicas e engenharia química, refletindo o enfoque técnico na produção e armazenamento de hidrogênio, além da expressiva presença das áreas de ciência dos materiais, energia, ciências ambientais e bioquímica/microbiologia, evidenciando aplicações diversas, desde rotas termoquímicas até fermentações biológicas e sistemas híbridos com fontes renováveis.

Figura 32 - Distribuição e percentual referente a áreas de estudo para o tema "*hydrogen*".



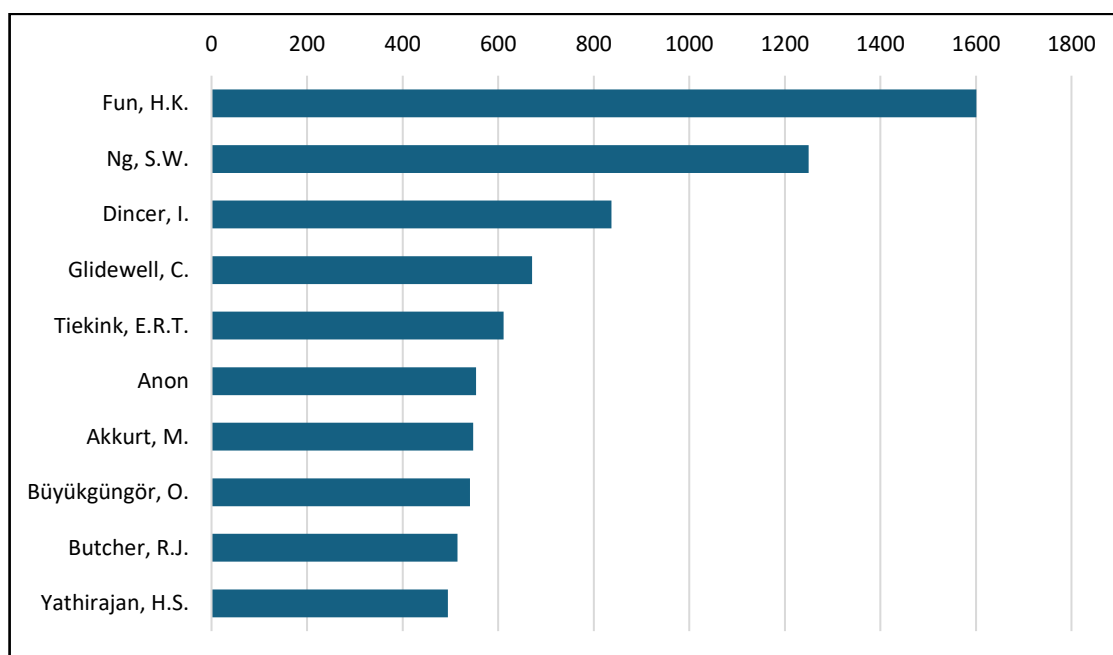
Fonte: Adaptado de Scopus, 2025.

Já a Figura 33, apresentada na sequência, identifica os principais autores em destaque no cenário global. Neste contexto, o pesquisador Hoongkun Kunh Fun, da “Universiti Sains Malaysia”, figura como o autor com maior número de publicações sobre o tema, com contribuições especialmente concentradas nas áreas de estrutura molecular, catálise e materiais

aplicados à produção e armazenamento de hidrogênio, consolidando sua relevância internacional. Dentre suas principais áreas de estudo, destacam-se a química e ciências dos materiais, que representam cerca de 64% de toda sua produção acadêmica.

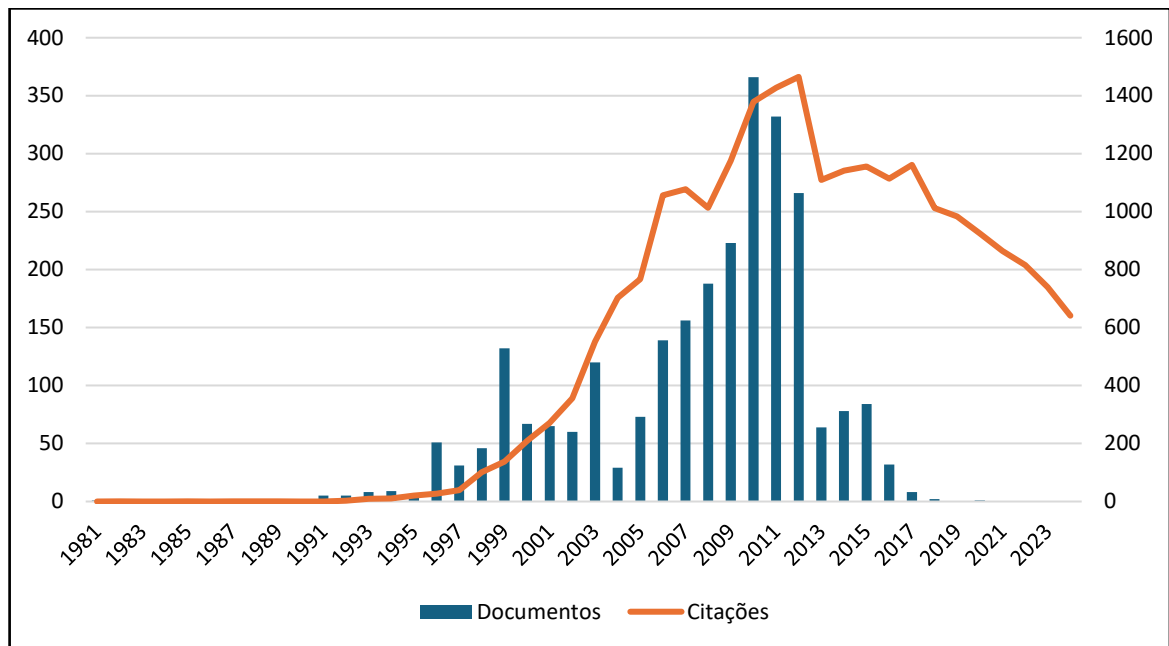
Em complemento, a Figura 34, por sua vez, mostra a evolução do número de publicações e citações deste autor, revelando crescimento acentuado nos últimos 15 anos, compatível com o aumento do interesse global por tecnologias sustentáveis e descarbonizadas. Em termos quantitativos, o autor apresenta atualmente 23.788 citações e 2.652 documentos, sendo 1.601 relacionados ao hidrogênio, o que garante a ele um índice-H de 64, segundo a base de pesquisa *Scopus*.

Figura 33 - Principais autores referentes a publicações associadas ao tema "*hydrogen*" no cenário mundial.



Fonte: Adaptado de Scopus, 2025.

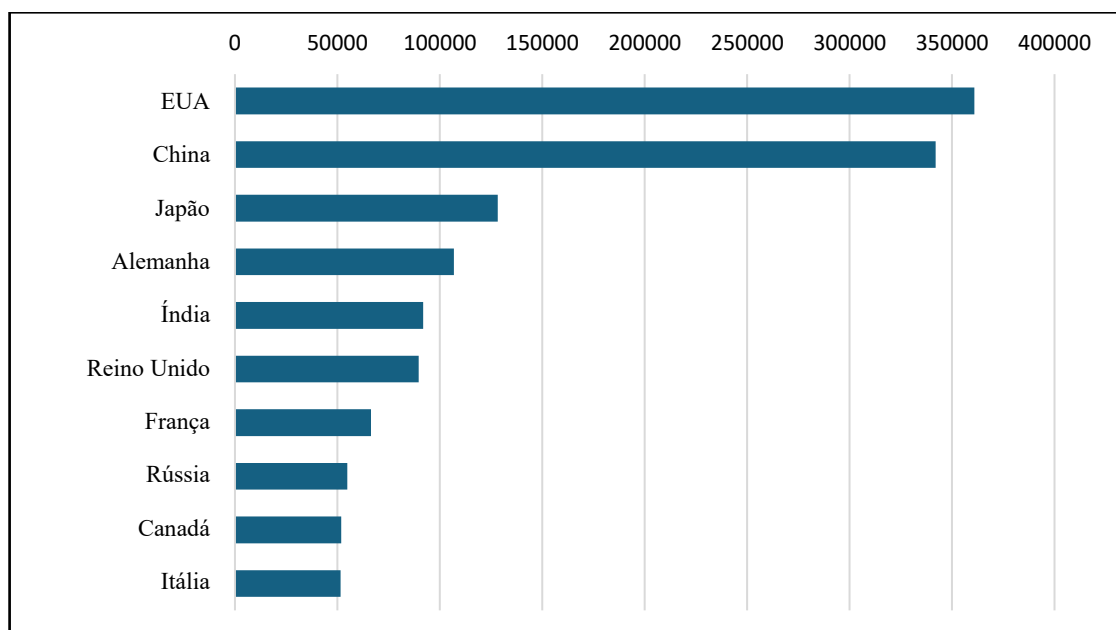
Figura 34 - Quantidade de documentos e citações de Hoongkun Kunh Fun.



Fonte: Adaptado de Scopus, 2025.

No que se refere ao panorama geográfico, a Figura 35 apresenta os dez países com maior produção científica relacionada ao tema. Os Estados Unidos lideram, com um número expressivo de 360.917 documentos associados ao tema, até o ano de 2024. Logo na sequência figura a China, que apresenta 341.904 publicações. Dessa forma, nota-se que tais países se destacam em relação aos demais, com uma diferença expressiva de documentos.

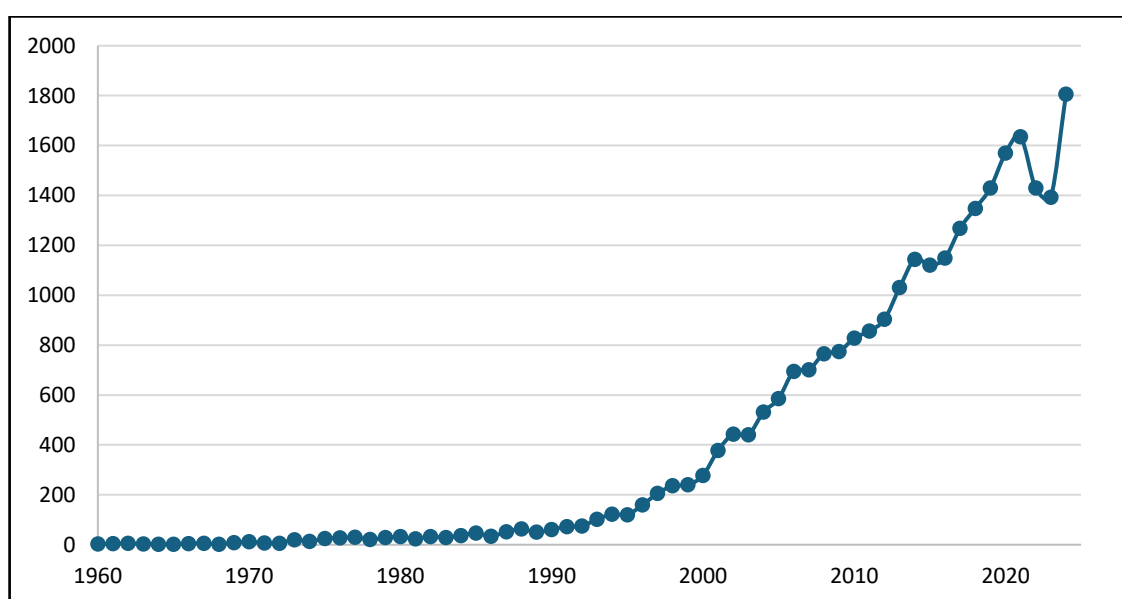
Figura 35 - Principais países referentes a publicações associadas ao tema "*hydrogen*".



Fonte: Adaptado de Scopus, 2025.

O Brasil, por sua vez, aparece na 15^o colocação em relação ao volume de documentos, apresentando um número de 26.518 publicações. A Figura 36, que apresenta a evolução temporal das publicações científicas sobre o tema hidrogênio no Brasil, revela um crescimento progressivo e constante a partir da década de 2000, com destaque mais expressivo após 2010. Esse aumento evidencia o interesse crescente da comunidade científica brasileira por tecnologias associadas à produção, armazenamento e aplicação do hidrogênio como fonte de energia alternativa e sustentável.

Figura 36 - Quantidade de publicações ao longo do tempo associadas ao tema "*hydrogen*" no Brasil.



Fonte: Adaptado de Scopus, 2025.

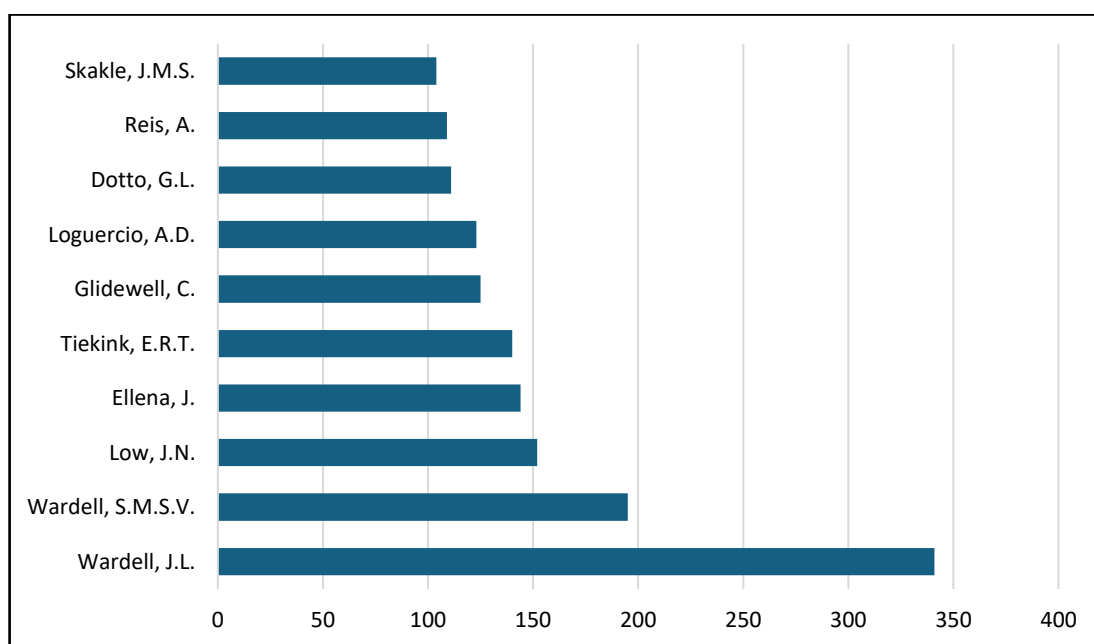
O cenário observado pode ser justificado por diversos fatores. Primeiramente, o Brasil passou a integrar mais ativamente a agenda internacional de descarbonização, buscando alternativas que complementem sua matriz energética, majoritariamente renovável, mas ainda fortemente dependente de hidroeletricidade. Nesse contexto, o hidrogênio, em especial o hidrogênio verde, produzido a partir de fontes renováveis como biomassa e energia solar, surgiu como um vetor estratégico. Além disso, o país possui grande disponibilidade de resíduos orgânicos e subprodutos agroindustriais, como vinhaça, lodo de esgoto e restos da agropecuária, que são matérias-primas potenciais para rotas biológicas de produção de hidrogênio, o que favoreceu a atuação de grupos de pesquisa em biotecnologia, engenharia química e ciências ambientais.

No entanto, apesar do crescimento identificado, observa-se que o Brasil ainda possui espaço para expansão, principalmente em termos de aplicações em escala industrial e

consolidação de políticas públicas voltadas à economia do hidrogênio. O aumento da produção científica nos últimos anos aponta para uma base sólida de conhecimento técnico e científico que, se bem articulada com o setor produtivo, pode alavancar o protagonismo brasileiro na transição energética global.

Em relação a autores no cenário brasileiro, destaca-se James Lewis Wardell, que atualmente é professor visitante na Fundação Oswaldo Cruz - Rio de Janeiro possuindo o título de professor emérito - Universidade de Aberdeen (Reino Unido). Com 692 documentos (341 associados ao hidrogênio), 6642 citações e índice-H de 35, o autor tem experiência na área de química, com ênfase em compostos organometálicos, atuando principalmente nos seguintes temas: cristalografia, arranjos supramoleculares e síntese de complexos e compostos orgânicos. O gráfico apresentado na sequência mostra os principais autores brasileiros que atuam na temática do hidrogênio.

Figura 37 - Principais autores referentes a publicações associadas ao tema "*hydrogen*" no Brasil.



Fonte: Adaptado de Scopus, 2025.

Dessa forma, com base na análise sistemática desenvolvida, conclui-se que o tema hidrogênio ocupa posição de destaque no cenário científico global, consolidando-se como um dos principais pilares da transição energética rumo a uma matriz mais limpa e sustentável. A literatura evidencia seu caráter altamente multidisciplinar, abrangendo desde ciências químicas e engenharia até biotecnologia e energia ambiental, refletindo a variedade de rotas tecnológicas disponíveis para sua produção e aplicação. Além disso, a liderança de países como Estados

Unidos e China reforça a importância de políticas públicas robustas e investimentos contínuos em inovação. Enquanto isso, no contexto brasileiro, embora ainda distante das potências globais em volume de publicações, o crescimento expressivo observado a partir de 2010 revela o amadurecimento da comunidade científica nacional e seu alinhamento com as demandas por soluções sustentáveis. Dessa forma, o aproveitamento de resíduos orgânicos, a atuação de grupos de pesquisa especializados e a presença de autores com contribuições relevantes, como James Lewis Wardell, indicam que o Brasil possui potencial para avançar na consolidação de uma economia do hidrogênio, desde que haja integração entre pesquisa científica, setor produtivo e estratégias governamentais.

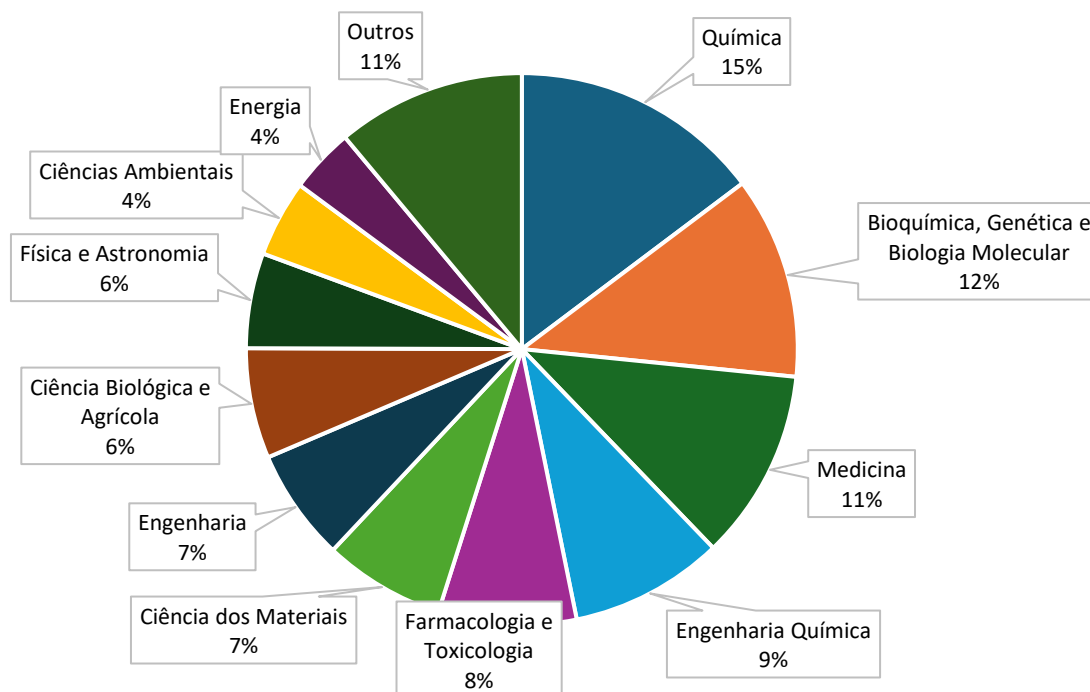
5.5 ETANOL

Como já apresentado, o etanol é amplamente reconhecido como um dos biocombustíveis mais relevantes no cenário energético global, especialmente no contexto da busca por alternativas renováveis e de baixo impacto ambiental. Sua produção a partir de biomassa vegetal, em especial da cana-de-açúcar no caso brasileiro, insere-se nas estratégias de descarbonização e diversificação da matriz energética. Diante disso, observa-se um aumento significativo do interesse científico em torno do tema, envolvendo diversas áreas do conhecimento, como engenharia química, ciências agrárias, energia, biotecnologia e meio ambiente. Dessa forma, este tópico tem como objetivo mapear a evolução das publicações científicas sobre o etanol, identificando as principais áreas de estudo, autores de destaque, países com maior produção acadêmica e tendências de pesquisa, a fim de compreender o papel desse biocombustível na transição energética e no desenvolvimento sustentável.

Inicialmente, analisou-se o tema no contexto das áreas de estudo, o que evidenciou que o etanol apresenta uma distribuição homogênea, com nenhuma área se destacando muito em relação as outras, conforme representado na figura 38. Nota-se que as áreas de química (15%), bioquímica, genética e biologia molecular (12%) e medicina (11%) concentram a maior parte das pesquisas, indicando um foco significativo na caracterização molecular, nos mecanismos bioquímicos de produção e nos efeitos fisiológicos do etanol, inclusive em contextos clínicos e toxicológicos. Além disso, a engenharia química (9%) e as ciências dos materiais (7%) também apresentam relevância, refletindo o interesse em processos industriais, tecnologias de conversão e aplicação em combustíveis. Outras áreas como farmacologia e toxicologia, ciências ambientais e ciências biológicas e agrícolas completam o panorama, demonstrando o caráter

multidisciplinar do tema, que abrange desde a produção e uso do etanol como biocombustível até seus impactos ambientais e biomédicos.

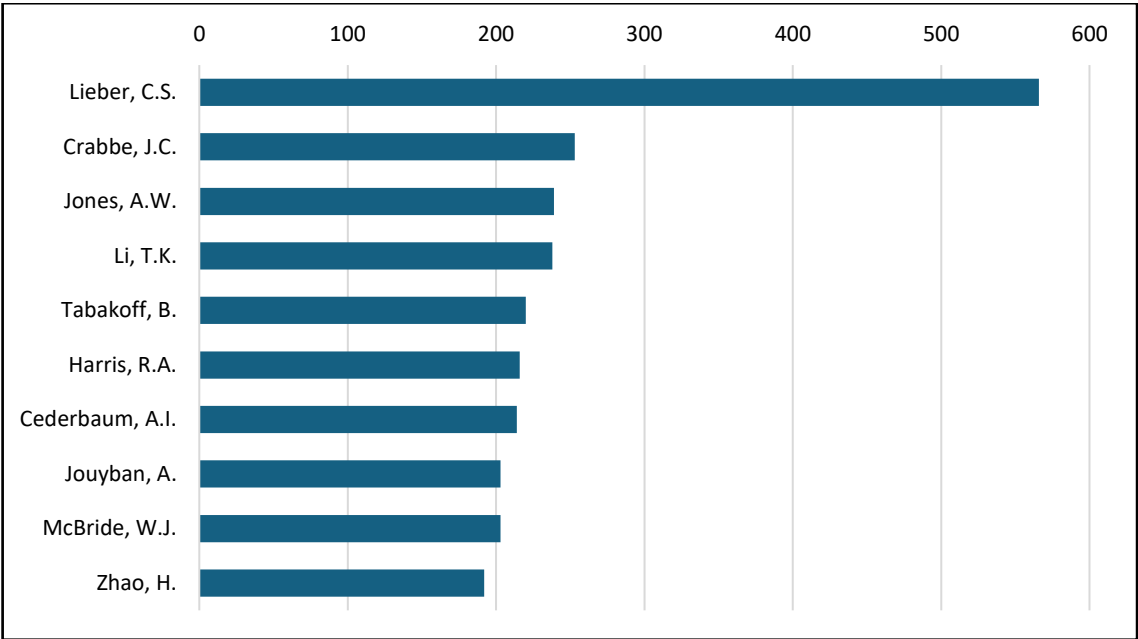
Figura 38 - Distribuição e percentual referente a áreas de estudo para o tema "*ethanol*".



Fonte: Adaptado de Scopus, 2025.

Já em relação aos principais autores associados ao tema do etanol, o destaque vai para Charles Saul Lieber, que lidera o ranking com 566 publicações, indicando uma contribuição expressiva na área, seguido por autores como John Crabbe e Alfred Jones, conforme representado na figura a seguir. Nota-se que Lieber apresenta um número muito maior de documentos se comparado com os demais autores, o que mostra sua ampla contribuição e dedicação em relação ao tema, já que conduziu estudos clínicos e experimentais por mais de quatro décadas, com ênfase em fígado, nutrição e fisiopatologia gastrointestinal, ou seja, em áreas relacionadas principalmente a medicina e bioquímica.

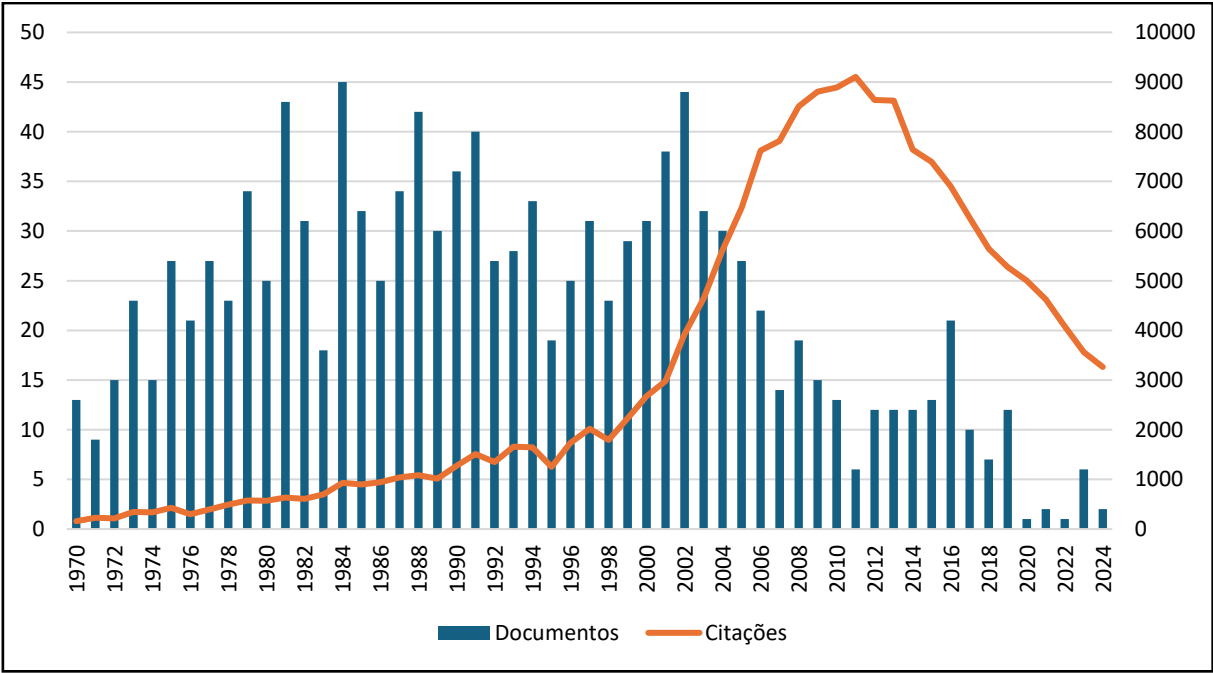
Figura 39 - Principais autores referentes a publicações associadas ao tema "*ethanol*" no cenário mundial.



Fonte: Adaptado de Scopus, 2025.

Em termos quantitativos, Lieber apresenta 1.300 documentos no total, 183.614 citações e um elevado índice-H de 198, mostrando sua relevância no cenário acadêmico. A evolução de documentos e citações do autor é apresentada na sequência.

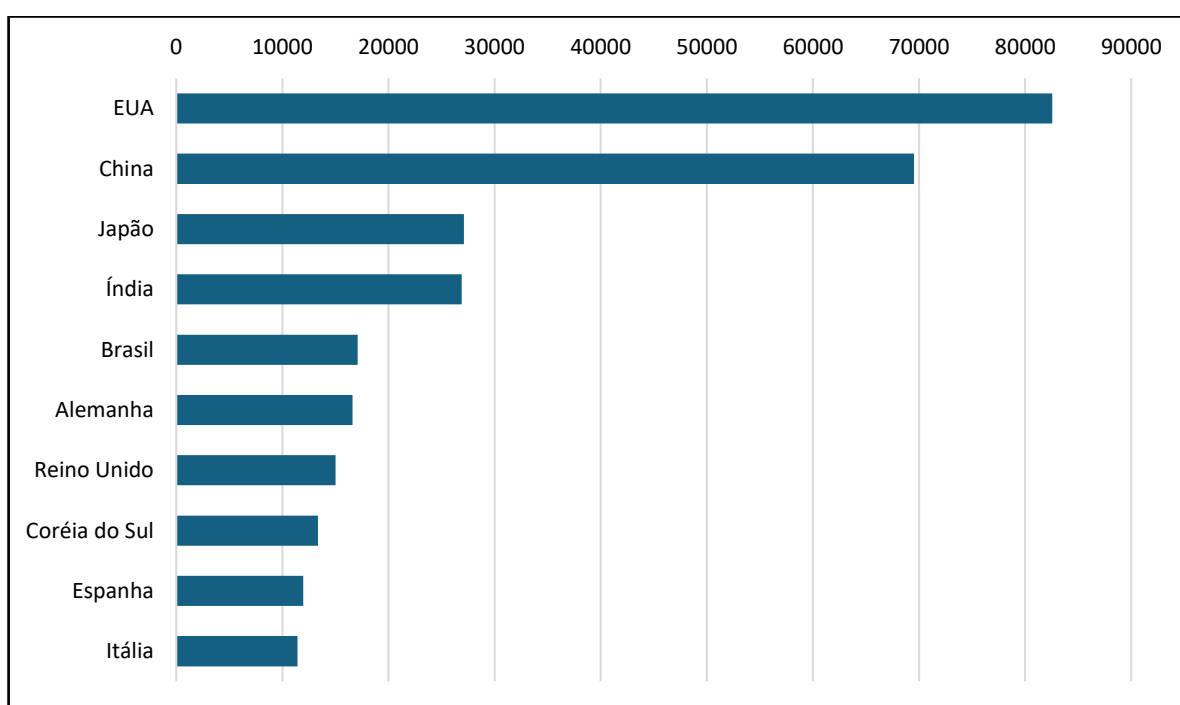
Figura 40 - Quantidade de documentos e citações de Charles Lieber..



Fonte: Adaptado de Scopus, 2025.

Em relação a aspectos territoriais, a Figura 41 apresenta os países com maior número de publicações científicas relacionadas ao tema etanol, revelando o protagonismo dos Estados Unidos (82.558 documentos), que lideram com certa vantagem, seguidos por China e Japão, que apresentam 69.526 e 27.103 documentos, respectivamente. Este cenário se assemelha ao já apresentado no tópico referente ao hidrogênio e, mais uma vez, pode ser atribuído ao elevado investimento desses países em pesquisa e desenvolvimento de biocombustíveis, tanto na perspectiva energética quanto biomédica, além de políticas públicas robustas voltadas à inovação tecnológica e à sustentabilidade.

Figura 41 - Principais países referentes a publicações associadas ao tema "*ethanol*".

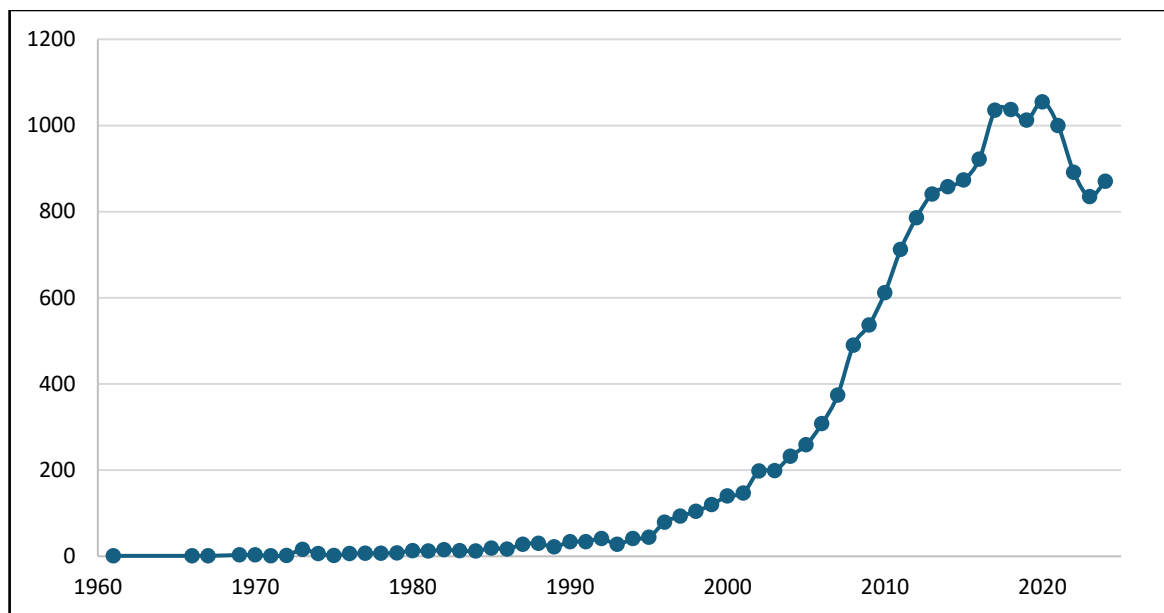


Fonte: Adaptado de Scopus, 2025.

O Brasil ocupa uma posição de destaque no ranking, situando-se entre os cinco países com maior produção científica sobre o tema, com 17.086 documentos. Esse desempenho é justificado pela relevância histórica e estratégica do etanol na matriz energética brasileira, especialmente por sua produção em larga escala a partir da cana-de-açúcar, o que faz do país um dos líderes mundiais na tecnologia de etanol combustível. Além disso, a forte presença de instituições de pesquisa e programas governamentais voltados à bioenergia, como o RenovaBio, que tem o objetivo de expandir a produção de biocombustíveis, fundamentada na previsibilidade e sustentabilidade ambiental, econômica e social, também contribui para o fortalecimento da produção científica nacional. Na sequência é apresentada a evolução de

publicações associadas ao etanol no Brasil, que evidencia um grande crescimento de pesquisas a partir dos anos 2000.

Figura 42 - Quantidade de publicações ao longo do tempo associadas ao tema "*ethanol*" no Brasil.

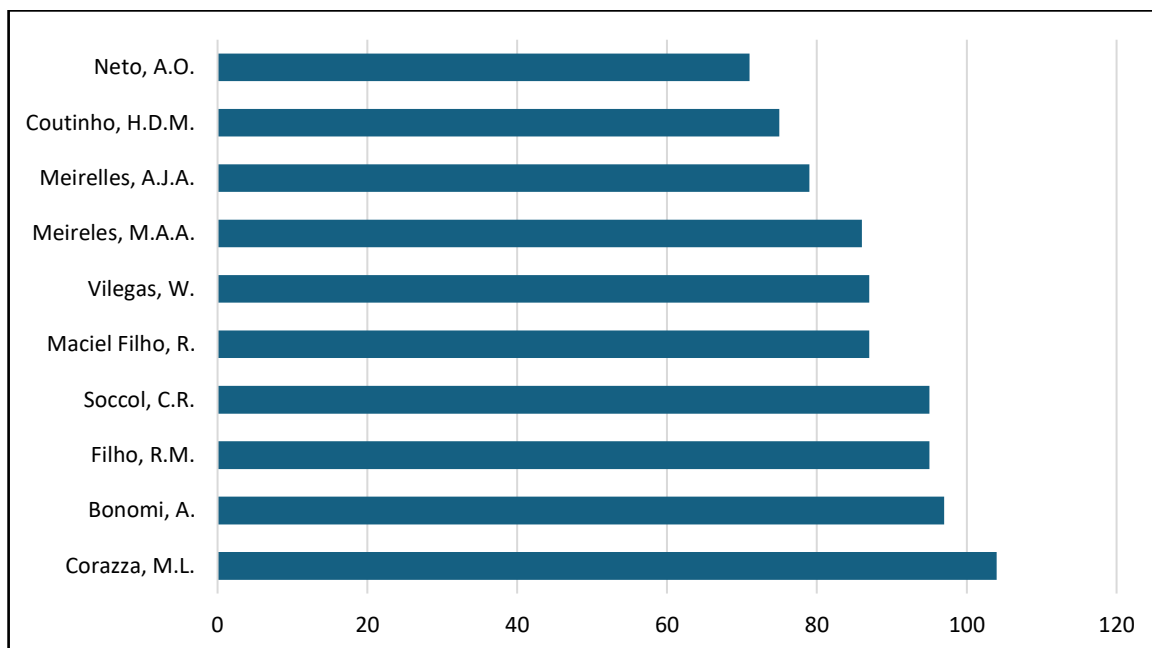


Fonte: Adaptado de Scopus, 2025.

Já em relação aos principais autores no contexto brasileiro, destaca-se Marcos Lúcio Corazza com 104 documentos associados ao etanol. Segundo a plataforma Lattes, Corazza atualmente é professor adjunto na Universidade Federal do Paraná e possui experiência nas áreas de engenharia química e de alimentos, com ênfase em termodinâmica de processos de separação e modelagem e simulação de processos. Além disso, tem atuado principalmente nos temas relacionados a medidas experimentais de equilíbrio de fases a baixas e altas pressões, modelagem termodinâmica e estabilidade de sistemas multicomponente e multifásicos, aplicações com fluidos supercríticos e gases pressurizados, técnicas de produção e separação de biodiesel, extração supercrítica e transformação de óleos vegetais para produtos aplicados à indústria química e de alimentos.

A figura 43 na sequência apresenta os principais autores associados a temática do etanol no contexto brasileiro, evidenciando Corazza como principal autor, seguido por Antônio Bonomi, também da área de engenharia química.

Figura 43 - Principais autores referentes a publicações associadas ao tema "*ethanol*" no Brasil.



Fonte: Adaptado de Scopus, 2025.

Dessa forma, o cenário evidencia não apenas o interesse global por temas relacionados ao etanol, mas também a capacidade científica brasileira de gerar conhecimento relevante em uma área alinhada às vocações produtivas e aos compromissos com a transição energética.

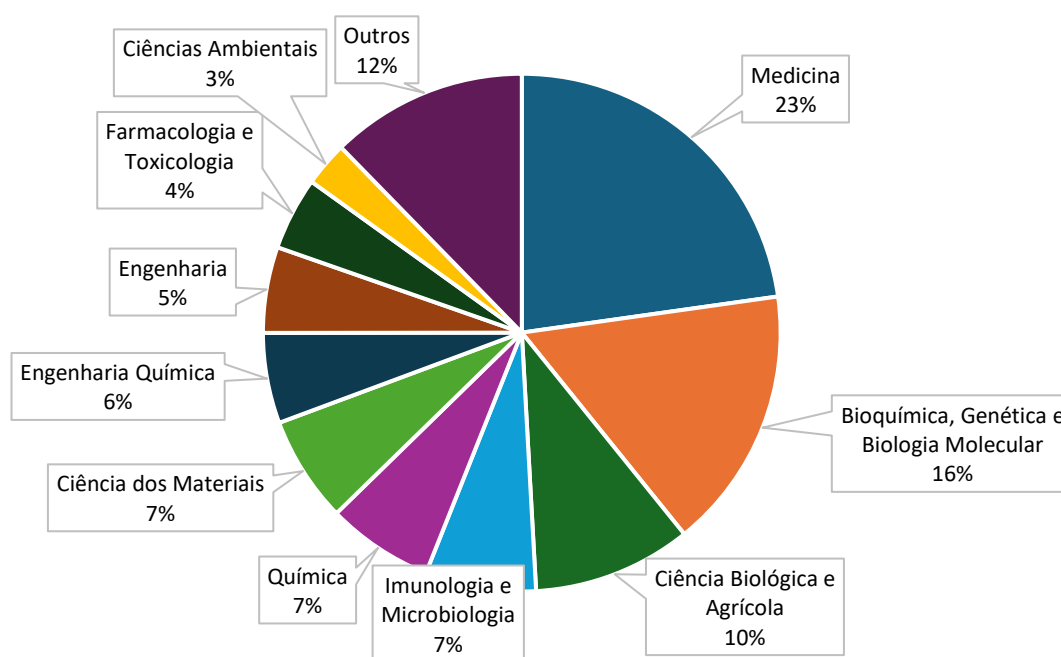
5.6 ÁCIDO LÁTICO

Por fim, a última palavra-chave abordada individualmente é "*acid lactic*", composto amplamente estudado por sua versatilidade de aplicações em diferentes setores, incluindo alimentos, farmacêutica, cosméticos, biomateriais e energia. Vale destacar que ele tem ganhado destaque tanto em processos biotecnológicos sustentáveis quanto em formulações médicas e terapêuticas, já que é um produto natural da fermentação de açúcares por bactérias lácticas. Dessa forma, nos últimos anos, o crescente interesse por rotas de produção ecológicas, biodegradabilidade e uso em biopolímeros consolidou o ácido lático como tema relevante na literatura científica.

A Figura 44 apresenta a distribuição percentual das áreas de estudo relacionadas ao tema ácido lático. Observa-se que a medicina lidera com 23% das publicações, o que reflete o interesse em suas aplicações clínicas e fisiológicas, especialmente em contextos como metabolismo muscular, acidose láctica e terapias celulares. Em seguida, destacam-se bioquímica, genética e biologia molecular (16%) e ciência biológica e agrícola (10%), áreas

que investigam os mecanismos de produção microbiana e as rotas metabólicas envolvidas. Além disso, também possuem representatividade significativa as áreas de química, ciência dos materiais, engenharia química e imunologia e microbiologia, com 6% a 7% cada, o que reforça o interesse por aplicações industriais e biomédicas do composto. Por fim, a presença de áreas como ciências ambientais, farmacologia/toxicologia e enfermagem demonstra ainda o amplo escopo do ácido láctico, desde seu impacto ambiental até seu uso em produtos terapêuticos e biomédicos.

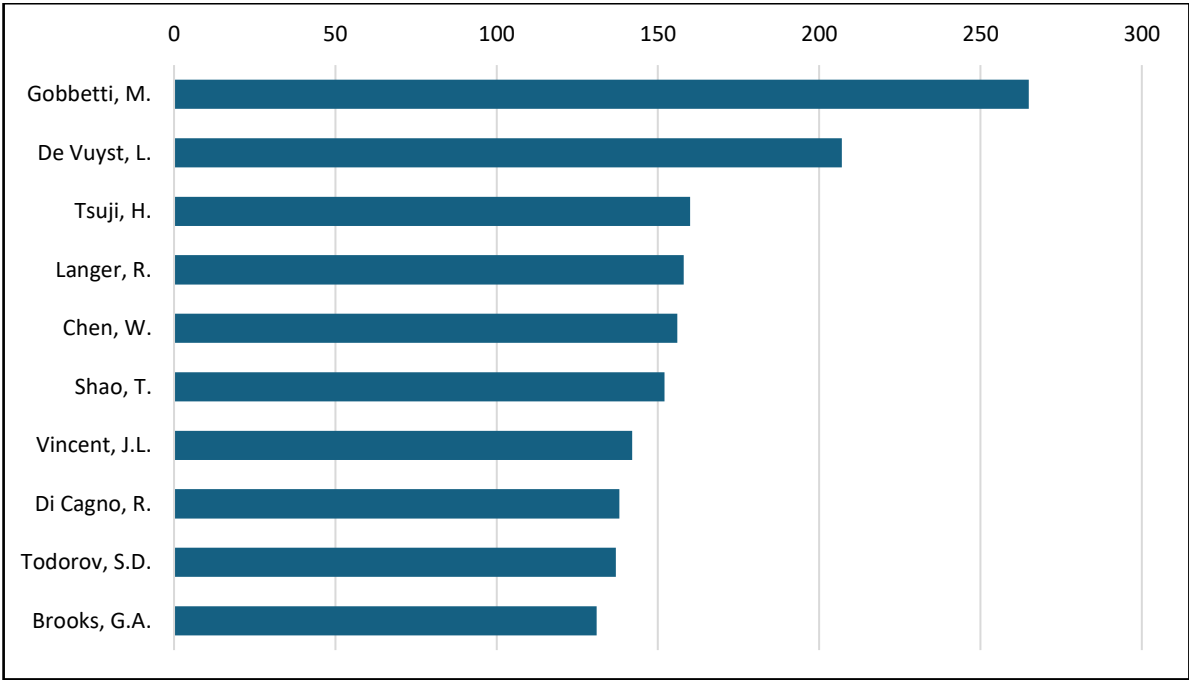
Figura 44 - Distribuição e percentual referente a áreas de estudo para o tema "*acid lactic*".



Fonte: Adaptado de Scopus, 2025.

Em relação aos principais autores em número de publicações associadas ao tema ácido láctico no cenário mundial, o destaque vai para Marco Gobetti, professor de microbiologia dos alimentos da “Free University of Bozen-Bolzano”, que apresenta significativa contribuição científica no campo, especialmente nas áreas de microbiologia alimentar, fermentações lácticas e probióticos. Em termos quantitativos, Gobetti conta com 447 documentos no total, sendo 265 relacionados ao ácido láctico, além de 34.613 citações e um índice-H de 104. Em seguida, aparecem autores como Luc De Vuyst, e Robert Langer, que concluiu sua graduação em engenharia química na Universidade Cornell e escreveu mais de 1.250 artigos, além de possuir quase 1.050 patentes, que foram licenciadas ou sublicenciadas para mais de 250 empresas farmacêuticas, químicas, de biotecnologia e de dispositivos médicos. A figura a seguir apresenta os principais autores associados ao tema do ácido láctico.

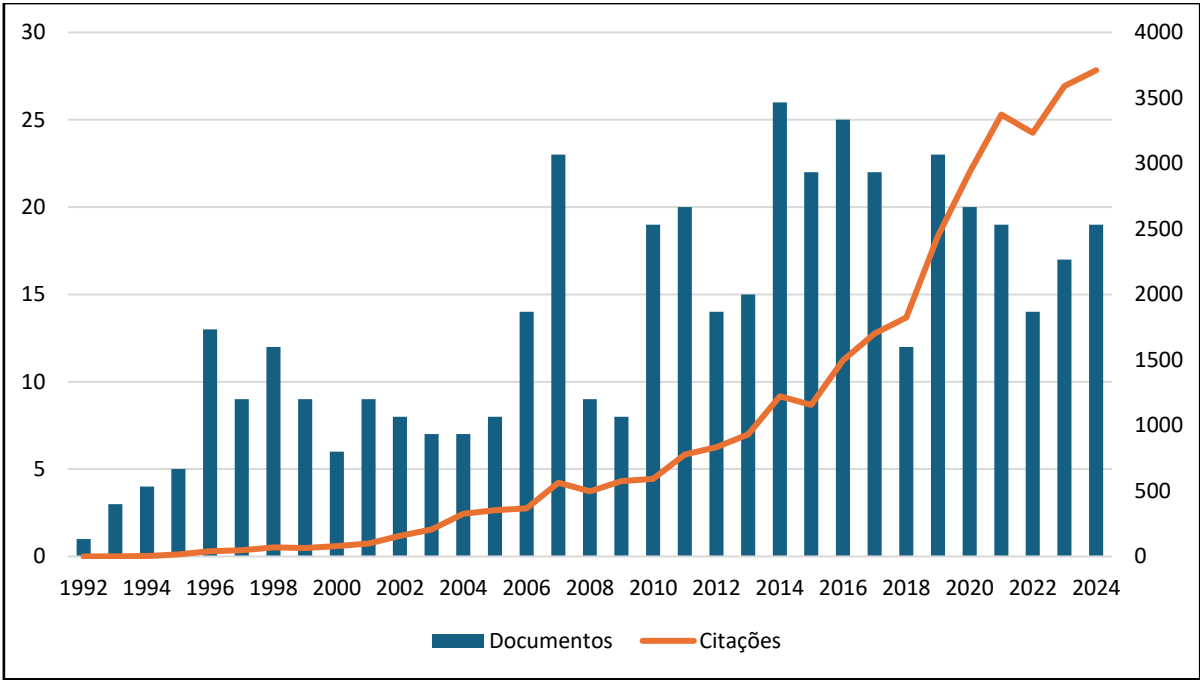
Figura 45 - Principais autores referentes a publicações associadas ao tema "*acid lactic*" no cenário mundial.



Fonte: Adaptado de Scopus, 2025.

Nesse contexto, a Figura 46 mostra a evolução temporal da produção científica e das citações do principal autor em termos de volume de documentos associados ao ácido láctico, Marco Gobbetti.

Figura 46 - Quantidade de documentos e citações de Marco Gobbetti.

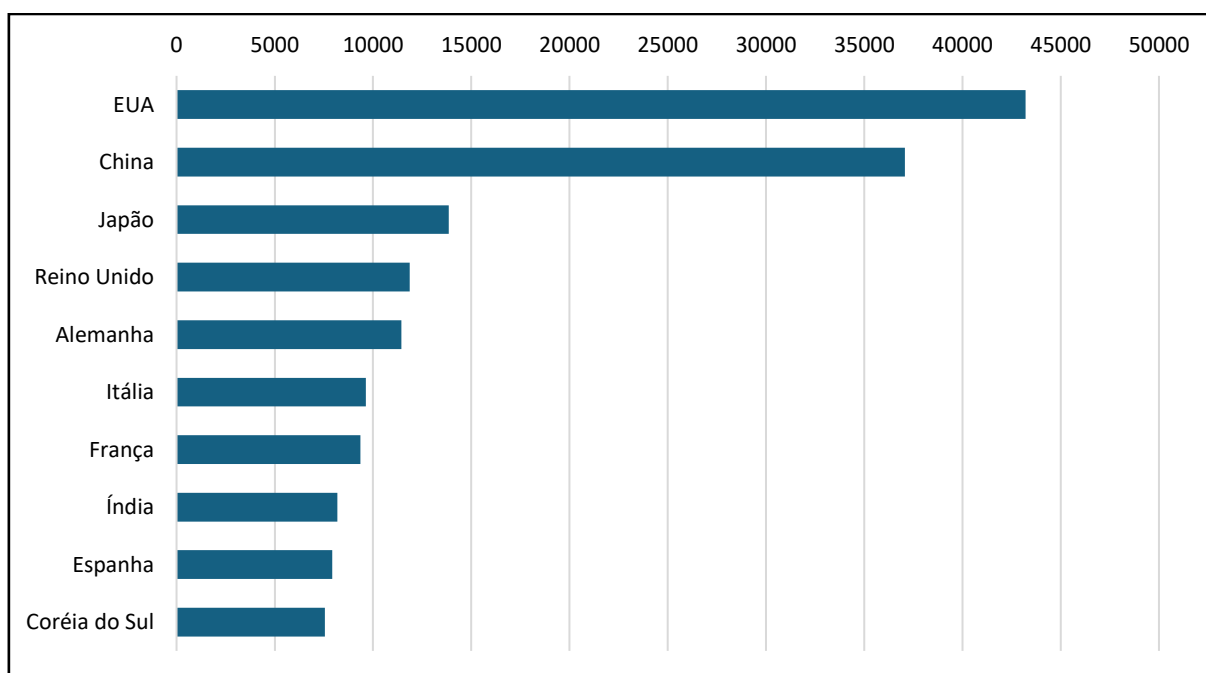


Fonte: Adaptado de Scopus, 2025.

Observa-se um crescimento consistente no número de documentos publicados desde os anos 1990, com picos mais expressivos a partir de 2010. O número de citações acompanha essa trajetória, com forte aumento nos últimos anos, indicando não apenas volume, mas também impacto e relevância acadêmica. A consolidação de Gobbetti como referência internacional está associada à qualidade de suas pesquisas e à importância crescente do ácido lático em processos fermentativos, alimentos funcionais e aplicações industriais sustentáveis.

Em relação aos principais países, nota-se novamente o protagonismo de Estados Unidos e China, assim como observado para os demais temas. A Figura 47 na sequência apresenta os países com maior número de publicações associadas ao tema ácido lático, evidenciando a liderança dos Estados Unidos, que superam a marca de 40.000 documentos. Esse destaque se justifica pela forte atuação em pesquisa aplicada à biotecnologia, indústria de alimentos e desenvolvimento de biomateriais, áreas nas quais o ácido lático possui grande relevância. Em segundo lugar está a China, com um volume expressivo de publicações, seguida pelo Japão, ambos impulsionados por políticas nacionais voltadas à inovação em bioprocessos e sustentabilidade industrial. Além disso, na sequência aparecem Reino Unido, Alemanha, Itália e França, países com tradição em pesquisa científica e com forte presença na indústria alimentícia e farmacêutica, setores que utilizam amplamente o ácido lático em aplicações funcionais e tecnológicas.

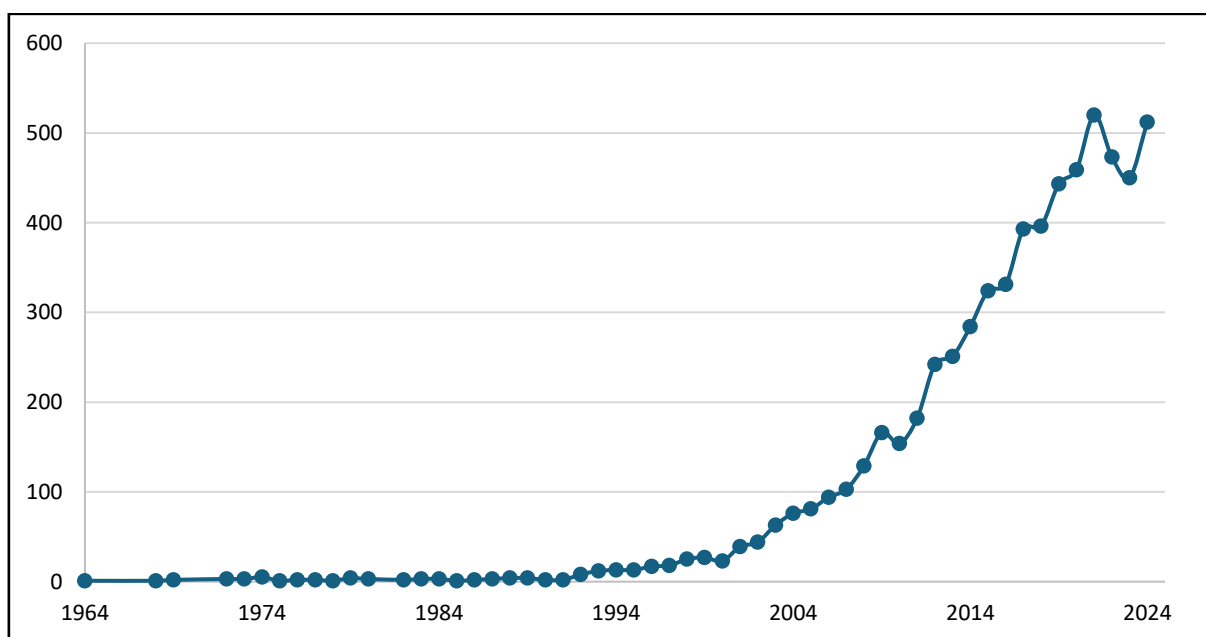
Figura 47 - Principais países referentes a publicações associadas ao tema "*acid lactic*".



Fonte: Adaptado de Scopus, 2025.

A ausência do Brasil no gráfico indica que, apesar de seu potencial agroindustrial e biotecnológico, o país ainda tem espaço para crescer em termos de produção científica voltada ao ácido láctico. Vale ressaltar também que, apesar disso, o Brasil apresentou grande crescimento no número de documentos a partir dos anos 2000 e atualmente conta com 6.419 publicações, o que o coloca na décima segunda posição mundial. Na sequência é apresentado a evolução do número de publicações associados ao tema do ácido láctico no Brasil.

Figura 48 - Quantidade de publicações ao longo do tempo associadas ao tema "*acid lactic*" no Brasil.

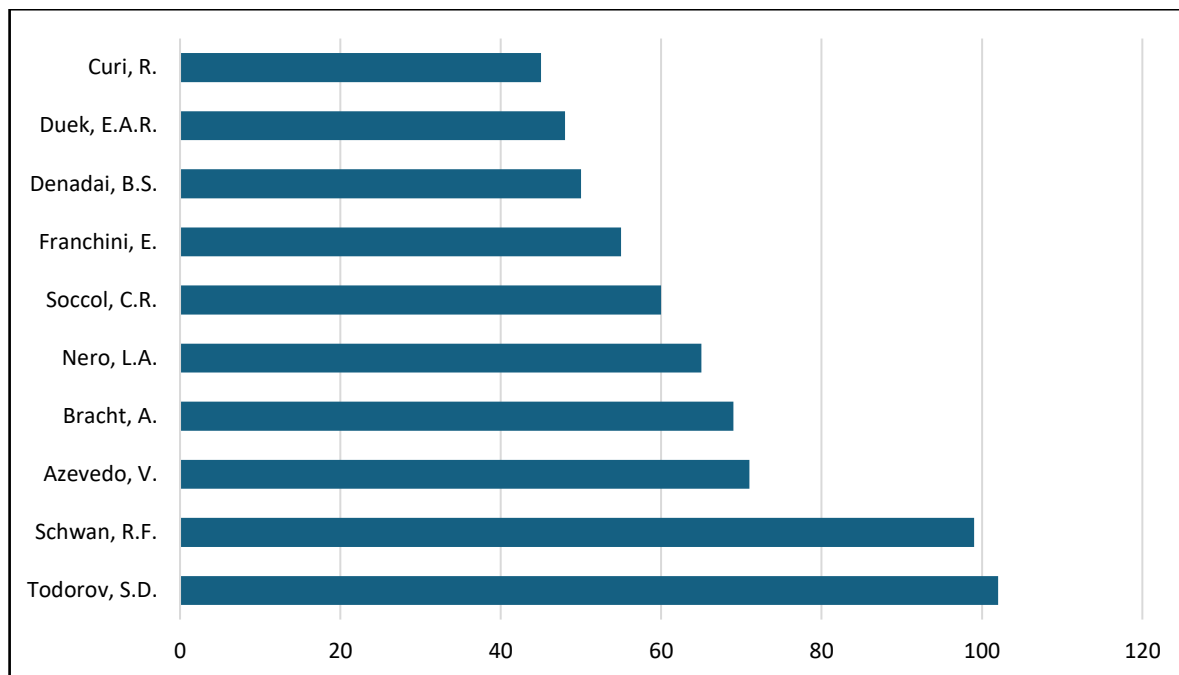


Fonte: Adaptado de Scopus, 2025.

Seguindo no contexto brasileiro, o autor que mais se destaca é Svetoslav Todorov, professor da Universidade de São Paulo, Faculdade de Ciências Farmacêuticas, Departamento de Alimentos e Nutrição Experimental desde janeiro de 2023. Dentre as principais áreas de pesquisa do autor destaca-se imunologia e microbiologia, ciência biológica e agrária e bioquímica, genética e biologia molecular, que somam 75% de todas as publicações de Todorov. Vale ressaltar ainda que o autor conta com 272 documentos, sendo 102 documentos associados ao ácido láctico, além de 9.453 citações, garantindo um índice-H de 59.

Outro nome que se destaca é Rosane Schwan, professora titular na Universidade Federal de Lavras, com 99 documentos relacionados ao tema. Assim como Todorov, as principais áreas de atuação da autora são imunologia e microbiologia, ciência biológica e agrária e bioquímica, genética e biologia molecular, ressaltando o potencial do ácido láctico nestes meios. Na figura da sequência são apresentados os principais autores no contexto brasileiro.

Figura 49 - Principais autores referentes a publicações associadas ao tema "*acid lactic*" no Brasil.



Fonte: Adaptado de Scopus, 2025.

Diante dos dados analisados, conclui-se que o ácido láctico é um tema de significativa relevância científica, com ampla aplicação em diferentes áreas, especialmente na medicina, biotecnologia, microbiologia e indústria de alimentos. A produção acadêmica mundial é liderada por países como Estados Unidos, China e Japão, impulsionada por políticas voltadas à inovação e sustentabilidade, enquanto no Brasil, embora ainda não figure entre os principais produtores de conhecimento, observa-se um crescimento consistente nas últimas décadas, com destaque para pesquisadores como Svetoslav Todorov e Rosane Schwan. Por fim, a consolidação do ácido láctico como objeto de estudo reflete seu potencial estratégico em tecnologias limpas, alimentos funcionais e formulações terapêuticas, reforçando sua importância na agenda científica e industrial contemporânea.

5.7 COMBINAÇÃO DE PALAVRAS-CHAVE

A crescente demanda por soluções sustentáveis e pela valorização de resíduos agroindustriais tem impulsionado a pesquisa científica sobre o aproveitamento do soro de leite, subproduto abundante da indústria láctea. Tradicionalmente tratado como resíduo de difícil descarte, devido a sua elevada carga orgânica, o soro tem emergido como recurso promissor em diversas aplicações industriais e bioenergéticas, destacando-se como matéria-prima para

produção de biocombustíveis, biofertilizantes e bioprodutos, já que apresenta alto conteúdo de nutrientes e carboidratos fermentáveis. Nesse contexto, a presente revisão sistemática visa analisar a integração temática entre o soro de leite e os principais produtos de interesse energético e biotecnológico (biogás, etanol, hidrogênio e ácido lático), por meio da combinação de palavras-chave em bases científicas consolidadas, como *Scopus* e *Web of Science*. Nesse contexto, a palavra-chave “whey” foi fixada em todas as combinações e associada com os diferentes produtos de interesse, já que o soro de leite figura como aspecto central desta análise.

Primeiramente, foi realizada uma análise quantitativa em relação ao número de documentos para cada associação de palavras-chave. Dessa forma, a Tabela 11, extraída da base *Scopus*, revela que a combinação "whey; acid lactic" foi a que apresentou o maior número de publicações (2.005 documentos), seguida por "whey; hydrogen" (1979), "whey; ethanol" (850), "whey; anaerobic digestion" (437) e "whey; biogas" (346), respectivamente. Esse panorama evidencia o predomínio de pesquisas voltadas à fermentação láctica, provavelmente motivadas pela ampla aplicação do ácido lático em alimentos, cosméticos e bioplásticos. Por outro lado, a forte presença de documentos relacionados ao hidrogênio sugere um interesse crescente nas rotas biotecnológicas de produção de bio-hidrogênio a partir de soro de leite, especialmente via fermentação escura, processo no qual este subproduto se mostra altamente viável como substrato.

Tabela 11 - Quantidade de publicações obtidas a partir da combinação de palavras-chave na base de dados *Scopus*.

Palavras-Chave	Período de Resultados	Quantidade de Publicações
<i>whey; anaerobic digestion</i>	1974 - 2024	437
<i>whey; biogás</i>	1983 - 2024	346
<i>whey; etanol</i>	1970 - 2024	850
<i>whey; hydrogen</i>	1962 - 2024	1979
<i>whey; acid lactic</i>	1960 - 2024	2005

Fonte: Adaptado de Scopus, 2025.

Tal processo foi realizado de maneira análoga para a plataforma *Web of Science*, como meio de comparação. Assim, a tabela 12 confirma essa tendência, destacando novamente a liderança da combinação "whey; acid lactic" com 2.689 publicações, seguida por "whey; hydrogen" (1.420), "whey; ethanol" (1.195), "whey; anaerobic digestion" (658) e "whey; biogas" (393). A ligeira diferença entre os totais das bases evidencia não apenas variações na indexação, mas também reforça a robustez da produção científica nas áreas em questão.

Tabela 12 - Quantidade de publicações obtidas a partir da combinação de palavras-chave na base de dados *Web of Science*.

Palavras-Chave	Período de Resultados	Quantidade de Publicações
<i>whey; anaerobic digestion</i>	1960 - 2024	658
<i>whey; biogás</i>	1960 - 2024	393
<i>whey; etanol</i>	1960 - 2024	1195
<i>whey; hydrogen</i>	1960 - 2024	1420
<i>whey; acid lactic</i>	1960 - 2024	2689

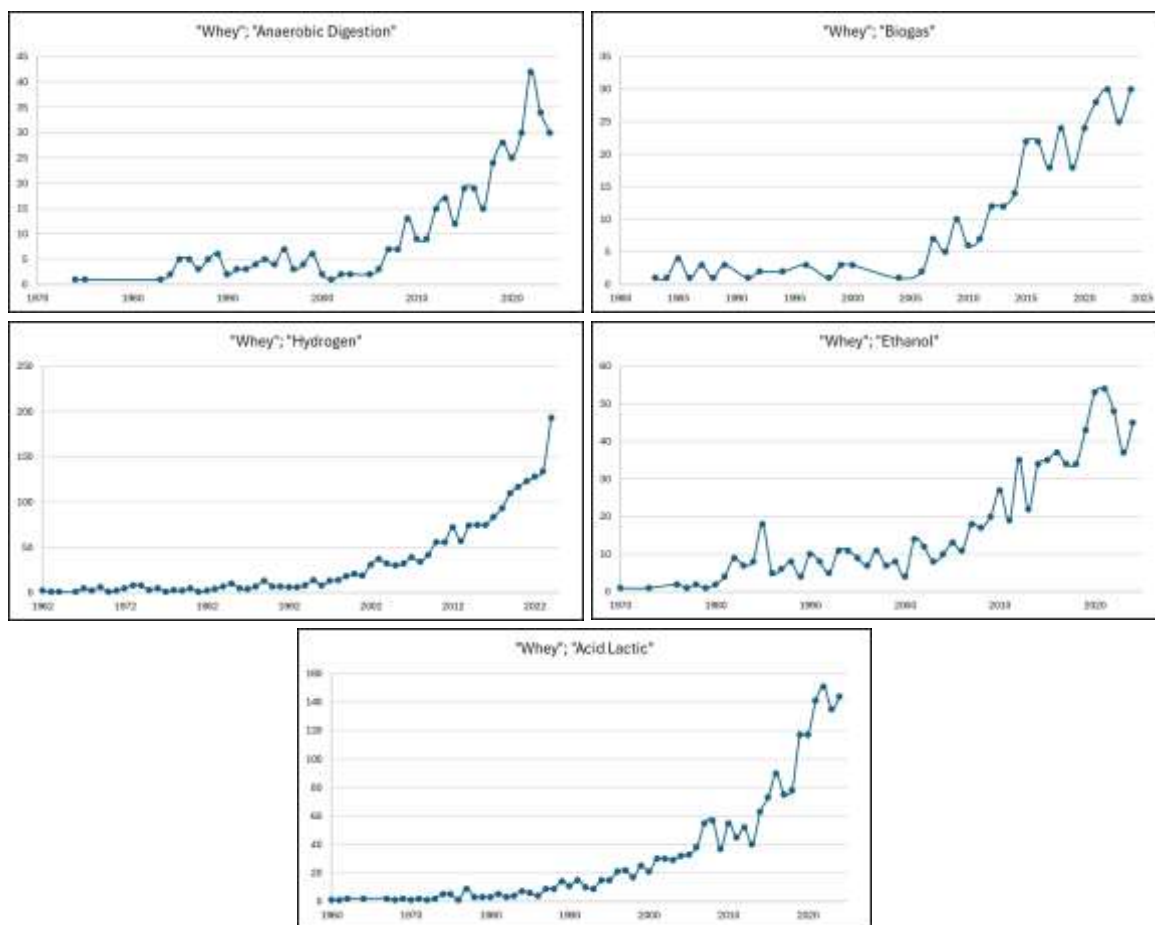
Fonte: Adaptado de Web of Science, 2025.

Dessa forma, essa distribuição revela duas vertentes principais: por um lado, um foco industrial, ligado à fermentação láctica e produção de bioprodutos como o ácido láctico; por outro, um eixo energético, voltado à produção de bioenergia a partir do soro por diferentes rotas fermentativas (biogás, hidrogênio e etanol). Além disso, a quantidade expressiva de publicações confirma o interesse científico consolidado na aplicação do soro de leite como substrato promissor.

Ainda em termos de quantidade de publicações, na figura 50 na sequência são apresentados os gráficos referentes à evolução de documentos ao longo do tempo para cada combinação de palavras-chave. Em primeiro lugar, observa-se que para todas as associações, o auge do volume de publicações ocorrer a partir de 2020, evidenciando o caráter atual dos temas no contexto global. Esse aumento recente pode ser atribuído à intensificação das discussões sobre sustentabilidade, economia circular e transição energética, além da ampliação de políticas públicas e investimentos em pesquisa voltados ao aproveitamento de resíduos agroindustriais e à busca por fontes renováveis.

Além disso, nota-se que todas as combinações apresentaram crescimento significativo a partir da década de 1990, o que coincide com o avanço de tecnologias de fermentação, bioprocessos e digestão anaeróbia, bem como com o fortalecimento de uma consciência ambiental mais crítica nas agendas científicas internacionais. Vale destacar também que esse período marca o início de estratégias institucionais de valorização do conhecimento interdisciplinar, o que impulsionou estudos que relacionam o soro de leite a diferentes rotas de produção energética e industrial. Dessa forma, o aumento consistente das publicações ao longo dos anos revela uma tendência consolidada de pesquisa aplicada, que não apenas reconhece o soro de leite como um resíduo com impacto ambiental, mas também como um recurso estratégico de alto valor agregado.

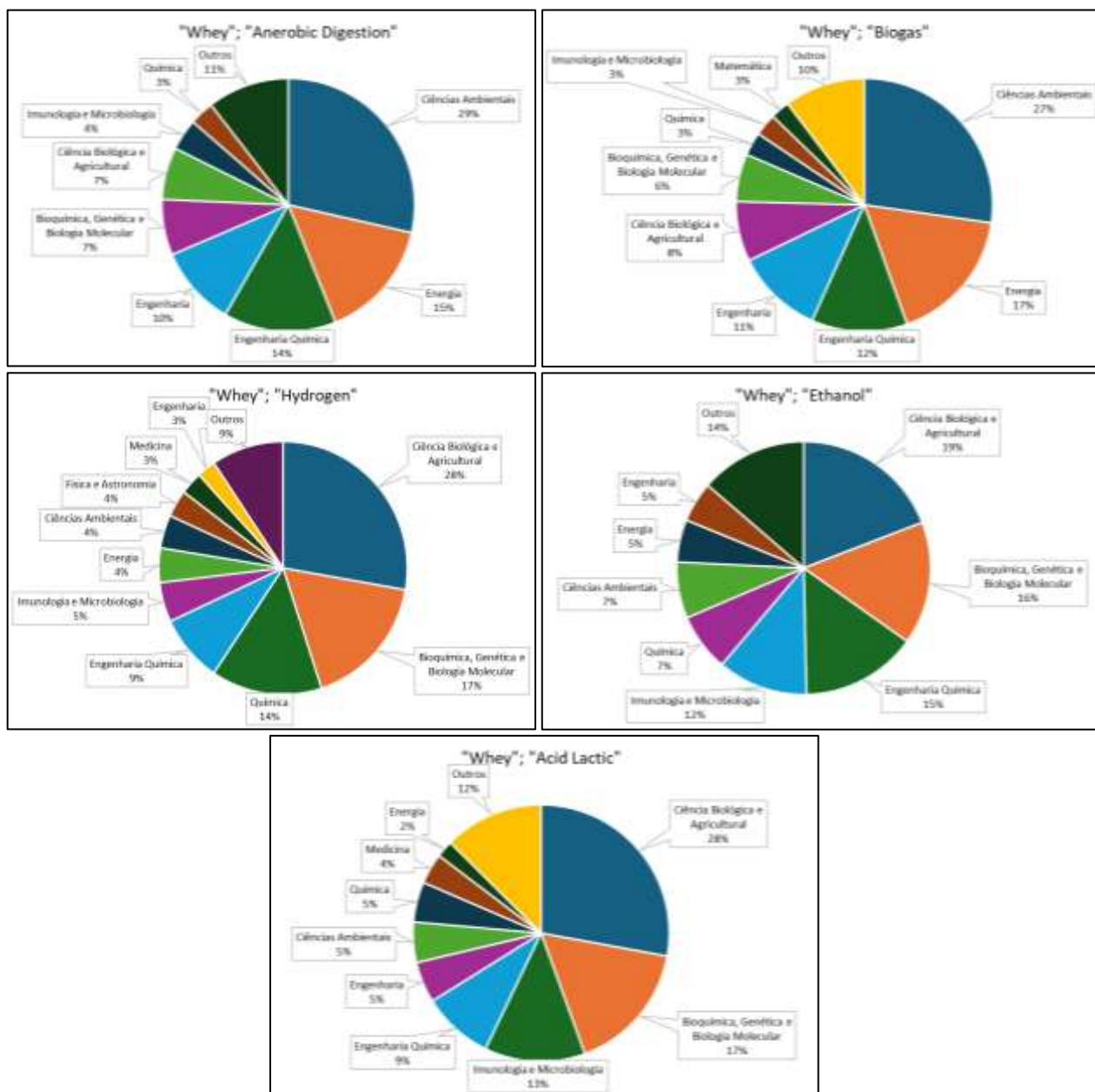
Figura 50 - Quantidade de publicações ao longo do tempo para cada combinação de palavras-chave no contexto global.



Fonte: Adaptado de Scopus, 2025.

Partindo para as áreas de estudo, a figura 51, que apresenta a distribuição por área de estudo, evidencia o caráter fortemente interdisciplinar do tema. Áreas como ciência biológica e agrária, engenharia química, microbiologia, bioquímica e biologia molecular, ciência dos alimentos, energia e ciências ambientais se destacam entre as mais representadas. Isso demonstra que os estudos envolvendo o soro de leite não estão restritos a um único campo de conhecimento, mas se expandem tanto para aplicações tecnológicas quanto para a compreensão bioquímica dos processos de conversão de substratos. Além disso, a presença expressiva de áreas aplicadas, como engenharia e ciências dos materiais, reforça o enfoque industrial e tecnológico na transformação do soro em produtos energéticos e de valor agregado.

Figura 51 - Distribuição e percentual referente a áreas de estudo para cada combinação de palavras-chave.



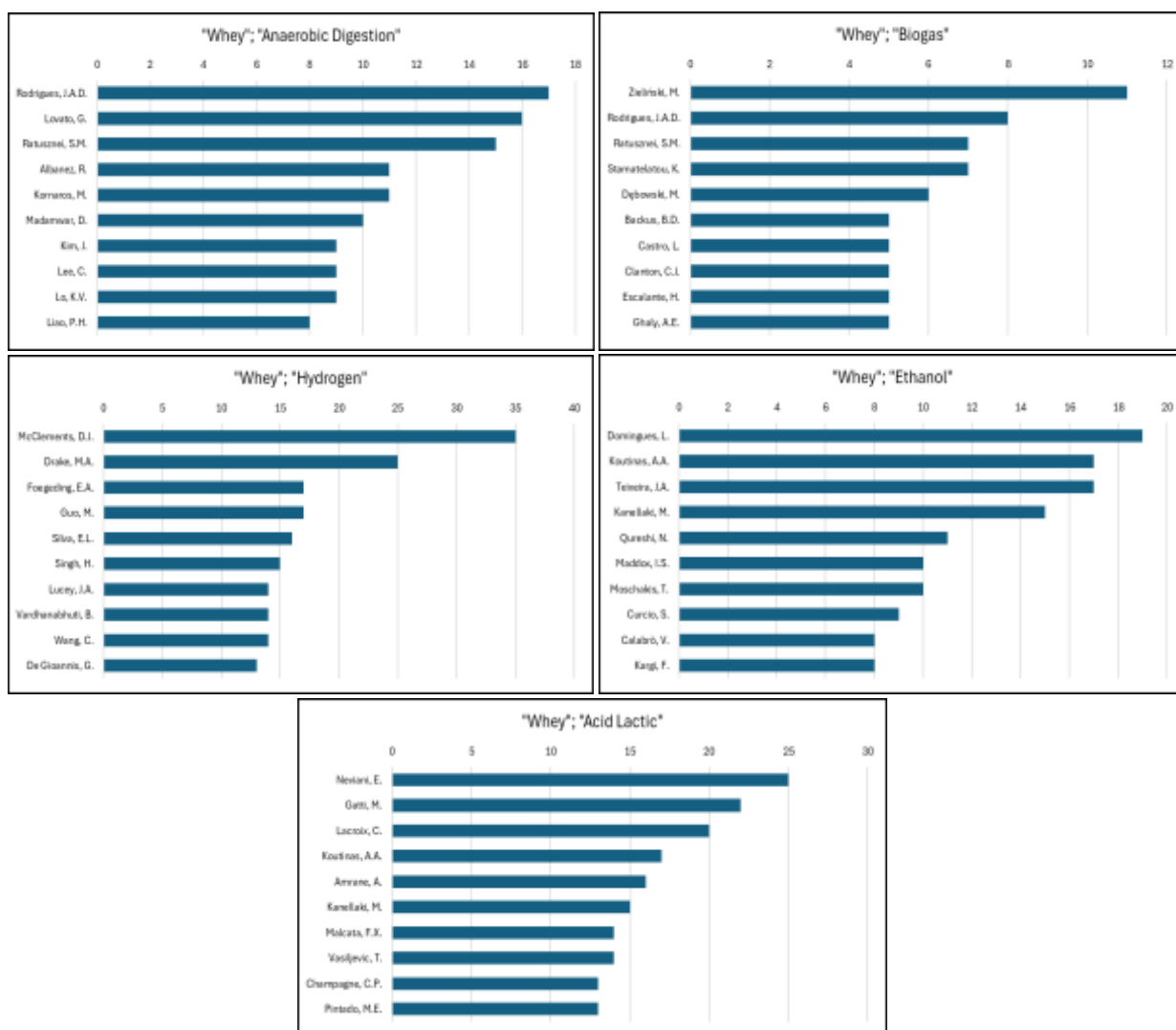
Fonte: Adaptado de Scopus, 2025.

A partir dos dados apresentados, nota-se a grande semelhança entre os gráficos das associações “whey”; “anaerobic digestion” e “whey”; “biogás”, o que está relacionado ao fato de o biogás ser o principal produto gerado no processo de digestão anaeróbia. Dessa forma, para ambos os gráficos, destaca-se a presença significativa das áreas de ciências ambientais e energia, já que esses campos englobam o estudo dos impactos ambientais da gestão de resíduos, bem como as tecnologias de conversão de matéria orgânica em energia renovável, uma vez que a digestão anaeróbia, além de tratar efluentes e subprodutos agroindustriais como o soro de leite, gera biogás como fonte alternativa de energia, o que justifica a concentração de estudos

nesses dois campos. Já para os demais gráficos, o destaque fica com as áreas de ciência biológica e agrária e bioquímica, genética e biologia molecular, o que pode ser justificado pelo foco nos mecanismos microbiológicos e bioquímicos envolvidos nas rotas de fermentação utilizadas para conversão do soro de leite em produtos de interesse. A produção de etanol, hidrogênio e ácido láctico geralmente depende da ação de microrganismos específicos, como leveduras e bactérias lácticas, sendo fundamental o entendimento genético, enzimático e metabólico dessas vias. Além disso, o uso de substratos como o soro de leite exige estudos sobre sua composição, adaptabilidade dos microrganismos, rendimento e otimização de processos, o que reforça a predominância dessas áreas do conhecimento.

Partindo para análise de autores, a figura a seguir expõe os principais relacionados a cada uma das associações de palavras-chave no contexto global.

Figura 52 - Principais autores referentes as associações de palavras-chave no cenário mundial.



Fonte: Adaptado de Scopus, 2025.

Para a combinação “Whey”;”Anaerobic Digestion”, destaca-se José Alberto Domingues Rodrigues, atualmente pesquisador da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), com graduação, mestrado e doutorado em engenharia química. Segundo a plataforma Lattes, Rodrigues apresenta pesquisas na área de engenharia de processos biológicos com ênfase em processos anaeróbios aplicados ao tratamento de águas residuárias, para produção de bioenergia (hidrogênio e metano) e biomoléculas (ácidos e biopolímeros), remoção de micro poluentes orgânicos e adequação ambiental de efluentes industriais e sanitário. Além disso, o autor também se destaca para a associação de palavras “Whey”;”Biogas”, figurando na segunda colocação em número de documentos, atrás apenas de Marcin Zieliński, professor e pesquisador acadêmico da Universidade de Warmia e Mazury em Olsztyn, Polônia, com enfoque na busca por soluções tecnológicas para melhorar a eficiência dos processos de tratamento de água e efluentes, gerenciamento de lodo de esgoto e bioenergia, em particular tecnologias para produção de biogás, produção e uso energético de biomassa de microalgas.

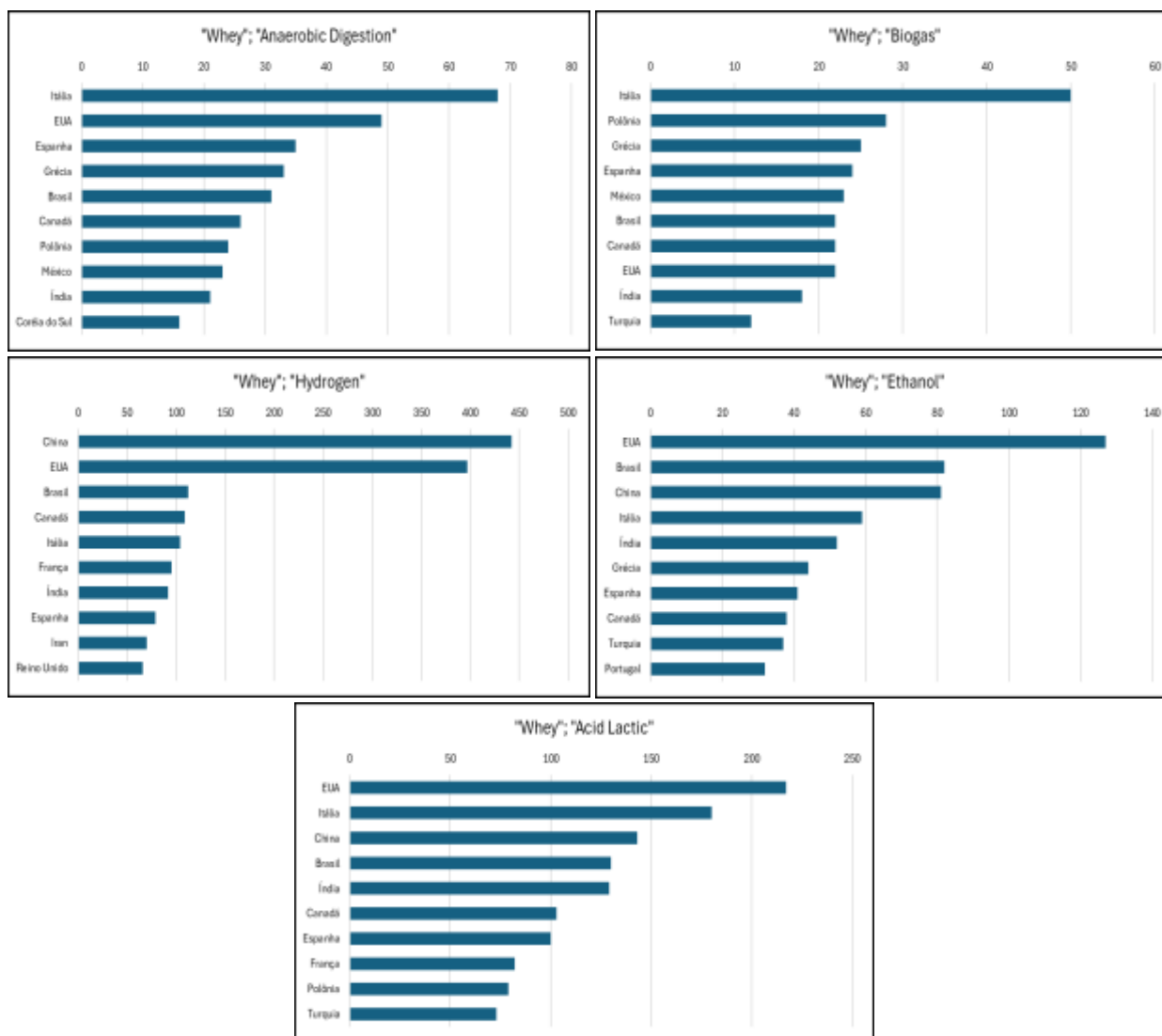
Já em relação a combinação de palavras-chave “Whey”;”Hydrogen”, o autor David McClements se sobressai, assim como abordado durante o tópico referente a análise sistemática do tema soro de leite, o que evidencia que uma de suas principais vertentes de trabalho sobre este substrato está atrelada a geração de hidrogênio. Enquanto isso, para a associação “Whey”;”Ethanol”, o destaque fica para Lucília Domingues, professora associada com habilitação no Departamento de Engenharia Biológica da Universidade do Minho e diretora do Curso de Mestrado em Biotecnologia, cuja principal área de pesquisa é engenharia e biotecnologia bioquímica, em particular, biotecnologia molecular e industrial.

Ademais, para a combinação “Whey”;”Acid Lactic”, destaca-se Erasmo Neviani, professor de microbiologia agrícola na Universidade de Parma. Além disso, de 2013 a 2015 foi presidente da Sociedade Italiana de Agricultura, Microbiologia Ambiental e Alimentar (SIMTREA) e atualmente é presidente do Conselho Italiano da Federação Leiteira Internacional (IDF). Dentre suas principais áreas de pesquisa, pode-se citar as ciências biológica e agrária, imunologia e microbiologia e a bioquímica, com publicações relevantes em todas elas.

Vale ressaltar ainda que é possível observar uma presença significativa de autores brasileiros em lugar de destaque no contexto global, como José Alberto Rodrigues, já citado anteriormente, Giovanna Lovato e Edson Luiz Silva, demonstrando o potencial acadêmico do Brasil e evidenciando o papel de destaque que o país vem assumindo na produção científica internacional, especialmente nas áreas voltadas à valorização de resíduos e desenvolvimento de tecnologias sustentáveis.

Por fim, nota-se também uma grande distribuição geográfica entre os nomes que aparecem nos gráficos, o que também pode ser evidenciado pela figura 53, que mostra os principais países referentes a estas associações de palavras-chave.

Figura 53 - Principais países referentes as associações de palavras-chave.



Fonte: Adaptado de Scopus, 2025.

Ao contrário dos gráficos expostos nos tópicos individuais de cada tema, que confirmavam a dominância dos Estados Unidos e da China como líderes na produção científica, nesse caso isso acontece apenas para a combinação “Whey”; Hydrogen”. Para as demais associações observa-se destaque de outros países, como a Itália, que aparece na liderança das combinações “Whey”; “Anaerobic Digestion” e “Whey”; “Biogas”, com 68 e 50 documentos, respectivamente, o que pode ser explicado pelo forte investimento em pesquisa aplicada à bioenergia e reaproveitamento de resíduos agroindustriais, especialmente no setor lácteo, que

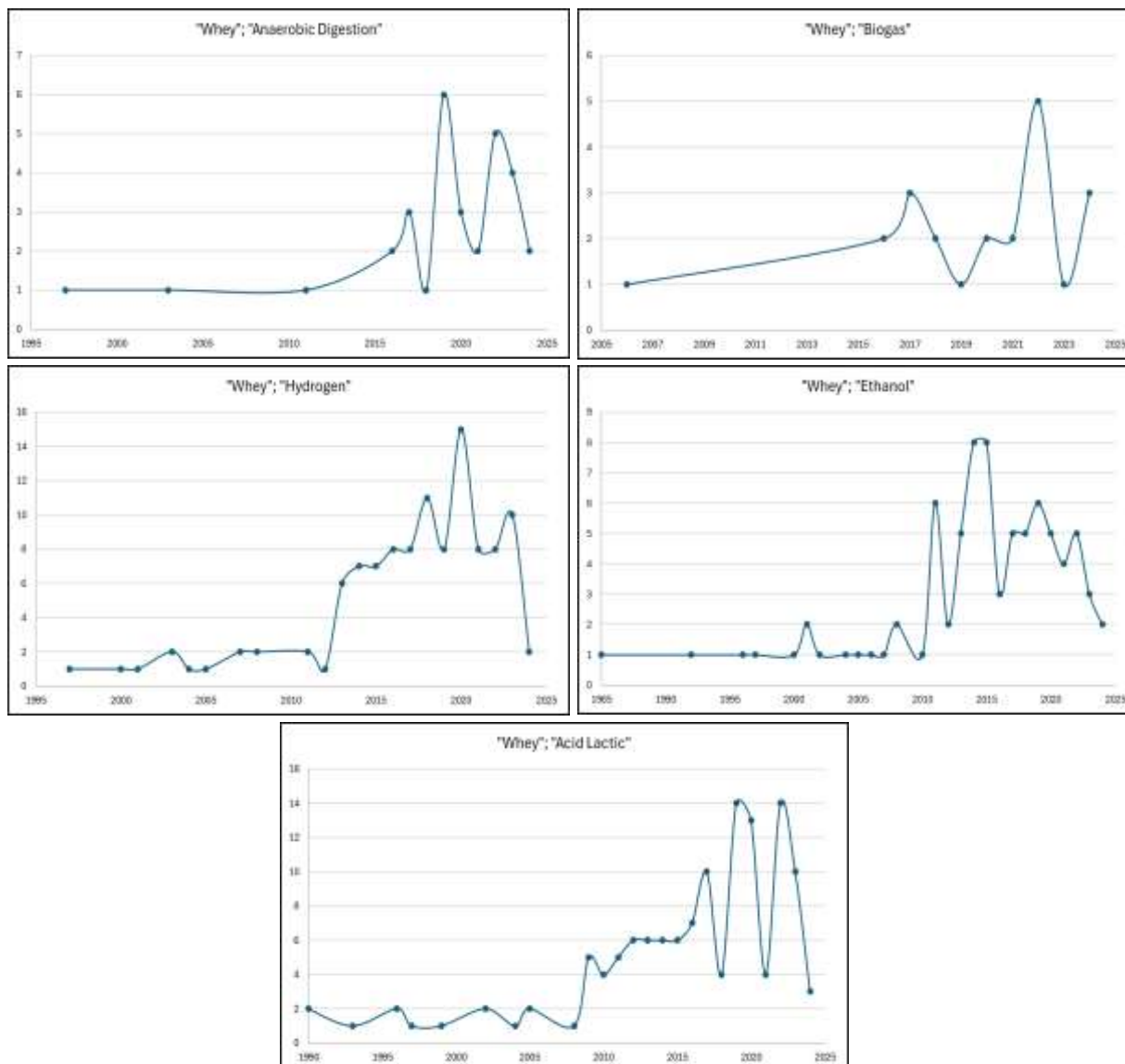
tem grande representatividade na economia agrícola do país, já que a Itália é um dos principais produtores de leite da Europa, com uma produção baseada em animais de alta genética e de longa tradição queijeira (FORBES, 2023). Ademais, a Itália possui uma tradição consolidada em estudos sobre fermentações e digestão anaeróbia, apoiada por instituições como a Universidade de Bolonha e o Conselho Nacional de Pesquisas (CNR), maior conselho de pesquisa da Itália, que promovem projetos voltados à economia circular e gestão sustentável de resíduos.

Além disso, nota-se também grande relevância do Brasil, que figura entre os maiores 6 países, em termos de volume de documentos, para todas as combinações de palavras-chave, com destaque para “Whey”; “Ethanol”, em que o Brasil aparece na segunda colocação mundial, o que pode ser justificado pela forte vocação nacional para o setor sucroenergético e a ampla disponibilidade de resíduos agroindustriais, como o soro de leite, o que impulsiona pesquisas voltadas à produção de biocombustíveis de segunda geração. Além disso, o país conta com centros de excelência em biotecnologia e bioenergia, como a Embrapa, a USP, a UFSCar e o CTBE, que têm atuado em projetos voltados à conversão de subprodutos em etanol por meio de rotas fermentativas.

Em termos quantitativos, o país apresenta 130 documentos para a combinação “Whey”; “Acid Lactic”, 112 para “Whey”; “Hydrogen”, 82 para “Whey”; “Ethanol”, 31 para “Whey”; “Anaerobic Digestion” e, finalmente, 22 para “Whey”; “Biogas”. Além disso, apresenta um cenário de crescimento nos últimos anos para todas as associações de palavras-chave, o que pode ser evidenciado pela figura 54.

Neste contexto, vale ressaltar que a inserção do Brasil em redes internacionais de pesquisa e o interesse crescente por soluções que promovam economia circular e redução de impactos ambientais na agroindústria contribuem para justificar o volume expressivo e crescimento de publicações nessas áreas. Esse cenário reforça o papel estratégico do país no contexto global da bioeconomia e destaca seu potencial para se consolidar como referência na integração entre ciência, inovação e sustentabilidade.

Figura 54 - Quantidade de publicações ao longo do tempo referentes as associações de palavras-chave no contexto brasileiro.



Fonte: Adaptado de Scopus, 2025.

Ainda no contexto brasileiro, como já apresentado, os autores aparecem com papel de destaque mundialmente. Rodrigues, que aparece como principal autor para as combinações “Whey”;”Anaerobic Digestion” e “Whey”;”Biogas”, com 17 e 8 documentos, respectivamente, já teve seu trabalho descrito anteriormente, uma vez que é o principal autor, em termos de volume de documentos, para a primeira combinação de palavras-chave.

Já para a combinação “Whey”;”Hydrogen”, o papel de destaque no cenário brasileiro fica com Edson Luiz Silva, que possui 16 documentos relacionados a esta temática, com vasta experiência na área de engenharia química, com ênfase em tecnologia química. Sua atuação se relaciona principalmente com os seguintes temas: tratamento anaeróbico de águas residuárias,

leito fluidizado trifásico, fenol, hidrodinâmica, transferência de massa e modelagem de reatores biológicos.

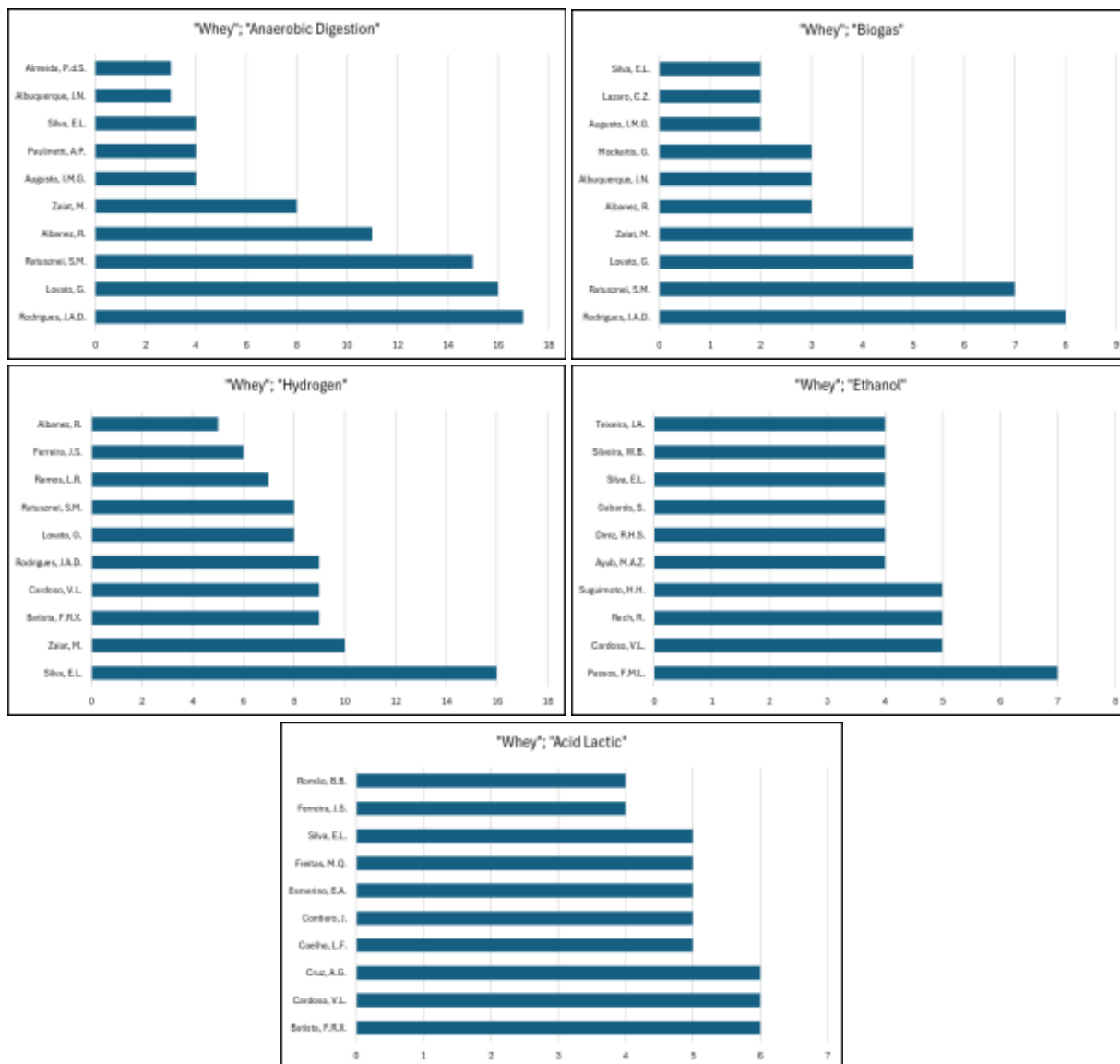
Para a associação “Whey”; “Ethanol”, a principal autora é Flávia Maria Lopes Passos (7 documentos), PhD em ciência de alimentos/biotecnologia pela Universidade Estadual da Carolina do Norte e pós-doutoramento pela "Université Paris Sud", Orsay, França. Dentre suas principais áreas de interesse destaca-se a bioquímica, genética e biologia molecular, a imunologia e microbiologia e a engenharia química, totalizando cerca de 72% de toda sua produção científica.

Por fim, para “Whey”; “Acid Lactic” destaca-se 3 autores, todos com 6 documentos: Fabiana Regina Xavier Batista, professora na Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia, atuando como coordenadora do programa de Pós-graduação da mesma; Antônio José Gonçalves da Cruz, docente da Universidade Federal de São Carlos desde 1998, atualmente professor da área de Processos Químicos do Departamento de Engenharia Química, com atuação na área de Engenharia Química e Bioquímica, em Modelagem, Instrumentação e Controle de Processos Químicos e Bioquímicos; e Vicelma Luiz Cardoso, professora da Universidade Federal de Uberlândia com experiência na área de Engenharia Química, com ênfase em Processos Bioquímicos.

Observa-se que há presença do mesmo autor em diferentes temas, como Rodrigues e Lovato que aparecem para as três primeiras combinações e Edson Luiz Silva que consta no ranking em todas as combinações pesquisadas, com destaque para “Whey”; “Hydrogen”, em que figura na primeira colocação com 16 documentos, o que reflete a atuação consolidada e abrangente desses pesquisadores nas diversas rotas de valorização do soro de leite. Essa recorrência evidencia não apenas o domínio técnico-científico dos autores sobre os processos de conversão biotecnológica, mas também o envolvimento ativo do Brasil em pesquisas alinhadas às agendas globais de sustentabilidade, bioenergia e economia circular.

A figura a seguir representa os principais autores referentes as associações de palavras-chave no contexto brasileiro.

Figura 55 - Principais autores referentes as associações de palavras-chave no contexto brasileiro.



Fonte: Adaptado de Scopus, 2025.

Em síntese, a análise da combinação de palavras-chave envolvendo o termo “whey” com produtos de interesse energético e industrial (biogás, etanol, hidrogênio, ácido lático e digestão anaeróbia) revelou um panorama científico robusto e em crescimento, demonstrando a relevância atual e multidisciplinar da temática. Os dados extraídos das bases *Scopus* e *Web of Science* apontam para um predomínio das pesquisas voltadas à fermentação láctica e produção de hidrogênio, seguidas pelas rotas fermentativas para etanol e biogás, evidenciando tanto abordagens biotecnológicas, quanto energéticas. Além disso, a evolução temporal das publicações demonstra um crescimento expressivo a partir da década de 1990, com picos a partir de 2020, refletindo o avanço das agendas globais de sustentabilidade e economia circular.

Já as áreas de estudo mais representadas, como bioquímica, microbiologia, engenharia química, energia e ciências ambientais, comprovam o caráter transversal e aplicado das pesquisas. Por fim, observa-se uma ampla distribuição geográfica de autores e instituições, com destaque, além de EUA e China, para a Itália e Brasil, sendo este último representado por nomes recorrentes em diferentes combinações temáticas, o que reforça seu papel emergente na produção científica voltada à valorização de resíduos agroindustriais, especialmente o soro de leite.

Dessa forma, a revisão sistemática realizada a partir da combinação de palavras-chave permitiu demonstrar a diversidade temática e a relevância científica do tema central deste trabalho: o potencial de valorização do soro de leite como recurso energético e industrial. Os resultados evidenciam que o soro de leite, tradicionalmente tratado como um resíduo de difícil gerenciamento, tem sido amplamente explorado como substrato estratégico para a geração de bioprodutos e bioenergia, com aplicações que vão desde biocombustíveis até moléculas de alto valor agregado. Além disso, a expressiva participação do Brasil nas frentes analisadas, tanto em volume de publicações, quanto em presença de autores de destaque, reforça a maturidade científica nacional e sua capacidade de contribuir ativamente para os desafios globais da bioeconomia. Com base nisso, a escolha do tema mostra-se não apenas relevante, mas estrategicamente alinhada aos desafios contemporâneos de sustentabilidade, aproveitamento de resíduos e desenvolvimento de soluções energéticas limpas e economicamente viáveis.

5.8 DESAFIOS E PERSPECTIVAS FUTURAS

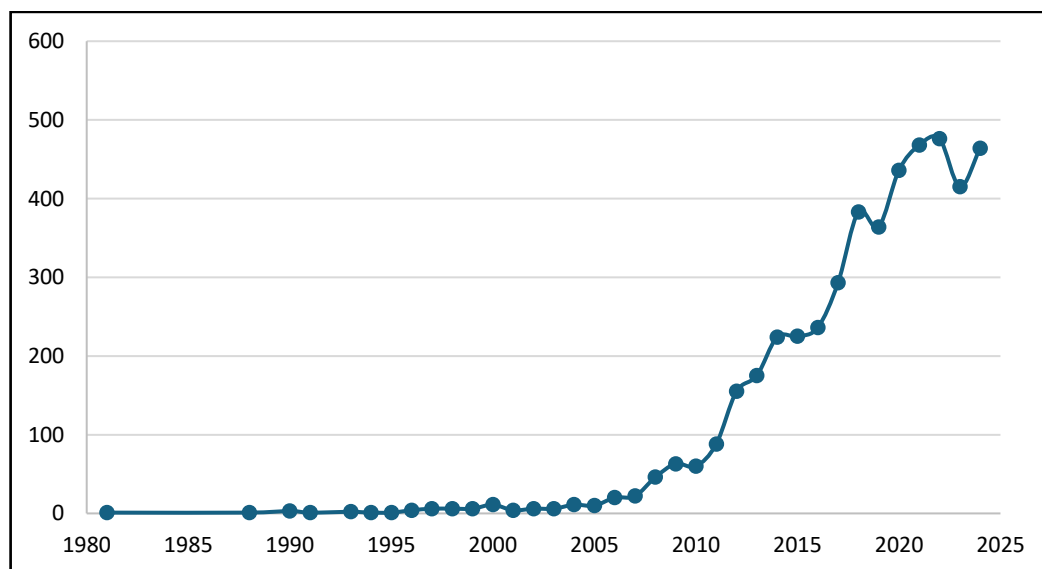
A valorização do soro de leite como recurso energético e industrial insere-se no contexto da busca por soluções sustentáveis para o tratamento de resíduos orgânicos e a diversificação da matriz energética. Embora promissora, essa abordagem ainda enfrenta diversos desafios técnicos, econômicos e regulatórios que precisam ser superados para sua consolidação em escala comercial e territorialmente abrangente. Apesar disso, este composto, altamente poluente devido à sua elevada carga orgânica, é hoje reconhecido como substrato valioso para digestão anaeróbia, fermentação e produção de bioativos com aplicações na indústria alimentícia, farmacêutica e energética.

Do ponto de vista técnico, a composição variável do soro de leite, influenciada por fatores como tipo de queijo produzido, sazonalidade e processos industriais, pode afetar diretamente o desempenho microbiológico dos processos biotecnológicos, o que impõe a necessidade de padronização do substrato ou de tecnologias adaptativas, capazes de lidar com essa

variabilidade sem comprometer o rendimento da conversão (MALOS et al., 2025). Além disso, o alto teor de lactose e a baixa relação C/N do soro puro podem gerar acúmulo de ácidos graxos voláteis e inibição do processo anaeróbio, exigindo a adoção de estratégias como a codigestão com resíduos ricos em nitrogênio ou fibras estruturais, como esterco, bagaço de cana ou resíduos de alimentos, uma vez que essa combinação de diferentes efluentes no tratamento pode gerar melhorias no desempenho do processo, resultando em um significativo aumento na produção de biogás e melhora da qualidade do biofertilizante gerado (VEERAMUTHU et al., 2025).

Nesse contexto, vale ressaltar que a codigestão anaeróbia é uma técnica que tem sido cada vez mais abordada, apresentando assim rápido crescimento no número de pesquisas e documentos associados a ela nos últimos anos, conforme apresentado na figura a seguir, já que possibilita otimizações da eficiência dos processos e, dessa forma, tende a continuar em expansão, seguindo o cenário de sustentabilidade e gestão de resíduos.

Figura 56 - Quantidade de documentos associados ao tema de codigestão anaeróbia.



Fonte: Adaptado de Scopus, 2025.

Outra limitação refere-se à viabilidade econômica, especialmente nos processos de purificação de subprodutos de alto valor, como bacteriocinas, ácido lático e etanol. A aplicação de tecnologias intensivas em capital, como biorreatores com membranas integradas, extração *in situ* e métodos de purificação livre de solventes, representa avanços importantes, mas ainda carece de escala e acesso para pequenos e médios produtores, fato que fica evidente no contexto brasileiro. Em contrapartida, a recente incorporação de ferramentas de modelagem computacional, tecnologias ômicas e inteligência artificial tem possibilitado um controle mais

preciso dos processos fermentativos, permitindo ajustes em tempo real e o uso de consórcios microbianos projetados para aumentar a eficiência de conversão e estabilidade operacional (MALOS et al., 2025).

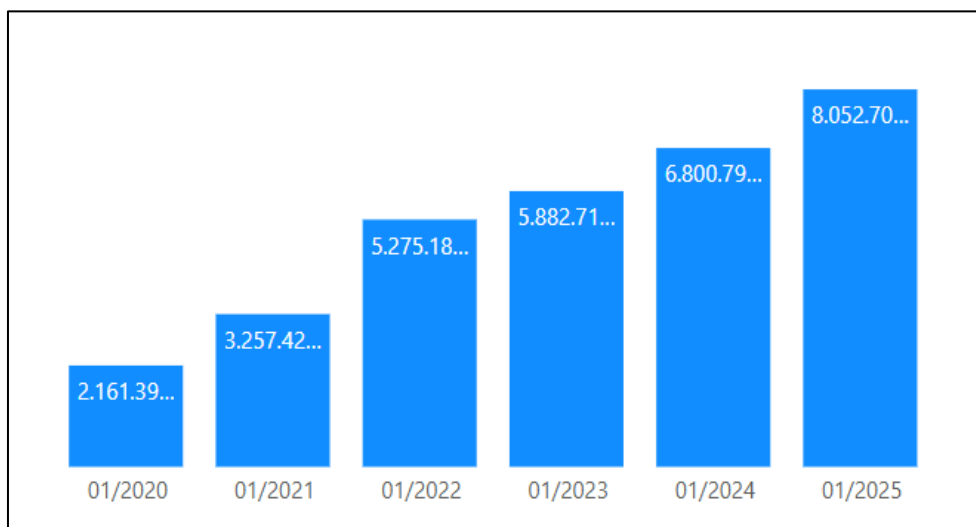
A produção de biogás e biometano a partir do soro de leite, isoladamente ou em codigestão, encontra-se alinhada com as tendências internacionais de substituição de combustíveis fósseis. Conforme apontado por Veeramuthu et al. (2025), o biometano é tecnicamente compatível com a infraestrutura de gás natural existente, podendo ser utilizado para geração de calor, eletricidade, combustível veicular (bio-CNG e bio-LNG) e até mesmo como insumo para geração de hidrogênio ou síntese de combustíveis líquidos, cenário que tende a aumentar como o passar dos anos. Neste contexto, países como Dinamarca e Suécia já implementam políticas agressivas de substituição do gás natural por biometano, com metas objetivas para 2030, reforçando a viabilidade dessa rota tecnológica. A figura 57 na sequência apresenta a evolução da produção global de biometano de 2010 a 2022.

Figura 57 - Produção anual de biometano no contexto mundial.



Fonte: Cedigaz, 2023.

O Brasil também segue essa crescente tendência de expansão da produção e utilização do biometano, apesar do fato do volume produzido no país ser ainda modesto se comparado ao resto do mundo, conforme evidenciado na figura a seguir, que apresenta os dados anuais de produção deste composto, segundo a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP).

Figura 58 - Produção anual de biometano no Brasil em m³.

Fonte: ANP, 2025.

Contudo, os desafios de escala, logística e regulamentação ainda são significativos, principalmente para o hidrogênio e o biogás. A falta de políticas públicas coordenadas, subsídios limitados para pequenos produtores, ausência de marcos legais claros para o uso de resíduos orgânicos como fontes energéticas e a dificuldade de integração com as redes de distribuição são barreiras frequentemente citadas (VEERAMUTHU et al., 2025). Além disso, o alto custo da purificação de biogás, que exige tecnologias como separação por membranas, adsorção por oscilação de pressão ou processos criogênicos, representa um gargalo para a disseminação dessa alternativa, especialmente em países em desenvolvimento.

No contexto do hidrogênio, o Grupo Interdisciplinar de Biotecnologia na Agricultura e Meio Ambiente da Unicamp destaca que o principal desafio está na eficiência do processo de fermentação escura, que ainda é baixa, o que significa que uma grande quantidade de biomassa é necessária para produzir uma pequena quantidade de hidrogênio. Além disso, a estabilidade também é um problema, uma vez que o hidrogênio é uma fonte de energia para os microrganismos, que logo desenvolvem estratégias para consumi-lo no próprio processo. Apesar disso, o hidrogênio musgo, gerado a partir da digestão anaeróbia, aparece como uma alternativa promissora à produção de hidrogênio verde, já que seu processo apresenta uma série de vantagens, como a sustentabilidade, a abundância e o baixo custo. Dessa forma, pesquisas estão sendo realizadas para melhorar a eficiência do processo de fermentação escura e reduzir seu custo, assim, com o desenvolvimento dessas tecnologias, o hidrogênio musgo pode se tornar uma fonte de hidrogênio limpa, acessível e sustentável.

Quanto ao ácido láctico, amplamente utilizado nas indústrias de alimentos, farmacêutica e na produção de bioplásticos como o PLA (ácido polilático), seu aproveitamento a partir do soro de leite também representa uma alternativa sustentável. No entanto, o processo fermentativo também enfrenta desafios relacionados à variabilidade da composição do soro, ao acúmulo de subprodutos inibitórios e à necessidade de purificação de alta pureza, especialmente para aplicações industriais de grau alimentício ou médico (DATTA; HENRY, 2006). Além disso, o custo da etapa de separação e purificação é um dos principais entraves à sua viabilização em larga escala. Dentre as perspectivas futuras destaca-se o uso de fermentação controlada com cepas selecionadas de *Lactobacillus*, sistemas de biorreatores com separação por membranas e integração com processos de coprodução, como recuperação simultânea de nutrientes ou bioenergia (VEERAMUTHU et al., 2025).

Do ponto de vista ambiental e social, a valorização energética do soro de leite contribui significativamente para a mitigação de gases de efeito estufa, para o aproveitamento de resíduos que seriam descartados de forma inadequada em corpos hídricos e para o fortalecimento da bioeconomia (EUROPEAN COMMISSION, 2013). Estima-se que a produção de biogás e sua conversão em biometano possam reduzir emissões em até 1000 milhões de toneladas de CO₂ até 2040, especialmente se integradas a estratégias de gestão de resíduos urbanos, agroindustriais e sanitários (VEERAMUTHU et al., 2025).

Vale ressaltar ainda que, entre as perspectivas futuras, destacam-se o desenvolvimento de sistemas integrados e híbridos de digestão anaeróbia com tecnologias termoquímicas (como gaseificação e pirólise), uso de microalgas como cosubstrato e sistemas de biorrefinaria voltados à produção de compostos bioativos de alto valor. Além disso, ferramentas como bioaumentação, engenharia de consórcios microbianos, biocatálise e digestores inteligentes com sensores IoT deverão ganhar espaço, aumentando o controle e a eficiência dos processos (MALOS et al., 2025). Modelos logísticos de produção descentralizada, combinando pequenas unidades produtoras em regiões rurais com redes cooperativas de distribuição de energia e fertilizantes, também despontam como solução escalável e inclusiva.

Adicionalmente, a integração da produção do etanol e biometano com o setor de transportes (por meio do uso de bio-CNG ou bio-LNG) oferece grande potencial, sobretudo para frotas públicas e veículos de uso urbano, contribuindo para metas de redução de emissões do setor (VEERAMUTHU et al., 2025). Segundo Camila Agner D'Aquino, pesquisadora no Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo, o Brasil tem potencial para produzir 80 milhões de metros cúbicos por dia de biometano, o que significa a substituição de quase 50%

do diesel consumido no país, minimizando a dependência de combustíveis fósseis e emitindo 85% menos gases de efeito estufa (GEE) em relação ao diesel. Nesse contexto, o avanço dessa regulamentação para países latino-americanos, como o Brasil, pode acelerar significativamente a demanda. Já no cenário europeu, a diretiva RED II já estabelece metas obrigatórias de uso de fontes renováveis nos transportes, o que reforça o papel do biometano como alternativa estratégica para a mobilidade de baixo carbono (EUROPEAN COMMISSION, 2013).

Em termos de mercado, segundo a plataforma “Mordor Intelligence”, todos os produtos abordados no presente trabalho tendem a ter um avanço significativo até 2029. Para o biogás, espera-se que o tamanho do mercado cresça de 23,86 gigawatts (GW) até o final do próximo ano para 29,75 GW após cinco anos, com um CAGR de 4,51% durante o período de previsão. Já para o hidrogênio verde, o mercado é ainda mais promissor em termos de crescimento, podendo registrar um CAGR de mais de 60% até 2029, considerando todas as suas aplicações. Para o etanol, é esperado um CAGR de mais de 5% durante o período de previsão, considerando que o mercado atinja níveis pré-pandêmicos e cresça de forma constante no futuro. Por fim, o tamanho do mercado de ácido láctico foi estimado em US\$ 511,11 milhões em 2024, e deverá atingir US\$ 624,54 milhões até 2029, crescendo a um CAGR de 4,09%.

Por fim, conclui-se que o aproveitamento energético e industrial do soro de leite, embora ainda enfrente desafios complexos, apresenta um futuro promissor. A convergência entre biotecnologia, política pública, inovação logística e valorização ambiental será determinante para transformar o soro de um passivo ambiental em um ativo estratégico da nova economia verde. Dessa forma, pesquisas futuras devem focar em estudos integrados, comparativos e em escala piloto-industrial, promovendo a padronização de metodologias, a avaliação do ciclo de vida e a modelagem econômica e ambiental das diferentes rotas tecnológicas viáveis.

6 CONCLUSÃO

A análise sistemática realizada permitiu evidenciar o grande potencial do soro de leite como um recurso estratégico para a indústria e para a matriz energética renovável, especialmente no contexto da bioeconomia e da economia circular. Ao longo do trabalho, foi possível demonstrar que, embora o soro de leite ainda seja amplamente tratado como resíduo no Brasil, com cerca de 40% sendo descartado de forma inadequada, ele representa uma fonte rica em compostos orgânicos, como lactose e proteínas, que podem ser convertidos em produtos de elevado valor agregado, como biogás, hidrogênio, etanol e ácido lático, por meio de rotas biotecnológicas.

Dentre os principais produtos abordados, o biogás se destacou por sua aplicabilidade consolidada e viabilidade técnica, especialmente em regiões com forte presença agroindustrial. Já o hidrogênio, embora ainda enfrente desafios tecnológicos, surge como vetor energético promissor, principalmente quando obtido por vias fermentativas a partir de substratos como o soro de leite, contribuindo para a descarbonização de setores estratégicos. O etanol, por sua vez, mostrou-se uma alternativa viável à produção convencional, sendo o soro uma matéria-prima não convencional capaz de ampliar a sustentabilidade da cadeia sucroenergética, especialmente quando associada ao conceito de biorrefinarias. Por fim, o ácido lático apresentou amplo potencial de aplicação na indústria química, alimentícia e farmacêutica, além de permitir a produção de biopolímeros biodegradáveis, como o PLA (ácido polilático), agregando valor ao subproduto e reforçando seu papel na transição para uma economia de baixo carbono.

A análise bibliométrica realizada ao longo do trabalho confirmou o crescente interesse científico nas rotas de valorização do soro de leite, com destaque para o aumento do número de publicações nos últimos anos e a diversificação das áreas de pesquisa envolvidas, o que reflete o amadurecimento das tecnologias e o reconhecimento de seu potencial econômico e ambiental. No entanto, também foram identificados desafios importantes, como a necessidade de melhorias nas infraestruturas industriais, especialmente nas pequenas e médias empresas, o alto custo de algumas tecnologias, a adaptação de microrganismos a condições industriais e a carência de políticas públicas que incentivem a adoção de soluções sustentáveis para o reaproveitamento do soro.

Dessa forma, conclui-se que a valorização do soro de leite não apenas representa uma solução tecnicamente viável para a mitigação de impactos ambientais da indústria de laticínios, como também oferece oportunidades concretas de geração de energia renovável, produção de

biocombustíveis e insumos industriais. Porém, para que esse potencial seja plenamente aproveitado, é fundamental o fortalecimento da integração entre pesquisa, setor produtivo e políticas públicas, fomentando a inovação tecnológica, a capacitação técnica e a criação de incentivos econômicos voltados à sustentabilidade.

Portanto, o reaproveitamento do soro de leite deve ser encarado não apenas como uma solução ambiental, mas como uma estratégia multifacetada que pode contribuir para a segurança energética, a competitividade industrial, a redução das desigualdades e o cumprimento dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). A consolidação de um modelo produtivo baseado em biorrefinarias e na circularidade de recursos representa o caminho mais promissor para transformar passivos ambientais em ativos estratégicos, reposicionando o soro de leite como um importante pilar da nova economia verde.

REFERÊNCIAS

- ABATZOGLOU, N.; BOIVIN, S. A review of biogas purification processes. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, v. 3, n. 1, p. 42-71, 2009.
- ABREU, M. O potencial bioativo do soro de queijo após a fermentação láctica: comparação de diferentes tipos de soro. Universidade de Lisboa, 2014.
- ANGELIDAKI, I. et al. Biogas upgrading and utilization: Current status and perspectives. *Biotechnology advances*, v. 36, n. 2, p. 452-466, 2018.
- ANTUNES, A. J. Funcionalidade de proteínas do soro de leite bovino. Barueri: Manole, 2003. 135 p.
- AQUINO, V. Estudo da estrutura de massas de pães elaboradas a partir de diferentes processos fermentativos. Universidade de São Paulo. Faculdade de Ciências Farmacêuticas, 2012.
- ASSELIN, M.; DROGUI, P.; BENMOUSSA, H.; BLAIS, J. Effectiveness of electrocoagulation process in removing organic compounds from slaughterhouse wastewater using monopolar and bipolar electrolytic cells. *Chemosphere*, v. 72, n. 11, p. 1727-1733, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABREPEL). Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil. 2022. Disponível em: <<https://abrelpe.org.br/panorama/>>. Acesso em: abril, 2025.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA QUÍMICA. A indústria química: desempenho anual da indústria química brasileira. Disponível em: <https://abiquim.org.br/industriaQuimica>. Acesso em: 28 abr. 2025.
- BENEVENUTI, C.S.J. Prospeção tecnológica da produção de ácido láctico no contexto de biorrefinaria: Tendências e oportunidades. 2016. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016. 87 p.
- BALAT, H.; Kirtay, E.; *Int. J. Hydrogen Energy* 2010, 35, 7416.
- BENEMANN, R. The technology of biohydrogen. Em: Zaborsky et al., editor. *Biohydrogen*. New York: Plenum Press, p. 19-30, 1998.
- BINOD, P. et al. Bioethanol production from rice straw: an overview. *Bioresource Technology*, v. 101, p. 4767-4774, 2010.
- BRIÃO, V. B. Estudo de prevenção à poluição em uma indústria de laticínios. 76 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2000.
- CARVALHO, F.; PRAZERES, A. R.; RIVAS, J. Cheese whey wastewater: Characterization and treatment. *Science of the Total Environment*, v. 445-446, 2013

CARVALHO, W. S., Reis, C. E. R., & Pereira, N. Jr. (2020). Produção de etanol de segunda geração a partir da biomassa lignocelulósica: desafios e perspectivas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 24(3), 169–176.

CHAHAL, SURINDER P.; STARR, JOHN N. *Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry: Lactic acid*. 7.ed. Weinheim: Wiley-VCH, 2006. f. 1-8.

CHERNICHARO, C. A. L. *Reatores anaeróbios (Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias)*. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. UFMG. 1997, 240 p.

CHYNOWETH, D.P. OWENS, J. M., LEGRAND, R. Renewable methane from anaerobic digestion of biomass. *Renewable Energy*, Vol. 22, Issues 1-3, Janeiro Março, 2001. P. 1-8.

CONRAD, A. et al. *Produção de Ácido Láctico a Partir do Soro de Leite: Uma Alternativa Sustentável para Reaproveitamento de Resíduos*. Universidade Federal de Santa Maria, 2023.

DAS, D.; Veziroglu, T.N.; *Int. J. Hydrogen Energy* 2008, 33, 6046.

DATTA, R.; HENRY, M. Lactic acid: recent advances in products, processes and technologies—a review. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, v. 81, n. 7, p. 1119–1129, 2006.

DEBOWSKI, M.; KORZENIEWSKA, E.; FILIPKOWSKA, Z.; ZIELSKI, M.; KWIATKOWSKI, R. Possibility of hydrogen production during cheese whey fermentation process by different strains of psychrophilic bacteria. *Int J Hydrogen Energy*, v. 39, p.1972-1978, 2014.

DE SÁ, L.; CAMMAROTA, M.; LEITÃO, V. PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VIA FERMENTAÇÃO ANAERÓBIA – ASPECTOS GERAIS E POSSIBILIDADE DE UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS BRASILEIROS. *Quim. Nova*, v. 37, n. 5, p. 857–867, 3 abr. 2014.

DOS PASSOS, J. H. *Produção de Etanol pela Fermentação Alcoólica do Permeado de Soro de Leite com Saccharomyces Cerevisae*. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2015.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). *Balanco Energético Nacional: Relatório Síntese ano base 2017*. Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Balanco-Energetico-Nacional-2017>>. Acesso em: maio de 2025.

FANG, H. H. P.; LIU, H.; ZHANG, T. Characterization of a hydrogen-producing granular sludge. *Biotechnology Bioengineering*, v. 78, p. 44-52, 2002.

FERNANDES, B. *Produção de hidrogênio em reator aneróbio de leito fixo*. Universidade de São Paulo, 2008.

FLORÊNCIO, I. M.; FLORENTINO, E. R.; SILVA F. L.; MARTINS, R. S.; CAVALCANTI, M.; GOMES, J. Produção de etanol a partir de lactossoro industrial. *R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental*, v. 17, n. 10, p.1088-1092, 2013.

GAVA, A.J.; SILVA, C.A.B.; FRIAS, J.R.G. Tecnologia de alimentos: princípios e aplicações. São Paulo: Nobel, 2009. 511p.

GEISSDOERFER, M. et al. (2017). The circular economy – A new sustainability paradigm?. *Journal of Cleaner Production*, 2017.

GRANDO, R. L.; ANTUNE, A. M. S.; FONSEXA, F. V.; SÁNCHEZ, A.; BARRENA, R.; FONT, X.. Technology overview of biogas production in anaerobic digestion plants: A European evaluation of research and development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v.80, p.44-53, 2017.

GUGLIELMOTTI, D.; MERCANTI, D.; REINHEIMER, J.; QUIBERONI, A. Review: efficiency of physical and chemical treatments on the inactivation of dairy bacteriophages. *Frontiers in microbiology*, v. 2, n. 10, 2011.

HAN SK, SHIN HS. Biohydrogen production by anaerobic fermentation of food waste, *Int. Journal. of Hydrogen Energy*. 2004; 29: 569-577.

KOTAY, M.K.; Das, D.; *Int. J. Hydrogen Energy* 2008, 33, 258.

LAMAISON, F.C. Aplicação da água residuária do processamento da mandioca como substrato para a produção de hidrogênio por processo fermentativo. 2009. 83 f. Dissertação (Mestrado em engenharia de alimentos) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

LEITE, M.T. Otimização da produção do ácido láctico através da fermentação do soro de leite por *Lactobacillus helveticus*. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006. 169 p.

LETTINGA, G.; REBAC, S.; ZEEMAN, G. Challenge of psychrophilic anaerobic wastewater treatment. *Trends in Biotechnology*, v. 19, p. 363-370, 2001.

LIMA, D. Produção de Biohidrogênio a Partir de Soro de Leite em AnSBBR com Recirculação da Fase Líquida. Universidade de São Paulo, 2015.

LIMA, Urgel de Almeida. Biotecnologia industrial: Processos fermentativos e enzimáticos. Vol. 3. Editora Edgard Blücher: São Paulo, 2001.

LIN CY, LAY CH. A nutrient formulation for fermentative hydrogen production using anaerobic sewage sludge microflora. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2005; 30: 285 – 292.

MACEDO, I. C., Seabra, J. E. A., & Silva, J. E. A. R. (2020). Greenhouse gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: The 2020 update.

MACHADO, R. M. G.; FREIRE, V. H.; SILVA, P. H. Controle ambiental em indústrias de laticínios. *BRASIL ALIMENTOS*, março/abril. 2001.

MALOS, I.G.; Ghizdareanu, A.-I.; Vidu, L.; Matei, C.B.; Pasarin, D. The Role of Whey in Functional Microorganism Growth and Metabolite Generation: A Biotechnological Perspective. *Foods* 2025, 14, 1488.

MARIOT, Andreza; GIBIKOSKI, Camila Zancanaro; VIEIRA, Rallian Madeira; VILARINS, Vanessa. Produção de ácido láctico a partir de soro de leite. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Química) - UNISUL, Tubarão, 2017.

MARQUARDT, L. et al. Indústrias lácteas: alternativas de aproveitamento do soro de leite como forma de gestão ambiental. *Tecno-Lógica*, v. 15, n. 2, p. 79-83, 2012.

MARQUES, D. P.; CUSTÓDIO, M. F.; GOULART, A. J.; GIORDANO, R. C.; GIORDANO, R. L. C.; MONTE, R. *Alim. Nutr.*, v. 16, n. 1, p. 17-20, 2005.

MARQUES, T. Produção de hidrogênio em um reator aneróbio de leite fluidificado a partir de soro de leite. Universidade Federal de Alagoas, 2018.

MATHEWS, J.; Wang, G.; *Int. J. Hydrogen Energy* 2009, 34, 7404.

MCT. Disponível em: http://www.mct.gov.br/upd_blob/0015/15132.pdf. Acesso em: Maio de 2025.

MENDONÇA, H.; RIBEIRO, C.; BORGES, A.; BASTOS, R. Sistemas Alagados Construídos em Batelada: remoção de Demanda Bioquímica de Oxigênio e regulação de pH no tratamento de efluentes de laticínios. *Rev. Ambient. Água*, v.10, n.2, 2015.

MIZUNO O, Dinsdale R, Hawkes FR, Hawkes DL, Noike T. Enhancement of hydrogen production from glucose by nitrogen gas sparging. *Bioresource Technology* 2000; 73: 59- 65.

MORAES, B. S.; ZAIAT, M. BONOMI, A. Anaerobic digestion of vinasse from sugarcane ethanol production in Brazil: Challenges and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 44, p. 888-903. 2015.

MORDOR INTELLIGENCE. Mordor intelligence. Disponível em: <<https://www.mordorintelligence.com/>>. Acesso em: Junho de 2025.

MUÑOZ, R. et al. A review on the state-of-the-art of physical/chemical and biological technologies for biogas upgrading. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, v. 14, p. 727-759, 2015.

NARAYANAN, N.; ROYCHOUDHURY, P.K.; SRIVASTAVA, A. L (+) lactic acid fermentation and its production polymerization. *Electronic Journal of Biotechnology*, Chile, v. 7, n. 2, 14 p., ago. 2004. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/27793675_Lactic_acid_fermentation_and_its_product_polymerization. Acesso em: 28 abr. 2025.

NUNES, L. et al. O Soro de Leite, seus Principais Tratamentos e Meios de Valorização. *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente*, 2016.

NUNES, L. A. Prospecção da valorização e gerenciamento do soro do leite no Litoral Sul da Bahia: um planejamento da cadeia produtiva. 2016. 197f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) - Universidade Estadual de Santa Cruz. Ilhéus, 2016.

OCDE-FAO. Perspectivas Agrícolas 2019-2028. OECD Publishing, París/Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), Roma. 2019. <https://doi.org/10.1787/7b2e8ba3-es>. Acesso em: 05 de maio de 2025.

OLIVEIRA, F. A. Desenvolvimento de bebida láctea não fermentada com soro de leite ácido. 2011. 45 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia em Alimentos) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Francisco Beltrão, 2011.

OZTURK, A. B. et al. Whey conversion scenarios for sustainable lactic acid, ethanol and hydrogen production: techno-economic aspects of biofuels and biochemical production. *Biofuels Bioproducts and Biorefining*, 28 mar. 2025.

PAES, Roberta. Caracterização do chorume produzido no Aterro da Muribeca – PE. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2003. PAGE, S.; Krumdieck, S.; *Energy Policy* 2009, 37, 3325.

PANESAR, P.S.; Kennedy, J.F. Biotechnological approaches for the value addition of whey. *Crit. Rev. Biotechnol.* 2012, 32, 327–348.

PINHEIRO, V. Potencial biotecnológico da biomassa – influência do pré-tratamento enzimático para a digestão anaeróbia e fermentação alcoólica. Universidade de São Paulo, 2021.

PYLER, E.J.; GORTON, L.A. *Baking science & technology*. 4.ed. Kansas City: Sosland Publishing, 2008. v.1, 772p.

RAFIEE, A. et al. Biogas as an energy vector: a review. *Department of Theoretical Foundations of Electrical Engineering, Faculty of Energy*, 2021.

ROCHA, J. S.; BARBOSA, M. J.; WIJFFELS, R. H. Hydrogen production by photosynthetic bacteria: culture media, yields and efficiencies. Em: J. Miyake et al., editor. *Biohydrogen II - An approach to environmentally acceptable technology*. London, UK: Pergamon Press; 2001.

SACHS, Ignacy. Caminhos para o desenvolvimento sustentável. Coleção Idéias Sustentáveis. Organizadora: Paula Yone Stroh. Rio de Janeiro: Garamond, 2000. 96 p.

SCHRODER U, Scholz F. Bacterial batteries. *Nature Biotechnology*. 2003; 21(10): 1151-1152.

SERPA, E. Concentração de proteínas de soro de queijo por evaporação a vácuo e ultra filtração. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – Universidade Regional Integrada, Erechim, 2005.

SILVA, G. G., Souza, W. R., & Delabona, P. S. (2022). Estratégias biotecnológicas para produção de etanol celulósico no Brasil. *Bioenergia em Revista*, 12(1), 13–29.
SILVA, T.C. et al. Papel da fermentação láctica na produção de silagem. *PUBVET, Londrina*, V. 5, N. 1, Ed. 148, Art. 998, 2011.

SOUZA, A. P., Leite, D. C. C., Pattathil, S., Hahn, M. G., Buckeridge, M. S., & Oliveira, M. M. (2021). Potential of sugarcane industrial by-products as feedstock for second generation ethanol production. *Frontiers in Plant*.

SOUZA, M.M.V.M.; Tecnologia do hidrogênio. Rio de Janeiro: Synergia Editora, 2009.

TANISHO S. B. V.; SUZUKI, Y.; WAKAO, N. Fermentative hydrogen evolution by *Enterobacter aerogenes* strain E.82005. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 20, p. 541-545, 1987.

TEGHAMMAR, Anna et al. Enhanced biogas production from rice straw, triticale straw and softwood spruce by NMMO pretreatment. *Biomass and Bioenergy*, v. 36, p. 116-120, 2012.

THOMAZ, P. G.; ASSAD, R. S.; MOREIRA, L. F. P. Uso do fator de impacto e do índice H para avaliar pesquisadores e publicações. *Arquivos Brasileiros de Cardiologia*, v. 96, p. 90-93, 2011.

TEIXEIRA, L.; FONSECA, L. Perfil físico-químico do soro de queijos mozzarella e minas padrão produzidos em várias regiões do estado de Minas Gerais. *Arq. Bras. Med. Vet. Zootec*, v. 60, n. 1, p. 243-250, 2008.

TUGUME, M.; IBRAHIM, M. G.; NASR, M. Valorization of cheese whey wastewater to achieve sustainable development goals. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 211, p. 115273, abr. 2025.

UNICA – União da Indústria de Cana-de-Açúcar. Relatório Anual 2020. São Paulo: UNICA, 2020.

VALENTE, J. P. S.; PADILHA, P. M.; SILVA, A. M. M. Oxigênio dissolvido (OD), demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e demanda química de oxigênio (DQO) como parâmetros de poluição no ribeirão Lavapés/Botucatu – SP. *Eclética Química*, Vol. 22, núm 1, 1997.

VEERAMUTHU Ashokkumar, Gopalakrishnan Kumar, Hariprasath Lakshmanan, V.P. Chandramughi, G. Flora, Richa Kothari, Grzegorz Piechota. A critical review of biogas production and upgrading from organic wastes: Recent advances, challenges and opportunities. *Biomass and Bioenergy*, volume 194, 2025.

VIDAL, Maria de Fátima. Produção e mercado de etanol. Fortaleza: Banco do Nordeste do Brasil, ano 5, n.121, ago. 2020.

VIERHOUT, R. Renewable ethanol: driving jobs, growth and innovation throughout Europe. State of the Industry Report. ePure European Renewable Ethanol Association, 2014.

VISSER, A. The anaerobic treatment of sulfate containing wastewater. Internacional course on anaerobic treatment. Wageningen Agricultural University, Wageningen. 1995.

VON WRIGHT, A., AXELSSON, L., 2012. Lactic Acid Bacteria: An Introduction, in: Lahtinen, S., Ouwehand, A., Salminen, S., von Wright, A. (Eds.), *Lactic Acid Bacteria: Microbiological and Functional Aspects*. Taylor and Francis, New York, pp. 1–16.

WEE, Y. J., KIM, J. N., & RYU, H. W. Biotechnological production of lactic acid and its recent applications. *Food Technology and Biotechnology*, v. 44, n. 2, f. 163 172, 2006.

WANG, X.; ZHAO, Y-C.; *Int. J. Hydrogen Energy* 2009, 34, 245.

WOOLFORD, M.K. & SAWCZYK, M.K. An investigation into the effect of cultures of lactic acid bacteria on fermentation in silage. 1. Strain selection. *Grass Forage Science*. 39:139-148, 1984.

ZHANG, Y.; SHEN, J. Effect of temperature and iron concentration on the growth and hydrogen production of mixed bacteria. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 31, p. 441-446, 2005.