

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

INSTITUTO DE BIOTECNOLOGIA

LUIZA FERREIRA DOS SANTOS

PRODUÇÃO DE MEIO LIXIVIANTE POR CONSÓRCIO MICROBIANO PARA
RECUPERAÇÃO DE METAIS DE BATERIAS DE ÍONS DE LÍTIO

Uberlândia

2025

LUIZA FERREIRA DOS SANTOS

**PRODUÇÃO DE MEIO LIXIVIANTE POR CONSÓRCIO MICROBIANO PARA
RECUPERAÇÃO DE METAIS DE BATERIAS DE ÍONS DE LÍTIO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação do Curso de Biotecnologia, da
Universidade Federal de Uberlândia, para
obtenção do grau de Bacharel em Biotecnologia

Área de concentração: Engenharia Química

Orientadora: Dr.^a Juliana de Souza Ferreira

Uberlândia

2025

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

S237 Santos, Luiza Ferreira dos, 1997-
2025 Produção de meio lixiviante por consórcio microbiano para
recuperação de metais de baterias de íons de lítio [recurso
eletrônico] / Luiza Ferreira dos Santos. - 2025.

Orientadora: Juliana de Souza Ferreira de Souza Ferreira.
Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade
Federal de Uberlândia, Graduação em Biotecnologia.
Modo de acesso: Internet.
Inclui bibliografia.
Inclui ilustrações.

1. Biotecnologia. I. Ferreira, Juliana de Souza Ferreira de Souza,
1975-, (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia.
Graduação em Biotecnologia. III. Título.

CDU: 60

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074

LUIZA FERREIRA DOS SANTOS

**PRODUÇÃO DE MEIO LIXIVIANTE POR CONSÓRCIO MICROBIANO PARA
RECUPERAÇÃO DE METAIS DE BATERIAS DE ÍONS DE LÍTIO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação do Curso de Biotecnologia, da
Universidade Federal de Uberlândia, para
obtenção do grau de Bacharel em Biotecnologia

Área de concentração: Engenharia Química

Uberlândia, 12 de maio de 2025

Banca Examinadora:

Prof^a. Dr^a. Juliana de Souza Ferreira, FEQUI/UFU

Prof^a. Dr^a. Raquel Cristina Cavalcanti Dantas, IBTEC/UFU

M. Sc. Gabriela Aparecida Santos, PPGEQ/FEQUI/UFU

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela Sua graça, por ter me dado força e ânimo para não desistir e continuar lutando pelo meu sonho.

À minha querida mãe e avô, Dalva e Otávio, e ao meu marido, Rainê, pela paciência, carinho, motivação e apoio, que me fizeram não desanimar nos dias difíceis.

À Prof. (a) Dra. Juliana, por ter dividido muito dos seus conhecimentos comigo e por ter me proporcionado poder trabalhar e aprender com você.

Às minhas colegas de laboratório, a aluna de iniciação científica Maria Eduarda Gonzaga de Souza e M. Sc. Rayelle Caroline Silva e aos meus amigos de classe que conviveram comigo durante a graduação e me ajudaram em todos os momentos.

A todos os professores que tive ao longo do curso e que compartilharam seu conhecimento e sabedoria, colaborando para meu crescimento pessoal e profissional.

A Universidade Federal de Uberlândia, pelos recursos e apoio que permitiram que esta obra fosse realizada.

“Todos esses que aí estão
Atravancando meu Caminho,
Eles passarão...
Eu passarinho.”
(Mário Quintana)

RESUMO

Este trabalho nasceu de uma problemática: como transformar o lixo tecnológico que acumulamos em algo valioso? Para tanto, focamos nas baterias de celulares que, quando descartadas, não só poluem o meio ambiente como desperdiçam metais preciosos. Dentre os métodos empregados, tem-se lixiviação - um processo que meio ácido para solubilizar os metais da amostra sólida. A atual limitação deste método está no emprego de ácidos inorgânicos, que exigem infraestrutura resistente a estes reagentes e não são biodegradáveis. Há estudos de lixiviação substituindo os ácidos inorgânicos por ácidos orgânicos, que são biodegradáveis, com resultados promissores. A proposta deste trabalho foi a produção de um meio lixiviente, rico em ácidos orgânicos, produzidos por fermentação usando um consórcio microbiano anaeróbico e heterotrófico. Os ácidos orgânicos podem ter função de solubilizar os metais, de serem agentes redutores e ainda quelantes que contribuem para melhorar a recuperação dos metais. Além de ácidos orgânicos, um meio com estas características pode conter compostos fenólicos que atuam como quelantes. Na metodologia é descrito os procedimentos empregados na pesquisa para produção de ácidos orgânicos via fermentação anaeróbica por consórcios microbianos. Inicialmente, os microrganismos foram mantidos em um meio sintético adequado, com lactose como fonte de carbono. Os ensaios fermentativos foram conduzidos com dois consórcios distintos, provenientes de efluentes industriais, sendo incubados sob condições controladas por 10 dias. Durante esse período, foram monitoradas variáveis como crescimento celular, consumo de lactose, pH do meio e produção de ácidos orgânicos (principalmente ácido láctico, butírico e propiônico). A análise dessas substâncias foi feita por espectrofotometria (DNS) para açúcares e cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC) para ácidos orgânicos. O meio produzido apresentou maior concentração de ácido láctico (cerca de 13 g/L), seguido de ácido butírico e ácido propiônico. Pela literatura há estudos que alcançaram alta recuperação usando o ácido láctico, que neste trabalho foi obtido em maior concentração no meio produzido, indicando o potencial de lixiviação do meio produzido. Esta tecnologia permite integrar um processo de tratamento de efluentes ao processo de lixiviação, representando redução do custo de matéria-prima, de etapas e minimização dos impactos ambientais.

Palavras-chave: hidrometalurgia; ácidos orgânicos; reciclagem inteligente; lixo eletrônico; química verde; economia circular.

ABSTRACT

This work arose from a problem: how can we transform the technological waste we accumulate into something valuable? To this end, we focused on cell phone batteries, which, when discarded, not only pollute the environment but also waste precious metals. Among the methods used is leaching - a process that uses an acidic medium to solubilize the metals in the solid sample. The current limitation of this method is the use of inorganic acids, which require infrastructure resistant to these reagents and are not biodegradable. There are leaching studies replacing inorganic acids with organic acids, which are biodegradable, with promising results. The proposal of this work was to produce a leaching medium, rich in organic acids, produced by fermentation using an anaerobic and heterotrophic microbial consortium. Organic acids can have the function of solubilizing metals, of being reducing agents and also chelating agents that contribute to improving metal recovery. In addition to organic acids, a medium with these characteristics can contain phenolic compounds that act as chelating agents. The methodology describes the procedures used in the research for the production of organic acids via anaerobic fermentation by microbial consortia. Initially, the microorganisms were maintained in a suitable synthetic medium, with lactose as a carbon source. The fermentation tests were conducted with two different consortia from industrial effluents, incubated under controlled conditions for 10 days. During this period, variables such as cell growth, lactose consumption, pH of the medium and production of organic acids (mainly lactic, butyric and propionic acids) were monitored. The analysis of these substances was performed by spectrophotometry (DNS) for sugars and high performance liquid chromatography (HPLC) for organic acids. The medium produced presented a higher concentration of lactic acid (approximately 13 g/L), followed by butyric acid and propionic acid. There are studies in the literature that achieved high recovery using lactic acid, which in this work was obtained in higher concentration in the produced medium, indicating the leaching potential of the produced medium. This technology allows the integration of an effluent treatment process into the leaching process, representing a reduction in the cost of raw materials, stages and minimization of environmental impacts.

Keywords: hydrometallurgy; organic acids; smart recycling; e-wastes; green chemistry; circular economy.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Principais problemas causados à saúde e ao meio ambiente das substâncias incorporadas aos equipamentos eletrônicos.	15
Tabela 2 -	Empresas que realizam a reciclagem de baterias e as características presentes no processo de cada uma.	22
Tabela 3 -	Amostragem do perfil de estudos publicados na literatura	24
Tabela 4 -	Composição do meio sintético para ensaio fermentativo	29

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	9
RESUMO.....	11
LISTA DE TABELAS	13
1 INTRODUÇÃO.....	10
1.1 Objetivos.....	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1 O aumento na utilização de eletrônicos e a importância da reciclagem.....	13
2.2 Bateria de Íons de Lítio (LIB)	16
2.3 Legislação	18
2.4 Processo de reciclagem das baterias.....	20
2.5 Biolixiviação.....	23
2.5.1 <i>Lixiviação usando ácidos orgânicos.....</i>	25
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	27
3.1 Material.....	27
3.1.1 <i>Reagentes</i>	28
3.2 Metodologia	29
3.2.1 <i>Manutenção das linhagens microbianas.....</i>	29
3.2.2 <i>Ensaios de produção de ácidos orgânicos</i>	29
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	32
4.1 Crescimento Celular e Redução do pH - Consórcio 1	32
4.2 Crescimento Celular e Redução do pH - Consórcio 2	33
4.3 Consumo de açúcares e produção de ácidos orgânicos - Consórcio 1.....	34
4.4 Consumo de açúcares e produção de ácidos orgânicos - Consórcio 2	35
4.5 Potencial dos diferentes consórcios microbianos para recuperação de metais de baterias de íons de lítio	37
5 CONCLUSÃO.....	38
6 REFERÊNCIAS.....	40

1 INTRODUÇÃO

O lítio pertence ao grupo dos metais alcalinos e é o menor e mais leve átomo não apenas entre esses metais, mas também entre todos os metais da tabela periódica (Massabni, 2023). Esse elemento, que há muito tempo é empregado na fabricação de vidros e cerâmicas, no tratamento do ar e como aditivo em lingotes contínuos, passou a desempenhar um papel essencial como mineral estratégico na produção de baterias, tornando-se indispensável para a transição energética global (Energia, 2023).

O lítio é encontrado principalmente em salmouras evaporíticas e em rochas conhecidas como pegmatitos. No Brasil, ele é extraído do espodumênio presente em pegmatitos, especialmente no Vale do Jequitinhonha (Minas Gerais), na província de Borborema (que abrange Pernambuco, Rio Grande do Norte e Ceará) e na província de Solonópole (Ceará). O mineral encontrado no país é considerado de alta qualidade. De acordo com o Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS), as reservas brasileiras totalizam 1 milhão de toneladas, colocando o Brasil como a 7^a maior reserva mundial. Além disso, o país é o 5º maior produtor mundial e, em 2022, produziu 2.200 toneladas (Energia, 2023).

A produção de baterias utilizando íons de lítio tem aumentado significativamente nos últimos anos, sendo amplamente concentrada na China, Coreia do Sul e Japão, no Leste Asiático. No entanto, investimentos anunciados nos Estados Unidos e na Europa indicam uma disputa pela ampliação da capacidade de produção e inovação, ligada à soberania energética dos países. Esse cenário tem impulsionado a formação de novos conglomerados industriais por meio de fusões, parcerias em pesquisa e desenvolvimento e *joint ventures* entre empresas tradicionais dos setores de tecnologia da informação e automotivo, além da entrada de novos participantes no mercado de baterias para veículos elétricos (Lemos *et al.*, 2024).

De acordo com Wang *et al.* (2025), as baterias de íons de lítio (LIBs) já fazem parte do nosso dia a dia, sendo usadas em dispositivos eletrônicos, veículos elétricos e redes inteligentes, graças à sua alta densidade energética, durabilidade e leveza, elas são vistas como uma das tecnologias mais promissoras para o armazenamento de energia no futuro.

Segundo a Agência Internacional de Energia, a produção de baterias de íons de

lítio (LIBs) deve aumentar de 1,57 TWh em 2022 para 6,79 TWh em 2030. O ciclo de vida dessas baterias varia conforme os materiais dos eletrodos, podendo durar de 500 a 30.000 ciclos. Um cátodo de óxido de cobalto e lítio (LiCoO_2) combinado com um ânodo de grafite dura entre 500 e 1.500 ciclos, enquanto um cátodo de óxido de cobalto e manganês de níquel pode alcançar entre 1.000 e 7.000 ciclos. Já um cátodo de LiCoO_2 com ânodo de óxido de titanato de lítio (NTO) pode chegar a 30.000 ciclos. Com isso, a vida útil das baterias em dispositivos portáteis é de aproximadamente 2 a 3 anos, enquanto em veículos elétricos pode alcançar cerca de 10 anos, gerando resíduos ao término desse período (Chandakhiaw *et al.*, 2024).

O descarte inadequado desses materiais pode representar riscos para o meio ambiente e para a saúde humana devido à presença de elementos tóxicos (Lemos *et al.*, 2024). Os resíduos de baterias são considerados um recurso renovável, pois contêm metais valiosos que podem ser recuperados. As baterias de íons de lítio (LIBs) apresentam concentrações de cobalto (30,8%–42,9%), cobre (13%), alumínio (6,5%–10%) e lítio (2,45%–8,88%), dependendo da composição do cátodo LCO. O minério de óxido de cobre-cobalto da República Democrática do Congo, maior produtora global de cobalto, contém 11,58% de Co, enquanto o espodumênio de alta pureza possui 3,72% de Li. Dessa forma, a reciclagem eficiente das LIBs não só contribui para a preservação ambiental, como também minimiza preocupações sobre a escassez de recursos minerais (Chandakhiaw *et al.*, 2024).

Tradicionalmente, a reciclagem dos metais valiosos presentes nos cátodos degradados dessas baterias, como cobalto (Co), níquel (Ni) e lítio (Li), é feita por meio de processos pirometalúrgicos e hidrometalúrgicos. No entanto, a pirometalurgia demanda alto consumo de energia e libera gases tóxicos durante a purificação e separação dos materiais. Já a hidrometalurgia (ou lixiviação), em que se pode atingir recuperação de aproximadamente 99% de lítio (Li), utiliza ácidos fortes como ácido nítrico (HNO_3), ácido sulfúrico (H_2SO_4) e ácido clorídrico (HCl) e envolve um processo complexo para extrair esses metais, o que pode resultar em grave poluição ácida e custos elevados de reciclagem, além de riscos elevados à segurança e exigir condições operacionais bastante rigorosas (Gao *et al.*, 2025; Priyadarsini, 2025).

Além desses métodos mais tradicionais, existe também a possibilidade do uso da biolixiviação, que de acordo com Yun *et al.* (2024) se trata de uma alternativa sustentável e econômica aos métodos convencionais de pirometalurgia e

hidrometalurgia. Esse processo utiliza microrganismos e metabólicos para extrair metais de minérios e resíduos. Apesar dos desafios, como o longo tempo de tratamento e a baixa recuperação de metais em altas densidades de polpa devido à toxicidade dos metais sobre os microrganismos, a biolixiviação tem sido amplamente pesquisada por sua viabilidade ambiental, custo reduzido, baixa emissão de gases tóxicos e menor consumo de energia.

A biolixiviação de metais por bactérias é classificada em dois tipos principais: direta e indireta, também chamadas de contato e não contato. Essas categorias se diferenciam pela existência ou ausência de interação física entre os microrganismos e os materiais sólidos durante o processo. Na biolixiviação direta, os microrganismos atuam diretamente sobre os sulfetos metálicos, enquanto na biolixiviação indireta a extração dos metais ocorre por meio de compostos gerados pelos microrganismos, como ferro férrico e ácidos orgânicos, que auxiliam na dissolução dos metais (Priyadarsini; Das, 2025).

Uma forma de combinar os benefícios da maior eficiência e menor tempo de processo da lixiviação, com redução de impactos ambientais, custos e em condições de processo moderadas da biolixiviação, é a realização do que se denomina de biolixiviação em duas etapas: produção de meio lixiviente por microrganismos que produzirão os metabólicos que, sendo empregados numa segunda esta, a de lixiviação (ausência de células), têm ações de biossolubilização dos metais, quelantes e redutores. (NETPAE; SUCKLEY, 2020)

Diante desse levantamento, fica claro que a busca por novas técnicas de recuperação de metais de baterias, aliada ao aprimoramento dos métodos existentes, pode impulsionar avanços tecnológicos. No futuro, isso tornará possível a aplicação industrial desse processo de forma sustentável, reduzindo custos, minimizando impactos ambientais e diminuindo a exploração de reservas minerais.

Este estudo investigou a atuação de um consórcio microbiano heterotrófico anaeróbio originado de um efluente industrial na área de laticínios, para a produção de um meio rico em ácidos orgânicos, que poderá ser aplicado na lixiviação para recuperação de metais, como o Li e o Co das baterias de íons de lítio.

1.1 Objetivos

Para se alcançar o objetivo principal de avaliar a produção de meio lixiviante por fermentação por cultura mista, tem-se como objetivos específicos:

- Comparar o desempenho fermentativo de dois consórcios microbianos na conversão do permeado de soro de leite em ácidos orgânicos sob condições anaeróbias controladas;
- Quantificar e comparar o crescimento microbiano, o consumo de lactose, a variação de pH e a produção de ácidos orgânicos ao longo do tempo para cada consórcio;
- Verificar diferenças no perfil de ácidos orgânicos produzidos por cada consórcio, considerando a mesma fonte de carbono e condições operacionais;
- Discutir o potencial de aproveitamento de resíduos agroindustriais como substrato para processos fermentativos voltados à produção de compostos de interesse industrial

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O aumento na utilização de eletrônicos e a importância da reciclagem

A sociedade moderna tem sido cada vez mais atraída pelas inovações tecnológicas, o que impulsiona a produção em larga escala de produtos eletroeletrônicos. Como consequência, esse avanço acelerado, aliado à rápida substituição desses equipamentos devido à obsolescência programada e às estratégias de marketing que incentivam o consumo excessivo, contribui para um aumento expressivo dos resíduos eletrônicos. Muitas vezes, esse descarte ocorre de forma prematura e inadequada, causando impactos ambientais significativos (CINTRA; CIDADE, 2020)

De acordo com o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP), são produzidas anualmente entre 20 e 50 milhões de toneladas de lixo eletrônico no mundo. No Brasil, o descarte de equipamentos eletrônicos ultrapassa 500 mil toneladas por ano. Esses resíduos incluem celulares, placas de circuito, baterias recarregáveis, monitores, impressoras, equipamentos de áudio e vídeo, além de outros

dispositivos que chegam ao fim de sua vida útil devido a falhas operacionais ou obsolescência tecnológica. (MOREIRA et al., 2024)

O mercado de telefonia móvel, em particular, tem apresentado um crescimento significativo. Segundo dados da Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL), há mais de 154 milhões de telefones celulares ativos no Brasil e, globalmente, estima-se que existam cerca de 4 bilhões de aparelhos em uso. Considerando que a vida útil média de um celular é inferior a dois anos, estima-se que entre 10 e 20% dos dispositivos fabricados sejam descartados anualmente. Esse volume equivale a cerca de 3 mil toneladas de celulares inutilizados que, em sua maioria, acabam em lixões ou aterros sanitários (MOREIRA et al., 2024)

A produção em larga escala de eletrônicos aumentou significativamente a demanda por metais utilizados na fabricação desses dispositivos, reduzindo a disponibilidade desses recursos e elevando seus custos. O consumo sustentável mundial de recursos naturais deveria ser de, em média, 2,2 hectares por pessoa. No entanto, essa média é de aproximadamente 4,8 hectares na Europa, enquanto na América atinge cerca de 9,6 hectares. Essa discrepância evidencia um desequilíbrio entre o consumo e a recuperação dos recursos naturais (CINTRA; CIDADE, 2020) Em resposta a esses problemas, algumas fabricantes de celulares, como Motorola (2018), Samsung (2018) e LG (2018), implementaram iniciativas para incentivar o descarte adequado de resíduos eletrônicos no Brasil. Essas empresas disponibilizam pontos de coleta e informam os consumidores sobre a importância do descarte responsável. No entanto, a gestão eficiente desses resíduos não deve ser apenas uma responsabilidade do setor empresarial de acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), é fundamental que o setor público implemente políticas eficazes de destinação correta de resíduos, ao mesmo tempo em que os consumidores devem adotar práticas responsáveis de descarte. (CINTRA; CIDADE, 2020)

Diversas prefeituras têm subsidiado a instalação de centros de triagem para a separação e comercialização de resíduos sólidos urbanos. Esses resíduos são encaminhados para associações de reciclagem cadastradas nos municípios, onde são devidamente processados. Entretanto, a falta de informações sobre os Pontos de Entrega Voluntária (PEVs) e empresas especializadas no recolhimento de lixo eletrônico leva muitos consumidores a descartá-los de maneira inadequada misturando-os ao lixo doméstico ou orgânico (CINTRA; CIDADE, 2020) Do ponto de

vista ambiental e toxicológico, os telefones celulares representam uma fonte significativa de substâncias nocivas. Quando queimados, podem liberar poluentes atmosféricos; quando descartados em aterros sanitários, podem contaminar o solo e os recursos hídricos devido ao processo de lixiviação. Entre os metais tóxicos presentes nesses dispositivos estão o arsênio, chumbo, cádmio, cobre, níquel entre outros (MOREIRA et al., 2024).

Embora esses metais pesados estejam naturalmente presentes no ambiente e sejam essenciais em pequenas quantidades, sua acumulação em níveis elevados pode provocar danos graves à saúde humana e ao ecossistema. Ao penetrar nos lençóis freáticos, metais como ouro, prata, gálio, mercúrio, arsênio, cadmio, chumbo, berílio, entre outros, contaminam a água utilizada na irrigação de plantações e na alimentação de rebanhos, resultando na bioacumulação desses elementos em alimentos de origem vegetal e animal. Além disso, a exposição direta a placas eletrônicas em lixões a céu aberto representa um risco significativo à saúde dos trabalhadores desses locais. (OLIVEIRA et al., 2021).

O Quadro 1 apresenta os principais impactos ambientais e danos à saúde causados pelas substâncias presentes nos equipamentos eletrônicos.

De modo geral, pode-se observar que estes metais são bioacumulados nos organismos da flora e fauna e quando atingem os seres humanos provocam problemas como câncer e outras enfermidades em diversos sistemas (digestivo, pulmonar, nervoso, músculo e ossos).

Tabela 1 - Principais problemas causados à saúde e ao meio ambiente das substâncias incorporadas aos equipamentos eletrônicos (Fonte: DAS; SULTANA; NDHLALA; MONDAL; CHANDRA, 2023).

Metais	Potenciais danos à saúde	Potenciais danos ao meio ambiente
Retardadores de chamas bromados	Cancerígenos e neurotóxicos; apresentam potenciais danos na função reprodutora.	Potencialmente solúveis em água, voláteis e bioacumulativos; Em incineradores podem gerar dioxinas e furanos.
Cd	Potenciais efeitos irreversíveis nos rins, podem provocar câncer e desmineralização óssea; Transtornos digestivos; Lesões pulmonares; Envenenamento e pneumonite.	Bioacumulativo e tóxico.

Pb	Potenciais danos no sistema nervoso, endócrino, cardiovascular e rins; Dores abdominais; Disfunção renal; Anemia; Problemas pulmonares; Neurite periférica e encefalopatia.	Bioacumulativo, gera efeitos tóxicos na flora, fauna e microrganismos.
Hg	Possíveis danos cerebrais, acumulativos e podem ser transmitidos para o feto; Gengivite, salivação e diarreia; Dores abdominais, congestão, inapetência, indigestão; Dermatite e elevação da pressão arterial; Estomatites, ulceração da faringe e do esôfago, lesões renais e no tubo digestivo; Insônia, dores de cabeça, colapso, delírios e convulsões.	Potencialmente solúvel em água e acumulativo nos organismos vivos.
Ba	Inchaço no cérebro; Fraqueza muscular; Potenciais danos no coração, fígado e baço.	
Cu	Pode gerar cirrose hepática.	

2.2 Bateria de Íons de Lítio (LIB)

No século XX, o uso de baterias convencionais impulsionou a busca por alternativas que atendessem de forma mais eficiente aos requisitos de capacidade específica e de energia específica. Diante dessa demanda, o lítio se destacou como um componente promissor, devido às suas propriedades físico-químicas favoráveis para aplicação em baterias. Esse metal alcalino apresenta características favoráveis para utilização como um dos eletrodos de bateria: é o metal mais leve em condições ambientais de pressão e temperatura (densidade de $0,53 \text{ g/cm}^3$) e possui um potencial padrão de eletrodo significativamente negativo (-3,05 V em relação ao eletrodo padrão de hidrogênio - EPH). Além disso, sua baixa massa atômica contribui para uma elevada capacidade de carga (BOCCHI; BIAGGIO; ROCHA-FILHO, 2019).

Outro fator relevante é que o lítio não é encontrado em seu estado metálico livre na natureza, mas sim sob a forma de compostos iônicos (JESUS; NETO; SILVA, 2023), o que reforça seu potencial como ânodo em baterias com altos valores de potencial de célula e energia específica. No entanto, o lítio metálico é altamente reativo, sendo incompatível com água e ar. Como consequência, tornou-se necessário o desenvolvimento de eletrólitos não aquosos para garantir a viabilidade do seu uso em sistemas eletroquímicos (BOCCHI; BIAGGIO; ROCHA- FILHO, 2019).

Considerando que as baterias de íon de lítio apresentam elevada densidade de energia, longa vida útil, baixa massa, reduzida taxa de autodescarga e toxicidade significativamente inferior em comparação a outros tipos de baterias, como as de

níquel-hidreto metálico e níquel cádmio. Devido a essas características, as baterias de íon de lítio têm sido amplamente utilizadas em câmeras fotográficas, telefones celulares e diversos equipamentos eletroeletrônicos (EEE) portáteis. O desenvolvimento de versões mais modernas dessas tecnologias, aliado ao maior acesso da população a esses dispositivos, tem contribuído para o crescimento da produção e do consumo de EEE e, consequentemente, de suas respectivas baterias. Atualmente, mais de 60% da comercialização de energia portátil é suprida por baterias de íon de lítio, cujas características também as colocam na posição de destaque no avanço das tecnologias para veículos híbridos (SILVA; AFONSO; MAHLER, 2018).

As baterias de íon de lítio são compostas, em sua estrutura por um ânodo formado por grafite, lítio, carbono e fluoreto de polivinilideno (PVDF), substância responsável por fixar os demais componentes ao coletor de corrente, que consiste em uma lâmina de cobre. O eletrólito, por sua vez, é composto por hexafluorfosfato de lítio (LiPF_6) dissolvido em um solvente orgânico, geralmente carbonato de etileno (CE), carbonato de dietila (DEC), carbonato de dimetila (DMC) ou por uma mistura desses compostos. O separador é usualmente fabricado a partir de polímeros como polipropileno (PP) ou polietileno (PE). O cátodo é constituído por carbono, um óxido misto contendo lítio e cobalto (como o LiCoO_2), além de PVDF, que também atua na fixação dos componentes ao coletor de corrente do cátodo, o qual é uma lâmina de alumínio. Atualmente, cerca de 25% de cobalto produzido globalmente é destinado à fabricação de baterias e a expansão do mercado de equipamentos eletroeletrônicos portáteis que tem impulsionado a valorização desse metal no comércio internacional (SILVA; AFONSO; MAHLER, 2018).

Os estoques de lítio podem ser encontrados sob duas formas principais de sais: em minas de rocha dura, localizadas principalmente na Austrália, que produzem concentrados minerais de lítio destinados à aplicações técnicas e à transformação em compostos químicos, atividade realizada quase exclusivamente na China; e em salmouras continentais, como ocorre nos salares da Argentina, Chile, China e Afeganistão, mais utilizadas para a produção de carbonato, hidróxido e cloreto de lítio. Em geral, essas regiões de salmouras são consideradas de menor custo de extração, o que as torna mais viáveis economicamente quando comparadas às fontes minerais de lítio, embora ambas estejam situadas em áreas remotas e apresentem desafios técnicos e logísticos bastante distintos (JESUS; NETO; SILVA, 2023)

2.3 Legislação

Diante dos impactos ambientais e à saúde pública decorrentes do descarte de resíduos eletrônicos, especialmente baterias, tornou-se essencial a formulação de políticas e normas voltadas ao controle da utilização de metais tóxicos e à destinação correta desses materiais. No Brasil, tais resíduos são regulamentados por legislações específicas que tratam desde a classificação dos resíduos sólidos até a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos (DIAS et al., 2024).

Conforme a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), resíduos sólidos são definidos como materiais sólidos e semissólidos, oriundos de atividades industriais, hospitalares, comerciais, domésticas, agrícolas, de serviços e de varrição. As baterias, por sua vez, enquadram-se como resíduos sólidos urbanos de origem doméstica, sendo classificadas como Resíduos de Classe I – Perigosos, devido ao seu potencial tóxico. (CRUZ; SILVA; OLIVEIRA, 2020).

A primeira regulamentação brasileira voltada ao descarte de pilhas e baterias foi estabelecida pela Resolução CONAMA n.º 257, de 30 de junho de 1999. Com essa medida, o Brasil tornou-se pioneiro na América do Sul ao instituir uma legislação específica para a gestão desses resíduos. (CRUZ; SILVA; OLIVEIRA, 2020).

Posteriormente, outras normas foram incorporadas, destacando-se a Resolução CONAMA n.º 424, de 22 de abril de 2010, que determina os limites máximos de chumbo, mercúrio e cádmio em baterias e pilhas comercializadas no país, além de estabelecer critérios para sua gestão ambiental adequada (BRASIL, 2012).

Segundo a Resolução n.º 424/2010, as baterias tipo zinco-manganês e alcalino-manganês devem conter, no máximo, 0,002% de cádmio, 0,1% de chumbo e 0,0005% de mercúrio. Já as baterias do tipo chumbo-ácido, não podem ultrapassar 0,005% de mercúrio e 0,010% de cádmio. Além disso, a norma determina que baterias contendo chumbo-ácido, óxido de mercúrio e níquel-cádmio, sejam destinadas exclusivamente a recicladores licenciados, proibindo seu descarte em aterros sanitários ou incineração (BRASIL, 2012).

A legislação também enfatiza a importância da educação ambiental, exigindo que embalagens e materiais publicitários informem os riscos do descarte inadequado e orientem os consumidores a devolverem os resíduos, após o término da vida útil, a pontos de coleta ou redes.

autorizadas. Estabelecimentos comerciais são obrigados a disponibilizar locais apropriados para a coleta, enquanto os fabricantes devem investir em tecnologias que reduzam ou eliminem o uso de metais pesados. (BRASIL, 2012).

A Lei 12.305/10, que institui Política Nacional de Resíduos Sólidos, complementa as resoluções do CONAMA ao estabelecer diretrizes mais amplas para o gerenciamento de resíduos perigosos. De acordo com essa legislação, empresas do setor químico devem elaborar planos de gerenciamento de resíduos sólidos e se cadastrarem no Cadastro Nacional de Operadores de Resíduos Perigosos. A PNRS promove a prevenção e a redução da geração de resíduos, por meio da adoção de hábitos de consumo sustentável e do incentivo à reutilização e à reciclagem. A lei estabelece a responsabilidade compartilhada entre fabricantes, distribuidores, comerciantes, importadores, consumidores e o poder público com o objetivo de eliminar lixões e fomentar o planejamento urbano sustentável. De acordo com essa legislação, os fabricantes de resíduos perigosos têm o prazo de 12 meses para apresentar propostas de gestão, estando sujeitos a penalidades em caso de descumprimento (KIM; BARROS, 2023; SILVEIRA; FIGUEIREDO, 2021)

Em nível internacional, cada país possui sua própria legislação referente ao gerenciamento de resíduos eletrônicos e baterias. Na União Europeia, a gestão de resíduos eletrônicos é regulada pela Diretiva de Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (Diretiva de REEE - 2002/96/CE), em vigor desde 2003. Essa norma estabelece metas de redução da geração de resíduos e promove a reutilização, reciclagem e recuperação de materiais, visando a melhoria do desempenho ambiental dos Estados-Membros. Inicialmente, a diretiva estipulava um recolhimento mínimo de 4 kg de resíduos eletrônicos por habitante ao ano. A partir de 2019, esse limite foi ampliado para 65% da média dos equipamentos eletrônicos comercializados nos três anos anteriores ou 85% dos resíduos efetivamente gerados (SHITTU; WILLIAMS; SHAW, 2021).

Na África, apesar de inexistirem legislações específicas e efetivas em muitos países, há acordos internacionais relevantes, como a Convenção de Basileia (em vigor desde 1992) e as Convenções de Bamako (adotada em 1991 e implementada em 1998). A Convenção de Basileia visa controlar o trânsito transfronteiriço de resíduos perigosos, especialmente doados de países desenvolvidos para países em desenvolvimento. Já a Convenção de Bamako, focada no continente africano, reforça

as disposições da Convenção de Basileia proibindo a importação de resíduos tóxicos e promovendo a gestão ambientalmente adequada desses materiais (SHITTU; WILLIAMS; SHAW, 2021)

A Ásia, responsável por cerca de 24,9 milhões de toneladas de lixo eletrônico, possui legislações diversas entre seus países. Embora o volume absoluto seja elevado, a geração per capita é de 5,6 kg por habitante. As diferenças legislativas entre os países asiáticos refletem distintos níveis de desenvolvimento e comprometimento com políticas ambientais. (RAJESH; KANAKADHURGA; PRABAHARAN, 2022)

Nos Estados Unidos, a gestão de resíduos sólidos é regida pela Lei de Conservação e Recuperação de Recursos (RCRA), de 1976, e pela Emenda sobre Resíduos Perigosos e Sólidos (HSWA) de 1984. No entanto, ambas apresentam limitações quanto à regulação específica dos resíduos eletrônicos, devido a inúmeras isenções incluídas na legislação. Embora propostas de leis federais mais abrangentes tenham sido apresentadas, até o momento não foram aprovadas. Atualmente, 25 estados norte-americanos contam com legislações próprias que regulamentam a coleta proibindo seu descarte ou incineração. Essa diversidade normativa entre estados representa um desafio para a indústria da reciclagem, demandando a criação de uma legislação unificada e eficaz em nível nacional e a reciclagem de resíduos eletrônicos, proibindo seu descarte ou incineração. Essa diversidade normativa entre estados representa um desafio para a indústria da reciclagem, demandando a criação de uma legislação unificada e eficaz em nível nacional. (SCHUMACHER; AGBEMABIESE, 2019)

2.4 Processo de reciclagem das baterias

Em virtude das crescentes pressões políticas, sociais e das regulamentações ambientais que determinam a destinação adequada de baterias e pilhas, diversos métodos de tratamento têm sido desenvolvidos com o objetivo de possibilitar a reciclagem desses resíduos metálicos (WU et al., 2023).

Inicialmente, para a efetiva reciclagem de baterias e pilhas é fundamental realizar a separação dos itens por categorias. Considerando a ampla variedade da composição química desses dispositivos, a maior parte das técnicas de reciclagem foi elaborada para atuar apenas com tipos específicos de baterias e pilhas (WU et al., 2023).

O processo de reciclagem das LIBs é, de forma geral dividido em duas etapas principais: a preparação da sucata e o processamento metalúrgico. Na etapa de preparação da sucata, realiza-se inicialmente a triagem dos dispositivos, com a separação conforme o tipo de bateria ou pilha. Essa triagem pode envolver procedimentos manuais e automatizados, utilizando técnicas como separação por tamanho, campos magnéticos, análise por imagens de raios-X, sensores ópticos e leitura de códigos eletrônicos nos materiais coletados. Em seguida, aplica-se o tratamento físico baseado em operações típicas da indústria mineral, como a britagem, cominuição, separação magnética, eletrostática e em meio denso. A britagem, por exemplo, permite a separação entre os componentes metálicos e plásticos das células, podendo ser realizada de forma automatizada ou manual, dependendo da unidade de tratamento (WINDISCH-KERN et al., 2022)

Já o processamento metalúrgico pode seguir três vias principais: pirometalurgia, hidrometalurgia e biohidrometalurgia. A pirometalurgia é comumente empregada na recuperação de cobalto presente em baterias de íon de lítio. O processo inicia-se com o desmonte das baterias e separação das células, que são então submetidas ao aquecimento e fundição. Etapas de pré-aquecimento, pirólise e fundição são utilizadas para reduzir o tamanho das baterias. Para a remoção completa do eletrólito, a caldeira deve operar abaixo de 300 °C, enquanto a zona de pirólise deve manter-se acima de 700 °C, assegurando a eliminação dos plásticos. Na etapa de fundição, os metais são convertidos em ligas (como Cu, Co, Ni e Fe) e escórias (Li, Al, Si, Ca e traços de Fe) (ABDALLA et al., 2023). Destaca-se pela simplicidade do processo, porém consome grandes quantidades de energia, libera gases de efeito estufa e pode resultar em perda de materiais.

A hidrometalurgia envolve a lixiviação com o uso de ácidos ou álcalis, seguida de etapas de separação e purificação. A massa negra, previamente triturada e peneirada, é dissolvida em um reagente químico. Processos de precipitação químicas, extração ou adsorção são aplicados para isolar metais como Co, Mn e Ni, permitindo a recuperação do lítio presente na solução remanescente. Etapas preliminares como descarga e desmontagem são comuns nesta rota. Embora demande maior tempo de processamento, a hidrometalurgia consome menos energia e emite menos gases poluentes quando comparada à pirometalurgia (ABDALLA et al., 2023).

A biohidrometalurgia, também conhecida por biolixiviação utiliza

microrganismos, como bactérias e fungos, para produção de ácidos orgânicos, como os derivados do ciclo de Krebs, que promovem solubilização dos metais. Essa abordagem substitui o uso de ácidos industriais, sendo mais sustentável e econômica. No entanto, o processo exige longos tempos de incubação (aproximadamente 14 dias), maior proporção líquido/sólido e rigoroso controle de variáveis como temperatura, pH, aeração, contaminações e densidade microbiana no biorreator para garantir a eficiência da lixiviação, portanto, são sensíveis a variações ambientais, o que pode comprometer os rendimentos (ABDALLA et al., 2023; Yun et al., 2024).

A biohidrometalurgia e a hidrometalurgia apresentam maior pureza nos metais recuperados. A seguir, apresenta-se Quadro 2 com algumas das principais empresas que atuam no processo de reciclagem de baterias de íon de lítio. Entretanto, são poucas as empresas que expõe o método utilizado. Por este Quadro 2, das empresas que divulgam o método utilizado, observa-se que a lixiviação é o adotado isoladamente ou em combinação com outras técnicas.

Tabela 2 - Empresas que realizam a reciclagem de baterias e as características presentes no processo de cada uma. (Fonte: DARIO; MARCO; ELISABETTA; ROBERTO; CRISTIANO; POMPEO; LEONARDO; ANTONIO, 2022)

Empresas	Característica	Referências
Neometais	Trabalha com o método hidrometalúrgico para recuperar os metais dos LIBs usados, incluindo o lítio;	DARIO; MARCO; ELISABETTA; ROBERTO; CRISTIANO; POMPEO; LEONARDO; ANTONIO, 2022)
Duesenfeld	Líder na reciclagem de baterias íon-lítio; Inovação em procedimentos para extinguir a necessidade de os módulos da bateria serem derretidos ou aquecidos no início; utiliza métodos mecânicos, termodinâmicos e hidrometalúrgicos; atinge as mais altas taxas de recuperação de material usando a menor quantidade de energia. Opera o único processo de reciclagem que proporciona grafite, eletrólitos e lítio para reciclagem de materiais, além de metais mais usuais;	DARIO; MARCO; ELISABETTA; ROBERTO; CRISTIANO; POMPEO; LEONARDO; ANTONIO, 2022)
Green Mei	Possui equipes globais que comissionam fábricas e otimizam aquelas que já estão em operação; cria estratégias adaptadas às suas necessidades específicas, possibilitando maior segurança, devido ao uso de reagentes químicos tóxicos, à saúde, ao meio ambiente e à comunidade;	(LI; NAZARI; MA; WEI; HE, 2025)

Ganfeng Lithium	Declara ter criado as baterias de lítio mais sustentáveis do mercado, utilizando tecnologias revolucionárias; possui design de tecnologia de bateria que possibilita que as baterias sejam atualizadas, consertadas e reutilizadas quando não forem mais viáveis;	(LI; NAZARI; MA; WEI; HE, 2025)
AkkuSer	Primeira empresa que realizou a instalação de reciclagem que pode reciclar baterias, abrangendo algumas que são classificadas como resíduos perigosos, de uma forma mais sustentável; desenvolveu uma tecnologia de reciclagem para lixo reativo de baterias que possibilita alta eficiência de reciclagem e tratamento seguro; mais da metade dos materiais das baterias são recolhidos para reutilização durante toda a etapa de reciclagem;	DARIO; MARCO; ELISABETTA; ROBERTO; CRISTIANO; POMPEO; LEONARDO; ANTONIO, 2022)
NAWA Technologies	Empresa que produziu a bateria de carbono ultrarrápida, através de um material de eletrodo revolucionário que combina o melhor das tecnologias nano e limpas; trabalha em uma nova geração de supercapacitores de elevada densidade de energia para auxiliar na melhora da velocidade de recarga e o ciclo de vida das células de bateria que já existem e as futuras;	(ABDALLA; ABDULLAH; DAWOOD; WEI; SUBRAMANIAN; AZAD; NOURIN; AFROZE; TAEEKUN; AZAD, 2023)
Li-Cycle	A empresa transforma a massa negra dos materiais do cátodo e do ânodo em produtos adequados para baterias que possivelmente serão reutilizados para fabricar baterias de íons de lítio na reciclagem hidrometalúrgica; Metais recuperados no método de reciclagem do ciclo Hidrometalúrgico do Li: Lítio, níquel, cobalto e outros metais são recuperados da matéria negra;	DARIO; MARCO; ELISABETTA; ROBERTO; CRISTIANO; POMPEO; LEONARDO; ANTONIO, 2022)

2.5 Biolixiviação

Na literatura, os microrganismos mais estudados são as bactérias acidófilos, como *Acidithiobacillus ferrooxidans*, que oxidam compostos de ferro e enxofre, facilitando a solubilização dos metais de interesse (Yun et al., 2024). Em segundo lugar, estão os fungos filamentosos e ainda, mais raramente, bactérias heterotróficas, como é mostrado a Tabela 1, que apresenta informações sobre sua categoria, faixa de temperatura e pH ideal de crescimento, tipo de nutrição, funções bioquímicas e taxas de recuperação metálica.

Tabela 3 - Amostragem do perfil de estudos publicados na literatura. (Fonte: PRIYADARSINI; DAS, 2025)

Categoría	Nome	T(°C)	pH	Nutrição	Atribuição	% Recuperação
Bactérias	<i>A. ferrooxidans</i>	30 - 35	1,5 - 2,5	Autotrófico	Oxidação de Fe ²⁺ /S, fixação de C/N	100%Li, 88%Co, 20%Mn
	<i>Acidithiobacillus thiooxidans</i>	28 - 30	2,0 - 3,0	Autotrófico	Oxidação de S, fixação de C	90%Li, 12%Ni/Co, 20%Mn
	<i>Leptospirillum ferriphilum</i>	30 - 40	1,5 - 2,0	Autotrófico	Oxidação de Fe ²⁺ , fixação de C	31%Li, 23%Ni/Co, 42%Mn
	<i>Acidithiobacillus caldus</i>	40 - 45	2,0 - 2,5	Autotrófico	Oxidação de S, redução de sulfeto	45%Li, 28%Co
	<i>S. termossulfidooxidans</i>	50 - 55	1,9 - 2,4	Mixotrófico	Fe ²⁺ / oxidação de S	59%Li, 35%Co
Arqueia	<i>Ferroplasma. spp</i>	35 - 36	1,7	Heterotrófico	Oxidação de Fe ²⁺	73%Li, 98%Ni, 79%Co
Fungos	<i>Aspergillus niger</i>	25 - 35	3,0 - 8,0	Heterotrófico	Secreção de ácido orgânico	95%Li, 38%Ni, 45%Co, 70%Mn

Em estudo realizado anteriormente pelo grupo de pesquisa deste mesmo trabalho, a biolixiviação por consórcio microbiano anaeróbico e heterotrófico indicou resultados e recuperação acima de 60% com uma razão sólido/líquido de 35 g/L, entretanto, por um período superior a 30 dias de processo (dados ainda não publicados até o momento).

O processo de biolixiviação sofre efeito de vários parâmetros como: temperatura, pH do meio, concentração celular, disponibilidade de nutrientes, composição do meio de cultivo, densidade da polpa (relação sólido/líquido), tamanho das partículas do resíduo eletrônico, potencial redox, aeração e agitação do sistema e a composição metálica do substrato. A interação entre esses fatores pode favorecer ou limitar as reações bioquímicas envolvidas, influenciando a atividade microbiana e, consequentemente, a solubilização dos metais-alvo. Ou seja, apesar do longo tempo de processo e recuperação inferior a outros processos, é possível promover melhorias, ao investigar esses diversos fatores. (NASERI; BEIKI; MOUSAVID; FARNAUD, 2023)

Uma alternativa, cujo estudo merece destaque, é a biolixiviação em duas etapas, integrando as vantagens da ação dos metabólitos produzidos pelos microrganismos na recuperação dos metais, sem o efeito tóxico dos metais que inibem o crescimento e metabolismo celular. Dependendo do microrganismo, pode-se ter

diferentes reações no meio e diferentes compostos excretados pelos agentes biológicos, como indicado na Tabela 1 (campo Atribuições).

Para microrganismos heterotróficos pode-se ter ácidos orgânicos que agem na solubilização dos metais (“desprendimento” dos metais da amostra sólida), como agentes oxirreduktores, que favorecem a alteração da carga de íons melhorando a sua lixiviação e, também, como quelantes. Em alguns casos, estes microrganismos ainda podem produzir compostos fenólicos que atuam como quelantes, elevando a recuperação dos metais. (BARNETT; PALUMBO-ROE; GREGORY, 2018)

Na Seção 2.6, a seguir, são apresentados estudos que utilizaram ácidos orgânicos na lixiviação de metais de resíduos eletrônicos. O relato destes estudos pode auxiliar a esclarecer a ação e os resultados promissores ao se produzir um meio contendo estes ácidos orgânicos e aplicados na lixiviação para recuperação de metais de baterias usadas.

2.5.1 Lixiviação usando ácidos orgânicos

A aplicação de ácidos orgânicos na recuperação de metais de lixos eletrônicos ou outros resíduos sólidos vem de encontro com a demanda de tecnologias sustentáveis, no âmbito da bioeconomia circular, uma vez que esses ácidos podem ser obtidos por processos biológicos integrados à tratamento de efluentes, portanto, reaproveitando resíduos agroindustriais para fabricação de produto de valor agregado e reduzindo o custo da matéria-prima no processo de produção. Além disso, ressalta-se que a substituição dos ácidos inorgânicos por orgânicos leva a processos de lixiviação em menor risco de segurança para os trabalhadores, exigem infraestrutura menos complexa e os ácidos orgânicos são biodegradáveis, eliminando a produção de resíduos secundários existente nos processos que usam os ácidos inorgânicos.

No trabalho desenvolvido por Wiecka *et al* (2022), uma das etapas do processo de recuperação de platina de conversores automotivos usados foi a lixiviação com ácidos orgânicos como uma etapa de pré-tratamento usando ácido oxálico e ácido láctico. Em seguida, lixiviação com ácido inorgânico e as etapas subsequentes de extração. Como resultado, os autores detectaram que o uso de ácidos carboxílicos conseguiu reduzir a quantidade de metais não preciosos (íons Fe, Mg(II), Zn(II)) para a segunda etapa.

Um estudo que já empregou um meio resultante de fermentação foi o de Wang *et al* (2021). Nele, o objetivo foi remover de cloreto das cinzas resultante do processo de

incineração de resíduos sólidos urbanos. Para isso, usaram caldo de fermentação contendo ácido láctico e tingiram 98,7% de remoção do cloreto.

Ainda com relação a remoção de metais de cinzas de incineração de resíduos urbanos, Cao *et al.* (2025) avaliaram diferentes ácidos orgânicos produzidos por rota biológica, sendo eles ácido cítrico, ácido oxálico, ácido láctico e ácido levulínico. Encontraram diferenças na seletividade, sendo que o ácido cítrico apresentou a maior eficiência para os metais traço, Mn

> 65%, Pb > 50%, Co aprox. 100%, Cd > 85%, Zn > 80%, Ni > 80%), e o ácido oxálico foi que proporcionou melhores resultados para a remoção de Sn aprox. 99%, Sb > 70%, Mo > 70%, Cr
> 50%.

Mais especificamente para as Baterias de Íons de Lítio (LIB's). Bae e Ryoo (2024) tiveram sucesso em recuperar Co, Mn e Ni cátodo (pós pré-tratamento) usando ácido láctico e ácido oxálico como reagentes de lixiviação e precipitação. Os autores observaram elevadas percentagens de recuperação semelhante às obtidas por ácidos sulfúrico, ácido clorídrico e nítrico. Em condições otimizadas, eficiências de lixiviação de Li, Mn, Co e Ni atingiram 90,4%, 89,2%, 92,2% e 91,8%, respectivamente. Além disso, neste estudo verificou-se que a adição de ácido oxálico ao meio lixiviado com ácido láctico promoveu a precipitação de metais, colaborando para a etapa de separação destes compostos.

Amarasekara *et al.* (2024) usaram uma mistura aquosa de ácido glicólico e láctico para recuperação de metais de LIBs retiradas de laptops, incluindo revestimentos de cátodo e ânodo, e conseguiram dispensar o uso de agentes redutores. A mistura composta de 0,15 M de ácido glicólico e 0,35 M em ácido láctico apresentou níveis de recuperação de 100, 100, 100 e 89% para Li, Ni, Mn e Co, respectivamente, em ensaio a 120 °C por 6 h. Este trabalho mostra que a combinação de ácidos orgânicos pode resultar em processos promissores, por exemplo, ao se comparar com o trabalho que empregam apenas um tipo de ácido orgânico, obviamente, levando em consideração que o resultado não depende apenas do tipo de lixiviente, mas de outras condições como o pré-tratamento da amostra, se são apenas cátodos ou outros itens presentes, as variáveis de processo como temperatura, tipo de agitação, tempo, tamanho de partícula, razão sólido/líquido.

No trabalho de Sahu e Devi (2023) empregou-se o ácido láctico como

lixivante, sendo que a máxima eficiência foi obtida para 1,0 mol/L de ácido láctico, 6% H₂O₂, 60 °C, razão S/L de 10 g/L e duração de lixiviação de 60 min, tendo 99,8% e 99% de recuperação de Li e Co, respectivamente. Deve-se ressaltar que, a condição exigiu a adição do agente redutor H₂O₂, concentração de ácido láctico três vezes superior ao do trabalho de Amarasekara et al. (2024), mas à uma temperatura moderada por apenas 1 h.

Outro trabalho que combina mais de um ácido orgânico foi o de Santhosh e Nayaka (2021), que acrescentou o ácido ascórbico ao meio. Eficiência de 99% para Li e 98% para Co foram atingidas para um processo com 0,5 mol/L de ácido láctico e 0,02 mol/L de ácido ascórbico, relação sólido/líquido de 2 g/L de catodos de LIBs, a 90 °C por 6h de ensaio. Vale destacar que esses autores afirmam que, comparando a trabalhos anteriores que usaram outros ácidos orgânicos, o ácido láctico foi o melhor.

Diante destes relatos, ressalta-se que a exploração da produção de ácido láctico por fermentação para ser usado como lixiviente para a região do Triângulo Mineiro, uma vez que há muitas indústrias de laticínios e o processo de tratamento de efluentes por consórcio presente nos biorreatores pode ser vinculado a produção de meio adequado para lixiviação.

Entretanto, são vários os ácidos orgânicos que têm registros na literatura como potenciais lixiviantes, e ainda, redutores e quelantes. Na análise de ciclo de vida desenvolvida por Mousavinezhad et al (2023), com o objetivo de investigar os impactos ambientais dos processos lixiviação para recuperação de metais do pó de cátodo de (LIB), os autores constataram que é o processo hidrometalúrgico com os ácidos acético, fórmico, maleico e málico demonstraram menores impactos ambientais em comparação com os ácidos láctico, ascórbico, succínico, cítrico, tricloroacético e tartárico. Isso mostra que é salutar a investigação dos ácidos orgânicos, a sua combinação com outros ácidos e ainda a avaliação técnico- econômica e ambiental para uma aplicação, de fato, em escala industrial.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Material

Dois consórcios microbianos distintos foram utilizados neste estudo, ambos oriundos de estações de tratamento de efluentes (ETE) de indústrias de laticínios

localizadas em Uberlândia- MG (ver Figura 1).

O primeiro consórcio foi obtido do reator anaeróbio UASB da indústria Cooperativa Agropecuária Ltda. de Uberlândia (CALU), que processa diversos produtos lácteos. O segundo consórcio foi coletado da indústria Tourinho Alimentos Ltda, especializada exclusivamente na fabricação de manteiga.

Figura 1 - Consórcio 1 obtido da ETE da empresa CALU (esquerda) e consócio 2 obtido da ETE da empresa Tourinho (direita).



Ambos os consórcios foram mantidos sob condições controladas no Núcleo de Processos Biotecnológicos da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia.

3.1.1 Reagentes

O permeado de soro de leite em pó, utilizado como principal fonte de carbono nos ensaios fermentativos e na manutenção dos consórcios microbianos, foi gentilmente fornecido pela empresa Sooro Concentrado Indústria de Produtos Lácteos Ltda. Esse material é composto principalmente por lactose (92,97%) e proteína (1,42%). Todos os demais reagentes utilizados foram de grau analítico e adquiridos comercialmente. As soluções foram preparadas utilizando água deionizada para garantir a pureza do meio e evitar interferências nas análises. (ROMÃO; BATISTA; FERREIRA; COSTA; RESENDE; CARDOSO, 2014).

3.2 Metodologia

3.2.1 Manutenção das linhagens microbianas

3.2.1.1 Consórcio microbiano

Cada consórcio microbiano foi mantido separadamente em frascos hermeticamente fechados de 500 mL, protegidos da luz, contendo um meio sintético preparado conforme a Tabela 4. Esse meio foi formulado com base em nutrientes essenciais para fermentação anaeróbia heterotrófica, sendo a lactose, proveniente do permeado de soro de leite, a principal fonte de carbono.

Tabela 4 - Composição do meio sintético para manutenção dos consórcios.

Reagente	Concentração (g/L)
KH ₂ PO ₄	3
K ₂ HPO ₄	7
MgSO ₄	1
(NH ₄) ₂ SO ₄	1
Extrato de levedura	3
Extrato de carne	1
Lactose*	20

*Proveniente do permeado do soro do leite em pó

Após preparo, o meio foi autoclavado a 120 °C por 20 minutos, junto com todo o material de cultivo. Para garantir a anaerobiose, o meio foi borbulhado com gás argônio após cada repique, realizado a cada 10 dias. Durante o repique, o conteúdo dos frascos era centrifugado (8.000 rpm, 12 min, temperatura ambiente), o sobrenadante descartado e o sedimento ressuspensido em meio fresco. (ROMÃO; BATISTA; FERREIRA; COSTA; RESENDE; CARDOSO, 2014)

3.2.2 Ensaios de produção de ácidos orgânicos

Foram conduzidos ensaios fermentativos independentes com os dois consórcios (CALU e TOURINHO), sob as mesmas condições experimentais. O meio de cultura descrito anteriormente foi utilizado como substrato em frascos de 500 mL contendo 250 mL de meio, sendo a concentração inicial de cada consórcio de 1 g/L. Os frascos

foram incubados a temperatura ambiente, sem agitação e protegidos da luz. Amostras foram retiradas a cada 48 horas ao longo de dez dias, sendo cada coleta precedida da reposição da atmosfera com gás argônio. Todos os ensaios foram realizados em duplicata para garantir a reproduzibilidade dos ensaios.

1.4.1.1 Concentração celular

As concentrações de células foram medidas por leitura de densidade óptica a 660 nm e relacionada por curva de calibração para obtenção da concentração em gsv/L.

A concentração celular (densidade microbólica) foi determinada pela razão entre a massa de sólidos voláteis (SV) por volume. Essa concentração foi obtida pela centrifugação (centrífuga da marca Shimadzu, modelo Mini 1240, com rotação igual 8000 rpm por 12 minutos a temperatura ambiente) de um volume conhecido da amostra, em que o sobrenadante foi reservado para análises posteriores e o corpo de fundo foi ressuspendido com água destilada e colocado em recipiente previamente tarado, seguida da introdução do sistema (recipientes + células) em estufa a $105 \pm 1,0$ °C. Após 24 horas, o recipiente foi acondicionado em dessecador com sílica gel até resfriamento e, posteriormente, pesado. Este procedimento foi repetido até a verificação de peso constante para a medida da massa celular seca. Para determinação de sólidos suspensos voláteis, foi feita a calcinação em cadinhos de porcelana por 30 minutos a 550 °C na mufla. Após o procedimento, os cadinhos foram transferidos para o dessecador de sílica gel e o peso foi aferido. A diferença da massa depois da estufa e da calcinação correspondeu à massa de células voláteis presente no volume de suspensão celular.

4.2.4.1 Concentração de açúcares redutores por DNS

A determinação da concentração de lactose foi realizada por DNS. O método consiste na redução do ácido 3,5-dinitrosalicílico. Para análise por este método foi necessário o preparo prévio do reagente DNS, empregando-se ácido 3,5-dinitrosalicílico, sal de Rochelle e hidróxido de sódio, cada um com uma função específica. (SANTOS; DEOTI; MÜLLER; DÁRIO; STAMBUK; ALVES JUNIOR,

2017)

Para determinação da concentração de açúcares redutores, 1 mL da amostra diluída foi acrescentada a 2 mL de reagente DNS em um tubo de Folin-Wu e levada para um banho de água em ebulação por 5 minutos. Depois, os tubos foram resfriados em banho de gelo e o volume completado a 25 mL com água destilada. Após a homogeneização, realizou-se a leitura da absorbância a 540 nm, em espectrofotômetro da marca Thermo Spectronic, modelo Genesys 10

UV, utilizando cubetas de vidro. As medidas de absorbância foram convertidas em concentração de açúcares redutores por meio de curva de calibração previamente estabelecida.

A calibração do zero no aparelho foi realizada utilizando um teste em branco, onde 1 mL de água destilada substituía a amostra, seguindo o mesmo procedimento. A curva de calibração do método do DNS, foi determinada utilizando soluções de glicose na faixa de 0,0 a 1,0 g/L, com intervalo 0,1 g/L. (MILLER, 1959)

4.2.4.2. *Determinação do potencial hidrogênio (pH)*

As medidas de pH foram realizadas com a utilização do pHmetro digital modelo PG 2.000, da marca GEHAKA. O equipamento é composto por um eletrodo de vidro para medição de pH, o qual era previamente calibrado com soluções tampões de pH 4 e pH 7.

Determinação de Ácidos Orgânicos e açúcares por HPLC A quantificação da concentração dos ácidos orgânicos e açúcares presentes no meio de fermentação por consórcio microbiano foram obtidas por meio da cromatografia líquida de alto desempenho - HPLC (High Performance Liquid Chromatography).

Para essa análise, foi utilizado um cromatógrafo Shimadzu modelo LC-20A Pronience, equipado com coluna SUPELCOGEL C-610H, com detector ultravioleta no comprimento de onda 210 nm para ácidos orgânicos e detecção por índice de refração para os açúcares. A fase móvel utilizada consistiu em uma solução de ácido fosfórico à 0,1% (v/v). A vazão da bomba foi de 0,5 mL/min, a temperatura do forno foi de 32 °C e o volume de injeção de 20 mL. As áreas obtidas nos cromatogramas para cada composto foram convertidas em concentrações em g/L por meio de curvas de calibração previamente estabelecidas.

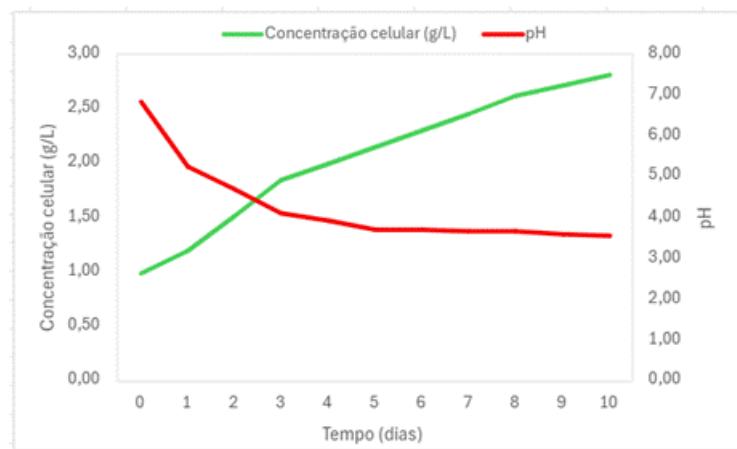
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta parte do trabalho, serão expostos os resultados obtidos nos experimentos conduzidos com o consórcio 1, oriundo da CALU, e o consórcio 2, proveniente da Tourinho, acompanhados das respectivas análises e discussões.

4.1 Crescimento Celular e Redução do pH - Consórcio 1

A evolução da concentração celular e do pH ao longo do experimento, apresentada na Figura 1, demonstra a capacidade do consórcio microbiano de se adaptar ao meio e metabolizar o permeado de soro de leite, promovendo a acidificação do sistema.

Figura 1 - Variação de pH e crescimento celular ao longo do tempo.



Inicialmente, o meio apresentou um pH de 6,84, reduzindo levemente para 5,25 no dia 1, após a inoculação dos microrganismos. No dia 2, a queda acentuada para 4,68 indica uma intensa atividade fermentativa, resultando na liberação de metabólitos ácidos. No dia 3, o pH continuou diminuindo para 4,10, atingindo 3,72 no dia 5. No último dia de experimento (dia 10), o pH atingiu 3,57, sugerindo uma possível estabilização do processo fermentativo.

O crescimento celular acentuado é um indicador de que os microrganismos estão ativos e metabolicamente produtivos, o que é essencial para gerar os compostos responsáveis pela solubilização dos metais no processo de lixiviação. (MARTÍNEZ; JORQUERA; POIRRIER; DÍAZ; CHAMY, 2023) No dia 0 (dia do repique e início do

processo fermentativo), a concentração celular inicial foi de 0,99 gcélulas/L, aumentando para 1,19 gcélulas/L no dia 1, evidenciando um período de crescimento exponencial associado ao consumo do substrato. No dia 3, a biomassa atingiu 1,84 gcélulas/L, indicando que os microrganismos mantiveram um crescimento ativo. No dia 5, a concentração celular foi de 2,14 gcélulas/L, e no dia 10, o valor obtido de 2,80 gcélulas/L, demonstrando um avanço gradual na fase de crescimento. Vale destacar que em todo o período de fermentação, o consórcio esteve em fase de crescimento exponencial. (SETHI; JONWAL; PARIHAR, 2025)

A acidificação do meio, evidenciada pela redução progressiva do pH de 6,84 no dia 0 para 3,57 no dia 10, é um indicativo positivo para a aplicação desses metabólitos na recuperação de metais.

4.2 Crescimento Celular e Redução do pH - Consórcio 2

Assim como o consórcio 1 o consórcio 2 apresentou resultados promissores quanto a evolução da concentração celular e do pH ao longo do experimento. A Figura 2, também apresenta a capacidade do consórcio 2 de se adaptar ao meio e metabolizar o permeado de soro de leite, promovendo a acidificação do sistema.

Figura 2 - Variação de pH e crescimento celular ao longo do tempo.



Inicialmente, o meio apresentou um pH de 6,89, reduzindo levemente para 5,35 no dia 1, após a inoculação dos microrganismos. No dia 2, houve uma queda mais expressiva de 4,78 que indica uma atividade fermentativa mais significativa, resultando na liberação de metabólitos ácidos. No dia 3, o pH continuou diminuindo para 4,20 e atingiu 3,82 no dia 5. No último dia de experimento (dia 10), o pH atingiu

3,64, sugerindo uma possível estabilização do processo fermentativo.

O aumento da concentração celular do consórcio 2 também reflete a dinâmica de crescimento. No dia 0 (dia do repique e início do processo fermentativo), a concentração celular inicial foi de 1,04 gcélulas/L, aumentando para 1,25 gcélulas/L no dia 1, evidenciando um período de crescimento exponencial associado ao consumo do substrato. No dia 3, a biomassa atingiu 1,60 gcélulas/L, indicando que os microrganismos mantiveram um crescimento ativo.

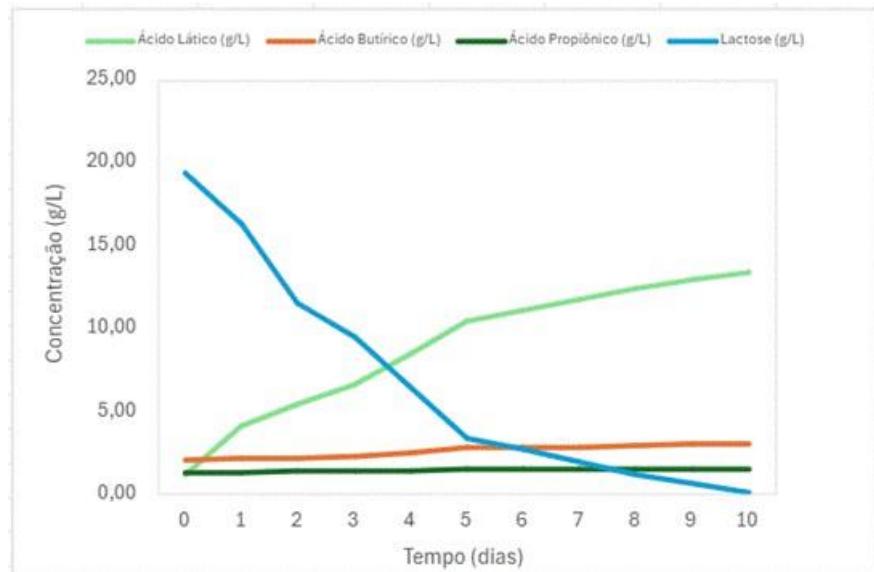
No dia 5, a concentração celular foi de 2,66 gcélulas/L, e no dia 10, o valor obtido de 3,43 gcélulas/L, demonstrando um avanço gradual na fase de crescimento. Vale destacar que em todo o período de fermentação, o consórcio 2 esteve em fase de crescimento exponencial.

A acidificação do meio, evidenciada pela redução progressiva do pH de 6,89 no dia 0 para 3,64 no dia 10, é um indicativo positivo para a aplicação desses metabólitos na recuperação de metais.

4.3 Consumo de açúcares e produção de ácidos orgânicos - Consórcio 1

Os perfis de concentração de lactose e dos principais ácidos orgânicos detectados estão ilustrados na Figura 3.

Figura 3 - Produção de ácidos orgânicos e consumo de lactose em 10 dias



A disponibilidade de carbono na forma de lactose, proveniente do permeado de soro de leite, foi essencial para a produção de ácidos orgânicos pelo consórcio

microbiano. Durante o processo de fermentação, os microrganismos metabolizaram rapidamente a lactose, resultando na formação predominante de ácido láctico, seguido por menores quantidades de ácidos butírico e propiônico, o que corrobora com o crescimento celular evidenciado e a queda do pH, analisados na Figura 1.

Pelo perfil de concentração do substrato, no dia 0, a concentração inicial de lactose foi de 19,37 g/L, enquanto as concentrações de ácido láctico, butírico e propiônico foram de 1,24 g/L, 2,09 g/L e 1,26 g/L, respectivamente. No primeiro dia, houve uma redução expressiva na concentração de lactose para 16,31 g/L, acompanhada por um aumento considerável na produção de ácido láctico, que atingiu 4,17 g/L, enquanto os ácidos butíricos e propiônico aumentaram moderadamente para 2,15 g/L e 1,31 g/L, respectivamente.

Nos dias subsequentes, o consumo de lactose continuou, e a produção de ácidos orgânicos seguiu uma tendência crescente. No dia 3, a lactose residual foi reduzida para aproximadamente 9,47 g/L, enquanto a produção de ácido láctico alcançou 6,62 g/L; o ácido butírico, 2,27 g/L; e o ácido propiônico, 1,42 g/L. No dia 5, a lactose foi medida em 3,4 g/L, e as concentrações de ácido láctico, butírico e acético foram de 10,44 g/L, 2,78 g/L e 1,50 g/L, respectivamente.

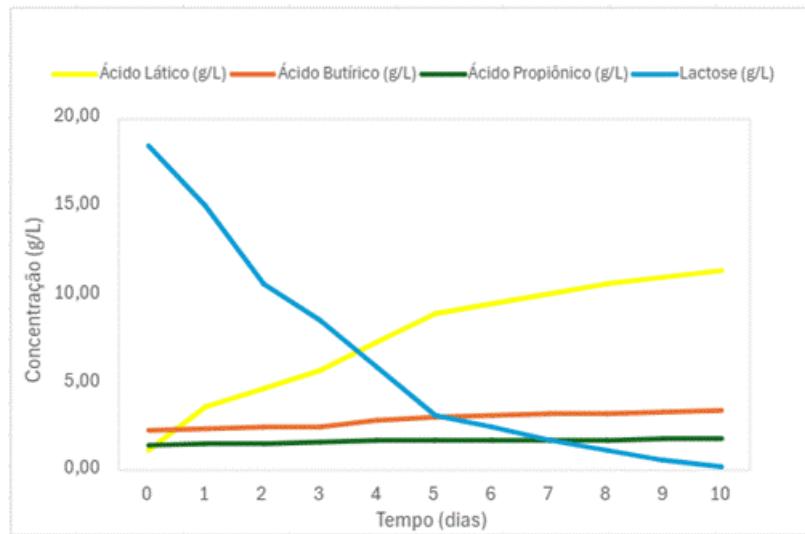
Nos dias subsequentes a lactose continuou sendo consumida gradativamente chegando ao décimo dia com uma concentração de 0,15 g/L, enquanto a produção de ácido láctico atingiu seu pico em 13,36 g/L, o ácido butírico atingiu ao final do experimento 3,07 g/L e o ácido propiônico obteve 1,55 g/L.

Esses resultados indicam que o consórcio microbiano utilizado possui elevada capacidade fermentativa e potencial significativo para a geração de ácidos orgânicos como metabólitos.

4.4 Consumo de açúcares e produção de ácidos orgânicos - Consórcio 2

Os perfis de concentração de lactose e dos principais ácidos orgânicos detectados estão ilustrados na Figura 4.

Figura 4 - Produção de ácidos orgânicos e consumo de lactose em 10 dias



A disponibilidade de lactose como fonte de carbono, proveniente do permeado de soro de leite, foi crucial para a produção de ácidos orgânicos pelo consórcio microbiano. Durante o

processo de fermentação, os microrganismos metabolizaram rapidamente a lactose, resultando também na formação mais abundante de ácido láctico, seguido quantidades mais baixas de ácidos butírico e propiônico, o que evidencia o crescimento celular evidenciado e a queda do pH, analisados na Figura 2.

Pelo perfil de concentração do substrato, no dia 0, a concentração inicial de lactose foi de 19,39 g/L, enquanto as concentrações de ácido láctico, butírico e propiônico foram de 1,22 g/L, 2,05 g/L e 1,23 g/L, respectivamente. No primeiro dia, também houve uma redução na concentração de lactose para 16,35 g/L, acompanhada por um aumento na produção de ácido láctico, que atingiu 4,09 g/L, enquanto os ácidos butírico e propiônico aumentaram moderadamente para 2,11 g/L e 1,28 g/L, respectivamente.

Nos dias subsequentes, o consumo de lactose permaneceu, e a produção de ácidos orgânicos seguiu uma tendência crescente. No dia 3, a lactose residual foi reduzida para aproximadamente 9,51 g/L, enquanto a produção de ácido láctico alcançou 6,49 g/L; o ácido butírico, 2,22 g/L; e o ácido propiônico, 1,39 g/L. No dia 5, a lactose foi medida em 3,5 g/L, e as concentrações de ácido láctico, butírico e acético foram de 10,23 g/L, 2,72 g/L e 1,47 g/L, respectivamente.

Nos dias subsequentes a lactose continuou sendo consumida gradativamente

chegando ao décimo dia com uma concentração de 0,17 g/L, enquanto a produção de ácido láctico atingiu seu pico em 13,09 g/L, o ácido butírico atingiu ao final do experimento 3,01 g/L e o ácido propiônico obteve 1,52 g/L.

Esses resultados indicam que o consórcio microbiano utilizado possui uma boa capacidade fermentativa e potencial significativo para a geração de ácidos orgânicos como metabólitos.

4.5 Potencial dos diferentes consórcios microbianos para recuperação de metais de baterias de íons de lítio

A significativa geração de ácido láctico por ambos os consórcios analisados neste estudo, evidencia o alto potencial para a biolixiviação de metais encontrados em baterias de íons de lítio. Observou-se que, ao longo de 10 dias, a concentração desse ácido láctico no consórcio adquirido na Calu aumentou progressivamente, partindo de 1,24 g/L no dia 0 e atingindo 13,36 g/L no dia 10 no primeiro consórcio utilizado, já o consórcio adquirido da Tourinho obteve um pouco menos rendimento, 1,05 g/L no dia 0 e atingiu 11,36 g/L no mesmo intervalo de tempo. Essa produção expressiva sugere que o metabolismo dos microrganismos foi eficiente na conversão da lactose disponível, que foi praticamente esgotada ao final do período experimental (redução de 19,37 g/L para 0,15 g/L no primeiro consórcio e 18,48 g/L para 0,17 g/L no segundo consórcio utilizado). O sistema biológico empregado mostrou eficiência na geração de quantidades expressivas de ácido a partir do permeado de soro de leite, um coproducto industrial. Além disso, a produção consistente e estável ao longo dos dias indica que, com otimizações nas condições de fermentação, como ajuste do pH, suplementação nutricional e prolongamento do tempo de cultivo, a concentração final de ácido láctico poderia ser ainda maior. Outro aspecto importante a considerar é que, apesar da produção em menores quantidades dos ácidos butírico e propiônico (3,07 g/L e 1,55 g/L no dia 10 para o consórcio 1 e 3,35 g/L e 1,74 g/L para o consórcio 2), sua presença pode favorecer a eficiência do processo de lixiviação, pois podem atuar de forma sinérgica com o ácido láctico na dissolução de metais.

Os resultados obtidos neste estudo, com produção de até 13,36 g/L de ácido láctico, são consistentes com os avanços relatados por Garcia, Morell, Lao, Solé-Sardans e Dorado (2025), embora meu trabalho use consórcios heterotróficos e os deles autotróficos, ambos demonstram que preparações simples e substratos acessíveis

podem gerar resultados expressivos na recuperação de metais, com destaque para a sustentabilidade do processo.

Estudos recentes como os de Biswal e Balasubramanian (2023) e Bahaloo-Horeh, Vakilchap e Mousavi (2019) têm fortalecido o uso de meios lixiviantes gerados por consórcios microbianos, especialmente aqueles que produzem misturas de ácidos orgânicos com ação sinérgica na recuperação de metais.

Destaca-se que a vantagem de ser ter um meio composto pela mistura de vários ácidos orgânicos, além de outros compostos, como os fenólicos que agem como quelantes e presentes no meio de fermentação. Além disso, estudos futuros, investigarão o aperfeiçoamento do processo fermentativo para aumentar a concentração dos ácidos orgânicos, focando na produção dos ácidos orgânicos com maior potencial de lixiviação, como indicado pela literatura.

5 CONCLUSÃO

Este estudo evidenciou que os consórcios microbianos provenientes de uma Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) anaeróbia de uma indústria de laticínios demonstram capacidade de metabolizar o permeado de soro de leite, promovendo a acidificação do meio e gerando ácidos orgânicos relevantes para processos de biolixiviação ou lixiviação utilizando exclusivamente o meio fermentado pela cultura mista.

Durante o experimento, observou-se um crescimento celular significativo e uma expressiva redução do pH, indicando a produção de metabólitos ácidos. A análise do consumo do substrato revelou que a lactose foi rapidamente metabolizada pelo consórcio, resultando na predominância de ácido láctico, além da síntese de ácidos butírico e propiônico.

Os resultados obtidos demonstram que o uso de consórcios microbianos representa uma alternativa viável e sustentável para a produção de ácidos orgânicos a partir de resíduos agroindustriais. A alta produção de ácido láctico, associada à geração de outros ácidos orgânicos, destaca seu potencial para a biolixiviação de metais presentes em baterias de íons de lítio, podendo substituir os ácidos minerais tradicionalmente utilizados nesse processo. Além disso, o emprego de ácidos orgânicos apresenta vantagens ambientais e operacionais, como menor toxicidade,

maior biodegradabilidade e redução dos impactos ambientais causados pelo descarte de efluentes industriais.

Dessa maneira, este trabalho contribui para o avanço de abordagens mais sustentáveis na recuperação de metais críticos, incentivando a valorização de resíduos agroindustriais e o uso de biotecnologias voltadas à mineração urbana. Estudos futuros serão fundamentais para aprimorar a produção de metabólitos ácidos pelos consórcios microbianos e avaliar sua eficiência na extração de lítio e cobalto em condições operacionais ampliadas.

6 REFERÊNCIAS

ALAVI, Nadali et al. Bioleaching of metals from cellphones batteries by a co-fungus medium in presence of carbon materials. *Bioresource Technology Reports*, v. 15, p. 100768, 2021. ISSN 2589-014X. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100768>.

AMBIENTE, Ministério do Meio. A problemática "Resíduos Sólidos". Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuos-solidos/politica-nacional-de-residuos-solidos/contextos-e-principais-aspectos.html>. Acesso em: 25 abr. 2024.

BOCCHI, Nerilso et al. Prêmio Nobel de Química de 2019: Láurea pelo Desenvolvimento das Baterias de Íons Lítio. **Química Nova na Escola**, São Paulo, v. 41, n. 4, p. 320–326, nov. 2019.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resoluções do CONAMA**. Brasília: Conama, 2012.

CHANDAKHIAW, Thanapon et al. Efficiency of *Penicillium* sp. and *Aspergillus* sp. for bioleaching lithium cobalt oxide from battery wastes in potato dextrose broth and sucrose medium. *Results in Engineering*, v. 24, p. 103170, dez. 2024. DOI: 10.1016/j.rineng.2024.103170.

CINTRA, Lucio Silva Kieling et al. Reutilização e reciclagem: desenvolvimento de joia com componentes oriundos de resíduos eletrônicos. **Mix Sustentável**, Florianópolis, v. 6, n. 3, p. 27–36, jun. 2020.

CONTE, Andria Angélica. Ecoeficiência, logística reversa e a reciclagem de pilhas e baterias: revisão. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, n. 39, p. 124–139, 31 mar. 2016. DOI: 10.5327/Z2176-947820167114.

DA CRUZ, T. F.; DA SILVA, G. R.; DE OLIVEIRA, H. R. APLICAÇÃO DE UMA OFICINA TEMÁTICA A PARTIR DA IDENTIFICAÇÃO DA PERCEPÇÃO AMBIENTAL SOBRE O DESCARTE DE PILHAS E BATERIAS EM RIO NEGRO-MS, BRASIL. **Mikarimin. Revista Científica Multidisciplinaria**, [S. l.], v. 6, n. 2, p. 103–116, 2020. Disponível em: <https://revista.uniandes.edu.ec/ojs/index.php/mikarimin/article/view/1829>. Acesso em: 5 may. 2025.

ENERGIA, Ministério de Minas e. **Lítio: o mineral estratégico que é protagonista na transição energética**. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/litio-o-mineral-estrategico-que-e-protagonista-na-transicao-energetica>. Acesso em: 24 abr. 2025.

FREITAS, Thatyana Pimentel Rodrigo de. **Biolixiviação: Utilização de Micro-organismos na Extração de Metais**. Rio de Janeiro: Cetem/MCT, 2010.

GAO, Yuhang; ZHANG, Han-Ming; SUN, Jinfeng. In-situ capacity regeneration of degraded lithium- ion batteries using remanufacturing remediator. **Energy Storage Materials**, v. 78, p. 104248, maio 2025. DOI: 10.1016/j.ensm.2025.104248.

HABASHI, F. Extractive Metallurgy. In: **Encyclopedia of Materials: Science and Technology**. [S. l.]: Elsevier, 2001. p. 2828–2831. DOI: 10.1016/B0-08-043152-6/00505-2.

HAMEED, Rashida **et al.** A review on sustainable management strategies for navigating the piling e- waste crisis and associated environmental threats. **Toxicology**, v. 511, p. 154019, fev. 2025. DOI: 10.1016/j.tox.2024.154019.

KAKSONEN, Anna H. **et al.** Recent progress in biohydrometallurgy and microbial characterisation. **Hydrometallurgy**, v. 180, p. 7–25, set. 2018. DOI: 10.1016/j.hydromet.2018.06.018.

KASPER, A. C. et al. Caracterização de sucatas eletrônicas provenientes de baterias recarregáveis de íons de lítio, telefones celulares e monitores de tubos de raios catódicos. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, n. 12, p. 9–17, 2009. Disponível em: https://www.rbciamb.com.br/Publicacoes_RBCIAMB/article/view/409.

LEMOS, Thiago Rodrigues et al. Geographical changes in the automobile industry, a case study of battery for electrical vehicles. **Mercator**, v. 23, n. 2024, p. 1–17, 28 out. 2024. DOI: 10.4215/rm2024.e23035.

MASSABNI, Antonio Carlos. **A importância do lítio na psiquiatria**. 2023. Instituto de Química – Araraquara – UNESP. Disponível em: <http://crqsp.org.br/a-importancia-do-litio-na-psiquiatria/>. Acesso em: 24 abr. 2025.

OLIVEIRA, E. M. et al. Cumprimento de políticas públicas ambientais e destinação de resíduos eletrônicos: uma análise dos fatores dificultadores. **Revista Teccen**, v. 14, n. 1, p. 7–13, jan./jun. 2021.

PAVOSKI, Giovani et al. Nanotechnology and recycling, remanufacturing, and reusing battery. In: **Nano Technology for Battery Recycling, Remanufacturing, and Reusing**. [S. l.]: Elsevier, 2022. p. 53–78. DOI: 10.1016/B978-0-323-91134-4.00022-4.

PRIYADARSINI, Sailaja; DAS, Alok Prasad. Lithium bioleaching: a review on microbial-assisted sustainable technology for lithium bio-circularity. **Journal of Water Process Engineering**, v. 69, p. 106744, jan. 2025. DOI: 10.1016/j.jwpe.2024.106744.

REVISTA MIKARIMIN. Santo Domingo: **Mikarimin**, v. 6, n. 2, 2020.

RODRIGUES, Bernardo Salgado **et al.** Geopolítica do lítio no século XXI. **Revista Brasileira de Estratégia e Relações Internacionais**, Rio de Janeiro, v. 6, n. 11, p. 197–220, jun. 2017.

SILVA, Rafael Gundim. Lixiviação ácida de baterias íon-lítio. **Química Nova**, Rio de

Janeiro, v. 41,
n. 5, p. 581–586, fev. 2018.

YUN, Seonjong et al. Bioleaching of valuable metals from three cathode active materials comprising lithium nickel cobalt manganese (NCM) oxide using indigenous microorganisms. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 135, p. 552–560, jul. 2024. DOI: 10.1016/j.jiec.2024.01.067.

YUN, Seonjong; HWANG, Gukhwa. Iron removal and valuable metal recovery from spent lithium- ion batteries (LIBs) using solvent extraction after bioleaching. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 144, p. 672–678, abr. 2025. DOI: 10.1016/j.jiec.2024.10.013.

WIECKA, Zuzanna; RZELEWSKA-PIEKUT, Martyna; REGEL-ROSOCKA, Magdalena. Recovery of platinum group metals from spent automotive converters by leaching with organic and inorganic acids and extraction with quaternary phosphonium salts. **Separation And Purification Technology**, [S.L.], v. 280, n. , p. 1-11, jan. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2021.119933>.

WANG, Xiaona; GAO, Ming; WANG, Menglu; WU, Chuanfu; WANG, Qunhui; WANG, Ying. Chloride removal from municipal solid waste incineration fly ash using lactic acid fermentation broth. **Waste Management**, [S.L.], v. 130, n. , p. 23-29, jul. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2021.05.014>

CAO, Can; YUAN, Ziwen; LIU, Hong; FEI, Xunchang; ESTEBAN, Jesús; SHE, Qianhong. Insights into the usage of biobased organic acids for treating municipal solid waste incineration bottom ash towards metal removal and material recycling. **Separation And Purification Technology**, [S.L.], v. 353, p. 1-17, jan. 2025. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2024.128330>.

BAE, Su Ho; RYOO, Keon Sang. Enhanced Recovery of Valuable Materials from Spent Lithium-Ion Secondary Batteries Using Organic Acids as Leaching and Precipitating Agents. **Chemistryselect**, [S.L.], v. 9, n. 36, p. 1-10, set. 2024. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/slct.202403680>.

AMARASEKARA, Ananda S.; WANG, Deping; SHRESTHA, Ambar B.. Efficient Leaching of Metal Ions from Spent Li-Ion Battery Combined Electrode Coatings Using Hydroxy Acid Mixtures and Regeneration of Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide. **Batteries**, [S.L.], v. 10, n. 6, p. 1-12, 21 maio 2024. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/batteries10060170>.

SANTHOSH, G.; NAYAKA, G.P.. Cobalt recovery from spent Li-ion batteries using lactic acid as dissolution agent. **Cleaner Engineering And Technology**, [S.L.], v. 3, p. 1-9, jul. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.clet.2021.100122>.

MOUSAVINEZHAD, Seyedkamal; KADIVAR, Saeede; VAHIDI, Ehsan. Comparative life cycle analysis of critical materials recovery from spent Li-ion batteries. **Journal Of Environmental Management**, [S.L.], v. 339, n. , p. 1-10, ago. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117887>.

DARIO, Latini; MARCO, Lagnoni; ELISABETTA, Brunazzi; ROBERTO, Mauri; CRISTIANO, Nicolella; POMPEO, Della Posta; LEONARDO, Tognotti; ANTONIO, Bertei. Recycling of Lithium-ion Batteries: overview of existing processes, analysis and performance. **Chemical Engineering Transactions**, [S.L.], v. 96, n. 96, p. 25-30, nov. 2022. AIDIC: Italian Association of Chemical Engineering. <http://dx.doi.org/10.3303/CET2296005>.

LI, Jiahao; NAZARI, Sabereh; MA, Xiaoxue; WEI, Neng; HE, Yaqun. A critical review on the advances in thermal reduction technology for recycling spent lithium-ion batteries. **Next Materials**, [S.L.], v. 8, n. 8, p. 100641, jul. 2025. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nxmate.2025.100641>.

ABDALLA, Abdalla M.; ABDULLAH, Mas F.; DAWOOD, Mohamed K.; WEI, Bo; SUBRAMANIAN, Y.; AZAD, Atia Tasfia; NOURIN, S.; AFROZE, S.; TAWEEKUN, Juntakan; AZAD, Abul K.. Innovative lithium-ion battery recycling: sustainable process for recovery of critical materials from lithium-ion batteries. **Journal Of Energy Storage**, [S.L.], v. 67, n. 67, p. 1-22, set. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.est.2023.107551>.

MORELL, Joana; LAO-LUQUE, Conxita; SOLE-SARDANS, Montserrat; RIBAS, David; GUIMERÀ, Xavier; DORADO, Antonio David. Closed-loop bioleaching for mobile phones from the bioregeneration of the leaching agent to the recovery of metal: a review. **Journal Of Industrial And Engineering Chemistry**, [S.L.], v. , n. , p. 1-22, abr. 2025. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jiec.2025.04.020>.

HOREH, N. Bahaloo; MOUSAJI, S.M.; SHOJAOSADATI, S.A.. Bioleaching of valuable metals from spent lithium-ion mobile phone batteries using Aspergillus niger. **Journal Of Power Sources**, [S.L.], v. 320, n. 320, p. 257-266, jul. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.04.104>.

WATLING, H.R.; SHIERS, D.W.; ZHANG, G.J.. Microbial behaviour under conditions relevant to heap leaching: studies using the sulfur-oxidising, moderate thermophile acidithiobacillus caldus. **Hydrometallurgy**, [S.L.], v. 127-128, n. 127, p. 104-111, out. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.hydromet.2012.07.012>.

CHEN, Hong-Rui; ZHANG, Duo-Rui; ZHAO, Xiao-Juan; LI, Qian; LIANG, Yu-Ting; PAKOSTOVA, Eva; ZHANG, Yan; YANG, Yong-Bin. Effects of Fe and cost-effective media composition on arsenopyrite bioleaching by Sulfobacillus thermosulfidooxidans. **Chemical Engineering Journal**, [S.L.], v. 474, n. , p. 1-10, out. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2023.145845>.

PRIYADARSINI, Sailaja; DAS, Alok Prasad. Lithium bioleaching: a review on microbial-assisted sustainable technology for lithium bio-circularity. **Journal Of Water Process Engineering**, [S.L.], v. 69, n. , p. 1-14, jan. 2025. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.106744>.

ROMÃO, B. B.; BATISTA, F. R. X.; FERREIRA, J. S.; COSTA, H. C. B.; RESENDE, M. M.; CARDOSO, V. L.. Biohydrogen Production Through Dark Fermentation by a Microbial Consortium Using Whey Permeate as Substrate. **Applied Biochemistry And Biotechnology**, [S.L.], v. 172, n. 7, p. 3670-3685, 23 fev. 2014. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s12010-014-0778-5>.

SANTOS, Angela Alves dos; DEOTI, Junior Romeo; MÜLLER, Gabriela; DÁRIO, Marcelo Goulart; STAMBUK, Boris Ugarte; ALVES JUNIOR, Sérgio Luiz. Dosagem

de açúcares redutores com o reativo DNS em microplaca. **Brazilian Journal Of Food Technology**, [S.L.], v. 20, n. , p. 1-9, 2017. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1981-6723.11315>.

MILLER, G. L.. Use of Dinitrosalicylic Acid Reagent for Determination of Reducing Sugar. **Analytical Chemistry**, [S.L.], v. 31, n. 3, p. 426-428, 1 mar. 1959. American Chemical Society (ACS). <http://dx.doi.org/10.1021/ac60147a030>.

NETPAE, Tinnapan; SUCKLEY, Sawitree. Comparison of three culture media for one-step and two-step bioleaching of nickel and cadmium from spent Ni-Cd batteries by Aspergillus niger. **Advances In Environmental Technology**, [S.L.], v. 6, n. 3, p. 167-172, ago. 2020. Iranian Research Organization for Science and Technology. <http://dx.doi.org/10.22104/aet.2021.4759.1286>.

NASERI, Tannaz; BEIKI, Vahid; MOUSAVI, Seyyed Mohammad; FARNAUD, Sébastien. A comprehensive review of bioleaching optimization by statistical approaches: recycling mechanisms, factors affecting, challenges, and sustainability. **Rsc Advances**, [S.L.], v. 13, n. 34, p. 23570-23589, 2023. Royal Society of Chemistry (RSC). <http://dx.doi.org/10.1039/d3ra03498d>.

BARNETT, Megan J.; PALUMBO-ROE, Barbara; GREGORY, Simon P.. Comparison of Heterotrophic Bioleaching and Ammonium Sulfate Ion Exchange Leaching of Rare Earth Elements from a Madagascan Ion-Adsorption Clay. **Minerals**, [S.L.], v. 8, n. 6, p. 1-11, 30 maio 2018. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/min8060236>.

MARTÍNEZ, María Eugenia; JORQUERA, Lorena; POIRRIER, Paola; DÍAZ, Katy; CHAMY, Rolando. Effect of Inoculum Size and Age, and Sucrose Concentration on Cell Growth to Promote Metabolites Production in Cultured Taraxacum officinale (Weber) Cells. **Plants**, [S.L.], v. 12, n. 5, p. 1116-1138, 2 mar. 2023. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/plants12051116>.

Sethi, S., Jonwal, H., Parihar, R. (2025). Solubilização de Metais por Biolixiviação: Ação Microbiana. Em: Shah, MP (orgs.) Extração de Metais Preciosos de Resíduos Industriais Utilizando Tecnologia Microbiana. **Ciência e Engenharia Ambiental**. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-83623-7_2

GARCIA, Lidia; MORELL, Joan; LAO, Conxita; SOLÉ-SARDANS, Montserrat; DORADO, Antonio D.. Metal Recovery from Discarded Lithium-Ion Batteries by Bioleaching Coupled with Minimal Mechanical Pre-Treatment. **Minerals**, [S.L.], v. 15, n. 6, p. 1-16, 26 maio 2025. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/min15060566>.

BISWAL, Basanta Kumar; BALASUBRAMANIAN, Rajasekhar. Recovery of valuable metals from spent lithium-ion batteries using microbial agents for bioleaching: a review. **Frontiers In Microbiology**, [S.L.], v. 14, n. , p. 1-25, 31 maio 2023. Frontiers Media SA. <http://dx.doi.org/10.3389/fmicb.2023.1197081>.

BAHALOO-HOREH, Nazanin; VAKILCHAP, Farzane; MOUSAVI, Seyyed Mohammad. Bio-hydrometallurgical Methods For Recycling Spent Lithium-Ion Batteries. **Recycling Of Spent Lithium-Ion Batteries**, [S.L.], v. , n. , p. 161-197, 2019. Springer International Publishing. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-31834-5_7.