

## Reciclagem de baterias de lítio

Dríadas Gontijo<sup>1</sup>, Rogério Caldeira<sup>1</sup>, Walison Dias<sup>1</sup>

([dríadas.gontijo1@hotmail.com](mailto:dríadas.gontijo1@hotmail.com) [rogerio.caldeira196@gmail.com](mailto:rogerio.caldeira196@gmail.com) [walisonhcdias@gmail.com](mailto:walisonhcdias@gmail.com))

Professora orientadora: Vanessa Mota

Coordenação de curso de Engenharia Química

### Resumo

A eletrificação de processos industriais e a popularização de veículos elétricos e eletrônicos têm aumentado a demanda por baterias de íon-lítio. A forma de reciclagem desse dispositivo tem sido tema de grandes debates, pois sua composição oferece grandes riscos ao meio ambiente quando descartada de forma incorreta. A reciclagem adequada dessas baterias é importante para reduzir o desperdício eletrônico, recuperar materiais valiosos e mitigar os riscos ambientais. A logística reversa é proposta como uma estratégia para a reciclagem de baterias de íon-lítio, permitindo que elas sejam reintegradas à cadeia de suprimentos. Para a separação dos materiais que a compõe se faz necessário a trituração, no entanto, a trituração direta das baterias é arriscada devido ao potencial explosivo em razão de ainda existir as cargas residuais. Portanto, o processo de descarga por eletrólise e trituração em atmosfera inerte é uma alternativa segura e eficaz para a reciclagem dessas baterias. Esse método permite a recuperação de materiais valiosos, como lítio, cobalto, ferro, níquel, cobre e plástico, presentes nas baterias de íon-lítio. Além dos benefícios ambientais, a reciclagem adequada dessas baterias também traz vantagens econômicas, pois reduz a necessidade de extração de novos recursos naturais e diminui os custos de produção.

Palavras-chave: bateria, reciclagem, meio ambiente

### 1. INTRODUÇÃO

É de conhecimento público que muitos governos ao redor do mundo, vem se comprometendo em reduzir a emissão de gases causadores de efeito estufa e por esse motivo a eletrificação de muitos processos vem sendo considerado como uma alternativa viável, uma vez que diminuiria a quantidade de gases, em especial o dióxido de carbono, a serem emitidos na atmosfera. Por isso a busca por utilização de baterias vem sendo alvo de grande demanda em muitos setores da indústria (FILHO,2022).

Contudo, mesmo que diversos estudos venham sendo propostos para a diminuição da emissão de gases e para encontrar alternativas que contornem esse fato, a eletrificação de muitos objetos usados para diminuir o impacto causado na atmosfera, assim como, a criação das baterias de íon-lítio, vem gerando outras consequências importantíssimas como a poluição dos solos e lençóis freáticos, por não haver um entendimento mais amplo de sua reciclagem após sua utilização.

Com a criação das baterias íon-lítio, os estudos referentes a como proceder após o seu uso, vem crescendo em grande escala, pois os componentes presentes nas baterias podem causar grandes impactos no meio ambiente (REIDLER, 2002). Por isso, vem sendo revisados métodos para que sua utilização não afete os consumidores e o ambiente em que serão descartadas posteriormente. Já que as baterias são usadas como uma alternativa aos métodos que antes utilizavam combustíveis que produziam gases tóxicos (FILHO, 2022).

---

<sup>1</sup> Graduação em Engenharia Química – Centro Universitário UNA.

As baterias de íon-lítio são muito utilizadas no atual segmento industrial automotivo, elétrico e eletrônico, que vem trabalhando fortemente no sentido de popularizar equipamentos que utilizam fonte de energia alternativa às antigas baterias utilizadas, como já citado anteriormente. Entre as alternativas reais e em uso, estão os veículos elétricos, smartphones e eletro portáteis no geral.

Esse esforço do setor industrial busca atender ao apelo da sociedade e às novas leis e restrições estabelecidas em diversos países, e conseqüentemente, alcançar a sustentabilidade e perenidade da indústria conforme o COP26 (Conferência sobre Mudanças Climáticas) realizado para que todos busquem métodos que erradiquem os gases prejudiciais a atmosfera até 2050. (COSTA, 2010).

Este trabalho tem o objetivo de descrever como ocorre o processo de reciclagem das baterias de lítio através do processo de descargas das baterias por eletrólise e trituração em atmosfera inerte, dispondo para o mercado um material em blend composto por metais valiosos como lítio (Li), cobalto (Co), níquel (Ni) e Cobre (Cu).

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

É notório o crescimento exponencial que o mundo tecnológico vem sofrendo ao decorrer das últimas décadas, o que trouxe inúmeros benefícios à humanidade em todos os setores existentes, é possível observar melhorias na área da saúde, alimentos, produtos entre outros.

Em paralelo a esse desenvolvimento houve também o acentuamento dos hábitos de consumo, a inserção de vários aparelhos eletroeletrônicos nos meios residenciais e industriais, onde as “velhas” tecnologias são constantemente substituídas por meios mais atuais e eficientes.

Devido a essa rotatividade tecnológica um problema vem se evidenciando, a constante geração de resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos, também denominados resíduos eletroeletrônicos (REEs) ou popularmente lixo eletrônico, que além de sua característica de periculosidade, são em sua grande maioria, compostos por matérias valiosas, de disposição natural limitada e que são de suma importância para que esse ciclo de desenvolvimento se perpetue.

Com o avanço da tecnologia, novos dispositivos eletrônicos são lançados no mercado com frequência, o que leva a uma rápida obsolescência dos aparelhos antigos. Como resultado, muitos desses dispositivos, como telefones celulares, computadores, tablets, TVs, entre outros, são descartados de forma inadequada e acabam em aterros sanitários, lixões, ou em países em desenvolvimento que não possuem a infraestrutura adequada para lidar com esses resíduos.

O problema é que esses aparelhos eletrônicos contêm muitos componentes perigosos, como metais pesados, plásticos e baterias de lítio (Li), que podem contaminar o solo e a água se não forem descartados adequadamente. Além disso, muitos desses componentes são recicláveis, o que significa que podem ser reaproveitados em novos produtos e reduzir a necessidade de extrair mais recursos naturais (BATISTA, 2021).

Um exemplo de REEs são as baterias íon-lítio, que vem sendo produzidas em grandes quantidades, pois possuem características que são mais vantajosas se comparadas com outras baterias, tais como uma baixa taxa de autodescarga, um ciclo de vida longo, tamanho e massas reduzidos por serem produzidas com componentes de baixa densidade e uma alta densidade de energia presente como cargas (BUSNARDO, et. Al.,2007)

As baterias de lítio apresentam risco ao meio ambiente devido a sua composição sensível e reativa, propiciando assim a contaminação do solo onde são destinadas e dificultando as operações de destinação, uma vez que as baterias apresentam uma energia residual, sendo essa energia suficiente para gerar uma ignição e assim uma reação de combustão. Em contrapartida, a composição dessas baterias as torna um bem de consumo, que, mesmo em seu final de vida útil, extremamente valioso, sendo elas compostas por metais como lítio (Li),

cobalto (Co), níquel (Ni) e Cobre (Cu). Sendo assim as baterias são um grande alvo quando o assunto é valorização sustentável, estando sua reciclagem alinhadas com os objetivos 9, 11 e 12 do desenvolvimento sustentável da ONU 1 (ONU BRASIL, 2022).

É importante que os governos e empresas se comprometam a implementar políticas e iniciativas para reduzir o desperdício eletrônico e promover a reciclagem. Isso pode incluir programas de reciclagem e coleta de resíduos eletrônicos, incentivos fiscais para a reciclagem e a redução de materiais tóxicos em produtos eletrônicos. Em janeiro de 2022 foi outorgado o DECRETO Nº 10.936 que declara que as pilhas e baterias não poderiam mais ser destinadas em aterros sanitários (BRASIL, 2022), e ao invés disso, deveriam ser incorporados pelo sistema de logística reversa, o que gerou uma grande indagação geral no mercado ambiental de destinação de resíduos com a seguinte incógnita: como destinar as baterias que antes eram dispostas em aterros sanitários.

Para responder essa pergunta, vem sendo debatido e estudado diversas formas de descarte ou de reutilização e a que mais chama atenção é a logística reversa das baterias íon-lítio. A logística reversa é um processo que envolve o retorno de produtos, materiais e embalagens do consumidor final de volta para a cadeia de suprimentos. É importante tanto para a gestão ambiental quanto para a gestão econômica de uma empresa, podendo ser realizada por meio de diferentes estratégias, incluindo a coleta seletiva de resíduos, o reuso de materiais e a reciclagem, pode ser aplicada a diferentes tipos de produtos, desde embalagens e materiais de construção até eletrônicos e baterias (SHIBAO et al. 2010).

Esse processo também é usado para reduzir custos e melhorar a eficiência da cadeia de suprimentos. Por exemplo, empresas podem coletar e reutilizar materiais que ainda têm valor, em vez de descartá-los e comprar novos materiais, sendo uma estratégia importante para empresas que desejam se tornar mais sustentáveis e reduzir seu impacto ambiental. Além disso, a logística reversa pode ser uma forma de melhorar a imagem da empresa e atrair consumidores preocupados com a sustentabilidade. No atual cenário globalizado, está havendo um aumento constante da interconexão entre desempenho ambiental, competitividade e resultados financeiros finais. Empresas e líderes estão utilizando o desempenho ambiental superior como uma poderosa ferramenta competitiva. A crescente preocupação social está impulsionando o desenvolvimento de produtos ecologicamente corretos e a obtenção de certificações em normas internacionais, tais como a ISO14000, as demandas de certificação estão alterando as relações entre o meio ambiente e os negócios (LIVA, 2003).

Destarte, a incorporação das baterias de íon-lítio no processo de logística reversa se torna extremamente interessante, fazendo com que as baterias que antes eram destinadas a aterros sanitários causando uma série de riscos ambientais e operacionais sejam dispostas no mercado como matéria passível de valorização e incorporação em outros processos produtivos.

Deste modo, foi proposto a descaracterização das baterias por meio de trituração, porém a simples trituração das baterias é extremamente arriscada devido ao seu potencial explosivo, isso acontece pois quando as baterias de íons-lítio são danificadas ocorre uma reação química exotérmica não controlada que resulta em uma rápida liberação de energia, causando um aumento repentino de temperatura e pressão dentro da bateria. Esse aumento pode levar a danos físicos e rupturas na estrutura da bateria, resultando em uma explosão.

As baterias de íons de lítio contêm dois eletrodos - um ânodo de grafite e um cátodo de material de óxido de metal - separados por um eletrólito líquido ou sólido. Durante o uso normal, os íons de lítio se movem do ânodo para o cátodo e vice-versa, criando uma corrente elétrica que alimenta o dispositivo. No entanto, se houver uma falha no sistema de gerenciamento da bateria, como sobrecarga, curto-circuito ou danos físicos, a reação química dentro da bateria pode se tornar não controlada, levando a um aumento rápido da temperatura e pressão dentro da bateria, que pode resultar em uma explosão. A explosão de uma bateria de

íons de lítio pode liberar gases tóxicos e inflamáveis, como o dióxido de carbono e o hidrogênio, bem como chamas e fragmentos de metal quente, tornando-a perigosa para as pessoas próximas.

Diante dos riscos apresentados foi definido uma forma de diminuir a carga residual presentes nas baterias e realizar a trituração das mesmas em atmosfera inerte, diminuindo assim radicalmente os riscos operacionais.

## 2.1 Processo

Para erradicar os riscos operacionais da descaracterização e valorização das baterias foi desenvolvido um processo em duas etapas que trará o material descaracterizado e disposto de forma inerte sem oferecer nenhum risco ambiental.

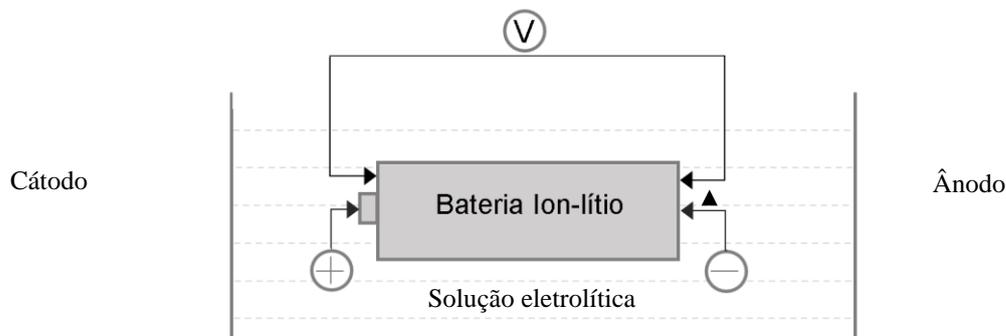
### 2.1.1 Descarga

Para fazer com que seja possível realizar a descarga das baterias em grande escala, foi estudado o processo de eletrólise.

O termo "eletrólise" tem origem na palavra grega que significa "decomposição por eletricidade". Esse processo é utilizado para promover uma reação química não espontânea através do uso de corrente elétrica. Para isso, um gerador de corrente elétrica contínua é conectado aos eletrodos de uma célula eletrolítica, fazendo com que os elétrons participem de reações de oxidação no ânodo e de redução no cátodo (FERNANDES, 2015).

Levando em consideração o processo de eletrólise (Figura 1), a ideia do trabalho é submeter as baterias a esse processo de forma que a energia residual das baterias seja consumida a fim de forçar uma outra reação não espontânea no meio de contato das baterias, conforme figura abaixo.

Figura 1. Representação esquemática de uma célula de bateria Ion-Lítio em processo de eletrólise



Fonte: Próprios autores

### 2.1.2 Moagem

No processo de moagem, as baterias são submetidas a um tratamento mecânico aplicando uma força bruta, pressão, impacto, abrasão ou corte, que fragmenta a sucata por meio do movimento dos seus utensílios de moagem, visando reduzir sua granulometria, facilitando assim a separação dos materiais que as compõem (BARCELOS, 2020). A trituração deve ser feita de forma a mitigar os riscos caso alguma célula entre no processo e não se descarregue até a tolerância estipulada, para isso descarregamento deve ser feito em atmosfera inerte.

### 3. METODOLOGIA

Inicialmente, realizou-se um estudo das aplicações das baterias em relação ao mercado atual, assim o processo em pauta será desenvolvido e testado em cima da tipologia das baterias encontradas em maior quantidade. Desta forma constatou-se que as maiores aplicações das baterias em relação a quantidade são:

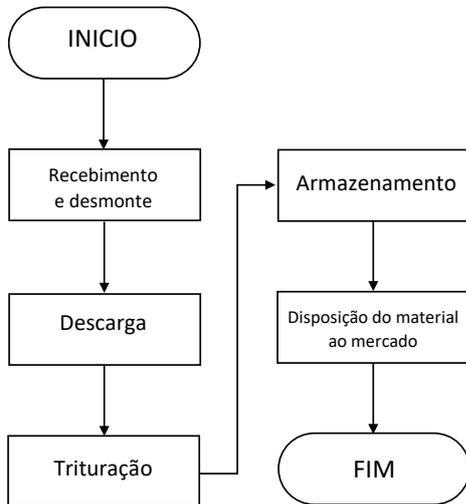
1. Eletrônicos portáteis: As baterias de lítio (Li) são amplamente utilizadas em dispositivos eletrônicos portáteis, como smartphones, tablets, laptops, câmeras digitais e smartwatches. Elas fornecem alta densidade de energia, o que permite alimentar esses dispositivos por longos períodos sem a necessidade de recarga frequente.
2. Veículos Elétricos: As baterias de lítio (Li) são essenciais para a propulsão dos veículos elétricos. Elas oferecem uma alta densidade de energia e uma boa relação entre peso e capacidade de armazenamento, o que permite que os veículos elétricos percorram distâncias significativas antes de serem recarregados.
3. Armazenamento de Energia Residencial e Comercial: Com o aumento da geração de energia renovável, como a solar e eólica, as baterias de lítio desempenham um papel crucial no armazenamento de energia para uso posterior. Elas permitem armazenar o excesso de energia gerado durante os períodos de baixa demanda e disponibilizá-la durante os períodos de alta demanda ou quando não há geração de energia renovável.
4. Armazenamento de Energia em Sistemas de Energia Renovável Isolados: Em regiões remotas ou em ilhas, onde não há acesso à rede elétrica convencional, as baterias de lítio são usadas para armazenar a energia gerada por painéis solares ou turbinas eólicas. Essas baterias fornecem energia durante os períodos em que não há geração de energia renovável.
5. Indústria Aeroespacial: As baterias de lítio (Li) são utilizadas em aplicações aeroespaciais, como satélites, sondas espaciais e veículos espaciais tripulados. Essas baterias oferecem alta densidade de energia e são capazes de operar em condições extremas, como temperaturas extremamente baixas e vácuo.
6. Equipamentos Médicos Portáteis: As baterias de lítio (Li) são usadas em equipamentos médicos portáteis, como monitores de saúde, desfibriladores e dispositivos de ventilação. Essas baterias proporcionam energia confiável e duradoura, permitindo a mobilidade e o uso contínuo desses equipamentos.

Com base na revisão da literatura, foram selecionadas uma quantidade representativa de baterias de smartphones e baterias tipo célula (presentes em módulos de armazenamento de energia que são aplicados nas mais diversas áreas) para a realização dos testes experimentais. A escolha das baterias levou em consideração critérios como popularidade no mercado, disponibilidade, porte das baterias e complexidade do desmonte das mesmas.

Os testes foram conduzidos em um ambiente controlado, com o intuito de avaliar a eficiência do processo descrito nesse trabalho, tanto das baterias de smartphones quanto as baterias tipo célula. Para isso, foram realizados testes de descarga preliminar (apenas nos equipamentos), descarga final, moagem e armazenamento.

Para cada etapa, são avaliadas as opções de vias alternativas e comportamento das baterias para estabelecer condições seguras e produtivas de operação, o processo produtivo seguiu fluxograma, no qual as etapas de descarregamento e trituração foram colocadas em teste e comprovadas.

Fluxograma 1: fluxograma do processo produtivo.



Fonte: Próprios autores

### 3.1 Descarregamento

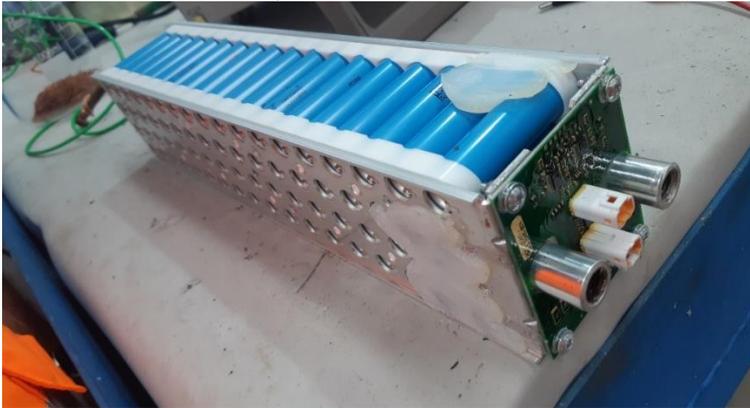
Para iniciar os testes foram separados dois equipamentos compostos por baterias tipo células sendo um módulo de tração (figura 02) e um Nobreak de Telecom (figura 03) e 5kg de baterias de smartphones (figura 04).

Inicialmente o módulo de tração (figura 02) e o nobreak (figura 03) apresentavam uma energia residual de aproximadamente 49,5V, que se encontra insegura para o manuseio e realização dos testes, devido a isso, foi necessário realizar a descarga nos equipamentos a uma tensão segura de aproximadamente 5V.

Quando a carga eletrônica programável é desligada, há um rápido aumento de tensão devido à abertura do circuito. Esse aumento não é relacionado ao rebote, mas simplesmente devido à perda da influência da resistência (medida em ohms) da bateria. Em circuito aberto, as baterias medem 1,5 V e em circuito fechado medem 0,38 V.

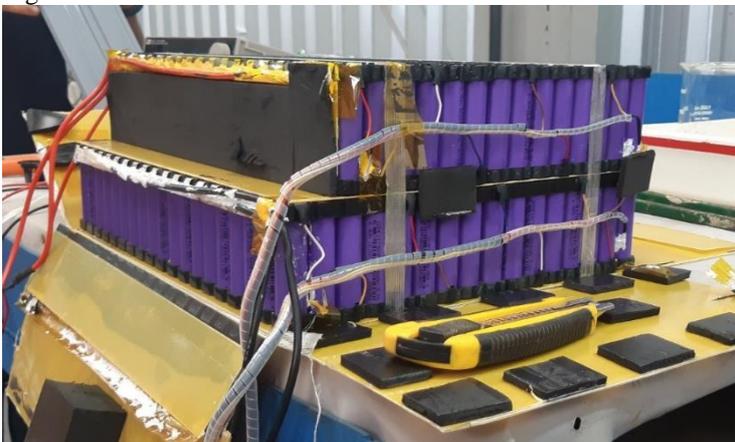
Ao final do descarregamento preliminar, o equipamento apresentava uma tensão interna de 0,83V, após a medição da tensão do equipamento, deu-se início ao desmonte dos equipamentos e retirada das células das baterias, a fim de dar continuidade aos testes.

Figura 02: Módulo de tração desmontado.



Fonte: Próprios autores.

Figura 03: Nobreak de Telecom desmontado



Fonte: Próprios autores.

Figura 04: Baterias de Smartphones.

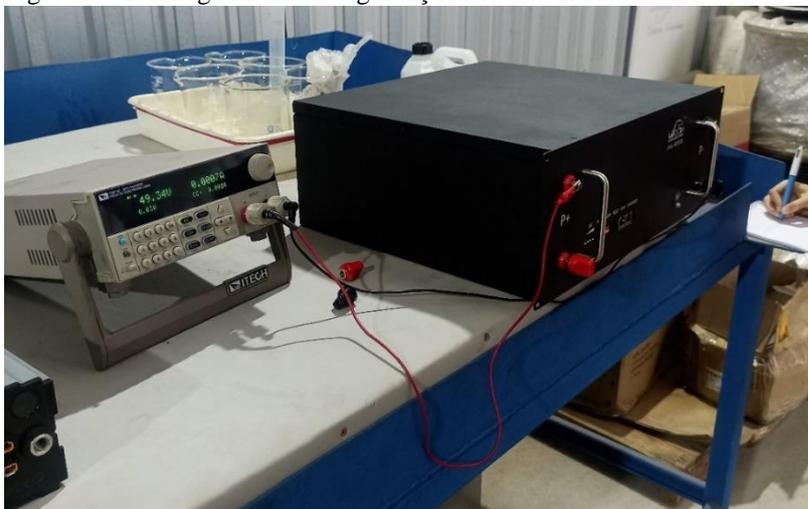


Fonte: Próprios autores.

Para realizar a descarga inicial nas baterias, foi utilizado um equipamento chamado “carga eletrônica programável” (figura 05) que é um equipamento de teste utilizado para emular cargas de resistências de corrente contínua ou corrente alternada, este equipamento possui em

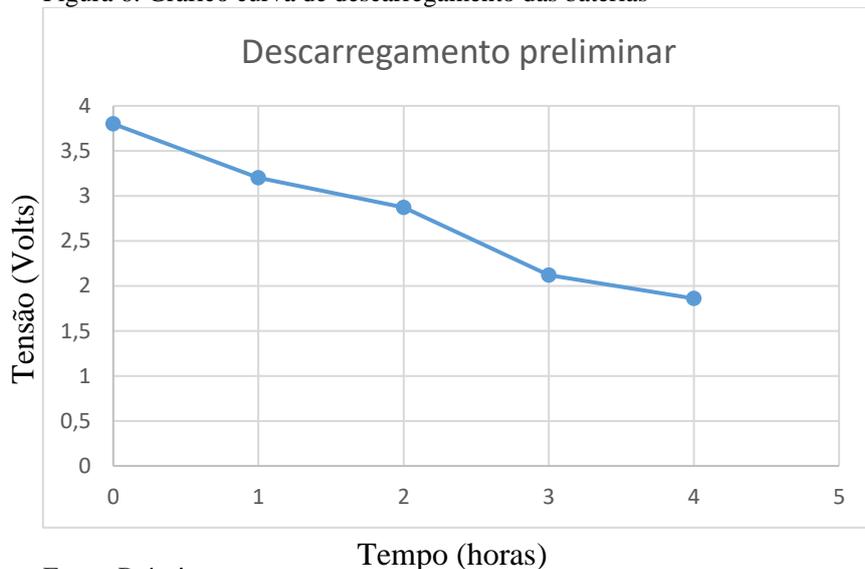
sua configuração, uma opção de descarga, que ao se conectar os pólos das baterias, consegue consumir a energia e dissipá-las em forma de calor por uma resistência. Podemos ver na figura 6 que a tensão das baterias vai baixando conforme o tempo que as mesmas passam dentro do Nobreak para o descarregamento inicial.

Figura 05: Descarga inicial de segurança do Nobreak de telecom.



Fonte: Próprios autores.

Figura 6: Gráfico curva de descarregamento das baterias



Fonte: Próprios autores

Após a separação dos equipamentos e retirada das células, foram medidas novamente a tensão presente nas baterias e apresentado uma média das mesmas com variação de 0,5V conforme informado pela tabela 01.

Tabela 1: Tensão inicial das baterias

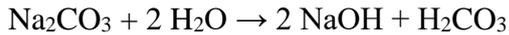
Baterias	Tensão Inicial Média
Baterias tipo célula de módulo de tração	3,84 V
Baterias tipo célula de Nobreak Telecom	3,72 V
Baterias de Smartphones	3,58 V

Fonte: Próprios autores

### 3.1.1 Banho eletrolítico

Para realizar a descarga das baterias foi preparado uma solução eletrolítica de água destilada e carbonado de sódio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) a 10% m/m (Figura 07). A reação balanceada dessa solução pode ser descrita na equação 1, onde observou-se a formação do hidróxido de sódio ( $\text{NaOH}$ ), e o ácido carbônico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ).

Equação 1: Balanceamento da solução.



Fonte: Próprios autores

Porém, para concentração utilizada o carbonato de sódio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) entra na solução a fim de aumentar a condutividade da mesma, sendo assim o carbonato de sódio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) entra como reagente limitante.

Além da adição do carbonato de sódio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), é realizado também a adição de cobre ( $\text{Cu}$ ) metálico em fios de comprimento menor que 2 cm, servindo também para aumentar a condutividade da solução eletrolítica e atuando como catalisador no processo, pois ao adicionar pedaços de cobre na água, é possível aumentar a condutividade elétrica da mesma. O cobre é um excelente condutor de eletricidade, e quando imerso na água, permite a passagem de corrente elétrica através do meio aquoso. A adição de cobre à solução eletrolítica cria uma solução aquosa contendo íons de cobre ( $\text{Cu}^{2+}$ ), que são responsáveis pela condução elétrica. Os íons de cobre ( $\text{Cu}^{2+}$ ) na solução aquosa são capazes de transportar cargas elétricas, permitindo que a solução eletrolítica se torne mais condutora. No entanto, é importante destacar que a condutividade da solução eletrolítica aumentada pela adição de cobre ( $\text{Cu}$ ) é temporária e depende da quantidade de cobre presente e da área de superfície exposta.

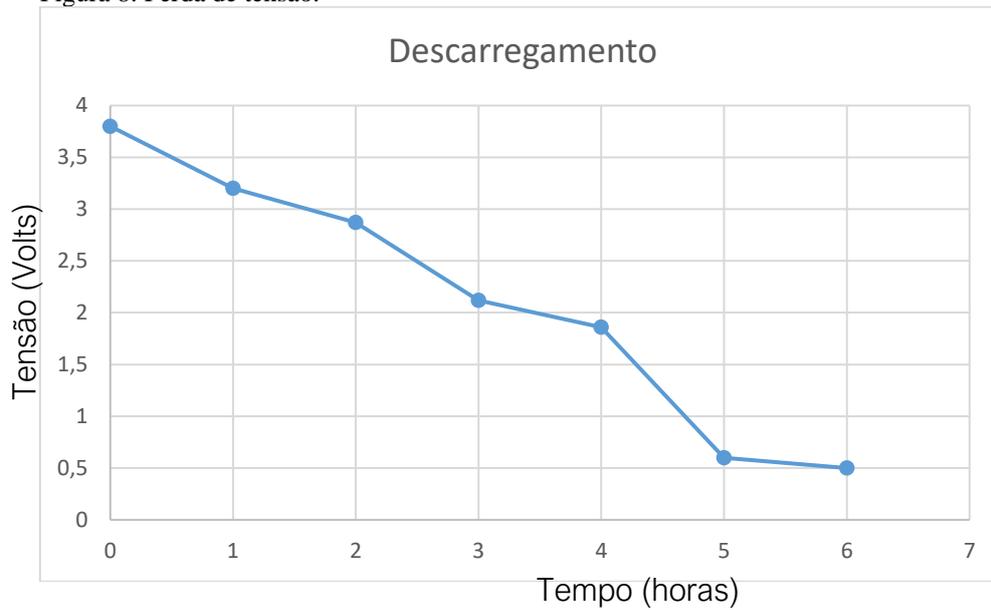
Figura 07: Descargas das baterias em solução eletrolítica.



Fonte: Próprios autores.

As baterias foram deixadas em processo de descarga por imersão por aproximadamente 6 horas e periodicamente foram feitas medições da tensão das baterias modelo, que foram marcadas e usadas de referência, como observou-se na figura 8.

Figura 8: Perda de tensão.



Fonte: Próprios autores

Sequencialmente as baterias foram retiradas do banho eletrolítico e tiveram suas tensões medidas novamente, onde constatou-se uma tensão média final, descrita na tabela 2.

Tabela 2: Tensão depois das baterias serem descarregadas.

Baterias	Tensão final MÉDIA
Baterias tipo célula de modulo de tração	0,6 V
Baterias tipo célula de Nobreak Telecom	0,8 V
Baterias de Smartphones	0,7 V

Fonte: Próprios autores

Após as medições finais, feitas em até 10 minutos após a retirada das baterias da solução eletrolítica, foi constatado que as baterias sofreram um rebote em tensão aumentando assim em até 0,5V em relação a medição feita ao final da descarga no exato momento em que a bateria saiu da eletrólise. Esse aumento não foi danoso ao processo pois a tensão esperada para a realização segura da moagem era de até 1,5V, e as tensões encontradas não ultrapassaram esse limite de segurança.

### 3.2 Trituração

Para realizar uma moagem segura a fim de mitigar os riscos operacionais advindos da energia residual das baterias, é necessário realizar a inertização da câmara por adição de gás inerte e exclusão de oxigênio. Para isso foi utilizado um triturador de bancada de eixo único (figura 6) com facas de 1 a 2 cm, peneira com malha de 2,5 cm, moega com tampa e vedação e saída inferior com tampa e vedação.

Para tornar a câmara de trituração um ambiente inerte foi utilizado um cilindro de Nitrogênio ( $N_2$ ), e a medição foi feita através de um explosímetro (Figura 10), para que a trituração seja segura é necessário alcançar um teor de oxigênio dentro da câmara abaixo de 8%.

Sequencialmente, foram dispostas 20 baterias tipo célula dentro da câmara de trituração (Figura 11), após 1,5 minutos de alimentação de nitrogênio, foi alcançado um teor de 3,3% de oxigênio no interior da câmara conforme explosímetro (Figura 10).

Figura 9: Triturador de bancada.



Fonte: Próprios autores

Figura 10: Explosímetro.



Fonte: Próprios autores

Figura 11: Alimentação do triturador.



Fonte: Próprios autores

Realizou-se o acionamento do triturador e mantido ligado por 10 minutos, após isso, a tampa da saída inferior foi aberta e o material processado foi retirado do triturador. Para compreendermos a composição do material triturado, uma amostra foi enviada para análise, onde foi determinado sua concentração em m/m, sendo:

- Lítio (Li) 1,9%
- Cobalto (Co) 6,1%
- Ferro (Fe) 0,0%
- Níquel (Ni) 0,4%
- Cobre (Cu) 0,4%
- Plástico e Grafite ( $C_6H_{10}$ ) 91,2%

Figura 12: Produto final.



Fonte: Próprios autores.

### 3.3 Armazenamento

Após a trituração do material, armazenou-se em sacos plásticos e selou-se a fim de evitar contato com o ambiente externo, o material final não apresenta nenhum risco operacional por se tratar de um material inerte e não tóxico, conforme figura 13.

Figura 13: Produto final armazenado.



Fonte: Próprios autores

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, observou-se os resultados obtidos a partir da análise dos dados coletados durante o estudo. As informações aqui apresentadas são fundamentais para compreender os efeitos e impactos das práticas de descarregamento e trituração de baterias de lítio. Os resultados fornecem *insights* valiosos sobre a eficácia desses processos, bem como suas implicações para a segurança, eficiência e sustentabilidade no manejo desses dispositivos.

A partir desses resultados, foi possível discutir os principais achados e suas contribuições para a área de gerenciamento de resíduos de baterias de lítio, assim como identificar oportunidades de melhoria e abordar possíveis desafios a serem enfrentados. Com base nas informações obtidas, foi possível propor recomendações e diretrizes para a implementação de boas práticas e regulamentações efetivas no âmbito da reciclagem de baterias de lítio.

### 4.1. Armazenamento Pré-teste

A fim de evitar a ocorrência de curtos e possíveis incêndios durante o armazenamento das baterias, foram estudadas formas de armazenamento que mitigariam os riscos. Se os polos positivo e negativo de duas baterias entrarem em contato direto, ocorrerá um curto-circuito, que é uma condição em que a corrente elétrica flui através de um caminho de baixa resistência, criando uma conexão direta entre os terminais de diferentes polaridades.

Quando isso acontece, uma quantidade excessiva de corrente será liberada rapidamente entre as duas baterias. Isso pode resultar em várias consequências, como:

- Aquecimento excessivo: O curto-circuito gera uma quantidade significativa de calor devido ao aumento repentino da corrente elétrica. Isso pode causar superaquecimento e até mesmo levar ao derretimento dos componentes internos das baterias.

- Danos às baterias: A alta corrente resultante do curto-circuito pode danificar os componentes internos das baterias, incluindo os eletrodos e o eletrólito. Isso pode levar à perda de capacidade de armazenamento de energia e redução da vida útil das baterias.
- Risco de incêndio ou explosão: O calor gerado pelo curto-circuito pode levar à ignição do eletrólito inflamável presente nas baterias, resultando em um risco de incêndio ou explosão.

As baterias de íons de lítio são sensíveis a curtos-circuitos e exigem cuidados especiais o que podem levar a condições perigosas, como liberação de gases tóxicos ou inflamáveis e, em casos extremos, a ocorrência de incêndios ou explosões.

Devido a isso é necessário manter os polos das baterias sem contato durante o armazenamento, para isso foi considerado uma opção de armazenamento por isolamento individual, nesta opção as baterias são embaladas por sacos plásticos individualmente, assim as baterias não teriam contato entre si, evitando o contato entre os polos das baterias. Esta forma de armazenamento é a mais eficaz, porém, por questão de mão de obra ela pode se tornar inviável se tratada em grande escala, conforme figura.

Figura 14: Armazenamento por isolamento individual.



Fonte: Próprios autores

#### 4.2. Redução da energia residual das baterias.

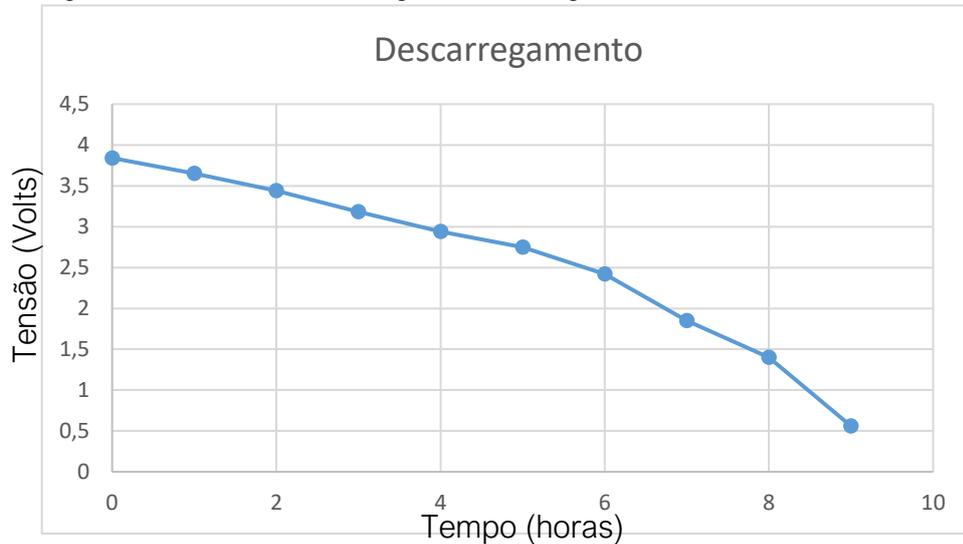
Para que a energia das baterias seja reduzida, foi proposto a imersão das baterias em uma solução sendo essa é uma mistura de solvente e soluto, capaz de conduzir eletricidade devido à presença de íons móveis. Nessa solução, os íons são formados quando o soluto se dissocia em íons positivos e negativos devido à ação do solvente.

Quando uma corrente elétrica é aplicada a uma solução eletrolítica, os íons positivos são atraídos pelo polo negativo (ânodo) e os íons negativos são atraídos pelo polo positivo (cátodo). Esse movimento de íons no solvente permite a passagem de elétrons através da solução, estabelecendo uma corrente elétrica.

O solvente utilizado foi a água destilada, e para aumentar a condutividade da solução foram analisados dois tipos de soluto, o cloreto de sódio ( $\text{NaCl}$ ) e o carbonato de sódio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ). Para ambos os solutos foram feitos testes de eficiência em relação a descarga das baterias, utilizando duas baterias, uma em cada solução, contendo a mesma tensão inicial, cada solução foi

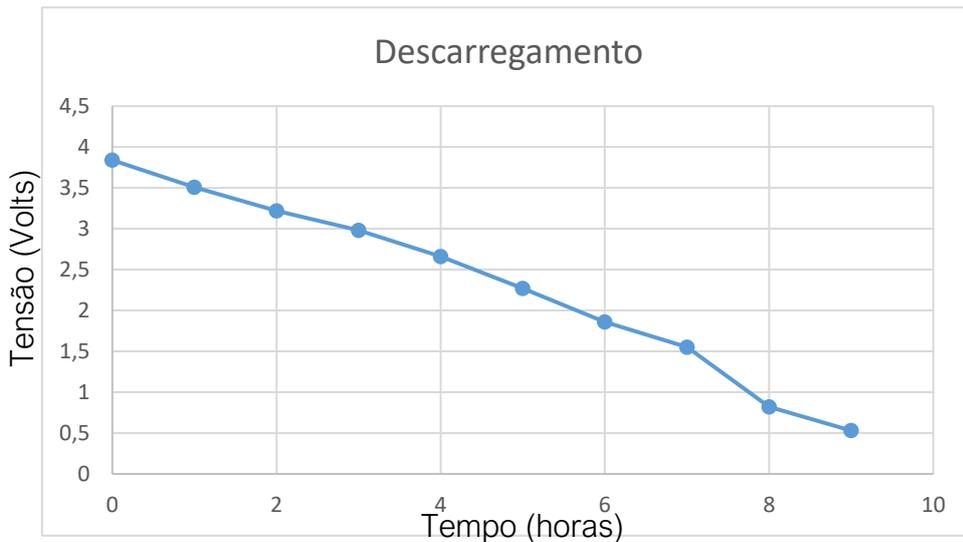
preparada com um litro de água destilada e 100g de soluto, sendo ele cloreto de sódio ou carbonato de sódio, os resultados obtidos seguem conforme a figura 15 e figura 16.

Figura 15: Eficiência de descarregamento com Água destilada e cloreto de sódio.



Fonte: Próprios autores

Figura 16: Eficiência de descarregamento com Água destilada e carbonato de sódio.



Fonte: Próprios autores

Evidenciou-se que não há ganhos significativos em relação aos solutos utilizados, porém a fim de evitar a formação de gás cloro durante o processo de descarregamento das baterias, foi definido que o soluto a ser utilizado seria o carbonato de sódio. Devido a isso, solução eletrolítica que foi definida para o descarregamento das baterias é composta de água destilada e carbonato de sódio a 10% m/m, seguindo a seguinte reação:

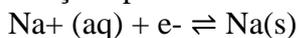


O preparo da solução não é feito de forma balanceada, pois a adição do carbonato de sódio serve apenas para aumentar a condutividade da solução, foram testadas outras concentrações, mas acima da concentração de 10% m/m, não houve mudança de eficiência do processo de

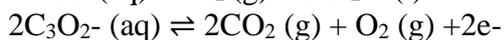
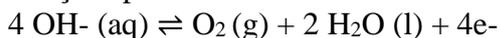
descarga, assim, foram estudadas as possíveis reações que ocorrem durante o processo de descarga.

Solução aquosa de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$

Reações prováveis no ânodo:



Reações prováveis no catodo:



Além do carbonato de sódio, foi definido a utilização do cobre metálico figura 12, que quando adicionado à solução, ocorre um processo chamado dissolução eletroquímica, em que íons de cobre são liberados na solução. Esses íons de cobre carregados positivamente (cátions  $\text{Cu}^{2+}$ ) podem mover-se livremente na solução, aumentando a concentração de cargas móveis.

A presença desses íons de cobre na solução, aumenta a quantidade de portadores de carga disponíveis para conduzir eletricidade, dessa forma, a condutividade elétrica da solução é aprimorada temporariamente, ou seja, enquanto o cobre estiver na solução.

Com o uso do cobre metálico, foi observado uma redução considerável no tempo de descarga das baterias, reduzindo em três horas o tempo de reação, sendo assim, foi constatado que o cobre realiza a função de um catalisador na reação, conforme gráfico representado na figura 17.

Figura 17: Uso de cobre para catalização da reação.



Fonte: Próprios autores

Foi definido que o tamanho dos fios de cobre deve ser no máximo metade do comprimento das baterias, para que não haja contato de um mesmo fio com os dois polos de uma bateria, pois assim, poderá ocorrer um curto circuito e uma possível explosão, o que ocorreu, mas foi controlado rapidamente conforme figura 18.

Figura 18: Bateria após ocorrência de curto circuito dentro da solução.



Fonte: Próprios autores

Após a descarga das baterias até a tensão estimada (0,5V) foi observado que as baterias sofrem um efeito chamado de rebote, onde a tensão das baterias aumenta após a retirada das mesmas da solução. Esse efeito é atribuído a vários fatores, incluindo redistribuição dos íons de lítio dentro da bateria e reações químicas reversas, que durante o efeito rebote ocorre uma pequena liberação de energia armazenada, levando a um aumento temporário da tensão da bateria. Esse aumento de tensão pode ser detectado e medido logo após a interrupção da descarga, aumentando no máximo 0,5V acima da tensão que foi medida no momento da retirada das baterias da solução eletrolítica.

#### 4.3 Descaracterização

Durante a trituração das baterias, a energia que ainda está presente nas mesmas, pode se dissipar em forma de calor, fenômeno que ocorre quando uma bateria sofre um dano mecânico. Então, para evitar que esse calor se torne um princípio de combustão, é necessário realizar a trituração em atmosfera inerte.

Atmosfera inerte refere-se a uma atmosfera que contém baixas concentrações de oxigênio ou outros gases reativos. Nesse tipo de atmosfera, a presença de gases reativos é reduzida para evitar reações indesejadas com materiais sensíveis ou potencialmente perigosos.

Para isso, foi utilizado um triturador com câmara estanque para que fosse possível a inserção de um gás inerte, reduzindo assim o percentual de oxigênio do meio, pois abaixo de 8% de oxigênio em uma câmara, não haverá forma alguma de combustão.

Foi definido, que para realizar a inertização da câmara seria utilizado ou nitrogênio ou dióxido de carbono, ambos gases inertes, mas por questões de disponibilidade os testes foram realizados com nitrogênio.

#### 4.4 Armazenamento

Logo após a trituração das baterias em um ambiente inerte, foi realizado o armazenamento dos produtos. Para que não haja contaminação dos componentes e nem algum tipo de oxidação quando misturados com a atmosfera, foi utilizado sacos plásticos para estocar os elementos.

## 5. CONCLUSÃO

Ao longo deste trabalho, explorou-se o tema da reciclagem de baterias de lítio, com foco no processo de descarga por eletrólise e trituração em atmosfera inerte. Através da pesquisa compreende-se como a reciclagem de baterias de lítio pode ajudar a mitigar os impactos ambientais e promover a sustentabilidade na indústria de energia. Uma das principais descobertas desta pesquisa foi a constatação de que a reciclagem de baterias de lítio é essencial para minimizar os riscos associados ao descarte inadequado desses dispositivos. As baterias de lítio são equipamentos muito sensíveis, extremamente perigosos e podem conter substâncias tóxicas e metais pesados que, se não forem corretamente tratados, podem contaminar o solo, a água e o ar, comprometendo a saúde humana e o meio ambiente.

O processo de descarga por eletrólise e trituração em atmosfera inerte mostrou-se uma alternativa eficaz para a recuperação de materiais valiosos das baterias de lítio, como o lítio, o cobalto, o níquel e o alumínio. Esse método permite a separação dos componentes da bateria de forma segura e controlada, minimizando o risco de vazamento de substâncias nocivas.

Além dos benefícios ambientais, a reciclagem de baterias de lítio também apresenta vantagens econômicas. A extração e o processamento de metais presentes nessas baterias demandam recursos naturais e energéticos significativos, então a reciclagem adequada dessas baterias permite a recuperação desses materiais, reduzindo a necessidade de novas minerações e diminuindo os custos de produção, estando extremamente alinhada com o conceito de economia circular.

No entanto, é importante ressaltar que a reciclagem de baterias de lítio ainda enfrenta desafios significativos. A falta de regulamentação adequada, a complexidade do processo e a necessidade de investimentos em infraestrutura são obstáculos a serem superados. Para uma implementação efetiva da reciclagem de baterias de lítio em larga escala, é fundamental o envolvimento de governos, indústria e sociedade civil na criação de políticas, incentivos e campanhas de conscientização.

Como pesquisadores, temos a convicção de que o conhecimento gerado por esta pesquisa contribuirá para o avanço do processo de reciclagem de baterias de lítio. Esperamos que as descobertas e as recomendações apresentadas neste trabalho possam ser utilizadas como base para futuros estudos e para a implementação de políticas e práticas sustentáveis na gestão de baterias de lítio.

Em última análise, a reciclagem de baterias de lítio é um passo crucial em direção a um futuro mais sustentável e livre de poluição. Nossos esforços em compreender e promover essa prática visam contribuir para a preservação do meio ambiente e a promoção de um desenvolvimento responsável. Cabe a todos nós, como cidadãos conscientes, adotar práticas de reciclagem e apoiar iniciativas que promovam a sustentabilidade.

## ADRADECIMENTOS

Gostaríamos de expressar nossos sinceros agradecimentos pelo artigo que marca o encerramento do curso de Engenharia Química. Esse momento representa o culminar de anos de estudo, dedicação e esforço, e esse trabalho reflete o comprometimento e a excelência demonstrados ao longo dessa jornada acadêmica.

Primeiramente, gostaríamos de agradecer a Deus e à nossa orientadora, Vanessa Mota Vieira, por sua orientação, paciência e incentivo ao longo de todo o processo de pesquisa e redação deste trabalho. Sua expertise e conhecimento foram fundamentais para o desenvolvimento desta pesquisa e para aprimorar nossas habilidades acadêmicas. Somos extremamente gratos por todo o suporte que você nos proporcionou.

Não podemos deixar de mencionar o apoio mútuo e a colaboração entre nós, Dríadas Gontijo, Rogério Caldeira e Walison Henrique. Nossa parceria e trabalho em equipe foram fundamentais para o desenvolvimento deste projeto. Juntos, superamos desafios, compartilhamos conhecimentos e alcançamos resultados significativos. Agradecemos por nossa dedicação, comprometimento e apoio mútuo ao longo dessa jornada.

Gostaríamos de expressar nossa gratidão a todos os participantes da pesquisa, sejam eles especialistas da indústria, recicladores ou pessoas comuns interessadas no assunto. Sem a colaboração e disposição de vocês em compartilhar seus conhecimentos e experiências, este estudo não teria sido completo. Agradecemos por terem dedicado seu tempo e contribuído para o enriquecimento deste trabalho.

A conclusão do curso de Engenharia Química é um marco significativo na formação profissional, e este artigo é testemunho do conhecimento adquirido, das habilidades desenvolvidas e do compromisso com a busca de soluções inovadoras para os desafios do campo da engenharia química. Através dessa pesquisa, podemos demonstrar a capacidade de aplicar conceitos teóricos e técnicas aprendidas ao longo do curso em uma área específica, enriquecendo assim o conhecimento científico.

Este artigo não é apenas um marco pessoal, mas também uma contribuição valiosa para o campo da Engenharia Química. Ele oferece uma perspectiva única e aborda questões relevantes, que podem servir de base para futuras pesquisas e avanços na área.

Também gostaríamos de agradecer aos nossos familiares e amigos que são nossa verdadeira riqueza, todos os professores, que desempenharam um papel importante no desenvolvimento acadêmico e pessoal durante o curso de Engenharia Química. Suas orientações, apoio e colaboração foram fundamentais para a conclusão bem-sucedida deste trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARCELOS, Lucas Pegrucci. **Estudos sobre o reaproveitamento de baterias íon-lítio**. 2020. 125 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2020.

BRASIL. DECRETO Nº 10.936, DE 12 DE JANEIRO DE 2022. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2019-2022/2022/Decreto/D10936.htm#art91](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2022/Decreto/D10936.htm#art91)>. Acesso em: maio de 2023.

BATISTA, Andreia Aparecida et al. Equipamentos eletrônicos: compra, uso e descarte consciente. **Revista Meio Ambiente e Sustentabilidade**, v. 4, n. 2, p. 131-168, 2013.

BATISTA, Rui Emanuel Veloso. **Implementação de uma comunidade de energia renovável**. 2021. ISCTE (Instituto universitário de Lisboa) Tese de Mestrado, 2021. Acesso em: 3 maio 2023.

BUSNARDO, Natália Giovanini; PAULINO, Jéssica Frontino; AFONSO, Júlio Carlos. **Recuperação de cobalto e de lítio de baterias íon-lítio usadas**. **Química Nova**, v. 30, p. 995-1000, 2007. FERNANDES, Ricardo Ferreira. Eletrólise. *Revista de Ciência Elementar*, v. 3, n. 1, 2015.

COSTA, R. C. da. **Reciclagem de baterias de íons de lítio por processamento mecânico**. [S. l.: s. n.]. Dissertação de mestrado Universidade Federal do Rio Grande Do Sul, 2010. Acesso em: 5 de maio. 2023.

FERNANDES, Ricardo Ferreira. *Eletrólise*. *Revista de Ciência Elementar*, v. 3, n. 1, 2015.

FILHO, Cleber Marcos de Oliveira. **Análise do ciclo de vida de baterias íon-lítio**. 2022. Monografia de trabalho de conclusão de curso. Acesso em 06 de maio de 2023.

LIVA, Patrícia Beaumord Gomes; PONTELO, Viviane Santos Lacerda; OLIVEIRA, Wedson Souza. **Logística reversa**. *Gestão e Tecnologia industrial*. IETEC, 2003.

ONU BRASIL. **Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil**. Nações Unidas Brasil. 2022. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>>. Acesso em: 30 abril 2023.

REIDLER, N. M. V. L.; GÜNTHER, Wanda Maria Risso. **Impactos sanitários e ambientais devido aos resíduos gerados por pilhas e baterias usadas**. In: **congresso interamericano de ingeniería sanitaria y ambiental**. 2002.

SHIBAO, Fábio Ytoshi; MOORI, Roberto Giro; SANTOS, MR dos. **A logística reversa e a sustentabilidade empresarial**. *Seminários em administração*, v. 13, p. 1-17, 2010.