

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE  
CURSO DE ENGENHARIA AUTOMOTIVA

GABRIEL BORGES MARTHENDAL

ANÁLISE DE MODOS DE FALHA E EFEITOS DE UMA CÉLULA DE LÍTIO-ÍON EM  
APLICAÇÃO NA EQUIPE DE COMPETIÇÃO FÓRMULA CEM

Joinville  
2022

GABRIEL BORGES MARTHENDAL

ANÁLISE DE MODOS DE FALHA E EFEITOS DE UMA CÉLULA DE LÍTIO-ÍON EM  
APLICAÇÃO NA EQUIPE DE COMPETIÇÃO FÓRMULA CEM

Trabalho apresentado como requisito para  
obtenção do título de bacharel em Engenharia  
Automotiva do Centro Tecnológico de Joinville  
da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Dr. Luís Fernando Peres Calil

Joinville  
2022

GABRIEL BORGES MARTHENDAL

ANÁLISE DE MODOS DE FALHA E EFEITOS DE UMA CÉLULA DE LÍTIO-ÍON EM  
APLICAÇÃO NA EQUIPE DE COMPETIÇÃO FÓRMULA CEM

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Automotiva, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 10 de março de 2022.

**Banca Examinadora:**

---

Dr. Luís Fernando Peres Calil  
Presidente  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Dr. Diego Santos Greff  
Membro  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Dr. Maurício de Campos Porath  
Membro  
Universidade Federal de Santa Catarina

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à instituição UFSC e todos seus funcionários que trabalham arduamente para fornecer um ensino público e de qualidade aos alunos. Agradeço especialmente ao professor Modesto Hurtado Ferrer, pelo seu comprometimento com a educação e desenvolvimento dos alunos, e por ser um mentor e amigo, à Professora Derce de Oliveira Souza Recouvreux pelos ensinamentos e conselhos que me foram passados, e por fim, ao Professor Luis Fernando Peres Calil, agradeço pela paciência e pelos conhecimentos a mim transmitidos durante a elaboração deste trabalho. Deixo aqui não somente meu agradecimento, mas a minha admiração pelos professores citados.

Agradeço à equipe Fórmula CEM e aos colegas que comigo enfrentaram este desafio que é participar de uma equipe de competição estudantil. Agradeço também pela oportunidade de aprendizado e desenvolvimento durante o tempo em que estivemos juntos. Este trabalho é fruto da equipe e merece ser compartilhado com os atuais e futuros membros. Aproveito para agradecer o amigo Rodrigo Inocência Cane que esteve comigo nessa empreitada. Com você eu aprendi a buscar continuamente pelo desenvolvimento pessoal e profissional, e em levar a vida com bom humor e leveza. Fica o meu agradecimento pelos anos de amizade e por toda a parceria, seja em Florianópolis, Joinville, Belo Horizonte ou Alemanha.

Agradeço aos profissionais que aceitaram de bom grado em participar da equipe da FMEA. Dedicaram tempo e seus conhecimentos para que este trabalho pudesse ser desenvolvido.

Agradeço aos inúmeros amigos que estiveram comigo durante a graduação. Me falta espaço para nomeá-los um a um. Deixo aqui meus sinceros agradecimentos a cada amigo que a UFSC e Joinville me proporcionaram. Aproveito para agradecer ao amigo Pedro Henrique de Oliveira Dellagiustina. Pelas inúmeras idas e vindas de Florianópolis para Joinville, e pela inúmeras conversas esclarecedoras e divertidas que estas viagens nos proporcionaram. Sou imensamente grato pela nossa amizade.

Agradeço ao meu amigo Jorge Miguel Bandeira de Oliveira pelos mais de 15 anos de amizade, 5 destes morando juntos e compartilhando dores e alegrias. Estes 5 anos em Joinville não seriam o mesmo sem você, meu irmão. Estendo meu agradecimento à

sua família, que sempre me acolheu tão bem.

Agradeço à minha companheira Dilma e sua mãe Zuleide. Muito obrigado por todo amor, carinho e compreensão.

Por fim, agradeço a minha família. Meus pais Afonso e Edilene, e minhas irmãs Aline e Larissa. Meus maiores incentivadores e apoiadores. Vocês são o motivo de tudo o que eu faço e almejo. É por vocês, sempre.

*Felix qui potuit rerum cognoscere causas.*

Afortunado é aquele que compreende as causas das coisas.

Virgílio, *Geórgicas*, livro II, linha 490.

## RESUMO

Dada a importância e complexidade de um projeto de acumulador de baterias de um veículo de competição estudantil, é importante conhecer os riscos de uma célula unitária para que ela opere da maneira mais confiável possível quando em conjunto com as demais células. Visando aumentar a confiabilidade deste componente da equipe Fórmula CEM do Centro Tecnológico de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina, que anualmente participa da Fórmula SAE Brasil, o presente trabalho teve como objetivo elaborar uma análise de modos de falha e efeitos (FMEA) de uma célula de lítio-íon, e elencar a criticidade de cada modo de falha para que através de ações de prevenção, possa reduzir sua probabilidade de ocorrência da falha e/ou mitigar os seus efeitos.

**Palavras-chave:** Fórmula CEM. FMEA. Confiabilidade. Célula de íon de lítio. Pack de baterias.

## **ABSTRACT**

Given the importance and complexity of a battery accumulator project for a student competition vehicle it is important to know the risks of a cell unit so that it operates as reliably as possible when connected to the other cells. Aiming to increase the reliability of this component from the student FSAE team Fórmula CEM of the Technological Center of Joinville of the Federal University of Santa Catarina, who annually participates in the Formula SAE Brasil competition, the present work had the objective of elaborating a failure mode effects and analysis (FMEA) of a lithium-ion cell, and list the criticality of each failure mode so that through actions of prevention it would be possible to reduce its probability of occurrence of the failure and/or mitigate its effects.

**Keywords:** Fórmula CEM. FMEA. Reliability. Lithium-ion cell. Battery pack.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Equipe Fórmula CEM 2019 . . . . .	15
Figura 2 – Comparação da densidade energética de células de bateria . . . . .	16
Figura 3 – Comparação da densidade energética em função do peso e tamanho . . . . .	17
Figura 4 – Componentes . . . . .	18
Figura 5 – Imagem esquemática da seção transversal ampliada da estrutura em camadas de um separador em uma célula cilíndrica de íon de lítio . . . . .	20
Figura 6 – Esquemático de uma célula cilíndrica . . . . .	22
Figura 7 – Esquemático de uma célula prismática . . . . .	22
Figura 8 – Esquemático de uma célula "Pouch" . . . . .	22
Figura 9 – Esquemático de uma célula em descarga . . . . .	23
Figura 10 – Desdobramento do sistema em subsistemas e componentes . . . . .	26
Figura 11 – Identificação das Funções . . . . .	27
Figura 12 – Abordagem funcional e estrutural aplicadas na análise de anel de vedação em um disjuntor . . . . .	29
Figura 13 – Diagrama de uma análise de eventos por rede causal . . . . .	30
Figura 14 – Taxonomia da CNEA . . . . .	30
Figura 15 – Escala dos índices de severidade, ocorrência e dificuldade de detecção . . . . .	31
Figura 16 – Relações determinísticas (regras) para definição do tratamento de cada combinação de índices . . . . .	32
Figura 17 – CNEA - Cátodo - Redução da capacidade de liberar/recuperar íons/elétrons . . . . .	37
Figura 18 – CNEA - Ânodo - Redução da capacidade de liberar/recuperar íons/elétrons . . . . .	38
Figura 19 – CNEA - Cátodo - Redução da capacidade de transferir íons para o eletrólito . . . . .	39
Figura 20 – CNEA - Ânodo - Redução da capacidade de transferir íons para o eletrólito . . . . .	39
Figura 21 – CNEA - Coletor Positivo - Redução da capacidade de transferir elétrons . . . . .	40
Figura 22 – CNEA - Coletor Negativo - Redução da capacidade de transferir elétrons . . . . .	40
Figura 23 – CNEA - Separador - Impedir passagem dos íons . . . . .	41
Figura 24 – CNEA - Separador - Permitir contato entre eletrodos . . . . .	41
Figura 25 – CNEA - Eletrólito - Redução da capacidade dielétrica . . . . .	43
Figura 26 – CNEA - Eletrólito - Instabilidade térmica . . . . .	43
Figura 27 – Célula de Lítio-ion da equipe Fórmula CEM em condições normais . . . . .	44

Figura 28 – Célula de Lítio-ion da equipe Fórmula CEM apresentando estufamento	44
Figura 29 – Célula de Lítio-ion de um parceiro da equipe Fórmula CEM apresentando rompimento da válvula de segurança . . . . .	45
Figura 30 – CNEA - Eletrólito - Redução da capacidade de transferir íons de lítio	46
Figura 31 – CNEA - Terminais - Redução da capacidade de transferir elétrons .	46
Figura 32 – CNEA - Case - Deformação acima do limite . . . . .	47
Figura 33 – CNEA - Válvula de segurança - Não rompimento da válvula de segurança . . . . .	47
Figura 34 – Folha FMEA - página 1 . . . . .	53
Figura 35 – Folha FMEA - página 2 . . . . .	54

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Comparativo de diferentes formas . . . . .	21
Quadro 2 – Exemplo de modo de falha com abordagem funcional . . . . .	28
Quadro 3 – Exemplo de modo de falha com abordagem estrutural . . . . .	28
Quadro 4 – Descrição Geral do Sistema . . . . .	33
Quadro 5 – Análise Funcional . . . . .	34
Quadro 5 – Análise Funcional . . . . .	35
Quadro 6 – Modos de Falha . . . . .	37
Quadro 7 – Avaliação do Risco . . . . .	48

## **LISTA DE SIGLAS**

BMS: Sistema de monitoramento de bateria

CNEA: Análise de Eventos por Rede Causal

COTUCA: Colégio Técnico de Campinas

CTJ: Centro Tecnológico de Joinville

EC: Eficiência Coulômbica

EV: Electric Vehicle

FMEA: Análise dos Modos de Falha e Efeitos

FSAE: Formula SAE

Fórmula CEM: Fórmula Combustion and Electric Motorsports

SAE BRASIL: Sociedade dos Engenheiros da Mobilidade Brasil

UFSC: Universidade Federal de Santa Catarina

UNICAMP: Universidade Estadual de Campinas

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
1.1	Objetivos	15
<b>2</b>	<b>BATERIAS DE LÍTIO-ÍON</b>	<b>16</b>
2.1	Componentes	18
<b>2.1.1</b>	<b>Eletrodos</b>	<b>18</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Eletrólito</b>	<b>19</b>
<b>2.1.3</b>	<b>Separador</b>	<b>19</b>
<b>2.1.4</b>	<b>Coletores de corrente</b>	<b>20</b>
<b>2.1.5</b>	<b>Outros</b>	<b>21</b>
2.2	Classificação	21
2.3	Formas	21
2.4	Princípio de funcionamento	23
<b>3</b>	<b>ANÁLISE DOS MODOS DE FALHA E EFEITOS</b>	<b>25</b>
3.1	Definição da Equipe da FMEA	25
3.2	Análise Funcional	26
3.3	Identificação dos Modos de falha e efeitos	27
3.4	Análise de eventos por rede causal (CNEA)	28
3.5	Identificação das Causas e Controles Atuais	28
3.6	Avaliação da Criticidade	30
3.7	Plano de Ação	31
<b>4</b>	<b>ANÁLISE DOS MODOS DE FALHA DE UMA BATERIA DE LÍTIO-POLÍMERO</b>	<b>33</b>
4.1	Análise Funcional	33
4.2	FMEA	35
<b>4.2.1</b>	<b>Redução da capacidade de liberar/recuperar íons/elétrons</b>	<b>37</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Redução da capacidade de transferir íons para o eletrólito</b>	<b>38</b>
<b>4.2.3</b>	<b>Coletores - Redução da capacidade de transferir elétrons</b>	<b>40</b>
<b>4.2.4</b>	<b>Impedir passagem dos íons</b>	<b>41</b>
<b>4.2.5</b>	<b>Permitir contato entre eletrodos</b>	<b>41</b>
4.2.5.1	Descontrole térmico	42
<b>4.2.6</b>	<b>Redução da capacidade dielétrica</b>	<b>42</b>
<b>4.2.7</b>	<b>Instabilidade térmica</b>	<b>43</b>
<b>4.2.8</b>	<b>Redução da capacidade de transferir íons de lítio</b>	<b>45</b>
<b>4.2.9</b>	<b>Terminais - Redução da capacidade de transferir elétrons</b>	<b>46</b>

4.2.10	<b>Deformação acima do limite</b> . . . . .	<b>46</b>
4.2.11	<b>Não rompimento da válvula de segurança</b> . . . . .	<b>47</b>
4.3	Caracterização do risco . . . . .	47
5	<b>CONCLUSÕES</b> . . . . .	<b>49</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	<b>51</b>
	<b>APÊNDICE A</b> . . . . .	<b>53</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Com o avanço da comercialização de veículos que utilizam propulsão elétrica, observa-se o aumento de estudos relacionados ao tema, sejam veículos híbridos, que fazem uso, tanto de motores à combustão, como motores elétricos, ou veículos puramente elétricos. Por ser tecnologia relativamente nova, os veículos elétricos ainda são minoria quando comparados à frota global, porém, têm-se observado o aumento da demanda, principalmente, devido à necessidade de uma motorização que utilize fontes renováveis de energia, evitando problemas econômicos e ambientais decorrentes dos motores à combustão.

Tendo em vista o crescente interesse pelos veículos elétricos, também conhecidos como Electric Vehicles (EV), a Sociedade dos Engenheiros da Mobilidade Brasil (SAE BRASIL), que atua promovendo cursos e eventos com objetivo de disseminar conhecimento para os profissionais da mobilidade brasileiros, oferece uma competição anual de veículos elétricos do tipo Fórmula desde 2012, com o intuito de oportunizar aos estudantes de engenharia a aplicação prática dos conhecimentos adquiridos, desenvolvendo um projeto completo de um veículo elétrico.

Como forma de avaliar a segurança dos componentes, a SAE exige que cada equipe entregue um relatório de Análise dos Modos de Falha e Efeitos (FMEA), de cada produto elétrico, que pela definição de Dias et al. (2011, p. 117) "[...] é uma técnica utilizada para análise de falhas cujo objetivo é desenvolver conhecimento para orientar as ações visando a eliminação das causas dos modos de falha."

A equipe Fórmula Combustion and Electric Motorsports (Fórmula CEM) é uma equipe de competição de Fórmula SAE (FSAE) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), fundada por 12 alunos do Centro Tecnológico de Joinville (CTJ) em Abril de 2010. Desde 2011 a equipe participa da competição anual de FSAE (Figura 1) com o protótipo à combustão e, em 2017, a equipe deu início ao desenvolvimento do protótipo elétrico, projetando neste e nos anos seguintes, dois veículos. Infelizmente, devido à pandemia do corona vírus, não houve a realização da competição em 2020.

O pouco tempo e a quantidade de trabalho, como conversado com os colegas e pela vivência na equipe, é um empecilho. Por isso, observa-se que não há aplicação de todas as etapas necessárias na elaboração das FMEAs da equipe.

Este trabalho apresenta uma aplicação das etapas da FMEA (a exceção da elaboração do plano de ação) da célula de íon de lítio atualmente utilizada no protótipo elétrico da equipe – um componente crítico e de vital importância para o funcionamento do veículo. Esta análise pode ser a base de informação para os atuais e futuros membros da equipe Fórmula CEM e demais interessados no assunto; podendo,

por exemplo, dar subsídio para a análise de falha do sistema de armazenamento de energia, no qual a célula é um dos componentes.

Figura 1 – Equipe Fórmula CEM 2019



Fonte: Fotografia feita pelo autor deste trabalho em 2019

## 1.1 OBJETIVOS

Fazer uma análise de modos de falha e efeitos da célula unitária de lítio-íon utilizada no pack de baterias da equipe de competição Fórmula CEM, com o intuito de aumentar a confiabilidade operacional deste produto.

Para atingir o objetivo, os objetivos específicos deste Trabalho de Conclusão de Curso, são:

- Fazer uma análise funcional da célula unitária de íon-lítio: descrevendo o sistema, desdobrando em subsistemas e componentes e identificando cada uma das funções;
- Investigar os modos e efeitos de falha da célula unitária de íon-lítio;
- Fazer uso da FMEA no sistema da célula unitária de íon-lítio;
- Identificar as funções e os componentes mais críticos da célula unitária de íon-lítio;

Embora faça parte de um FMEA a etapa de desenvolvimento de um plano de ação após o mapeamento das funções críticas, este trabalho não vai abordar esta etapa.

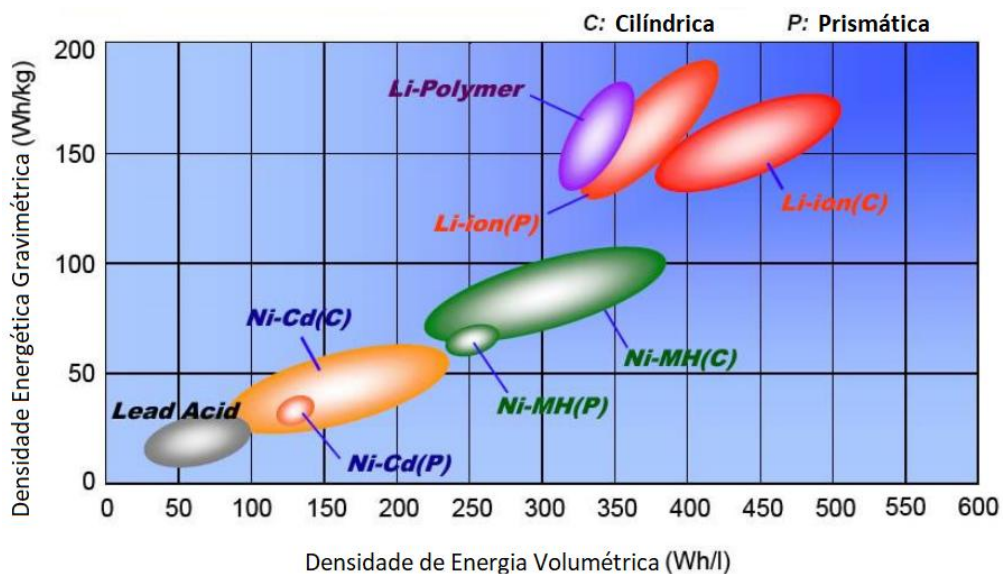


## 2 BATERIAS DE LÍCIO-ÍON

Próximo dos \$22 bilhões de dólares em 2019, o mercado global das baterias de íon de lítio tem expectativa de ultrapassar a marca dos \$70 bilhões de dólares em 2025. Estes valores demonstram a importância que esta tecnologia possui atualmente, e reforçam que seguirá sendo tendência nos próximos anos (RESEARCH AND MARKETS, 2020).

Morris (2012) acredita que as baterias de íon de lítio são as mais utilizadas, por alguns motivos apresentados a seguir: Há uma grande necessidade por baterias leves, pequenas e com potência suficiente. A combinação destes três fatores é também conhecida como densidade energética, que é o grande diferencial da bateria de íon de lítio quando comparada às demais químicas. Um comparacional entre as químicas de baterias em função da densidade energética pode ser vista nas Figuras 2 e 3.

Figura 2 – Comparação da densidade energética de células de bateria

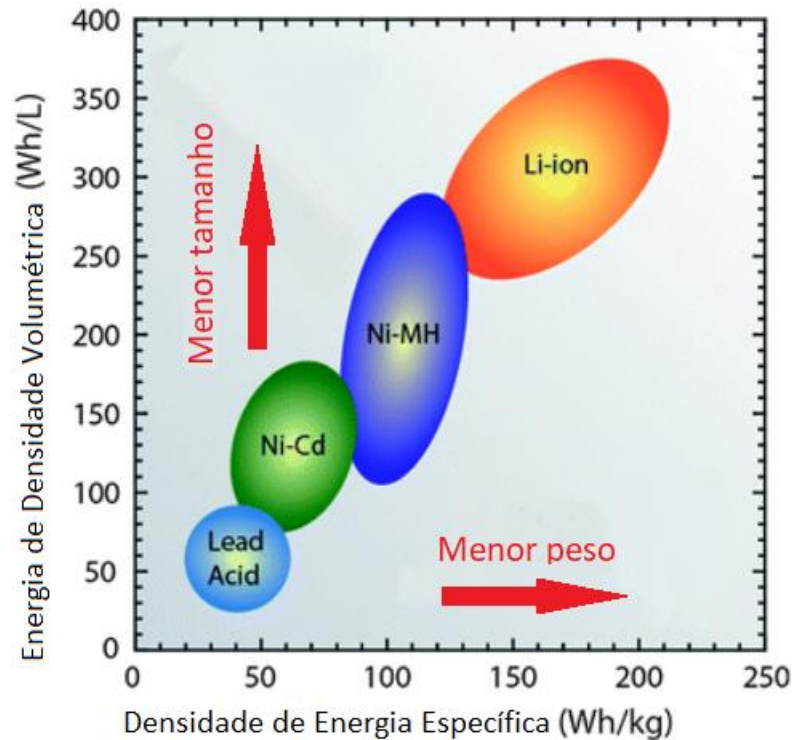


Fonte: Technologies (2021, p. 1, tradução nossa)

A bateria de íon de lítio é o dispositivo de geração e armazenamento de energia de maior sucesso comercial atualmente por possuir elevados valores de densidade energética, densidade de potência, segurança e custo (TARASCON; ARMAND, 2001).

A sua alta energia e elevada densidade de potência permitem que a bateria de íon de lítio alimente não somente eletroportáteis como celulares e computadores, como também automóveis, reduzindo efetivamente o consumo de combustíveis fósseis e contribuindo com a diminuição da geração dos gases causadores do efeito estufa (ZHU et al., 2021).

Figura 3 – Comparação da densidade energética em função do peso e tamanho



Fonte: Technologies (2021, p. 1, tradução nossa)

Comparada com outras baterias, as células de lítio-íon oferecem alta densidade energética, alta potência de descarga, elevada Eficiência Coulômbica (EC) e muitos ciclos de vida (RAHIMI, 2021).

Segundo Michelini (2020), baterias de íon de lítio possuem vantagem perante as outras, devido ao lítio ser o mais leve dentre os metais, ter o maior potencial eletroquímico e fornecer maior energia específica por peso.

Outro fator determinante para a escolha de baterias de íon de lítio é o impacto ambiental. Segundo Van den Bossche et al. (2006), as baterias a base de sal tendem a trazer menos consequências ao ambiente do que as demais.

Porém, Li et al. (2021) afirma que uma das desvantagens da bateria de íon de lítio é que ela possui menos estabilidade térmica do que as outras químicas, o que causou uma certa quantidade de incêndios em baterias de celulares, veículos elétricos e aviões. Este fato torna a bateria de lítio íon um interessante objeto de estudo se tratando de análise de falhas.

Michelini (2020) acredita que os recentes episódios envolvendo incêndios com baterias de lítio tornou as pessoas cientes dos perigos desta química, desencadeando uma grande quantidade de pesquisas a respeito do tema.

## 2.1 COMPONENTES

O primeiro conceito importante a ser entendido é diferenciar “bateria” de “célula”. Embora o termo “bateria” seja comumente utilizado, a unidade básica é a “célula”, e a “bateria” consiste de uma ou mais “células” conectadas em série e/ou paralelo.

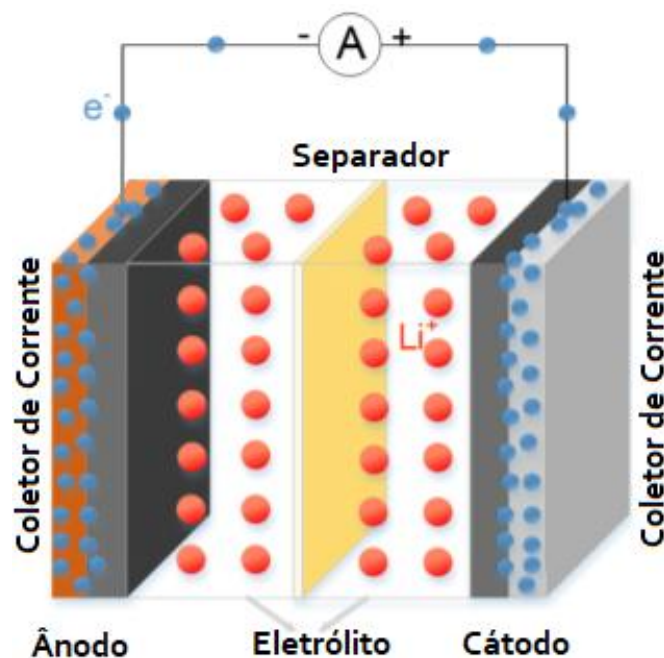
“Em um veículo elétrico típico, o pack de baterias é composto por vários módulos, que por sua vez é composto por várias células individuais de íon de lítio” (PRASAD, 2011, p. 13).

Neste trabalho, tanto o termo bateria quanto célula serão utilizados para se referir a uma célula unitária.

Segundo Zhu et al. (2021) uma célula típica de lítio-íon (Figura 4) é composta por:

- Ânodo
- Cátodo
- Eletrólito
- Separador
- Coletores

Figura 4 – Componentes



Fonte: Zhu et al. (2021, p. 3, tradução nossa)

### 2.1.1 Eletrodos

O ânodo e o cátodo, também são conhecidos como eletrodo negativo e eletrodo positivo, respectivamente, ou apenas eletrodos. Eletrodos típicos de baterias de íon-lítio

consistem no material ativo, aglutinantes e aditivos condutores revestidos e calandrados nos coletores (LI; DANIEL; WOOD, 2011)

De acordo com Li, Daniel e Wood (2011) e Prasad (2011), os materiais ativos mais comumente utilizados nos cátodos em baterias de lítio de íon são  $LiNi_xMn_yCo_{1-x-y}O_2$ ,  $LiMn_2O_4$  e  $LiFePO_4$ . Zhu et al. (2021) adiciona o  $LiCoO_2$  à lista dos materiais ativos mais utilizados. Knödlmayr (2020) e Miao et al. (2019) confirmam o que foi informado pelos demais autores e adicionam o  $LiNi_{0.8}Co_{0.15}Al_{0.05}O_2$ .

Quanto ao ânodo, Li, Daniel e Wood (2011), Prasad (2011), Zhu et al. (2021), Knödlmayr (2020) e Miao et al. (2019) são enfáticos ao informar que o grafite é o material ativo mais utilizado.

### 2.1.2 Eletrólito

Os eletrólitos consistem de sais de lítio em alguns solventes orgânicos que atuam como via condutora para o movimento dos íons de lítio (MICHELINI, 2020) (ZHU et al., 2021) (LI; DANIEL; WOOD, 2011) (KNÖDLMAYR, 2020) (PRASAD, 2011) (MIAO et al., 2019) (TARASCON; ARMAND, 2001) (BHATT et al., 2016) (REMLER; DAS; JAYANTI, 2021). As baterias podem ser classificadas como “wet cell” ou célula úmida, se o eletrólito for líquido, ou “dry cell” ou célula seca, se o eletrólito for um gel ou um sólido (MORRIS, 2012).

### 2.1.3 Separador

O separador é utilizado para separar mecanicamente os eletrodos positivo e negativo, no entanto é permeável ao eletrólito, a fim de manter a condutividade iônica (MICHELINI, 2020) (PRASAD, 2011) (REMLER; DAS; JAYANTI, 2021) (MORRIS, 2012).

Os separadores, normalmente camadas microporosas que consistem em membranas poliméricas, são colocados entre o cátodo e o ânodo para evitar o contato físico (ZHU et al., 2021) (KNÖDLMAYR, 2020).

Para Li, Daniel e Wood (2011), um bom separador deve ter alto fluxo iônico, condutividade eletrônica desprezível, alta estabilidade química contra eletrólitos, alta estabilidade mecânica e dimensional e força física suficiente para suportar o processo de montagem. Se uma bateria de íon de lítio entrar em curto-circuito, o separador também deve ser projetado para interromper o fluxo iônico e evitar o descontrole térmico, também conhecido como “Thermal Runaway”. Isso geralmente é realizado derretendo completamente ou parcialmente o separador, preenchendo os poros e evitando totalmente que os íons fluam de um eletrodo para o outro. Assim, as reações da bateria são suprimidas.

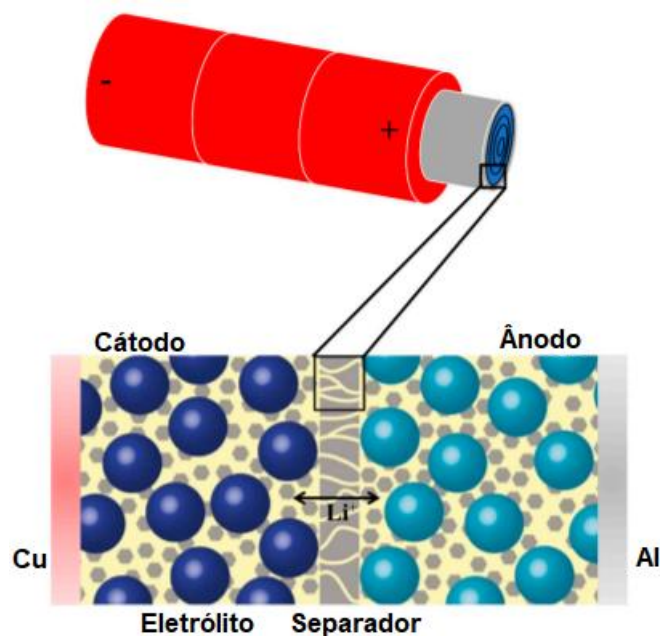
Segundo Li et al. (2021), o separador ideal não deve apenas ter grande

captação de eletrólitos para diminuir a resistência interna da célula, mas também ter espessura extremamente fina com forte resistência mecânica, sendo eletroquímica e estruturalmente estável, além de possuir uma estrutura altamente porosa com grande tortuosidade para evitar o crescimento de dendritos de lítio.

Os separadores fornecem isolamento eletrônico interno entre as camadas do cátodo e do ânodo e, assim, forçam os elétrons para a carga resistiva externa à qual a bateria está conectada. Além disso, os separadores fornecem rigidez mecânica para desencorajar o crescimento dos dendritos em direção ao eletrodo (JANA; ELY; GARCÍA, 2015).

É possível analisar na Figura 5 a presença do separador entre os eletrodos.

Figura 5 – Imagem esquemática da seção transversal ampliada da estrutura em camadas de um separador em uma célula cilíndrica de íon de lítio



Fonte: Li et al. (2021, p. 2, tradução nossa)

#### 2.1.4 Coletores de corrente

Os coletores de corrente são componentes que atuam como pontes, ao coletar a energia elétrica gerada nos eletrodos e conectar ao circuito externo. Usualmente, uma fina camada de alumínio é utilizado como coletor no cátodo, e uma fina camada de cobre no ânodo (ZHU et al., 2021).

Alumínio e cobre são amplamente utilizados como coletores de corrente devido a alta condutividade e estabilidade destes materiais (KNÖDLMAYR, 2020).

### 2.1.5 Outros

Em todas as baterias há também um invólucro, responsável por revestir e proteger a célula, um terminal positivo e um negativo, que são as áreas de contato com os polos do dispositivo alimentado, e em alguns tipos de células há também a presença de uma válvula de segurança, que se rompe se a célula atingir determinada pressão.

## 2.2 CLASSIFICAÇÃO

As baterias podem ser de diversos tamanhos, formas, tensões e capacidades. Elas também podem ser compostas de diferentes eletrólitos e eletrodos. Porém, podem ser classificadas de duas maneiras: baterias primárias ou secundárias.

Antes de entender a fundo uma bateria, é importante saber o que é um ciclo de vida.

Baterias primárias, também chamadas de baterias não recarregáveis, tem apenas um ciclo de vida, ou seja, a reação química que ocorre para fornecer energia é irreversível. E as baterias secundárias, conhecidas como baterias recarregáveis, possuem muitos ciclos, podendo ser recarregadas ao final de um ciclo de descarga.

“As baterias primárias não são recarregáveis e são mais conhecidas como pilhas. As baterias secundárias são recarregáveis.” (MICHELINI, 2020, p. 7)

O foco deste trabalho de conclusão de curso são as baterias secundárias.

## 2.3 FORMAS

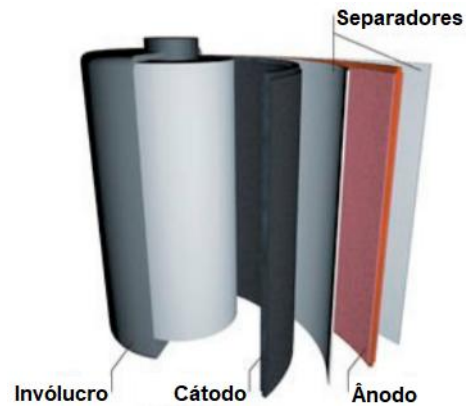
Baseado no fator forma, as células podem ser classificadas como cilíndricas (Figura 6), prismáticas (Figura 7) ou “pouch cell” (Figura 8) (PRASAD, 2011). Essa versatilidade ajuda a ampliar o uso das baterias de lítio-íon, pois elas podem ser projetadas em torno de vários fatores de forma diferentes para cada necessidade específica (HORIBA, 2014). No quadro 1 é possível analisar um comparativo entre os diferentes formatos de células e as vantagens e desvantagens de cada um.

Quadro 1 – Comparativo de diferentes formas

Forma	Cilíndrica	Prismática	Pouch
Arranjo dos eletrodos	Enrolados	Enrolados	Camadas
Força mecânica	++	+	-
Gerenciamento térmico	-	+	+
Energia específica	+	+	++
Densidade energética	+	++	+

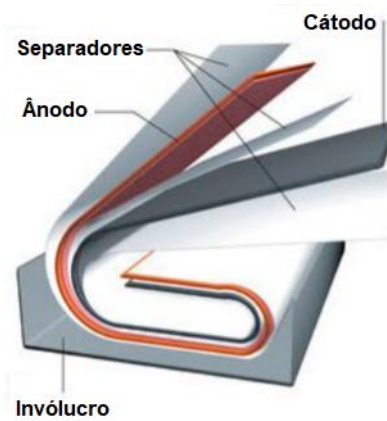
Fonte: Miao et al. (2019, p. 9, tradução nossa)

Figura 6 – Esquemático de uma célula cilíndrica



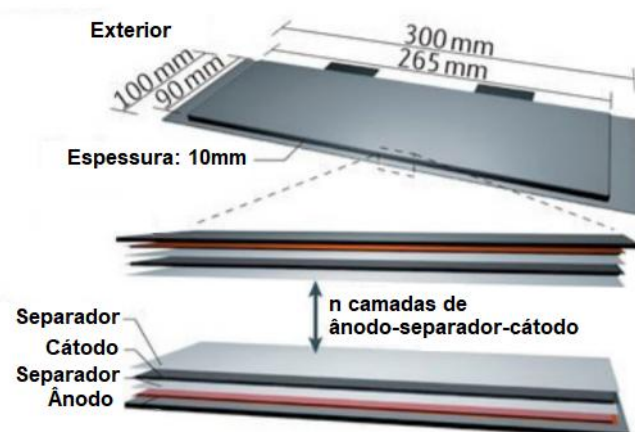
Fonte: Choi e Aurbach (2016, p. 6, tradução nossa)

Figura 7 – Esquemático de uma célula prismática



Fonte: Choi e Aurbach (2016, p. 6, tradução nossa)

Figura 8 – Esquemático de uma célula "Pouch"



Fonte: Choi e Aurbach (2016, p. 6, tradução nossa)

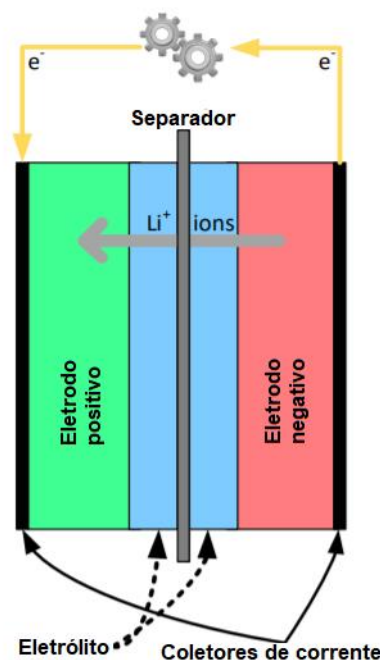
## 2.4 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

Baterias são dispositivos que armazenam energia química e a convertem em energia elétrica. Os elétrons são gerados através de reações químicas em um eletrodo e então fluem para o outro eletrodo. Em uma célula é necessário haver dois eletrodos: ânodo ou eletrodo negativo, onde os elétrons são produzidos por reações químicas; e o cátodo ou eletrodo positivo, onde os elétrons são recebidos (BHATT et al., 2016).

Há duas reações químicas que ocorrem na célula simultaneamente. No ânodo, o eletrodo reage com o eletrólito em uma reação onde são produzidos elétrons, que ficam acumulados no ânodo, e no cátodo ocorre outra reação, que o torna apto a receber elétrons. O termo químico correto para uma reação onde ocorre transferência de elétrons é reações de oxidação-redução. Redução é o ganho de elétrons, que ocorre no cátodo, e oxidação é a perda de elétrons, que ocorre no ânodo (BHATT et al., 2016).

Os elétrons têm uma carga negativa e, como a reação química no ânodo produz elétrons que estão sendo enviados para o cátodo, é necessário ter um equilíbrio de carga neutro no eletrodo. Para isso, uma quantidade correspondente de íons carregados positivamente também são produzidos. Estes não são enviados pelo circuito externo, e sim pelo eletrólito, que é o responsável por manter o equilíbrio de cargas. Ao mesmo tempo, o cátodo também deve equilibrar a carga negativa dos elétrons que recebe, de modo que a reação que ocorre deve receber os íons carregados positivamente do eletrólito (BHATT et al., 2016).

Figura 9 – Esquemático de uma célula em descarga



Fonte: Miao et al. (2019, p. 3, tradução nossa)



Cada uma das reações citadas anteriormente, tem um potencial padrão específico. O potencial pode ser definido como a eficiência da reação em produzir ou receber elétrons. Quaisquer dois materiais condutores que tenham reações com potenciais padrões diferentes podem formar uma célula eletroquímica, porque o mais forte, que possui o maior delta em função do potencial, será capaz de tirar elétrons do mais fraco. A diferença de potencial entre os eletrodos equivale à "força" com a qual os elétrons são transferidos entre os dois eletrodos. Isso é conhecido como potencial eletroquímico geral da célula e determina sua voltagem. Quanto maior a diferença, maior o potencial eletroquímico e maior a tensão da célula. (BHATT et al., 2016).

Quando a bateria do tipo secundária é conectada a uma fonte de eletricidade externa, ela reverte a reação química que ocorreu durante a descarga. Isso envia os íons positivos liberados do ânodo para o eletrólito de volta ao ânodo, e os elétrons que o cátodo absorveu também de volta ao ânodo. O retorno de íons positivos e elétrons de volta ao ânodo prepara o sistema para que esteja pronto para funcionar novamente (BHATT et al., 2016).

Quando a célula está conectada a uma carga externa, os elétrons fluem do ânodo, que é oxidado, através da carga externa para o cátodo, onde os elétrons são aceitos e o cátodo é reduzido. O circuito elétrico é completado no eletrólito pelo fluxo de íons negativos para o ânodo e íons positivos para o cátodo (MICHELINI, 2020).

Durante a descarga (Figura 9), íons de lítio armazenados no ânodo fluem para o cátodo, gerando elétrons e formando um fluxo de corrente. O processo é reverso quando a bateria está sendo carregada (ZHU et al., 2021).

### 3 ANÁLISE DOS MODOS DE FALHA E EFEITOS

Segundo Escagion Antonietti (2002), FMEA é uma técnica que busca, evitar, por meio da análise das falhas potenciais e propostas de ações de melhoria, que ocorram falhas no projeto do produto ou do processo. A SAE Automotive Quality and Process Improvement Group (2002) descreve FMEA como um conjunto de atividades com o objetivo de reconhecer e avaliar as falhas de um determinado produto ou processo e seus respectivos efeitos, identificar as ações necessárias para eliminar ou reduzir a probabilidade de falha e, por fim, a documentação do processo.

Segundo Dias et al. (2011), há diversos métodos de aplicação da FMEA, porém, de forma geral, aconselham-se os seguintes passos:

- a) Definição do item a ser analisado;
- b) Definição da equipe da FMEA;
- c) Análise funcional e identificação das funções do sistema escolhido;
- d) Análise de eventos por rede causal
- e) Identificação dos modos de falha e efeitos;
- f) Identificação das causas e controles atuais;
- g) Avaliação da criticidade (se pertinente);
- h) Levantamento das ações a serem executadas;
- i) Reavaliação dos índices de severidade, ocorrência e dificuldade de detecção, após a implementação das ações.

#### 3.1 DEFINIÇÃO DA EQUIPE DA FMEA

Após a definição do sistema em análise, parte-se para a elaboração e definição da equipe da FMEA.

Stamatis (2014) acredita que a equipe é uma das questões mais importantes, e que, um FMEA realizado individualmente, não cumpre e não atende os requisitos, por ser formado exclusivamente pela opinião de um único indivíduo.

McDermott, Mikulak e Beauregard (2009) defendem que o propósito da equipe da FMEA é trazer diferentes pontos de vista, perspectivas e experiências para o projeto.

Quanto ao tamanho da equipe, nota-se uma leve divergência entre os diversos estudiosos do tema, mas de forma geral, o ideal é uma equipe com pelo menos 4 membros e no máximo 9.

Indica-se para a composição da equipe: uma pessoa responsável pelo desenvolvimento da FMEA, uma pessoa moderadora, um líder do projeto e um grupo de especialistas do campo de conhecimento do objeto ou sistema em estudo (DIAS et al., 2011).

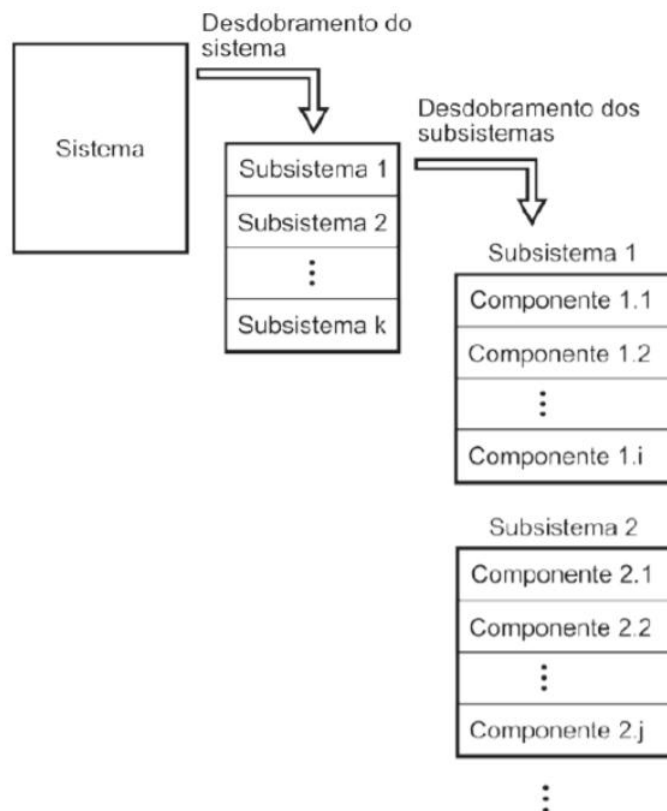
### 3.2 ANÁLISE FUNCIONAL

Segundo Dias et al. (2011), o primeiro passo, após a formação da equipe da FMEA, é realizar uma análise funcional do produto, que, nada mais é, do que um conjunto de atividades realizadas com o objetivo de obter conhecimento e informação a respeito do sistema em estudo, ressaltando que, quanto maior for o nível de detalhamento das informações obtidas, menor será o tempo para realizar a análise de falhas.

Há três tarefas realizadas na análise funcional: descrição geral do sistema, desdobramento em subsistemas/componentes e identificação das funções (DIAS et al., 2011).

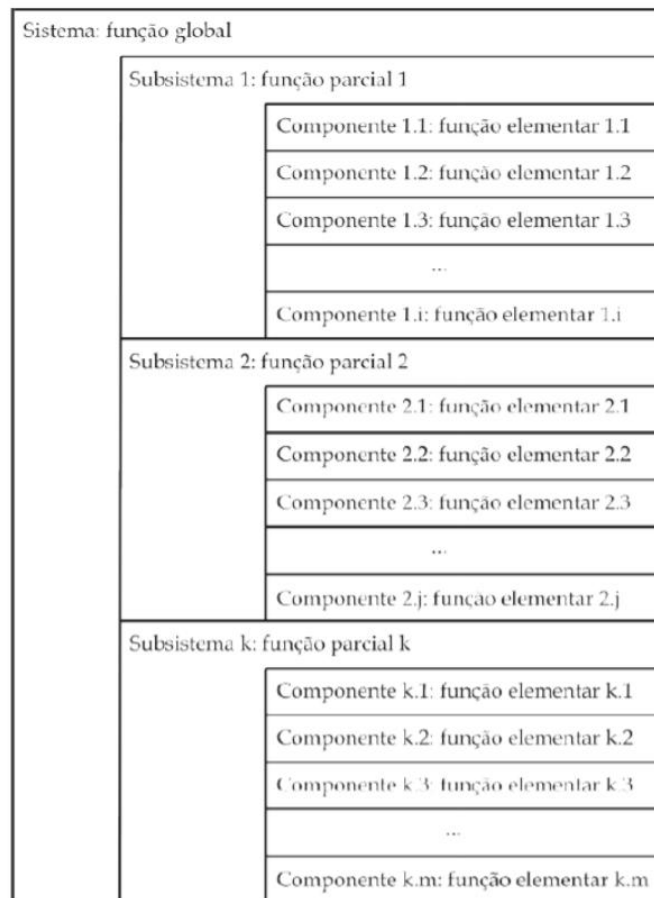
De acordo com Dias et al. (2011), na etapa de descrição geral do sistema é delimitado o escopo da análise, o ambiente e a interação com outros sistemas. As etapas de desdobramento em subsistemas/componentes e identificação das funções estão representadas visualmente nas Figuras 10 e 11.

Figura 10 – Desdobramento do sistema em subsistemas e componentes



Fonte: Dias et al. (2011, p. 109)

Figura 11 – Identificação das Funções



Fonte: Dias et al. (2011, p. 110)

### 3.3 IDENTIFICAÇÃO DOS MODOS DE FALHA E EFEITOS

McDermott, Mikulak e Beauregard (2009) definem modo de falha como os possíveis jeitos que um produto pode falhar, e que cada modo de falha tem um efeito, sendo alguns efeitos mais prováveis de ocorrer do que outros.

Dias et al. (2011) acreditam que modo de falha é a maneira com que o sistema estudado deixa de executar a sua função, e que, enquanto o modo de falha ocorre internamente no item, o efeito manifesta-se externamente. Para identificar os modos de falha e efeitos, é necessário definir qual das abordagens da FMEA serão aplicadas: funcional ou estrutural.

A abordagem funcional (Quadro 2) tem como foco as funções do sistema técnico e, portanto, a abordagem costuma ser mais abrangente (DIAS et al., 2011).

Dias et al. (2011, p. 119) definem que na abordagem estrutural (Quadro 3) "[...] o modo de falha está associado a aspectos mais específicos dos componentes, elementos, peças ou partes do sistema sob análise. Normalmente, está associado à resistência mecânica, carregamento ocorrido, tratamento superficial existente, [...]".

Quadro 2 – Exemplo de modo de falha com abordagem funcional

<b>Componente</b>	<b>Função</b>	<b>Modo de Falha</b>
Eixo	Transmitir torque	Não transmite torque

Fonte: Dias et al. (2011, p. 119,)

Quadro 3 – Exemplo de modo de falha com abordagem estrutural

<b>Componente</b>	<b>Função</b>	<b>Modo de Falha</b>
Eixo	Transmitir torque	Ruptura, empenamento, desgaste, trinca

Fonte: Dias et al. (2011, p. 120)

Dias et al. (2011) destaca que há uma diferença importante na montagem do quadro dos efeitos e modos de falha de análise funcional e estrutural. Onde deve-se preencher “causa”, na abordagem funcional, passa a ser o “modo de falha” na abordagem estrutural, como exemplificado na Figura 12.

### 3.4 ANÁLISE DE EVENTOS POR REDE CAUSAL (CNEA)

A análise de eventos por rede causal é uma ferramenta para auxiliar na elaboração dos modos de falha e efeitos, como pode-se visualizar na Figura 13. Segundo Dias et al. (2011), é uma técnica que estrutura, em forma de diagrama, a análise de risco por meio da representação do evento analisado, causas, efeitos e as barreiras (que são os controles atuais na FMEA) que atuam na corrente causal. Além disso, possui uma taxonomia própria (Figura 14) para auxiliar no desenvolvimento dos diagramas.

### 3.5 IDENTIFICAÇÃO DAS CAUSAS E CONTROLES ATUAIS

SAE Automotive Quality and Process Improvement Group (2002) define causa como um indicativo de problema no produto, que tem como consequência o modo de falha.

Para Dias et al. (2011), todo modo de falha tem uma ou mais causas que potencializam sua ocorrência e, estas possuem várias denominações e diferentes formas de caracterizar sua dimensão ou importância.

A SAE Automotive Quality and Process Improvement Group (2002) categoriza as causas em 7 níveis, onde o objetivo é destrinchar a percepção da causa do nível mais geral para o mais específico, até aproximar-se da causa raiz.

Porém, para Dias et al. (2011), nem sempre é necessário destrinchar em tantos níveis o processo de análise das causas, sendo possível dividir em apenas 3 níveis:

Figura 12 – Abordagem funcional e estrutural aplicadas na análise de anel de vedação em um disjuntor

**FMEA funcional**

Item	Função	Modo de falha	Efeito	Causa
Anel de vedação	Vedar	Não veda	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Perda total – caso haja rompimento (explosão) da câmara – ou parcial do SF6.</li> <li>• Redução da pressão interna do SF6.</li> <li>• Abertura de arco elétrico nas partes condutoras internas.</li> <li>• Aumento dos danos causados pelo arco elétrico durante a abertura ou o fechamento do disjuntor.</li> <li>• Trip do disjuntor (com abertura do disjuntor).</li> <li>• Impossibilidade de fechamento do disjuntor.</li> <li>• Danos a pessoas e equipamentos próximos caso haja explosão.</li> </ul>	Deformação permanente



**FMEA estrutural**

Item	Função	Modo de falha	Efeito	Causa
Anel de vedação	Vedar	Deformação permanente	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Perda total – caso haja rompimento (explosão) da câmara – ou parcial do SF6.</li> <li>• Redução da pressão interna do SF6.</li> <li>• Abertura de arco elétrico nas partes condutoras internas.</li> <li>• Aumento dos danos causados pelo arco elétrico durante a abertura ou o fechamento do disjuntor.</li> <li>• Trip do disjuntor (com abertura do disjuntor).</li> <li>• Impossibilidade de fechamento do disjuntor.</li> <li>• Danos a pessoas e equipamentos próximos caso haja explosão.</li> </ul>	Pressão de aperto excessiva Temperatura excessiva Material do anel inadequado Envelhecimento

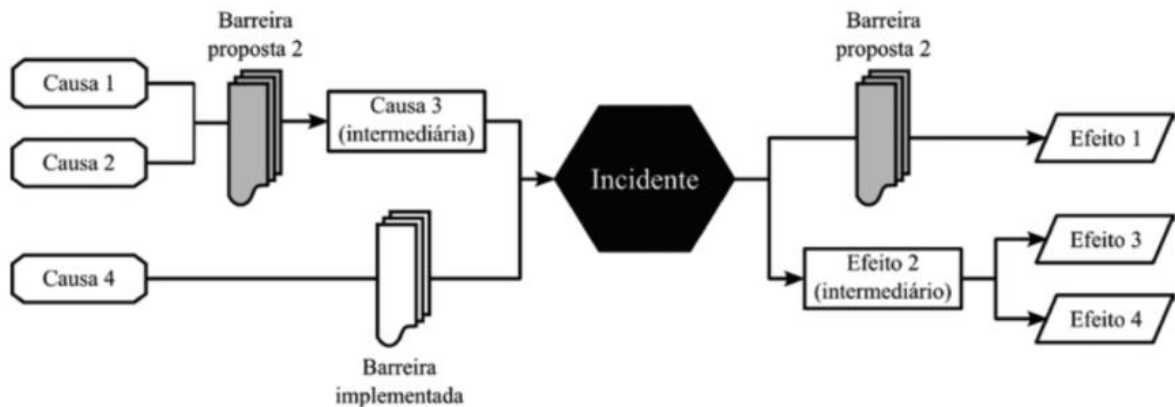
Fonte: Dias et al. (2011, p. 120)

causas próximas, intermediárias e raízes. As causas próximas são as relatadas pelo operador do produto, as intermediárias geralmente necessitam de uma análise mais profunda e são indicadas por especialistas, e as raízes são o último nível de análise.

Os controles atuais, por sua vez, são barreiras que interferem nas correntes causais – quer para reduzir a probabilidade de ocorrência do modo de falha, quer para mitigar seus efeitos.

Note-se que pode-se associar mais de uma barreira na mesma corrente causal, por exemplo: na análise de um sistema de armazenamento de energia que a célula

Figura 13 – Diagrama de uma análise de eventos por rede causal



Fonte: Dias et al. (2011, p. 190)

Figura 14 – Taxonomia da CNEA

FIGURA	DESCRIÇÃO	FIGURA	DESCRIÇÃO
	Evento a se analisar, no caso, um <b>incidente</b> . Alguns autores adotam um círculo. Optou-se pelo hexágono para diferenciar da representação de causa raiz na FTA.		<b>Barreiras preventivas já implementadas</b> que objetivam evitar a ocorrência do evento central ou mitigar seus efeitos.
	<b>Efeitos</b> potenciais que o evento central pode gerar, dentro do escopo de análise.		<b>Barreiras preventivas propostas</b> , que deverão ser implementadas.
	<b>Causa raiz</b> para a ocorrência do evento central, dentro do escopo de análise.		
	<b>Causa ou efeito intermediário</b>		

Fonte: Dias et al. (2011, p. 191)

é um dos componentes, pode-se instalar um sistema de monitoramento de baterias (BMS) para reduzir a probabilidade de ocorrer sobrecarga na célula da bateria; e/ou instalar a célula em uma clausura para não permitir a propagação de incêndio; etc. No entanto, esses outros sistemas externos a célula não estão no escopo do trabalho.

### 3.6 AVALIAÇÃO DA CRITICIDADE

A avaliação da criticidade é efetuada desde as causas da condição perigosa e do evento gatilho, até os efeitos do incidente, incluindo os resultados de cada ocorrência. Os efeitos são então classificadas quanto à segurança, continuidade, disponibilidade, economia e finança. Cada cenário é avaliado por três critérios: chance de ocorrer (O), dificuldade de detecção (D) e severidade associada (S). A partir destes critérios, a criticidade é categorizada a partir de uma matriz de ocorrência versus severidade,

conforme o índice de detecção (DIAS et al., 2011).

Com as escalas da Figura 15, é possível identificar qual matriz e em qual posição ou nível de criticidade (Figura 16), de acordo com o nível de ocorrência e severidade, encontra-se o modo de falha analisado.

Figura 15 – Escala dos índices de severidade, ocorrência e dificuldade de detecção

Severidade (S)		Ocorrência (O)		Dificuldade de detecção (D)	
Categoria	Descrição	Categoria	Descrição	Categoria	Descrição
1 - 2	Insignificante	1 - 2	Improvável	1	Fácil
3 - 4	Menor	3 - 4	Remota	2	Regular
5 - 6	Maior	5 - 6	Ocasional	3	Difícil
7 - 8	Perigosa	7 - 8	Provável	4	Muito difícil
9 - 10	Catastrófica	9 - 10	Frequente		

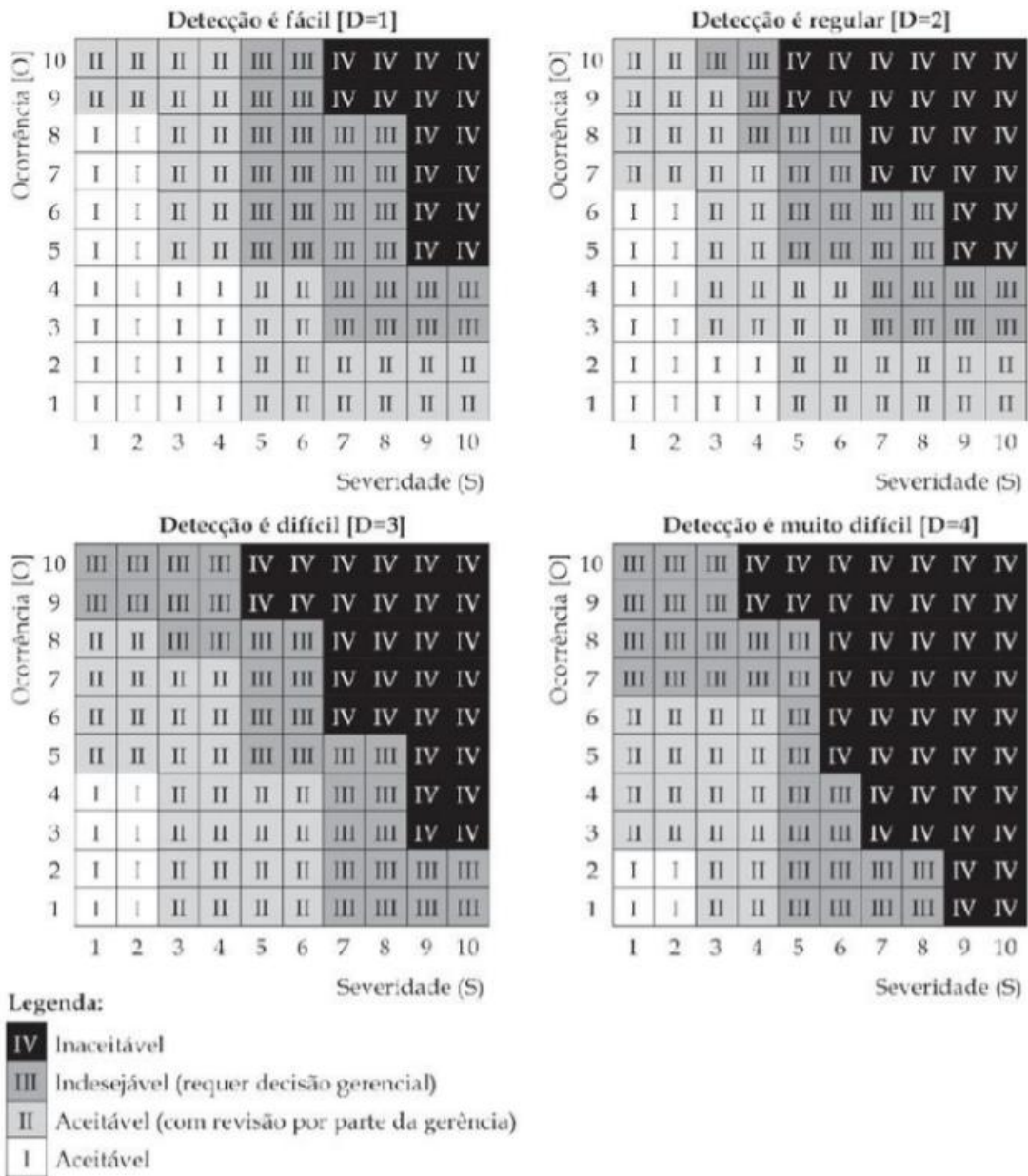
Fonte: Dias et al. (2011, p. 269)

### 3.7 PLANO DE AÇÃO

Uma vez determinado quais os perigos mais críticos, deve-se montar um plano de ação para evitar que os perigos evoluam para a condição de incidentes. Há diferentes estratégias para implementar as ações que evitam os perigos: ações para evitar o risco, para transferir o risco e para reduzir o risco (DIAS et al., 2011).



Figura 16 – Relações determinísticas (regras) para definição do tratamento de cada combinação de índices



Fonte: Dias et al. (2011, p. 268)

## 4 ANÁLISE DOS MODOS DE FALHA DE UMA BATERIA DE LÍTIO-POLÍMERO

Após selecionado o produto a ser estudado e definido a equipe responsável pela FMEA, foram marcadas reuniões individuais com os participantes da equipe da FMEA para discutir e elaborar a análise funcional do produto e do quadro da FMEA (que está apresentado no Apêndice A).

### 4.1 ANÁLISE FUNCIONAL

A elaboração da análise funcional foi dividida em três etapas:

1. Descrição geral do sistema, onde é delimitado o escopo da análise, o ambiente e a interação com outros sistemas, se houver, apresentado no Quadro 4;
2. Desdobramento do sistema em subsistemas e componentes, como demonstrado no Quadro 5;
3. Identificação das funções de cada um dos subsistemas e componentes elencados, também no Quadro 5.

Definiu-se que a bateria está fornecendo energia para um veículo de competição de FSAE Brasil e montou-se descrição geral do sistema com as funções, critérios de desempenho e condições de operação.

Quadro 4 – Descrição Geral do Sistema

Sistema	Funções	Critérios de Desempenho	Condições de Operação
Célula de íon de lítio	Armazenar energia na forma química; Através de reações químicas, disponibilizar energia na forma elétrica; Através de uma fonte externa, converter energia elétrica em energia química.	Fornecer 60.000mAh de corrente de pico; Fornecer 10.000mAh de corrente contínua por ao menos 30min.	Operar em ambiente com temperatura mínima de 25°C e máxima de 60°C.

Fonte: Quadro desenvolvido pelo autor deste trabalho

Após a descrição geral do sistema, partiu-se para os desdobramentos do sistema em subsistemas e componentes, e as definições das funções de cada subsistema. O Quadro 5 demonstra estas etapas.

## Quadro 5 – Análise Funcional

<p><b>Célula</b></p> <p>Funções:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Armazenar energia na forma química;</li> <li>• Através de reações químicas, disponibilizar energia na forma elétrica;</li> <li>• Através de uma fonte externa, converter energia elétrica em energia química.</li> </ul>
<p><b>Ânodo</b></p> <p>Funções:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Reagir quimicamente com o eletrólito gerando íons de lítio e elétrons que são enviados para o cátodo;</li> <li>• Reagir quimicamente com o eletrólito estando apto a receber íons de lítio e elétrons do cátodo.</li> </ul>
<p><b>Coletor negativo</b></p> <p>Funções:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Coletar elétrons do ânodo e transmitir para o terminal;</li> <li>• Receber os elétrons do terminal e transmitir para o ânodo.</li> </ul>
<p><b>Terminal negativo</b></p> <p>Funções:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Receber os elétrons do coletor e transmitir para o circuito externo;</li> <li>• Receber os elétrons do circuito externo e transmitir para o coletor.</li> </ul>
<p><b>Cátodo</b></p> <p>Funções:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Reagir quimicamente com o eletrólito estando apto a receber íons de lítio e elétrons do ânodo;</li> <li>• Reagir quimicamente com o eletrólito gerando íons de lítio e elétrons que são enviados para o ânodo.</li> </ul>
<p><b>Coletor positivo</b></p> <p>Funções:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Receber os elétrons do terminal e transmitir para o cátodo;</li> <li>• Coletar elétrons do cátodo e transmitir para o terminal.</li> </ul>
<p><b>Terminal positivo</b></p> <p>Funções:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Receber os elétrons do circuito externo e transmitir para o coletor;</li> <li>• Receber os elétrons do coletor e transmitir para o circuito externo.</li> </ul>
<p><b>Eletrólito</b></p> <p>Função:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Possibilitar o movimento dos íons entre os eletrodos durante as reações químicas.</li> </ul>

Continua na próxima página

Quadro 5 – Análise Funcional

<p><b>Separador</b></p> <p>Funções:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Prevenir o contato entre cátodo e ânodo;</li> <li>• Permitir somente a passagem dos íons de lítio.</li> </ul>
<p><b>Case</b></p> <p>Funções:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Revestir e proteger a célula;</li> <li>• Alocar a válvula de segurança.</li> </ul>
<p><b>Válvula de Segurança</b></p> <p>Função:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Romper-se quando a célula atingir determinada pressão.</li> </ul>

Fonte: Tabela desenvolvida pelo autor deste trabalho

#### 4.2 FMEA

Com o quadro de análise funcional montada, com os respectivos subsistemas e funções, partiu-se para a elaboração da FMEA funcional da célula de íon-lítio (Figuras 34 e 35, que estão apresentadas no Apêndice A)).

A equipe que atuou nas análises apresentadas neste trabalho é composta por 6 pessoas:

- Um especialista em manutenções de baterias, com grande conhecimento em projeto de packs de baterias. Possui formação em Engenharia Elétrica na Católica de Santa Catarina na unidade Joinville. Atualmente possui empresa própria onde fornece serviços de manutenção da parte elétrica e projetos de pack de bateria para pequenos veículos e dispositivos elétricos.
- Um especialista que atua e possui experiência como engenheiro de sistemas de bateria. Atualmente trabalha para uma montadora de veículos automotivos. Possui curso técnico em eletroeletrônica pelo Colégio Técnico de Campinas (COTUCA) e graduação em Engenharia Elétrica e Eletrônica pela Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Este especialista possui outras experiências profissionais na área elétrica, além de ter participado da competição Fórmula SAE Brasil como membro e como juiz.
- Um especialista que possui graduação em eletrônica automotiva pela FATEC Santo André, mestrado em Engenharia Elétrica pela Escola Politécnica da USP e atualmente está cursando doutorado em sistemas de monitoramento de baterias (BMS) na Escola Politécnica da USP e na Faculdade de Engenharia

da Universidade do Porto. Possui amplo conhecimento como pesquisador em renomados centros de pesquisa nacionais e também atuando na iniciativa privada em outras funções, porém sempre atuando na área elétrica. Atualmente trabalha com baterias e projetos de sistemas de monitoramento de baterias (BMS) e acumula mais de 15 anos de experiência na área.

- Um especialista em baterias de lítio-íon, que atua como coordenador de engenharia de baterias de lítio e trabalha para uma multinacional do setor de baterias. Atua há quase 20 anos nesta multinacional, além de possuir breve experiência como pesquisador. Possui graduação como engenheiro elétrico na UNICAMP.
- Um especialista graduado em Engenharia Mecatrônica pela UFSC, que atuou como projetista e líder do setor técnico na equipe Fórmula CEM por 3 anos. Atualmente trabalha em uma multinacional da área elétrica.
- O último integrante da equipe é graduando de Engenharia Automotiva pela UFSC e é o atual projetista do pack de baterias da equipe Fórmula CEM.

Para esta etapa, foram realizadas reuniões individuais com cada um dos participantes da equipe da FMEA, onde cada um dos integrantes forneceu informações que estão dentro do seu escopo de atuação a respeito do produto estudado, contribuindo com a construção da análise de falhas.

Por fim, reuniu-se uma única vez com o maior número possível de participantes da equipe da FMEA, para revisar e debater sobre os modos de falha, efeitos, causas potenciais e avaliação de criticidade de cada um dos itens da folha da FMEA.

Abaixo, encontra-se o Quadro 6 com os modos de falha presentes na folha da FMEA (Figuras 34 e 35, que estão apresentadas no Apêndice A).

Quadro 6 – Modos de Falha

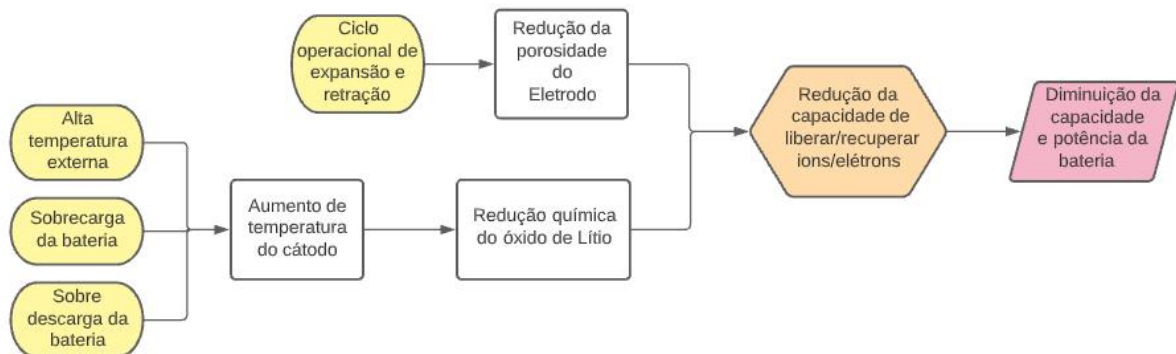
Cátodo - Redução da capacidade de liberar/recuperar íons/elétrons
Cátodo - Redução da capacidade de transferir ions para o eletrólito
Ânodo - Redução da capacidade de liberar/recuperar íons/elétrons
Ânodo - Redução da capacidade de transferir ions para o eletrólito
Coletor positivo - Redução da capacidade de transferir elétrons
Coletor negativo - Redução da capacidade de transferir elétrons
Separador - Permitir contato entre eletrodos
Separador - Impedir passagem dos íons
Eletrólito - Redução da capacidade dielétrica
Eletrólito - Instabilidade térmica
Eletrólito - Redução da capacidade de transferir íons
Terminais - Redução da capacidade de transferir elétrons
Case - Deformação acima do limite
Válvula de Segurança - Não acionamento da válvula

Fonte: Quadro desenvolvido pelo autor deste trabalho

#### 4.2.1 Redução da capacidade de liberar/recuperar íons/elétrons

Este modo de falha tem dois braços causais no cátodo (Figura 17): um relacionado a porosidade do eletrodo e outro ao aumento da temperatura do cátodo e a sua influência na composição química do eletrodo.

Figura 17 – CNEA - Cátodo - Redução da capacidade de liberar/recuperar íons/elétrons

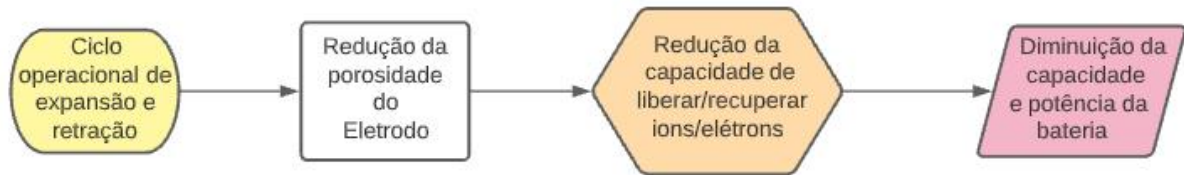


Fonte: Figura gerada pelo autor deste trabalho

No ânodo (Figura 18) há apenas o braço causal relacionado a porosidade do eletrodo.

A respeito da redução da porosidade do eletrodo, que é uma causa intermediária tanto para o cátodo quanto para o ânodo, as alterações volumétricas derivadas da expansão e retração do eletrodo, associadas à intercalação repetida, podem causar o isolamento das partículas do eletrodo, resultando em uma redução na

Figura 18 – CNEA - Ânodo - Redução da capacidade de liberar/recuperar íons/elétrons



Fonte: Figura gerada pelo autor deste trabalho

capacidade de fornecimento de íons do respectivo eletrodo e, conseqüentemente, na redução da capacidade e potência da célula. Esta mudança na estrutura do eletrodo pode ser observada medindo a porosidade da estrutura.

A reação de intercalação de lítio ocorre quando um elétron e um íon de lítio se combinam nas partículas do eletrodo. Como o eletrólito é isolado eletronicamente, uma rede condutiva de partículas é necessária para facilitar o transporte de elétrons através da estrutura do eletrodo.

Sobre o braço causal exclusivo do cátodo, que tem como causa intermediária a redução química do óxido de lítio, o cátodo é suscetível à três fatores que podem aumentar a temperatura interna: a temperatura externa à célula, a sobrecarga da bateria e a sobre descarga da bateria. Quando um destes três fatores provocam o aumento da temperatura do cátodo, o eletrólito acaba tornando-se instável, e reage quimicamente com o cátodo.

Como a composição química do eletrodo positivo é um óxido de lítio, o oxigênio durante a reação com o eletrólito, acaba gaseificando, reduzindo a capacidade do cátodo de fornecer íons, e por fim, reduzindo a capacidade da célula.

#### 4.2.2 Redução da capacidade de transferir íons para o eletrólito

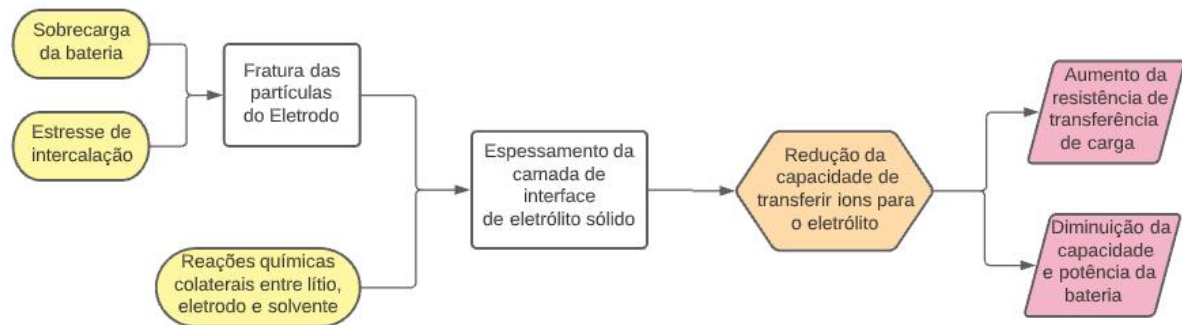
Este modo de falha possui apenas um braço causal com duas causas intermediárias no cátodo, como pode-se observar na Figura 19.

E no ânodo apresenta mais um braço causal, além do mesmo que é apresentado no cátodo, como apresentado na Figura 20

A causa intermediária denominada fratura das partículas do eletrodo, pode ser observada como microfissuras na superfície do eletrodo, como resultado da iniciação e propagação de trincas durante a intercalação e desintercalação iônica. Essas microfissuras acabam aumentando a área de contato do eletrodo com o eletrólito, o que contribui para o surgimento da camada de interface do eletrólito sólido e conseqüentemente para o seu espessamento.

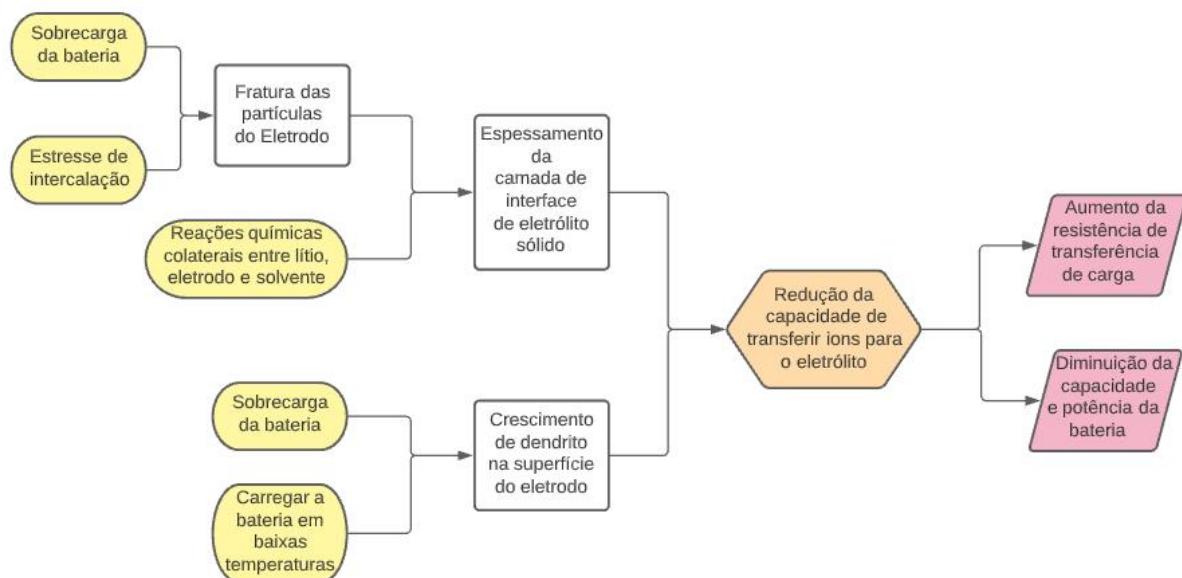
Como o processo da intercalação iônica é um processo natural da célula, não há como evitar esse modo de falha. Porém, as fraturas das partículas do eletrodo podem ser agravadas caso a bateria seja recarregada rapidamente, com uma alta taxa

Figura 19 – CNEA - Cátodo - Redução da capacidade de transferir íons para o eletrólito



Fonte: Figura gerada pelo autor deste trabalho

Figura 20 – CNEA - Ânodo - Redução da capacidade de transferir íons para o eletrólito



Fonte: Figura gerada pelo autor deste trabalho

de carga, ou se o tamanho das partículas do eletrodo não estiverem bem distribuídas.

A respeito da causa intermediária espessamento da camada de interface do eletrólito sólido, quando a célula é montada e opera pela primeira vez, as reações entre os solventes e o eletrodo resultam na formação de uma camada de interface de eletrólito sólido na superfície do eletrodo, o que, conseqüentemente, resulta em uma perda de capacidade irreversível da célula e em uma barreira para a transferência de íons.

Esta camada é semi-permeável aos íons de lítio e ajuda a prevenir outras reações do eletrólito com o eletrodo, que reduziriam ainda mais a capacidade útil da bateria, porém, conforme a bateria é operada e realiza ciclos, novos locais de reação tornam-se disponíveis devido à fratura das partículas do eletrodo, resultando em um



modo de falha que reduz continuamente a capacidade da bateria e que aumenta a espessura desta camada.

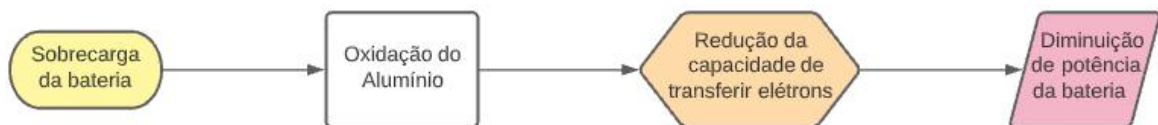
Vale destacar que o cátodo é menos afetado pelo crescimento da camada de interface do eletrólito sólido do que o ânodo, devido a diferença entre o potencial eletroquímico dos dois eletrodos.

Sobre o braço causal exclusivo do ânodo, em situações em que a bateria é carregada rapidamente, alta taxa de carga, ou em baixas temperaturas, ocorre o depósito de metal (Li) na superfície do ânodo. Após muitos ciclos, esses depósitos podem se desenvolver em estruturas dendríticas que, além de dificultarem a transferência de íons, podem perfurar o separador e iniciar curtos-circuitos internos.

#### 4.2.3 Coletores - Redução da capacidade de transferir elétrons

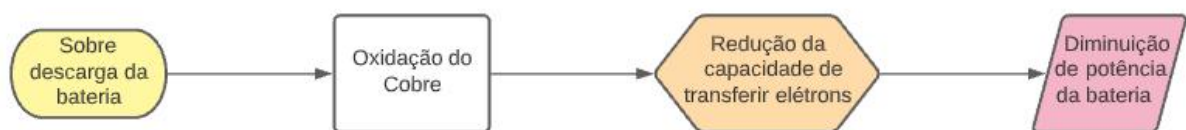
Este modo de falha ocorre tanto no coletor positivo (Figura 21), quanto no negativo (Figura 22), além de possuírem os mesmos efeitos. Porém, as causas são distintas, e isso se deve, principalmente, à composição dos dois materiais.

Figura 21 – CNEA - Coletor Positivo - Redução da capacidade de transferir elétrons



Fonte: Figura gerada pelo autor deste trabalho

Figura 22 – CNEA - Coletor Negativo - Redução da capacidade de transferir elétrons



Fonte: Figura gerada pelo autor deste trabalho

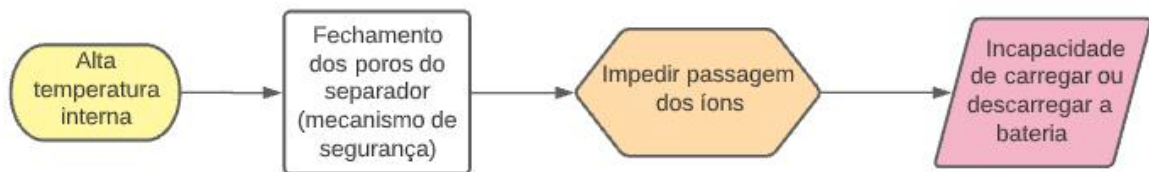
O coletor de corrente do cátodo é normalmente de alumínio, e em situações de sobrecarga, o alumínio pode corroer, tornando o coletor menos eficaz na transferência de elétrons, levando a um aumento da resistência interna e a uma diminuição de potência da célula.

O coletor do eletrodo negativo é geralmente composto de cobre, e quando a bateria está sob descarga excessiva, ocorre a dissolução de partículas do cobre no eletrólito. Esta perda de material para o eletrólito reduz a capacidade do coletor negativo de transferir elétrons entre o ânodo e o terminal negativo.

#### 4.2.4 Impedir passagem dos íons

Este modo de falha é derivado de um mecanismo de segurança da célula. Quando a célula está em sobrecarga ou sobre descarga, há o aumento da temperatura interna da célula, e para interromper este ciclo e evitar um evento catastrófico, ocorre o fechamento dos poros do separador impedindo a passagem dos íons, como mostrado na Figura 23.

Figura 23 – CNEA - Separador - Impedir passagem dos íons



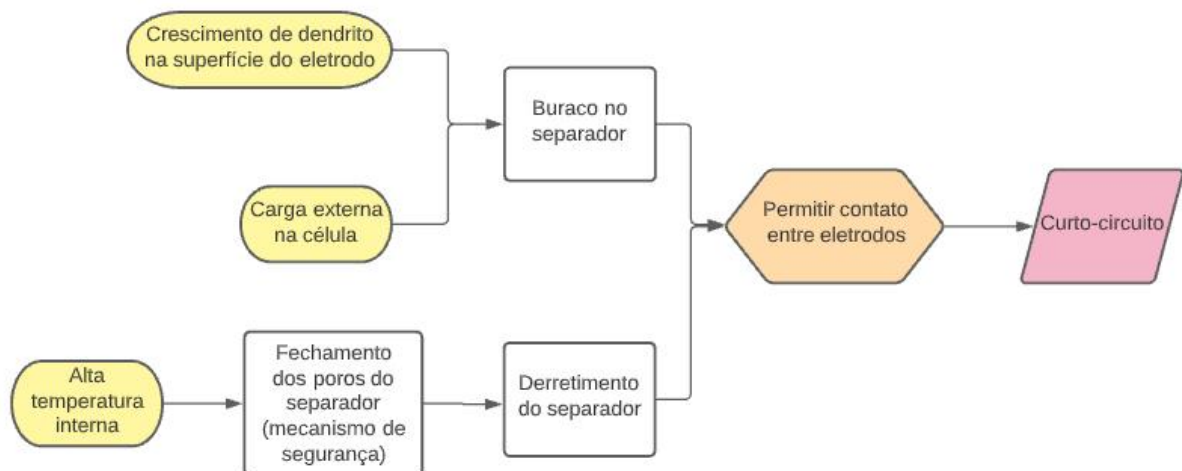
Fonte: Figura gerada pelo autor deste trabalho

Ao fechar os poros do separador, não há mais a troca de íons entre cátodo-eletrólito-ânodo e conseqüentemente, a célula torna-se inoperável.

#### 4.2.5 Permitir contato entre eletrodos

Como apresentado na Figura 24, este modo de falha apresenta dois braços causais. Um relacionado à causa intermediária denominada buraco no separador e outra derivada do modo de falha apresentado anteriormente na seção 4.2.4.

Figura 24 – CNEA - Separador - Permitir contato entre eletrodos



Fonte: Figura gerada pelo autor deste trabalho

O separador em uma bateria de íon de lítio é um polímero poroso que permite a passagem de íons enquanto evita o contato entre os eletrodos. Se a integridade do

separador for comprometida, os eletrodos podem entrar em contato, resultando em um curto-circuito interno que pode causar geração de calor e levar ao descontrole térmico.

Este modo de falha, relacionado à causa intermediária buraco no separador, pode ocorrer de duas maneiras. Com o crescimento de dendritos oriundos do eletrodo negativo, que podem perfurar o separador, ou, com a aplicação de uma carga externa à bateria.

Há ainda uma terceira causa, que é quando ocorre o derretimento do separador. Na seção 4.2.4, foi constatado que o separador possui um mecanismo de segurança que é acionado impedindo a passagem de íons quando a temperatura interna da célula atinge altas temperaturas. Acontece que, dependendo dos fatores que levaram a aumentar a temperatura interna, seja por curto-circuito, sobrecarga ou sobre descarga, a temperatura da célula aumenta em grande proporções e de forma muito rápida, e por mais que o mecanismo de segurança seja acionado, a temperatura interna da célula já está em patamares onde atinge o ponto de fusão do separador.

Atingindo o ponto de fusão do separador, os eletrodos vão entrar em contato, fechando um curto-circuito, e acelerando o descontrole térmico na célula.

#### 4.2.5.1 *Descontrole térmico*

O descontrole térmico (thermal runaway) é uma reação em cadeia dentro de uma célula que pode ser muito difícil de interromper o processo depois de iniciado. Ocorre quando a temperatura dentro de uma célula atinge o ponto que causa uma reação química. Essa reação química produz ainda mais calor, o que eleva a temperatura, causando mais reações químicas que geram mais calor (DEMERITT, 2021).

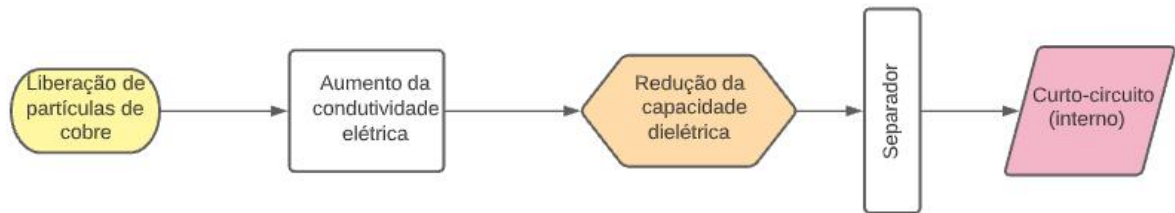
Durante o descontrole térmico de uma célula a temperatura aumenta incrivelmente rápido (milissegundos) e a energia armazenada nessa bateria é liberada muito repentinamente. Esta reação em cadeia cria temperaturas extremamente altas, cerca de 400 graus celsius. Essas temperaturas podem causar gaseificação da bateria e um incêndio que é tão forte que pode ser quase impossível de extinguir (DEMERITT, 2021).

#### 4.2.6 **Redução da capacidade dielétrica**

Este modo de falha tem como causa a sobre descarga da bateria. Quando em sobre descarga, ocorre a oxidação do cobre no coletor negativo.

Durante a oxidação deste coletor, partículas de cobre são acumuladas no eletrólito, e dependendo da quantidade de partículas de cobre livres suspensas no eletrólito, é possível que ocorra um curto-circuito na célula (Figura 25).

Figura 25 – CNEA - Eletrólito - Redução da capacidade dielétrica



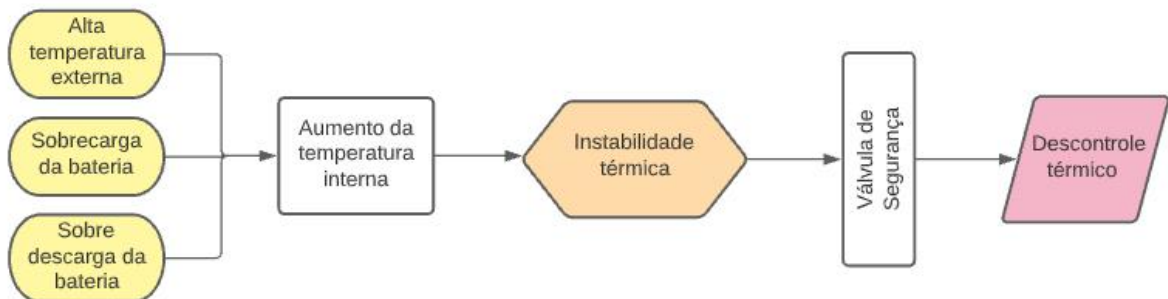
Fonte: Figura gerada pelo autor deste trabalho

Vale destacar a presença do separador como um controle existente para este modo de falha (apresentado na forma de uma barreira na Figura 25).

#### 4.2.7 Instabilidade térmica

A temperatura interna da célula pode atingir altas temperaturas por 3 fatores: sobrecarga, sobre descarga e a bateria estar exposta à um ambiente externo com elevadas temperaturas (Figura 26).

Figura 26 – CNEA - Eletrólito - Instabilidade térmica



Fonte: Figura gerada pelo autor deste trabalho

Acontece que, quando a temperatura da célula atinge altos valores, o eletrólito torna-se instável, ocorrendo reações entre este componente e o cátodo. Nestas reações, ocorre geração de gás, que é responsável pelo inchamento da célula. É possível visualizar esta condição de estufamento, no comparativo entre as Figuras 27 e 28. A célula da Figura 28 apresenta estufamento devido a uma sobre descarga, que por sua vez causou a instabilidade térmica do eletrólito, porém não evoluiu para um descontrole térmico.

A válvula de segurança cumpre uma função primordial de controle neste modo de falha e o seu acionamento pode evitar um evento catastrófico. Pode-se observar na Figura 29 o rompimento da válvula de segurança de uma célula cilíndrica, devido a uma sobre descarga que aumentou a temperatura interna da célula e causou a

instabilidade térmica do eletrólito.

Figura 27 – Célula de Lítio-ion da equipe Fórmula CEM em condições normais



Fonte: Fotografia gerada pelo autor deste trabalho

Figura 28 – Célula de Lítio-ion da equipe Fórmula CEM apresentando estufamento



Fonte: Fotografia gerada pelo autor deste trabalho

Nestas reações entre o eletrólito termicamente instável e o cátodo, ocorre

liberação de energia, o que contribui para o aumento da temperatura interna, dando início à uma reação em cadeia na célula que pode evoluir rapidamente para um descontrole térmico se não forem tomadas ações de controle, como por exemplo, retirar a célula da condição que causou este aumento de temperatura, ou então, os mecanismos de segurança da célula serão acionados, como por exemplo, os poros do separador podem se fechar inoperando a célula ou a válvula de segurança pode se romper para liberar o gás que está sendo gerado, evitando uma explosão.

Figura 29 – Célula de Lítio-ion de um parceiro da equipe Fórmula CEM apresentando rompimento da válvula de segurança



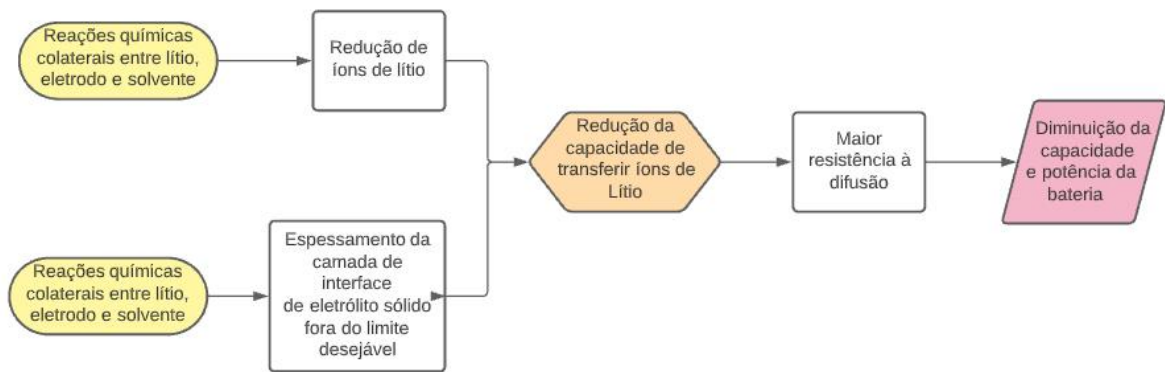
Fonte: Fotografia gerada pelo autor deste trabalho

#### **4.2.8 Redução da capacidade de transferir íons de lítio**

As reações colaterais entre eletrodo e eletrólito, além de criar uma camada de interface de eletrólito sólido e promover o crescimento nos eletrodos dificultando a transferência de íons, também provoca a diminuição dos íons de lítio no eletrólito (Figura 30).

Esta redução dos íons de lítio no eletrólito, diminui a capacidade do próprio eletrólito em transferir os íons, reduzindo de uma maneira geral, a capacidade da célula.

Figura 30 – CNEA - Eletrólito - Redução da capacidade de transferir íons de lítio

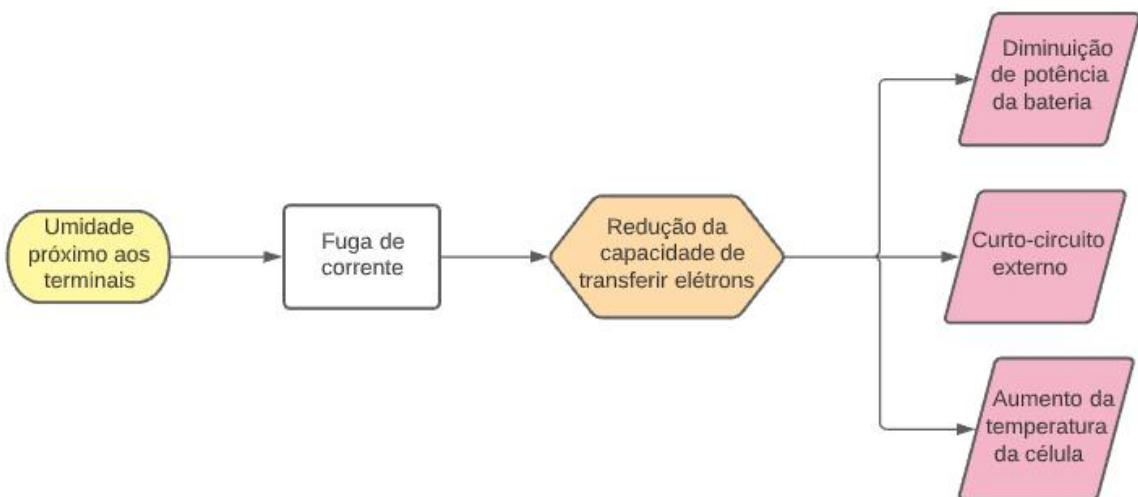


Fonte: Figura gerada pelo autor deste trabalho

#### 4.2.9 Terminais - Redução da capacidade de transferir elétrons

Quando a célula não está bem protegida do meio externo, e há presença de umidade no exterior da célula, pode ocorrer uma fuga de corrente, podendo provocar um curto-circuito externo, e conseqüentemente a um aumento da temperatura interna (Figura 31).

Figura 31 – CNEA - Terminais - Redução da capacidade de transferir elétrons



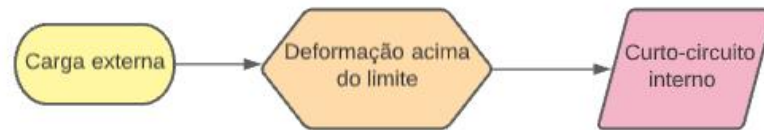
Fonte: Figura gerada pelo autor deste trabalho

#### 4.2.10 Deformação acima do limite

Este modo de falha ocorre no case, também conhecido como invólucro, da célula (Figura 32).

Quando ocorre a aplicação de uma força externa à célula, que seja maior do que o limite permitido pelo invólucro, e que provoque uma deformação na célula, os

Figura 32 – CNEA - Case - Deformação acima do limite



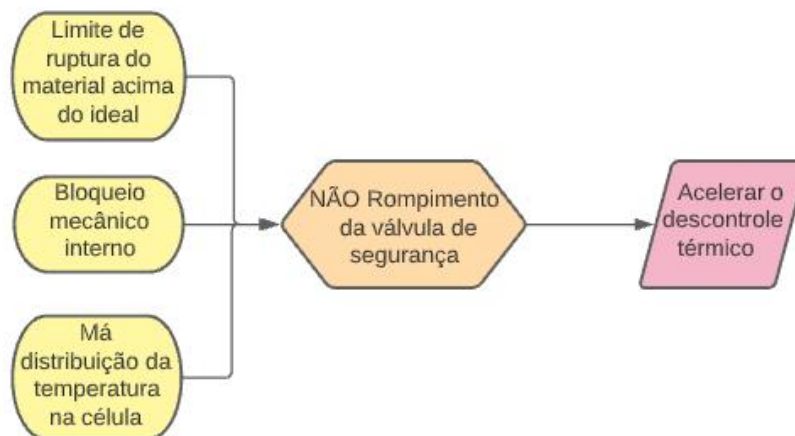
Fonte: Figura gerada pelo autor deste trabalho

componentes internos podem ser rearranjados, e o contato entre cátodo e ânodo pode ocorrer, causando um curto-circuito na célula, e como consequência, o aumento da temperatura interna da célula.

#### 4.2.11 Não rompimento da válvula de segurança

O não rompimento da válvula de segurança, é um modo de falha de extrema importância. Por mais que as probabilidades de ocorrer sejam baixas, a válvula de escape é um mecanismo de segurança, e o seu não acionamento é um indicador de que a célula vai explodir e/ou pegar fogo.

Figura 33 – CNEA - Válvula de segurança - Não rompimento da válvula de segurança



Fonte: Figura gerada pelo autor deste trabalho

Este modo de falha pode ocorrer devido a um defeito de projeto da válvula, que pode ter um limite de ruptura acima do ideal, a um bloqueio mecânico interno ou a má distribuição de temperatura na célula, como observa-se na Figura 33.

### 4.3 CARACTERIZAÇÃO DO RISCO

Após a finalização da FMEA da célula de íon de lítio (apresentada no Apêndice A), os integrantes da equipe deram valores de severidade, ocorrência e dificuldade de



detecção, para cada um dos modos de falha, utilizando como base a Figura 15, para definir esses valores.

Ao terminar a primeira etapa da criterização, utilizou-se os valores de severidade, ocorrência e dificuldade de detecção de cada modo de falha, e identificou-se em qual das quatro escalas apresentadas na Figura 16 o modo de falha analisado pertence.

Por fim, analisou-se a quantidade de avaliações aceitáveis e inaceitáveis cada componente da célula de lítio-íon recebeu (Quadro 7).

Quadro 7 – Avaliação do Risco

<b>Item</b>	<b>Aceitável (I)</b>	<b>Aceitável c/ revisão (II)</b>	<b>Indesejável (III)</b>	<b>Inaceitável (IV)</b>
Cátodo	0	6	1	0
Ânodo	0	4	1	0
Coletor Positivo	0	1	0	0
Coletor Negativo	0	1	0	0
Eletrólito	0	1	0	4
Separador	0	1	1	2
Case	0	0	1	0
Terminais	0	0	0	1
Válvula de Segurança	0	1	0	2

Fonte: Quadro desenvolvido pelo autor deste trabalho

Foi constatado que todos os itens que possuem avaliações inaceitáveis (IV) estão relacionados com modos de falha onde tem grandes probabilidades de ocorrer um curto-circuito interno, levando ao descontrole térmico, e por fim, podendo ocorrer uma explosão e/ou incêndio da célula.

Os itens que possuem avaliações indesejáveis (III), também possuem relação com probabilidades de ocorrer um curto-circuito, porém, devido aos modos de falha possuírem valores de severidade, de ocorrência ou de dificuldade de detecção menores, se enquadram na escala de indesejáveis.

Os demais itens que receberam avaliação aceitável com revisão (II), estão classificados, em sua maioria, como itens onde os modos de falha possuem relação com a diminuição da capacidade e/ou potência da célula.

## 5 CONCLUSÕES

O presente trabalho objetivou analisar os modos de falha (por uma FMEA) de uma célula de lítio-ion utilizada pela equipe Fórmula CEM, a fim de identificar medidas que diminuam a probabilidade de falha ou mitiguem seus efeitos.

Os resultados demonstraram que há 2 fatores de extrema importância para uma operação segura e eficiente da célula de lítio-ion: temperatura e tensão/corrente. Quando a célula está em condições que não estão dentro dos limites aceitáveis de temperatura e tensão/corrente, e se manter nestas condições por determinado tempo, há chances de não somente haver perda de eficiência da célula, mas de ocorrer um evento catastrófico.

Para atingir estes resultados, primeiramente escutou-se profissionais da área que trabalham diariamente com baterias de diferentes composições químicas, porém que possuem algum contato com baterias de lítio-ion. A partir desta conversa com os especialistas, montou-se uma curadoria com os conhecimentos de cada um, e posteriormente, organizou-se estes conhecimentos como causas, modos de falha e efeitos, como manda a FMEA.

Um ponto importante a se destacar foi a dificuldade em organizar os conhecimentos em causas, modos de falhas e efeitos. Para tal, optou-se pela técnica CNEA, que foi de extrema importância para a visualização e a correta identificação dos modos de falhas. A célula da bateria de íon-lítio possui uma particularidade desafiadora que é o fato de que seus componentes possuem influências diretas em modos de falha de outros componentes da célula. O que por vezes confunde sobre qual causa, modo de falha ou efeito pertence a qual componente.

Sobre o escopo do trabalho e a identificação das medidas de controles dos modos de falha, sabe-se que os sistemas que os packs de bateria possuem sistemas de monitoramento de baterias (BMS), que auxiliam no controle da temperatura e taxas de carga e descarga, além de monitorar outros fatores, e também há a precaução em manter o sistema enclausurado, evitando umidade e diminuindo o impacto de cargas externas. Estas medidas de controle foram desconsideradas no escopo do presente trabalho.

Sobre recomendações futuras de estudos, o presente trabalho abre diversas opções de estudos teóricos e práticos sobre o assunto, visto que foram pontuados diversos modos de falha, causas e efeitos com elevados valores de criticidade. Reconhece-se que há em andamento muitos estudos sobre o tema, porém como as baterias são tecnologias que estão em constante desenvolvimento, há uma alta demanda para pesquisas e debates sobre o tema, especialmente no Brasil.

Recomenda-se a reavaliação deste FMEA com a presença de mais especialistas, e de preferência, especialistas de diferentes áreas dos membros da FMEA deste presente trabalho, tornando a equipe mais multidisciplinar, além de realizar um plano de ação.

Sugere-se que sejam realizados estudos de testes de carga e descarga da célula de íon-lítio com o objetivo de identificar faixas seguras de operacionalização de tensão e corrente, e seus impactos nos modos de falhas que sofrem influência desses fatores, e avaliar o comportamento térmico da célula unitária.

Indica-se a aplicação da FMEA para o acumulador de baterias da equipe Fórmula CEM, analisando o comportamento, não somente de uma célula unitária, mas do pack de baterias, com a finalidade de identificar possíveis modos de falha decorrentes da atuação em conjunto das células e mitigá-los.

Concluiu-se que o objetivo do trabalho foi cumprido ao realizar as seguintes etapas: elaborar a análise funcional do produto, e realizar o desdobramento dos componentes; realizar o apontamento e investigação dos modos de falha, utilizando-se do CNEA; e avaliar a criticidade de cada cadeia causal, a fim de identificar os componentes mais críticos. No entanto, este presente trabalho não alcançou a elaboração de um plano de ação para reduzir o risco associado aos modos de falha críticos.

## REFERÊNCIAS

- BHATT, A. et al. **How a battery works?** 2016. Disponível em: <https://www.science.org.au/curious/technology-future/batteries>. Acesso em: 17 ago. 2021.
- CHOI, J.; AURBACH, D. Promise and reality of post-lithium-ion batteries with high energy densities. **Nature Reviews Materials**, v. 1, p. 16013, 03 2016.
- DEMERITT, C. **What Is Thermal Runaway In Batteries?** 2021. Disponível em: <https://dragonflyenergy.com/thermal-runaway/>. Acesso em: 20 nov. 2021.
- DIAS, A. et al. **Metodologia para análise de risco: mitigação de perda de sf6 em disjuntores**. Florianópolis: Nova Letra Gráfica e Editora, 2011.
- Escagion Antonietti, L. **ANÁLISE ESPECÍFICA DAS DIFICULDADES DE IMPLEMENTAÇÃO DO FMEA EM UMA INDÚSTRIA MECÂNICA DE AUTOPEÇAS**. Itajubá, MG, 2002.
- HORIBA, T. Lithium-ion battery systems. **Proceedings of the IEEE**, v. 102, n. 6, p. 939–950, 2014.
- JANA, A.; ELY, D.; GARCÍA, E. Dendrite-separator interactions in lithium-based batteries. **Journal of Power Sources**, v. 275, p. 912–921, 02 2015.
- KNÖDLMAYR, T. **Failure modes, effects and criticality analysis (FMECA) of lithium-ion batteries placed in liquid silicone**. 2020.
- LI, A. et al. A review on lithium-ion battery separators towards enhanced safety performances and modelling approaches. **Molecules**, v. 26, n. 2, 2021. ISSN 1420-3049. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1420-3049/26/2/478>.
- LI, J.; DANIEL, C.; WOOD, D. Materials processing for lithium-ion batteries. **Journal of Power Sources**, v. 196, n. 5, p. 2452–2460, 2011. ISSN 0378-7753. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037877531001904X>.
- E. MCDERMOTT, R.; J. MIKULAK, R.; R. BEAUREGARD, M. **The Basics of FMEA**. 2. ed. New York, NY: Taylor Francis Group, 2009.
- MIAO, Y. et al. Current li-ion battery technologies in electric vehicles and opportunities for advancements. **Energies**, v. 12, p. 1074–1094, 03 2019.
- MICHELINI, A. **Baterias de Lítio**. Cotia-SP: S.T.A. - Sistemas e Tecnologia Aplicada Ind. Com. LTDA., 2020.
- MORRIS, M. Comparison of rechargeable battery technologies. **ASME Early Career Technical Journal**, v. 11, p. 148–155, 11 2012.
- PRASAD, A. N. **ENGINEERING SAFETY ANALYSIS OF EV LI-ION BATTERIES FOR MINIMIZING AUTO INSURANCE LOSSES**. 2011.
- RAHIMI, M. Lithium-ion batteries: Latest advances and prospects. **Batteries**, v. 7, n. 1, 2021. ISSN 2313-0105. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2313-0105/7/1/8>.

REMLER, D.; DAS, S.; JAYANTI, A. **Battery Technology**. 79 John F. Kennedy Street, Cambridge, MA 02138, 2021.

RESEARCH AND MARKETS. **Global Lithium Ion Battery Market: Analysis By Compound Type, End User, By Country (2020 Edition): Market Insight, Competition and Forecast (2020-2025) - By Region (Americas, Europe, APAC, MEA)**. 2020.

SAE AUTOMOTIVE QUALITY AND PROCESS IMPROVEMENT GROUP. **SAE J1739**. Warrendale, PA, 2002.

STAMATIS, D. H. **The ASQ Pocket Guide to Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)**. Milwaukee, Wisconsin: ASQ Quality Press, 2014.

TARASCON, J.-M.; ARMAND, M. Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries. **Nature**, v. 414, n. 6861, p. 359–367, nov 2001.

TECHNOLOGIES, E. E. **Battery Cell Comparison**. 2021. Disponível em: <https://www.epectec.com/batteries/cell-comparison.html>. Acesso em: 27 out. 2021.

Van den Bossche, P. et al. Subat: An assessment of sustainable battery technology. **Journal of Power Sources**, v. 162, n. 2, p. 913–919, 2006. ISSN 0378-7753. Special issue including selected papers from the International Power Sources Symposium 2005 together with regular papers. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775305008761>.

ZHU, P. et al. A review of current collectors for lithium-ion batteries. **Journal of Power Sources**, v. 485, p. 229321, 2021. ISSN 0378-7753. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775320316098>.

## APÊNDICE A - FOLHA DE FMEA

Figura 34 – Folha FMEA - página 1

Universidade Federal de Santa Catarina		Campus: CTJ		<b>FMEA: CÉLULA DE LÍLIO-ÍON DA EQUIPE DE COMPETIÇÃO FÓRMULA CEM</b>					
Responsável: Gabriel Borges Marthendal									
Supervisor: Prof. Dr. Eng. Luis Fernando Peres Calil									
Produto:	Célula de Lítio-íon		Funções:	- Armazenar energia na forma química; - Através de reações químicas, disponibilizar energia na forma elétrica; - Através de uma fonte externa, converter energia elétrica em energia química.					
Componente	Função	Modo de Falha	Gravidade da ocorrência	Efeito Observado	Causa Potencial	Probabilidade de ocorrer	Facilidade de detecção	Ações de Controle	Criticidade
<b>Cátodo - Material Ativo</b>	- Recebe os íons de lítio provenientes do ânodo, e elétrons chegam ao cátodo através de um circuito externo.	Redução da capacidade de liberar/recuperar íons/elétrons	3	Diminuição da capacidade e potência da bateria	Ciclo operacional (natural) de expansão e retração	10	4	-	III
					Alta temperatura externa	8	1	Evitar exposição da bateria à ambientes com elevadas	II
					Sobrecarga da bateria	6	2	Controlar a taxa de carga da bateria	II
					Sobre descarga da bateria	6	2	Controlar a taxa de descarga da bateria	II
	- Quando conectado à uma fonte elétrica externa, ocorre o processo contrário.	Redução da capacidade de transferir íons para o eletrólito	3	Aumento da resistência de transferência de carga	Estresse de intercalação	6	4	Controlar a taxa de carga da bateria	II
					Reações químicas colaterais entre lítio, eletrodo e solvente	9	2		II
				Diminuição da capacidade e potência da bateria	Sobrecarga da bateria	6	2	II	
<b>Cátodo - Coletor</b>	- Conduz os elétrons do cátodo ao terminal positivo ou do terminal positivo ao cátodo.	Redução da capacidade de transferir elétrons	2	Diminuição da potência da bateria	Sobrecarga da bateria	3	4	Controlar a taxa de carga da bateria	II
<b>Ânodo - Material Ativo</b>	- Os íons de lítio se movem em direção ao cátodo, e elétrons são transferidos para o cátodo através de um circuito externo, gerando energia elétrica.	Redução da capacidade de liberar/recuperar íons/elétrons	3	Diminuição da capacidade e potência da bateria	Ciclo operacional (natural) de expansão e retração	10	4	-	III
					Sobrecarga da bateria	6	2	Controlar a taxa de carga da bateria	II
	- Quando conectado à uma fonte elétrica externa, ocorre o processo contrário.	Redução da capacidade de transferir íons para o eletrólito	3	Aumento da resistência de transferência de carga	Reações químicas colaterais entre lítio, eletrodo e solvente	9	2	Evitar exposição da bateria à ambientes com baixas temperaturas	II
					Estresse de intercalação	6	4		II
					Carregar a bateria em baixas temperaturas	5	1		II
<b>Ânodo - Coletor</b>	- Conduz os elétrons do ânodo ao terminal negativo ou do terminal negativo ao ânodo.	Redução da capacidade de transferir elétrons	2	Diminuição da potência da bateria	Sobre descarga da bateria	4	4	Controlar a taxa de descarga da bateria	II

Fonte: Figura gerada pelo autor deste trabalho

Figura 35 – Folha FMEA - página 2

Universidade Federal de Santa Catarina		Campus: CTJ		FMEA: CÉLULA DE LÍTIO-ÍON DA EQUIPE DE COMPETIÇÃO FÓRMULA CEM					
Responsável: Gabriel Borges Marthendal									
Supervisor: Prof. Dr. Eng. Luis Fernando Peres Calil									
Produto:	Célula de Lítio-ion	Funções:		- Armazenar energia na forma química; - Através de reações químicas, disponibilizar energia na forma elétrica; - Através de uma fonte externa, converter energia elétrica em energia química.					
Componente	Função	Modo de Falha	Gravidade da ocorrência	Efeito Observado	Causa Potencial	Probabilidade de ocorrer	Facilidade de detecção	Ações de Controle	Criticidade
Separador	- Previne o contato entre cátodo e ânodo.	Permitir contato entre eletrodos	9	Curto-circuito	Crescimento de dendrito na superfície do eletrodo	6	2	Controlar a taxa de carga da bateria	IV
					Alta temperatura interna	7	2	Evitar exposição da bateria à baixas temperaturas	
	- Permite somente a passagem dos íons de lítio.	Impedir passagem dos íons	6	Incapacidade de carregar ou descarregar a bateria	Carga externa na célula	3	1	Controlar a temperatura interna da célula	IV
					Alta temperatura interna	3	2	Controlar a pressão externa sobre a célula	III
Eletrólito	- Possibilita o movimento dos íons durante as reações químicas.	Redução da capacidade dielétrica	9	Curto-circuito	Acúmulo de partículas de cobre	4	4	Controlar a temperatura interna da célula	IV
		Instabilidade térmica	10	Descontrole térmico	Alta temperatura externa	8	1	Evitar exposição da bateria à ambientes com elevadas	IV
					Sobrecarga da bateria	6	2	Controlar a taxa de carga da bateria	IV
		Sobre descarga da bateria	6	2	Controlar a taxa de descarga da bateria	IV			
Redução da capacidade de transferir íons	3	Diminuição da capacidade e potência da bateria	Reações químicas colaterais entre lítio, eletrodo e solvente	9	2	-	II		
Terminais	- Conduz corrente dos coletores ao circuito externo ou vice e versa.	Redução da capacidade de transferir elétrons	9	Diminuição da potência da bateria	Umidade próximo aos terminais	5	1	Proteger da umidade o ambiente onde se encontra a célula	IV
				Curto-circuito (externo)					
				Aumento da temperatura da célula					
Case	- Laminado que protege e reveste toda a área da célula. - Fixação da válvula de segurança.	Deformação acima do limite	9	Curto-circuito	Carga externa na célula	4	1	Controlar a pressão externa sobre a célula	III
Válvula de Segurança	- Rompimento do lacre quando há sobrepessão na célula oriunda de geração de gases	Não rompimento da válvula de segurança	10	Acelera o descontrole térmico	Limite de ruptura do material acima do ideal	1	2	Controlar a pressão externa sobre a célula	II
					Bloqueio mecânico interno	3	4		IV
					Má distribuição da temperatura na célula	3	3	Monitorar a temperatura interna da bateria	IV

Fonte: Figura gerada pelo autor deste trabalho