

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**DÉBORA VITÓRIA ARGENTA KRESTA**

**ANÁLISE TÉRMICA DE BATERIAS DE SEGUNDA VIDA: UMA ABORDAGEM  
UTILIZANDO MODELO DE CIRCUITO EQUIVALENTE E SIMULAÇÃO CFD**

**PONTA GROSSA**

**2025**

**DÉBORA VITÓRIA ARGENTA KRESTA**

**ANÁLISE TÉRMICA DE BATERIAS DE SEGUNDA VIDA: UMA ABORDAGEM  
UTILIZANDO MODELO DE CIRCUITO EQUIVALENTE E SIMULAÇÃO CFD**

**Thermal Analysis of Second-Life Batteries: An Approach Using Equivalent  
Circuit Model and CFD Simulation**

Trabalho de conclusão de curso de graduação  
apresentado como requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Carlos Henrique Illa Font

**PONTA GROSSA**

**2025**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**DÉBORA VITÓRIA ARGENTA KRESTA**

**ANÁLISE TÉRMICA DE BATERIAS DE SEGUNDA VIDA: UMA ABORDAGEM  
UTILIZANDO MODELO DE CIRCUITO EQUIVALENTE E SIMULAÇÃO CFD**

Trabalho de conclusão de curso de graduação  
apresentado como requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 12/dezembro/2025

---

Carlos Henrique Illa Font  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Marcella Scoczynski Ribeiro Martins  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

José Rodolfo Galvão  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**PONTA GROSSA**

**2025**

Dedico este trabalho à minha família, pelo apoio incondicional e compreensão, e aos meus professores, cuja dedicação e ensinamentos foram fundamentais para minha formação acadêmica.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por iluminar meu caminho e guiar meus passos.

Aos meus pais e familiares, por serem meu alicerce. O amor, o incentivo e os sacrifícios de vocês foram fundamentais para que eu pudesse trilhar este caminho. Obrigada por acreditarem em mim mesmo nos momentos em que eu duvidei.

Ao meu namorado, Víctor, por ser meu companheiro incansável. Obrigada por toda a paciência, pelo apoio incondicional e por sempre me lembrar da minha capacidade. Você tornou essa jornada mais leve e significativa.

Dedico um agradecimento especial, *in memoriam*, ao meu amigo Denis. Sua partida deixou uma saudade imensa, mas sua alegria e as memórias que construímos continuam vivas em mim. Onde quer que esteja, saiba que você faz parte desta conquista.

Gostaria de agradecer a todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho, de maneira especial ao meu orientador Prof. Dr. Carlos Henrique Illa Font pela oportunidade de fazer parte do projeto, e por todo apoio, orientação e incentivo fornecido.

Agradeço também a toda equipe que compõe o projeto e aos colegas de laboratório, pela parceria, pelo conhecimento compartilhado e por todo o apoio.

E por fim, agradeço a UTFPR, CNPq (408053/2022-4) e ao grupo Renault Brasil por tornarem possível este projeto.

*" A imaginação é a faculdade da descoberta,  
predominantemente. É ela que penetra nos mundos invisíveis  
que nos rodeiam, nos mundos da ciência."*

*(Ada Lovelace).*

## RESUMO

Com o desenvolvimento do setor automotivo e a popularização dos veículos elétricos surgem questionamentos e embates em relação às baterias, especificamente em relação ao descarte delas. A partir disso, surgiu a necessidade de propor ideias visando uma nova finalidade para essas baterias, como por exemplo utilizá-las para fins de armazenamento de energia através do desenvolvimento de um BESS (Battery Energy Storage System). Partindo disso, deu-se início ao projeto do CNPq junto à UTFPR campus Ponta Grossa e em parceria com a Renault, intitulado “Desenvolvimento de um sistema de armazenamento de energia com baterias de segunda vida bem adaptado aos requisitos da rede de distribuição de energia elétrica em baixa tensão”, no qual foram utilizadas as baterias de três veículos Renault Kangoo Z.E.. O objetivo central é a análise térmica dos módulos de baterias, buscando visualizar a distribuição de temperatura e validar os resultados obtidos computacionalmente em comparação com a prática. Inicialmente, foi realizada a modelagem 3D do módulo, de maneira simplificada, seguida do teste de caracterização de potência de pulso híbrido (HPPC) para obtenção dos parâmetros a serem utilizados nas simulações, disposto disso foi possível realizar a simulação térmica no *software* ANSYS e, simultaneamente, testes práticos em bancada utilizando sensores LM35 para medição de temperatura. A comparação entre os resultados obtidos na prática e os resultados obtidos através do *software* ANSYS revelou boa correlação entre os dados, com um erro inferior a 3% para a temperatura final no cenário de validação.

Palavras-chave: Baterias; Segunda vida; Análise térmica; Modelo circuito equivalente.

## ABSTRACT

With the development of the automotive sector and the popularization of electric vehicles, questions and debates arise concerning batteries, specifically regarding their disposal. Consequently, a need emerged to propose ideas for a new purpose for these batteries, such as their utilization for energy storage through the development of a BESS (Battery Energy Storage System). Following this direction, a project was initiated by CNPq in conjunction with the UTFPR Ponta Grossa campus and in partnership with Renault Group, entitled 'Development of a second-life battery energy storage system well adapted to the requirements of the low-voltage electricity distribution network,' utilizing the batteries from three Renault Kangoo Z.E. vehicles. The central objective is the thermal analysis of the battery modules, seeking to visualize the temperature distribution and validate the computationally obtained results against practical data. Initially, a simplified 3D model of the module was created, followed by the Hybrid Pulse Power Characterization (HPPC) test to obtain the necessary parameters for the simulations. With these data, it was possible to perform the thermal simulation using the ANSYS software, while simultaneously conducting practical bench tests using LM35 sensors for temperature measurement. The comparison between the experimental results and the numerical simulation results obtained through the ANSYS software revealed a good correlation between the data, with an error of less than 3% for the final temperature in the validation scenario.

Keywords: Batteries; Second life; Thermal analysis; Equivalent circuit model.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1: ESQUEMA DE GERAÇÃO DE CALOR. ....	21
FIGURA 2: MODELOS DE CIRCUITO EQUIVALENTE.....	22
FIGURA 3: MÓDULO DO RENAULT KANGOO Z.E. ....	25
FIGURA 4: MÓDULO DA BATERIA DESMONTADO.....	26
FIGURA 5: BANCADA DE TESTES. ....	27
FIGURA 6: DISPOSIÇÃO DOS SENSORES LM35. ....	28
FIGURA 7: CIRCUITO EQUIVALENTE DE UMA CÉLULA. ....	29
FIGURA 8: CIRCUITO EQUIVALENTE PARA DUAS CÉLULAS EM SÉRIE.....	30
FIGURA 9: PONTOS DE VOC DO MÓDULO EM FUNÇÃO DO SOC.....	32
FIGURA 10: CURVA AJUSTADA DE VOC.....	33
FIGURA 11: CURVA AJUSTADA DE RS. ....	34
FIGURA 12: CURVA AJUSTADA DE R1.....	34
FIGURA 13: CURVA AJUSTADA DE R2.....	35
FIGURA 14: CURVA AJUSTADA DE C1.....	35
FIGURA 15: CURVA AJUSTADA DE C2.....	36
FIGURA 16: MODELAGEM 3D SIMPLIFICADA DO MÓDULO.....	37
FIGURA 17: MODELAGEM 3D SIMPLIFICADA DO MÓDULO.....	38
FIGURA 18: CONFIGURAÇÃO MODELO DE BATERIA DO ANSYS.....	39
FIGURA 19: CONFIGURAÇÃO DOS PARÂMETROS DO MODELO ECM.....	40
FIGURA 20: DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA PARA 10 A.....	45
FIGURA 21: DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA PARA 20 A.....	45
FIGURA 22: DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA PARA 30 A.....	46
FIGURA 23: DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA PARA 40 A.....	46
GRÁFICO 1: TEMPERATURA EXPERIMENTAL DURANTE CARGA A 20 A.....	43
GRÁFICO 2: TEMPERATURA SIMULADA NO ANSYS.....	44
GRÁFICO 3: RELAÇÃO ENTRE CORRENTE E TEMPERATURA MÁXIMA.....	47

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1: COEFICIENTES DOS POLINÔMIOS DE 5ª ORDEM. ....	36
TABELA 2: PROPRIEDADES DAS CÉLULAS DE ÍONS DE LÍTIO NMC.....	41
TABELA 3: COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS.....	44

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
<b>1.1</b>	<b>Delimitação do tema</b> .....	<b>13</b>
<b>1.2</b>	<b>Problema</b> .....	<b>14</b>
<b>1.3</b>	<b>Relevância do tema</b> .....	<b>14</b>
<b>1.4</b>	<b>Objetivos geral e específicos</b> .....	<b>15</b>
<b>1.5</b>	<b>Metodologia</b> .....	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>17</b>
<b>2.1</b>	<b>Segunda vida</b> .....	<b>17</b>
<b>2.2</b>	<b>Químicas de baterias</b> .....	<b>17</b>
2.2.1	Baterias de chumbo-ácido .....	18
2.2.2	Baterias de níquel-cádmio .....	18
2.2.3	Baterias de níquel-hidreto metálico .....	19
2.2.4	Baterias de íon-lítio.....	19
<b>2.3</b>	<b>Comportamento térmico de baterias de lítio</b> .....	<b>20</b>
<b>2.4</b>	<b>Modelagem de bateria por circuito equivalente</b> .....	<b>21</b>
<b>2.5</b>	<b>Simulação numérica multifísica</b> .....	<b>23</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>24</b>
<b>3.1</b>	<b>Objeto de estudo e bancada experimental</b> .....	<b>24</b>
3.1.1	Caracterização física e química.....	24
3.1.2	Bancada experimental e testes em laboratório .....	26
<b>3.2</b>	<b>Teste HPPC</b> .....	<b>28</b>
<b>3.3</b>	<b>Modelagem matemática</b> .....	<b>29</b>
<b>3.4</b>	<b>Processamento de dados e ajuste de curvas</b> .....	<b>31</b>
3.4.1	Extração e plotagem de parâmetros.....	31
3.4.2	Ajuste de curva.....	32
<b>3.5</b>	<b>Simulação térmica</b> .....	<b>37</b>
3.5.1	Geometria e malha .....	37
3.5.2	Modelo físico e acoplamento térmico .....	38
3.5.3	Propriedades dos materiais e definição de zonas .....	40
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>42</b>
<b>4.1</b>	<b>Validação experimental do modelo</b> .....	<b>42</b>
4.1.1	Resultados experimentais .....	42
4.1.2	Resultados da simulação .....	44
<b>4.2</b>	<b>Distribuição de temperatura</b> .....	<b>45</b>

**5            CONSIDERAÇÕES FINAIS .....48**

**REFERÊNCIAS.....49**

## 1 INTRODUÇÃO

Com a crescente popularização dos veículos elétricos (VEs), os avanços tecnológicos no setor automobilístico trouxeram à tona questionamentos importantes sobre o descarte de suas baterias. Após uma utilização média de aproximadamente 10 anos, estas baterias já não atendem aos requisitos de desempenho para aplicações veiculares, o que impulsiona a busca por novas alternativas, além da simples reciclagem.

Nesse contexto, surge a necessidade de estender sua vida útil por meio de novas finalidades, como a sua utilização em aplicações estacionárias para fins de armazenamento de energia. Este trabalho se insere em um projeto mais amplo, intitulado "Desenvolvimento de um sistema de armazenamento de energia com baterias de segunda vida bem adaptado aos requisitos da rede de distribuição de energia em baixa tensão," fomentado pelo CNPq, UTFPR-PG e o grupo Renault Brasil, cujo objetivo é a criação de um BESS (Battery Energy Storage System) utilizando baterias de segunda vida de veículos Renault Kangoo Z.E..

Para garantir a operação segura dessas baterias em aplicações secundárias, o entendimento e o gerenciamento de seu perfil térmico são cruciais, especialmente considerando seu histórico de 10 anos de uso veicular.

Adicionalmente, a caracterização do perfil térmico da bateria permite projetar de forma eficiente os sistemas de resfriamento, seja por convecção natural, ventilação forçada ou resfriamento líquido.

O presente trabalho visa analisar a viabilidade técnica da reutilização dessas baterias, concentrando-se na análise térmica dos módulos. O objetivo é promover a visualização da distribuição de temperatura e, com base na modelagem térmica dos módulos, validar os resultados obtidos em comparação com os testes práticos realizados em laboratório, garantindo assim a utilização adequada e segura em aplicações estacionárias.

### 1.1 Delimitação do tema

Esta pesquisa está delimitada à análise térmica de módulos de baterias de íons de lítio de segunda vida e sua validação experimental, com o objetivo de embasar sua aplicação segura em sistemas elétricos de armazenamento de energia (BESS).

A simulação da distribuição de temperatura, crucial para identificar pontos quentes, é realizada no *software* ANSYS. Para garantir uma previsão satisfatória, a simulação é fundamentada na modelagem dos módulos utilizando um modelo de circuito equivalente (ECM) composto por dois pares RC. Este modelo elétrico é indispensável, pois serve como base para o cálculo da geração de calor, também utilizado como dado de entrada para a análise multifísica no ANSYS.

O trabalho finaliza na validação experimental desse modelo térmico, confirmando a confiabilidade dos dados simulados por meio da comparação direta com os perfis de temperatura medidos nos testes práticos de carga/descarga.

## 1.2 Problema

Um dos pontos críticos em relação ao reuso de baterias reside na caracterização precisa e preditiva de seu comportamento térmico após a degradação veicular. É crucial entender quais são os padrões de geração e distribuição de calor em um módulo, ou pack, de baterias de segunda vida, principalmente quando não é possível rastrear seu histórico de uso.

Diante disso, o presente trabalho visa o desenvolvimento e a validação experimental de um modelo térmico eficiente, baseado no modelo de circuito equivalente (ECM) com 2 pares RC e implementado no *software* ANSYS, capaz de caracterizar com exatidão o comportamento térmico dos módulos sob diferentes condições de operação.

## 1.3 Relevância do tema

A relevância da análise térmica de módulos de baterias de segunda vida é crítica e multidimensional, abrangendo fatores ambientais, econômicos e de segurança operacional. Com o aumento da frota de veículos elétricos (VEs), a busca por soluções sustentáveis para o descarte das baterias é recorrente. A reutilização desses módulos, como em sistemas de armazenamento de energia, prolonga sua vida útil, atuando como uma estratégia eficaz de gestão de resíduos e contribuindo diretamente para a economia circular do setor.

Além da sustentabilidade, o estudo é vital para a segurança e a viabilidade técnica do reaproveitamento, visto que é essencial compreender o comportamento térmico e gerenciá-lo para garantir a operação segura e adequada da bateria. A

validação experimental da modelagem térmica fornece uma estrutura metodológica robusta, permitindo identificar pontos críticos de calor e mitigar riscos como o superaquecimento, que pode comprometer tanto a eficiência quanto a segurança do sistema. Em suma, o estudo é crucial para transformar um potencial passivo ambiental em um ativo energético seguro e confiável.

#### **1.4 Objetivos geral e específicos**

Desenvolver, parametrizar e validar experimentalmente um modelo térmico, baseado no modelo de circuito equivalente (ECM), para caracterizar o comportamento térmico de módulos de baterias de segunda vida. Para que isso ocorra de maneira satisfatória, alguns objetivos específicos devem ser cumpridos:

1. Realizar uma revisão bibliográfica sobre ECM e selecionar o modelo mais adequado para representar a dinâmica eletroquímica e a geração de calor de baterias de íons de lítio.
2. Determinar, a partir de dados experimentais das baterias de segunda vida, os parâmetros do ECM (resistências, capacitâncias e a tensão de circuito aberto) em função do Estado de Carga (SOC) e da Temperatura, considerando o aumento da impedância interna devido à degradação.
3. Implementar o modelo elétrico no *software* de simulação ANSYS para prever a geração e a distribuição de calor no módulo.
4. Simular o comportamento térmico do módulo sob diferentes taxas de carga/descarga, identificando os padrões de geração de calor e os pontos quentes.
5. Comparar os dados de temperatura simulados com os resultados obtidos experimentalmente em bancada de testes, quantificando o erro do modelo para comprovar a precisão do modelo para baterias de segunda vida.
6. Por fim, analisar os resultados obtidos a partir do modelo por circuito equivalente.

#### **1.5 Metodologia**

A metodologia do presente trabalho é de natureza experimental e computacional, e foi desenvolvida em fases sequenciais para garantir a precisão do modelo eletrotérmico e sua validação com dados práticos. O foco principal é a

caracterização térmica dos módulos de baterias de segunda vida, oriundos do veículo Renault Kangoo Z.E., para futuras aplicações em um BESS.

A metodologia adotada foi conduzida da seguinte forma:

1. Modelagem 3D dos Módulos: Criação do modelo tridimensional representativo dos módulos de bateria.
2. Obtenção dos parâmetros do circuito elétrico equivalente da bateria: Equacionamento do circuito equivalente, realização do teste para obtenção dos pontos em função do estado de carga dos módulos, realização do ajuste dos pontos para obtenção da coeficientes das equações de cada um dos componentes do circuito.
3. Simulação numérica ANSYS: Configuração do ambiente de simulação no *software* ANSYS, aplicando os parâmetros obtidos e as condições de carga/descarga do módulo e execução das simulações para obter a distribuição de temperatura sob diferentes condições operacionais.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta a fundamentação teórica necessária para compreender os aspectos da análise térmica de baterias. Inicialmente, aborda-se as químicas das baterias, com foco nas baterias de lítio, bem como os mecanismos fundamentais de geração de calor.

Por fim, são apresentadas as bases da metodologia da pesquisa, a modelagem matemática através de ECM e a aplicação de dinâmica dos fluidos computacional (CFD) para a simulação.

### 2.1 Segunda vida

O conceito de "Segunda Vida" refere-se ao reaproveitamento de baterias de veículos elétricos que, após atingirem um determinado nível de degradação, são retiradas da aplicação automotiva e redirecionadas para usos menos exigentes. Segundo Font et al. (2023), o ciclo de vida dessas baterias pode ser segmentado em três estágios distintos baseados na capacidade remanescente:

**Primeira Vida (Mobilidade Elétrica):** Encerra-se quando a bateria atinge entre 70% e 80% de sua capacidade nominal original, momento em que já não atende plenamente aos requisitos de autonomia e potência para tração veicular.

**Segunda Vida (Aplicações Estacionárias):** Compreende o intervalo de capacidade entre 70% e 30%. Nesta fase, os módulos mantêm funcionalidade suficiente para operar em sistemas de armazenamento estacionário.

**Reciclagem:** Quando a capacidade cai para níveis iguais ou inferiores a 30%, considera-se esgotada a viabilidade técnica para reuso, devendo o componente ser encaminhado para processos de reciclagem e recuperação de materiais.

A transição para a segunda vida representa uma etapa intermediária crucial. Ao prolongar o ciclo de vida útil do produto antes do descarte final, maximiza-se o valor econômico extraído dos materiais nobres e reduz-se o impacto ambiental associado à fabricação de novas células, alinhando-se aos princípios da economia circular e sustentabilidade energética.

### 2.2 Químicas de baterias

A tecnologia de baterias recarregáveis é um pilar para a transição energética, suportando aplicações que vão de dispositivos móveis a veículos elétricos e redes

inteligentes. Conforme aponta Olabi (2023), seu uso generalizado é impulsionado pela crescente demanda por armazenamento de energia eficiente, sustentável e de alto desempenho. Nesse contexto, diversas químicas foram desenvolvidas, cada qual com características próprias que balanceiam densidade energética, durabilidade e custos de produção.

Na sequência são abordados os tipos de baterias utilizadas atualmente e algumas de suas características.

### 2.2.1 Baterias de chumbo-ácido

As baterias de chumbo-ácido são uma das tecnologias de armazenamento de energia mais antigas, inventadas por Gaston Planté em 1859, e amplamente utilizadas, presentes em aplicações automotivas, industriais, sistemas de energia solar e armazenamento em redes elétricas.

Apesar da concorrência de baterias mais modernas, como as de íon-lítio, as baterias de chumbo-ácido mantêm relevância devido ao baixo custo, alta reciclabilidade e maturidade tecnológica. Segundo May et al. (2018), as baterias de chumbo-ácido mantêm uma posição dominante no mercado global de recarregáveis, liderando tanto em volume financeiro de vendas quanto em capacidade energética produzida, sustentadas por uma cadeia de suprimentos ampla e bem estabelecida.

### 2.2.2 Baterias de níquel-cádmio

As baterias de níquel-cádmio foram inicialmente desenvolvidas por Waldemar Jünger em 1899 e adaptadas por Neumann em 1947.

De acordo com Chen et al. (2023), as baterias de níquel-cádmio (NiCd) são amplamente utilizadas em dispositivos portáteis, ferramentas elétricas e equipamentos industriais e médicos devido à sua confiabilidade e alta densidade de energia. Os autores destacam sua aplicação em setores exigentes, como a aviação, e sua capacidade de operar em ambientes adversos.

Reforçando essas características, Simic et al. (2021) afirmam que a tecnologia NiCd tem sido empregada historicamente em aplicações que demandam longa vida útil da bateria, mesmo sob condições ambientais difíceis, devido à sua robustez e baixo custo.

Em termos construtivos, estas células são compostas por um cátodo de hidróxido de níquel, um ânodo de cádmio e um eletrólito alcalino. Segundo Olabi et al. (2023), essa química confere às baterias um desempenho relativamente bom em baixas temperaturas. No entanto, os autores ressaltam que, devido à elevada toxicidade do cádmio e aos riscos ambientais associados, essa tecnologia foi, em grande parte, substituída por alternativas mais sustentáveis no mercado atual.

### 2.2.3 Baterias de níquel-hidreto metálico

Segundo Chen et al. (2023), as baterias de níquel-hidreto metálico (NiMH) são classificadas como sistemas alcalinos que utilizam um material ativo positivo à base de níquel e um negativo composto majoritariamente por uma liga de armazenamento de hidrogênio. Os autores descrevem essa tecnologia como uma versão aprimorada das baterias de níquel-cádmio, na qual o cádmio é substituído por um metal absorvedor de hidrogênio.

Essa modificação estrutural permitiu alcançar densidades de energia superiores às das baterias de NiCd e assegurar uma boa vida útil cíclica. Conforme afirma Whittingham (2012), apesar desses avanços, estas células ainda apresentam como desvantagem uma taxa elevada de autodescarga, o que limita sua eficiência em aplicações de longo prazo sem recarga.

### 2.2.4 Baterias de íon-Lítio

Segundo Chen et al. (2023), as baterias de íon-lítio caracterizam-se pelo uso de uma solução eletrolítica não aquosa, podendo utilizar lítio metálico ou uma liga de lítio como material para os eletrodos negativo ou positivo. Essa configuração química permitiu que a tecnologia se diferenciasse das antecessoras, oferecendo maior eficiência energética.

Ainda de acordo com Chen et al. (2023), essas baterias tornaram-se a opção predominante para armazenamento de energia nos últimos anos, impulsionadas por vantagens como alta tensão de operação e elevada energia específica, o que as consolida como uma excelente alternativa às tecnologias convencionais. No entanto, os autores ressaltam que elas também apresentam desvantagens a serem superadas: diferentemente de outras baterias recarregáveis, a capacidade das células de íon-lítio

diminui gradualmente com o uso e seu desempenho é significativamente influenciado pela temperatura.

Ainda em relação as baterias de íon de lítio, existem tipos diferentes de composições químicas, as quais surgem de alterações no material do cátodo, cada uma conferindo propriedades distintas à célula em termos de potência, segurança e durabilidade. O modelo mais conhecido e aplicado comercialmente são as baterias de óxido de lítio-níquel-manganês-cobalto (NMC).

A química NMC, composta por óxidos de níquel, manganês e cobalto, superou a tecnologia  $\text{LiCoO}_2$  em diversas aplicações eletrônicas graças à sua capacidade aprimorada, como explica Whittingham (2012). Adicionalmente, Kim (2019) destaca a versatilidade desta tecnologia, a qual pode ser usada em diferentes combinações, buscando obter um aumento em sua densidade de energia e diminuir o custo dos materiais.

### **2.3 Comportamento térmico de baterias de lítio**

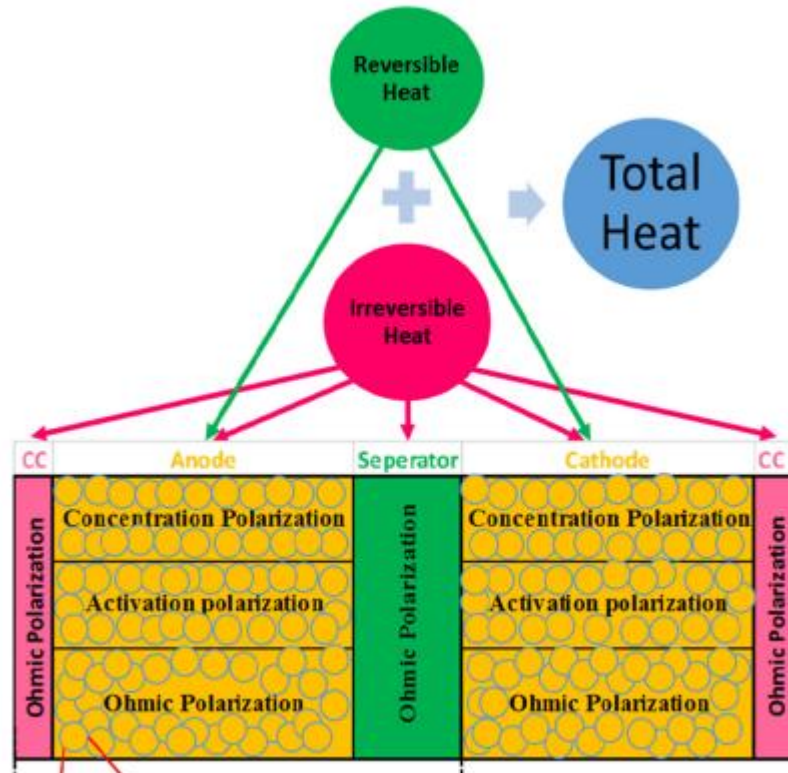
Segundo Liu et al. (2017), o gerenciamento térmico em baterias de íon-lítio concentra-se em duas preocupações fundamentais: evitar que a temperatura de operação exceda os limites de segurança e garantir a uniformidade térmica para prevenir degradações localizadas que comprometam a vida útil do componente. Os autores ressaltam que, para maximizar o desempenho, a segurança e a longevidade, é crucial manter a operação dentro de uma faixa de temperatura restrita, idealmente situada entre 15 °C e 35 °C.

Aprofundando a análise sobre a distribuição interna dessas fontes térmicas, Nazari e Farhad (2017) detalham que a geração de calor ocorre de maneira distinta em cada componente da célula. Nos coletores de corrente, o aquecimento é provocado exclusivamente pela resistência ôhmica à passagem dos elétrons. No separador, por sua vez, a dissipação térmica resulta da resistência imposta pelo eletrólito ao fluxo dos íons de lítio.

A situação nos eletrodos é mais complexa, pois envolvem múltiplas fontes: a resistência ôhmica dos materiais condutores (eletrônica) e do eletrólito (iônica), somada às polarizações de ativação e concentração nos sítios ativos onde ocorrem as reações. Segundo os autores, o somatório de todas essas parcelas constitui o calor irreversível total da bateria. Adicionalmente, é na estrutura dos materiais ativos dos

eletrodos que se manifesta o calor reversível, originado pelas mudanças de entropia durante as reações eletroquímicas, conforme demonstrado na Figura 1.

Figura 1: Esquema de geração de calor.



Fonte: Nazari e Farhad (2017)

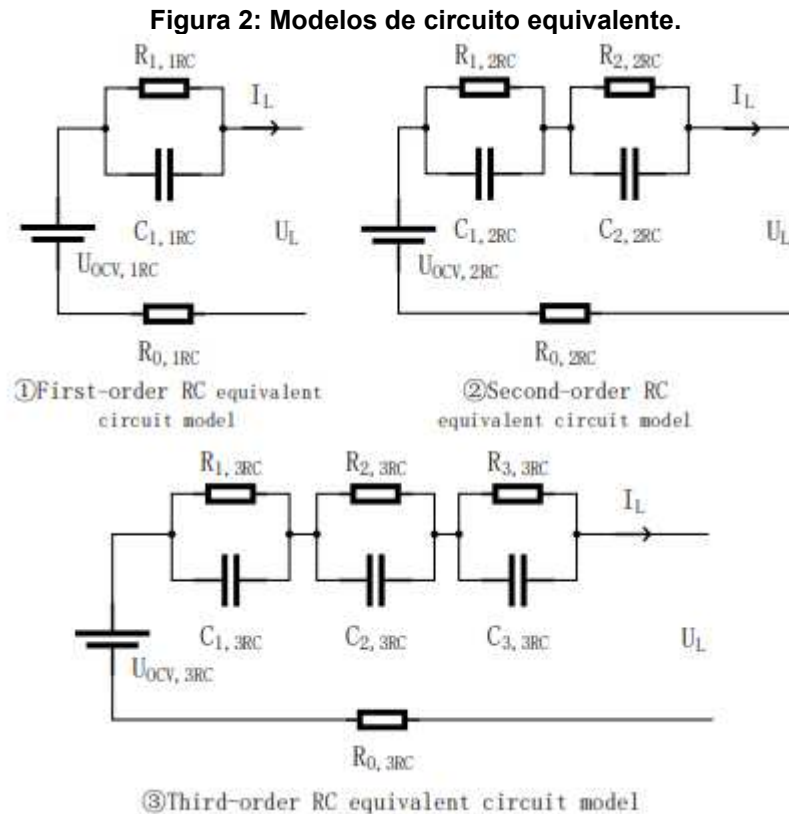
## 2.4 Modelagem de bateria por circuito equivalente

Com o objetivo de prever o comportamento de baterias sem que haja a necessidade de realização de testes físicos, utilizam-se modelos matemáticos que representam a dinâmica interna da célula. Estes modelos podem ser classificados em eletroquímicos, que descrevem as reações em nível molecular, e modelos elétricos ou empíricos, o qual compõe este trabalho.

Segundo Dini *et al.* (2024), a Modelagem por Circuito Equivalente (ECM) destaca-se como a abordagem mais abrangente para descrever o comportamento de uma célula unitária. Os autores ressaltam que, devido à sua natureza modular, o ECM é capaz de descrever a dinâmica eletrotérmica de toda a bateria, inclusive incorporando considerações de natureza química na análise do sistema completo.

Nesse contexto, Li *et al.* (2025) afirmam que os circuitos RC são amplamente empregados na modelagem de sistemas eletroquímicos para caracterizar as

propriedades de polarização. Os autores explicam que a construção desses modelos parte da estrutura básica Rint (composta apenas por um resistor e uma fonte de tensão) e evolui através da adição de pares RC em série, conforme pode ser visualizado na Figura 2. Essa abordagem permite a formação de modelos n-RC capazes de refletir com precisão as características complexas das baterias de lítio.



Fonte: Li *et al.* (2025)

Contudo, aumentar a complexidade do circuito nem sempre é vantajoso. Conforme concluem Lai *et al.* (2018), a elevação da ordem dos pares RC não garante necessariamente uma melhoria na predição do modelo, podendo inclusive acarretar problemas devido ao excesso de variáveis desconhecidas. Os autores demonstram que os modelos de primeira e segunda ordem são os mais consistentes, sendo que o modelo de segunda ordem (2 pares RC) se destaca por oferecer uma precisão superior, o que justifica sua ampla adoção em estudos que buscam equilibrar fidelidade dinâmica e robustez computacional.

## 2.5 Simulação numérica multifísica

A complexidade dos fenômenos de transporte de calor e massa em baterias de íons de lítio torna a análise simples insuficiente para prever o comportamento térmico em geometrias reais e condições dinâmicas. Nesse cenário, a dinâmica dos fluidos computacional (CFD) apresenta-se como uma ferramenta robusta, a qual abrange uma abordagem multifísica, permitindo a resolução numérica das equações de conservação de energia, massa e momento em domínios tridimensionais.

*Softwares* comerciais avançados, como o ANSYS fluent, utilizam métodos numéricos para acoplar diferentes físicas em uma única simulação, para o cenário de baterias, a abordagem mais eficaz é o modelo MSMD (Multi-Scale Multi-Dimensional).

Segundo Rommel (2023), essa abordagem multifísica permite que o calor gerado pelas reações internas seja utilizado como termo fonte na equação da energia. Complementando essa visão, Mora-Paz (2024) destaca que a utilização de modelos multifísicos completos é fundamental para elucidar a física complexa que ocorre no interior da célula, oferecendo uma precisão superior à de modelos puramente eletroquímicos simplificados. O autor ressalta que, à medida que a carga de trabalho aumenta, a consideração dos efeitos térmicos torna-se preponderante para o sistema. Além disso, as simulações fornecem dados detalhados de temperatura e tensões que são cruciais para cientistas e engenheiros na otimização de projetos, representando um desenvolvimento sólido para análises de alta precisão.

A validação desses modelos numéricos através de dados experimentais, conforme preconizado na literatura, fornece a confiabilidade necessária para que a simulação seja utilizada como ferramenta preditiva no projeto de sistemas de armazenamento de segunda vida, reduzindo custos e riscos de prototipagem.

### 3 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a metodologia empregada para a realização das simulações térmicas em módulos de baterias de segunda vida. A abordagem metodológica é apresentada em uma sequência lógica, iniciando-se com a modelagem 3D dos módulos, seguida do equacionamento do circuito utilizado para representação deles. Posteriormente, o texto descreve o procedimento de testes práticos para a obtenção dos parâmetros do circuito (resistências, capacitâncias e tensão de circuito aberto) em função do Estado de Carga (SOC). É, também, detalhado como as curvas de cada variável foram ajustadas no *software* MATLAB para encontrar os coeficientes que definem as componentes do circuito.

Por fim, são expostas as configurações implementadas no *software* ANSYS Fluent para a execução das simulações térmicas. Desta forma, este capítulo estabelece a cronologia completa e os procedimentos para a realização das simulações, cujos resultados serão discutidos no capítulo 4.

#### 3.1 Objeto de estudo e bancada experimental

O objeto central de análise deste trabalho consiste em módulos de baterias de íons de lítio de segunda vida, provenientes de veículos elétricos do modelo Renault Kangoo Z.E. Originalmente, o pack de bateria do veículo em questão é projetado para operar com uma tensão nominal de 400 V e suportar correntes de até 300 A. O conjunto completo possui capacidade energética de 24 kWh e é composto por 48 módulos ligados em série.

Embora o histórico detalhado da utilização dos módulos cedidos não esteja disponível, estima-se que estes tenham operado por um período aproximado de 10 anos. Ao final deste período, a degradação da capacidade de armazenamento atinge níveis que, embora inviabilizem a alta performance exigida no uso automotivo, preservam características técnicas adequadas para aplicações estacionárias de segunda vida.

##### 3.1.1 Caracterização física e química

Os módulos apresentam uma forma prismática, com dimensões externas mensuradas em 303 mm x 223 mm x 35 mm. A aparência externa, com sua carcaça

de liga de alumínio, que atua tanto na proteção mecânica das células quanto em relação a dissipação térmica, é apresentada na Figura 3.

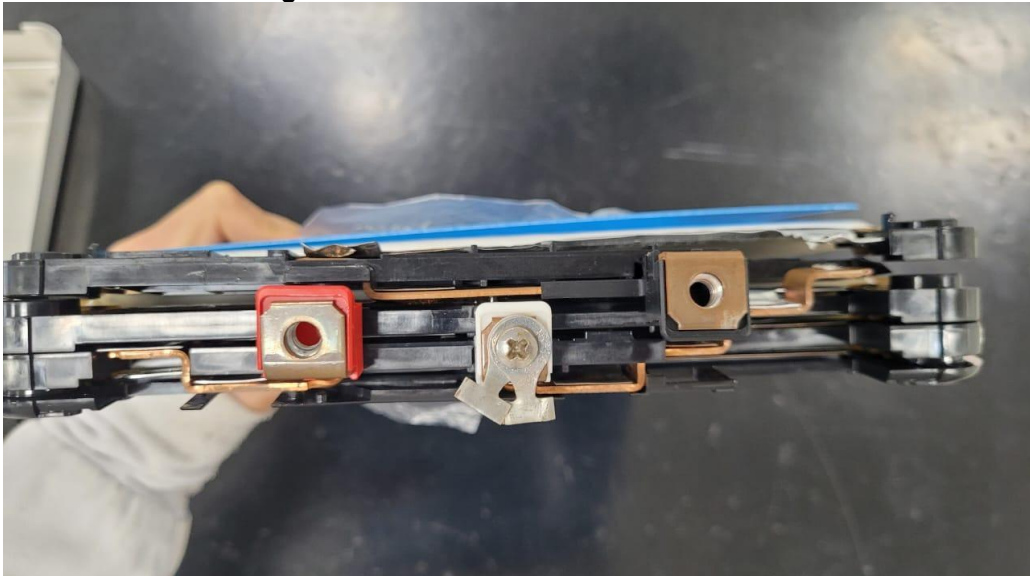
**Figura 3: Módulo do Renault Kangoo Z.E.**



**Fonte: Autoria própria (2025)**

Internamente, cada módulo abriga um conjunto de quatro células do tipo pouch (bolsa). A topologia de conexão entre elas adota a configuração 2s2p (dois conjuntos em série, compostos por duas células em paralelo), resultando na tensão nominal do módulo, 8,4V. A eletroquímica das células é baseada em cátodo de NMC LiNiCoO<sub>2</sub> e ânodo de grafite. A Figura 4 exhibe o módulo com a carcaça superior removida, permitindo a visualização das células *pouch*, dos barramentos de cobre e das camadas de isolamento polimérico (PVC e PET).

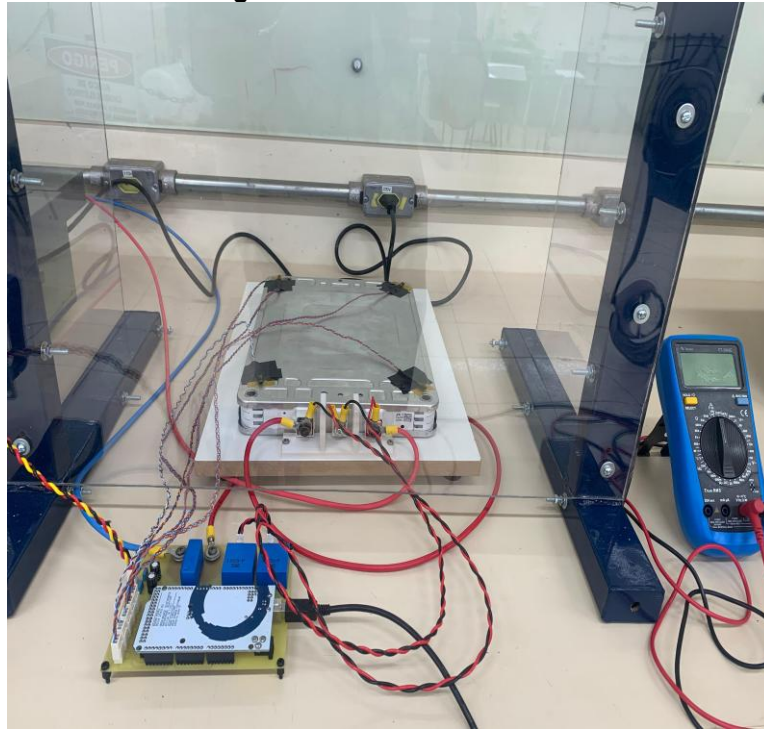
**Figura 4: Módulo da bateria desmontado.**



**Fonte: Autoria própria (2025)**

### 3.1.2 Bancada experimental e testes em laboratório

Os ensaios experimentais para obtenção de parâmetros e validação térmica foram realizados no Laboratório de Eletrificação Veicular (LEV), utilizando a bancada desenvolvida no âmbito do projeto (Figura 5). Na qual, o módulo foi posicionado horizontalmente sob uma base de madeira com uma impressão 3D fixada visando garantir a estabilidade estrutural e a integridade dos contatos elétricos dos terminais durante os ciclos de carga e descarga, evitando que fosse possível curto circuitar os terminais durante a conexão dos cabos.

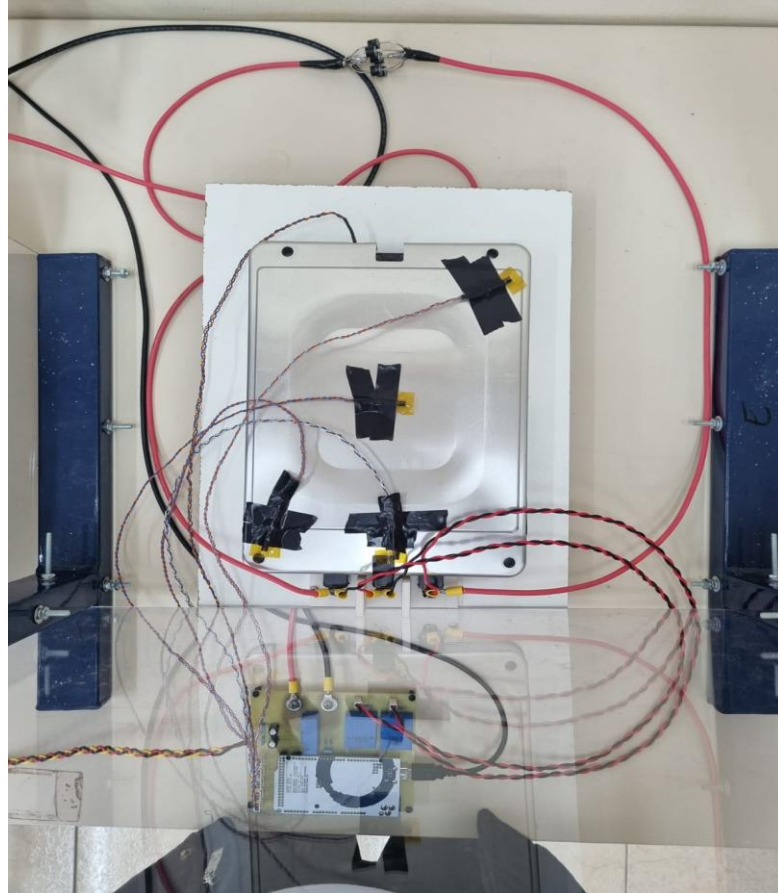
**Figura 5: Bancada de testes.**

**Fonte: Autoria própria (2025)**

O sistema de aquisição de dados utilizado foi implementado por outro integrante da equipe de pesquisa, sendo disponibilizados para este trabalho os dados de temperatura. O setup de medição utilizou 5 sensores de temperatura analógicos do modelo LM35, escolhidos pela linearidade de resposta e precisão adequada para a faixa de operação. A fixação dos sensores sobre a superfície da carcaça de alumínio foi realizada com fita isolante e fita adesiva de polimida (Kapton), garantindo fixação mecânica estável e mínima interferência térmica, respectivamente.

A disposição dos sensores, ilustrada na Figura 6, foi definida de modo a acompanhar se há diferenças consideráveis entre a distribuição de temperatura. Foram posicionados sensores na região central do módulo, onde se espera a maior concentração de calor devido à maior distância das arestas, nas quais é esperado que ocorra uma maior troca de calor por convecção, e outros nas proximidades dos terminais positivo e negativo e um foi posicionado na parte interna do módulo.

**Figura 6: Disposição dos sensores LM35.**



**Fonte: Autoria própria (2025)**

### **3.2 Teste HPPC**

Para a parametrização do modelo computacional, utilizaram-se os dados experimentais gerados nos ensaios realizados por Corrêa (2025) em sua dissertação de mestrado, que descreve os procedimentos de teste e aquisição utilizados. O método adotado para levantar a resposta dinâmica da bateria foi o HPPC (Hybrid Pulse Power Characterization), um protocolo padrão da indústria automotiva para determinar a capacidade de potência e a impedância interna em função do Estado de Carga (SOC).

O ensaio foi conduzido em um módulo composto por uma célula, o procedimento experimental consistiu em submetê-la a uma sequência de pulsos de corrente de descarga, varrendo toda a faixa de operação da bateria (de 100% a 10% de SOC).

Nos pontos de operação analisados, após o período necessário para a estabilização da tensão de circuito aberto, a célula foi submetida a pulsos de corrente

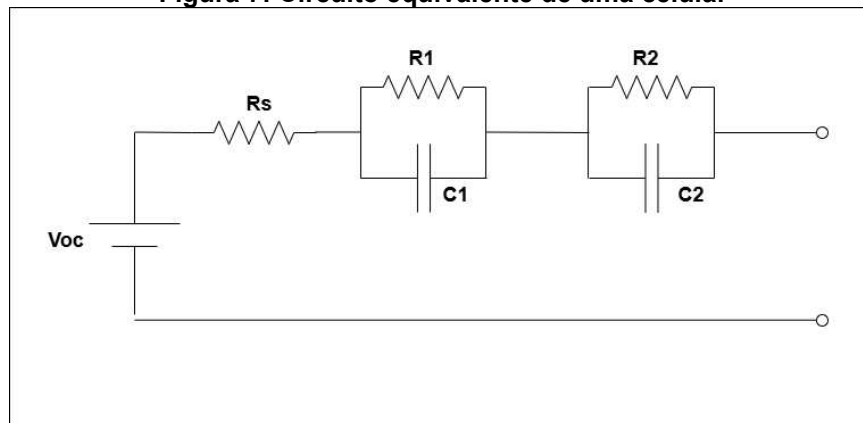
de descarga intercalados por intervalos de repouso. As curvas de resposta de tensão obtidas nestes ensaios possibilitaram a extração dos pontos das curvas de resistências, capacitâncias e tensão de circuito aberto em função do SOC.

### 3.3 Modelagem matemática

Para a representação da dinâmica de tensão e da geração de calor em uma bateria composta por uma célula, adotou-se um modelo de circuito equivalente de segunda ordem, o qual pode ser observado na Figura 7.

Este modelo foi escolhido por oferecer um equilíbrio adequado entre custo computacional e precisão na representação de uma célula.

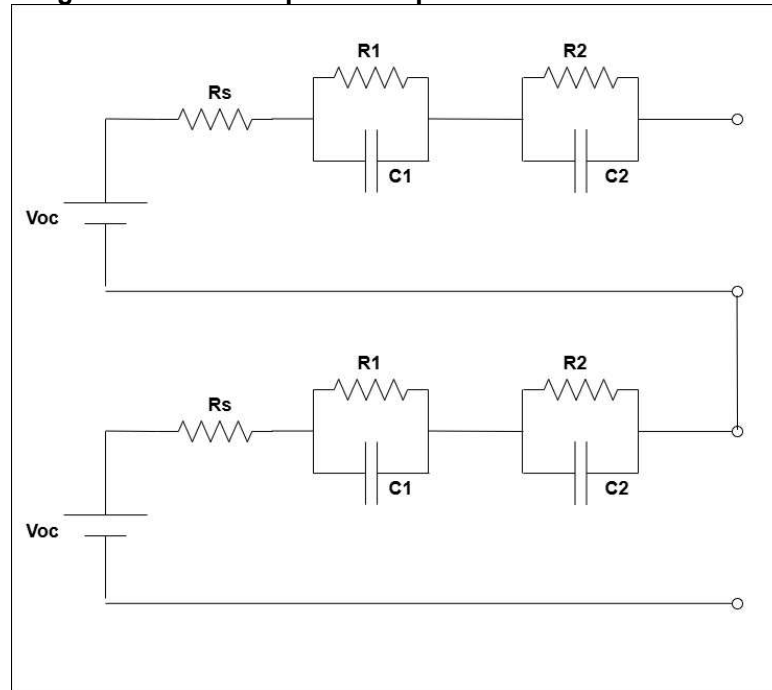
**Figura 7: Circuito equivalente de uma célula.**



**Fonte: Autoria própria (2025)**

Considerando a topologia física do módulo do Renault Kangoo Z.E., que apresenta uma configuração 2s2p (dois conjuntos em série de dois pares em paralelo), o modelo matemático foi construído considerando dois circuitos equivalente para uma célula conectados em série, como mostra a Figura 8.

**Figura 8: Circuito equivalente para duas células em série.**



**Fonte: Autoria própria (2025)**

Para validar a utilização dos dados experimentais obtidos em nível de célula unitária na representação do módulo completo, utilizou-se uma abordagem fundamentada no Teorema de Thévenin. Esta base teórica foi empregada para demonstrar que o comportamento elétrico do arranjo 2s2p poderia ser reproduzido de maneira satisfatória aplicando-se fatores de escala algébricos sobre os pontos levantados nos testes, dispensando a necessidade de caracterização direta de todo o conjunto. Na sequência, é possível visualizar de maneira simplificada, nas equações (1) e (2) o equacionamento utilizado.

$$V_{Th} = V_{oc} + V_{oc} \Rightarrow V_{Th} = 2V_{oc} \quad (1)$$

$$Z_{Th} = (R_2 \parallel C_2) + (R_1 \parallel C_1) + R_s + (R_2 \parallel C_2) + (R_1 \parallel C_1) + R_s \quad (2)$$

Ao realizar o desenvolvimento da equação (2) foram obtidas as equações (3) e (4), respectivamente, as quais foram expostas na sequência.

$$Z_{Th} = 2R_s + 2(R_1 \parallel C_1) + 2(R_2 \parallel C_2) \quad (3)$$

$$Z_{Th} = 2R_s + 2 \left( \frac{\frac{R_1}{C_1 s}}{R_1 + \frac{1}{C_1 s}} \right) + 2 \left( \frac{\frac{R_2}{C_2 s}}{R_2 + \frac{1}{C_2 s}} \right) \quad (4)$$

Por fim, o desenvolvimento algébrico conduziu à Equação (5), apresentada a seguir. A análise deste modelo, fundamentado na associação em série de dois circuitos equivalentes (cada um composto por dois pares RC), demonstra a viabilidade de extrapolação dos dados experimentais obtidos em nível de célula unitária. Os resultados indicam que, para representar fielmente o módulo objeto deste estudo, os valores de Tensão de Circuito Aberto ( $V_{oc}$ ) e as resistências obtidos no ensaio HPPC devem ser multiplicados por dois, enquanto as capacitâncias devem ser divididas pelo mesmo fator.

$$Z_{Th} = 2R_s + \left( 2R_1 \parallel \frac{C_1}{2} \right) + \left( 2R_2 \parallel \frac{C_2}{2} \right) \quad (5)$$

### 3.4 Processamento de dados e ajuste de curvas

A etapa de processamento dos dados experimentais foi realizada utilizando o *software* MATLAB, com o objetivo de converter os resultados obtidos nos testes em laboratório em funções matemáticas, as quais descrevem o comportamento dos parâmetros elétricos do circuito, aptas a serem utilizadas pelo solver numérico do ANSYS.

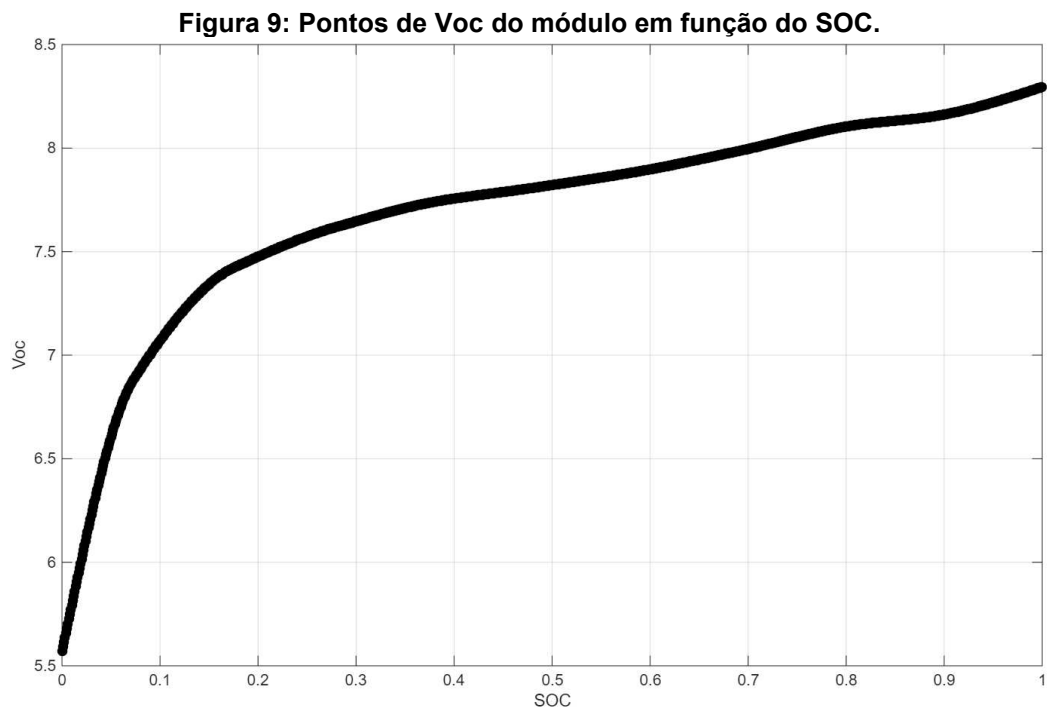
#### 3.4.1 Extração e plotagem de parâmetros

Inicialmente, os arquivos de texto contendo os valores dos parâmetros elétricos ( $R_s$ ,  $R_1$ ,  $C_1$ ,  $R_2$ ,  $C_2$ ) e da tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ) para cada intervalo de SOC, previamente processados a partir dos ensaios HPPC, foram importados para o ambiente de trabalho do MATLAB.

Estes dados consistiam em matrizes que relacionavam os níveis de Estado de Carga (SOC) aos respectivos valores de impedância e potencial obtidos em cada ponto de operação. Nesta etapa, conforme fundamentado na modelagem matemática via Thévenin (Seção 3.3), aplicou-se o fator de escala necessário para adequar os dados da célula unitária à topologia do módulo (2s2p). Desta forma, os valores dos

pontos experimentais de tensão ( $V_{oc}$ ) e resistências ( $R$ ) foram multiplicados por 2 enquanto as capacitâncias foram divididas pelo mesmo fator, garantindo que as curvas resultantes representem a dinâmica de tensão e dissipação de potência do módulo completo.

Antes de proceder com o ajuste matemático, executou-se a plotagem gráfica destes pontos discretos para inspeção visual. Esta etapa foi fundamental para verificar a consistência física dos dados e garantir a ausência de descontinuidades que pudessem comprometer a qualidade da regressão. A Figura 9 apresenta o comportamento da tensão de circuito aberto em função do estado de carga.



**Fonte: Autoria própria (2025)**

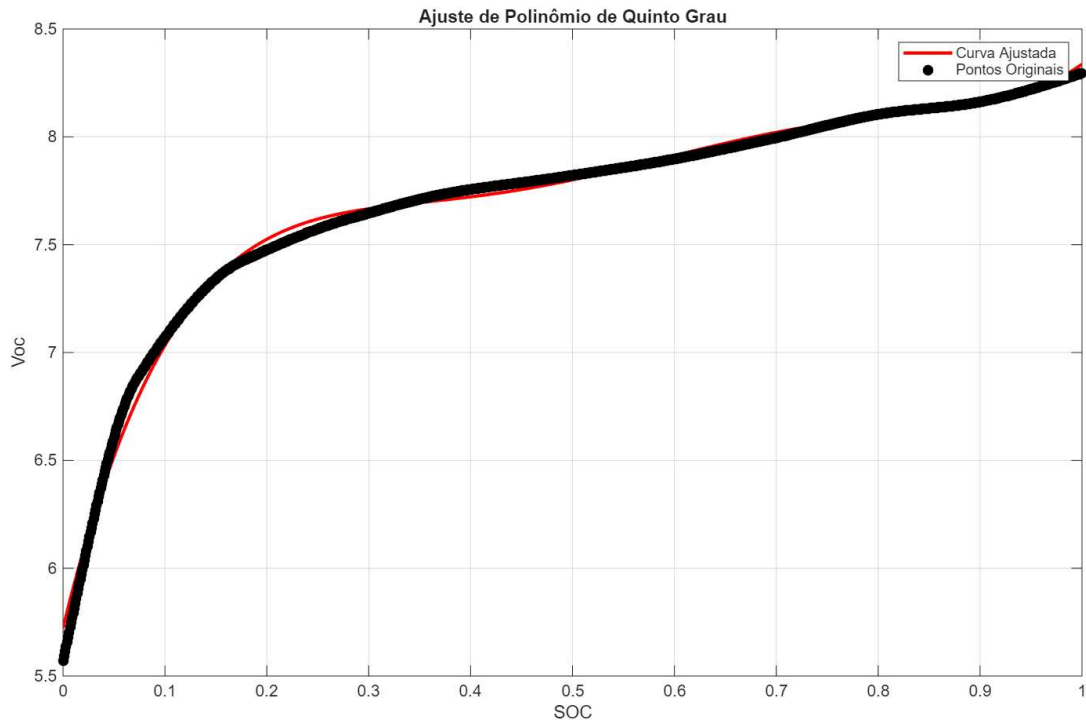
### 3.4.2 Ajuste de curva

Para a parametrização do modelo numérico, foi necessário converter os dados em equações contínuas. A escolha da função de ajuste foi determinada pelos requisitos do *software* ANSYS, cujo modelo MSMD (Multi-Scale Multi-Dimensional) exige a entrada dos parâmetros elétricos na forma de polinômios de quinta ordem.

No MATLAB utilizou-se a função *polyfit* para extrair os coeficientes ( $a_0 \dots a_5$ ) que adaptam os dados experimentais à estrutura da equação imposta pelo simulador.

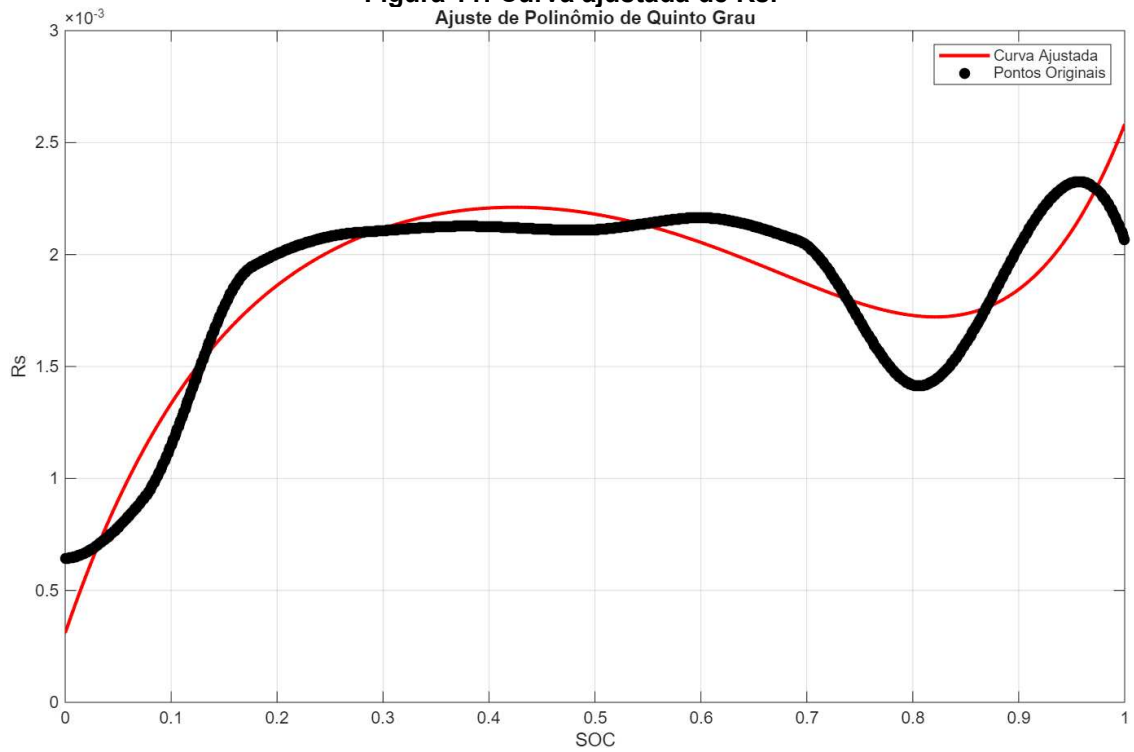
A validação visual do ajuste foi realizada através da função *polyval*, plotando-se a curva polinomial gerada sobre os pontos experimentais. A Figura 10 apresenta o ajuste para a Tensão de Circuito Aberto ( $V_{oc}$ ), enquanto as Figuras 11, 12, 13, 14 e 15 exibem os ajustes para as resistências internas ( $R_s$ ,  $R_1$ ,  $R_2$ ) e capacitâncias ( $C_1$ ,  $C_2$ ), respectivamente.

**Figura 10: Curva ajustada de  $V_{oc}$ .**



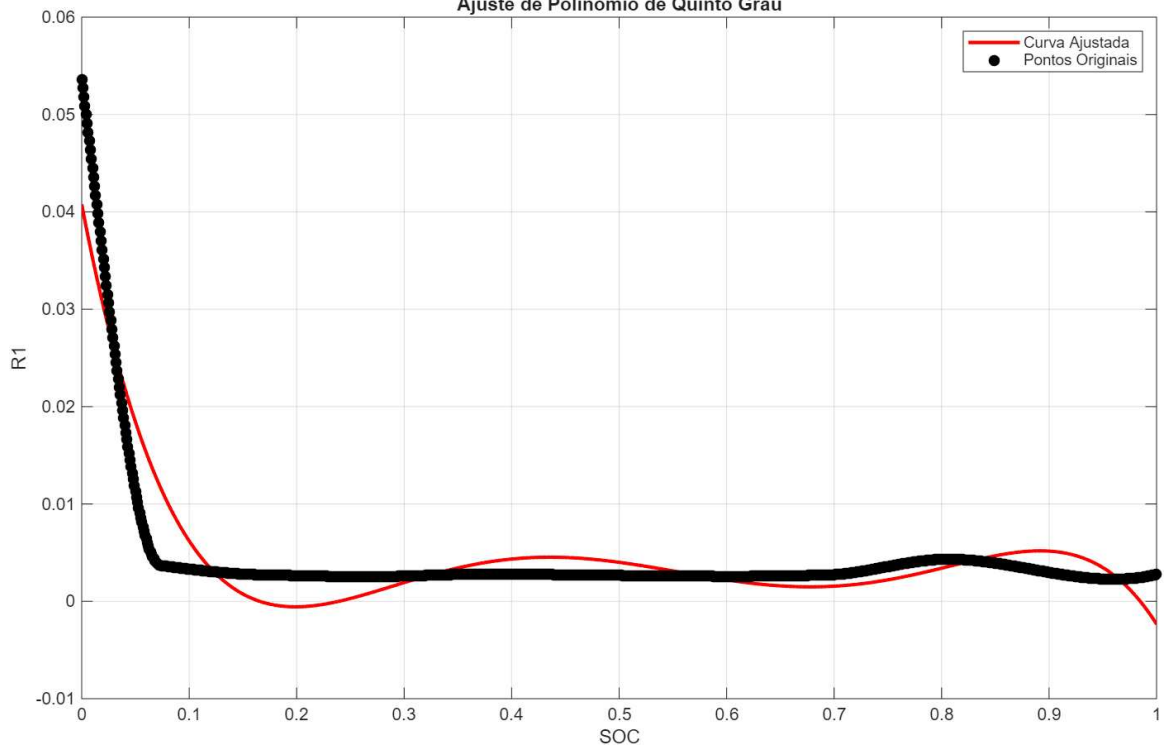
**Fonte: Autoria própria (2025)**

**Figura 11: Curva ajustada de  $R_s$ .**  
Ajuste de Polinômio de Quinto Grau



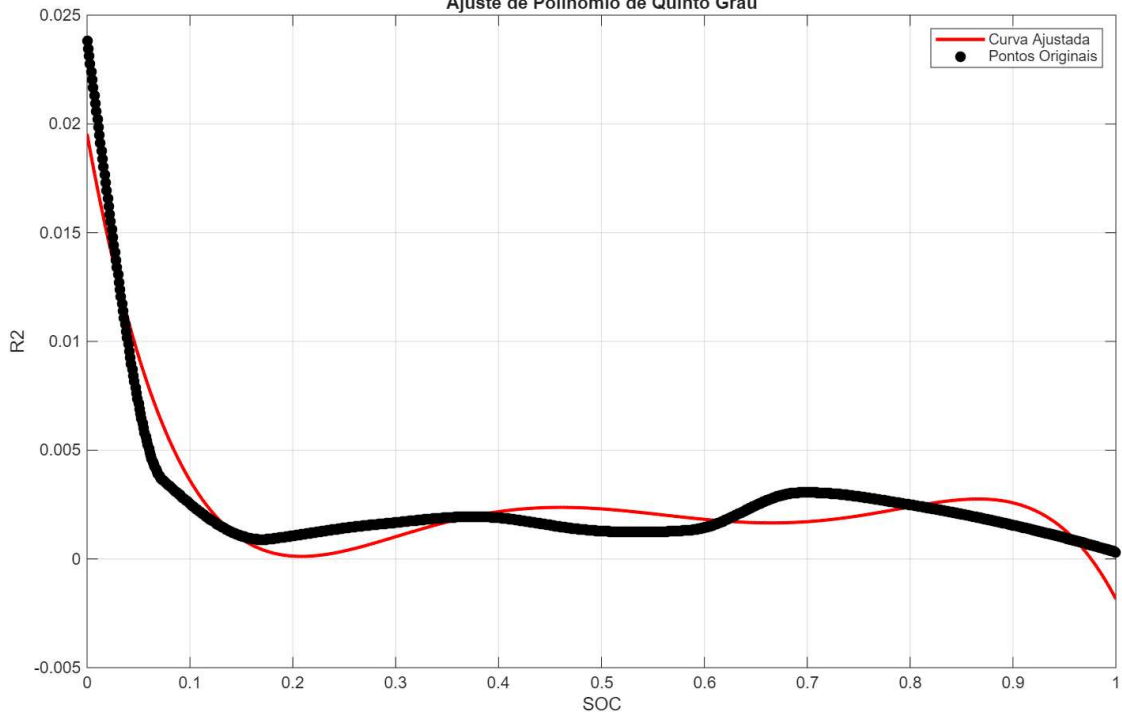
Fonte: Autoria própria (2025)

**Figura 12: Curva ajustada de  $R_1$ .**  
Ajuste de Polinômio de Quinto Grau



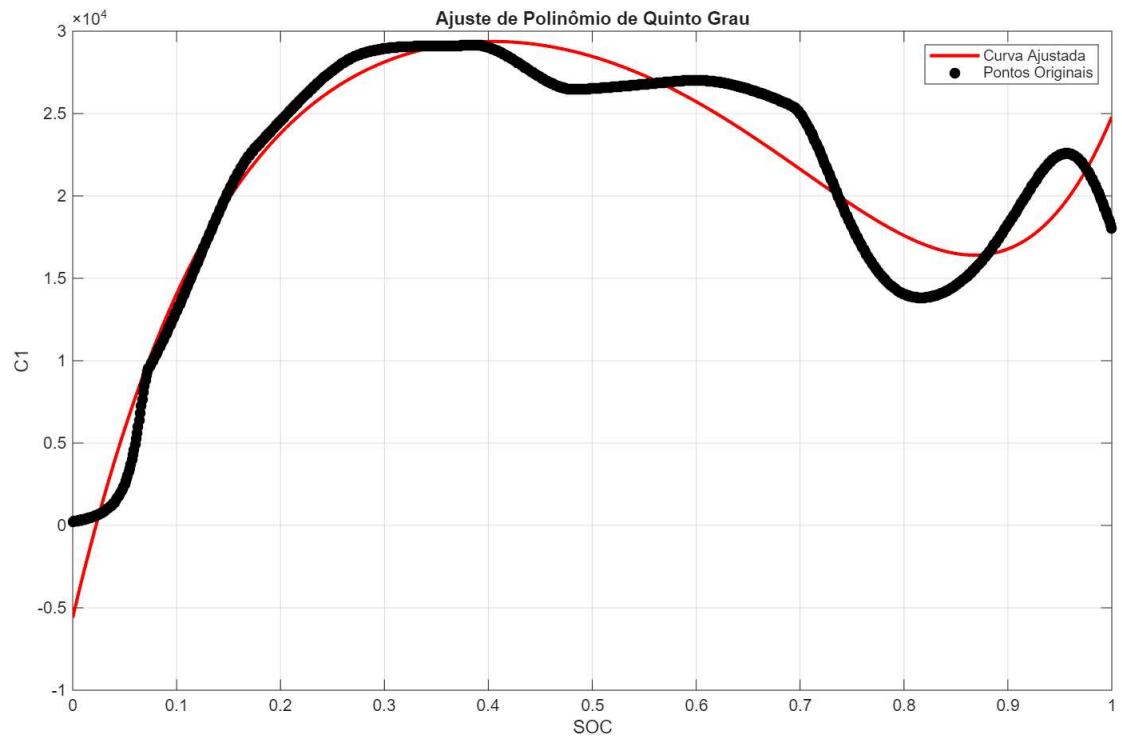
Fonte: Autoria própria (2025)

**Figura 13: Curva ajustada de R2.**  
Ajuste de Polinômio de Quinto Grau



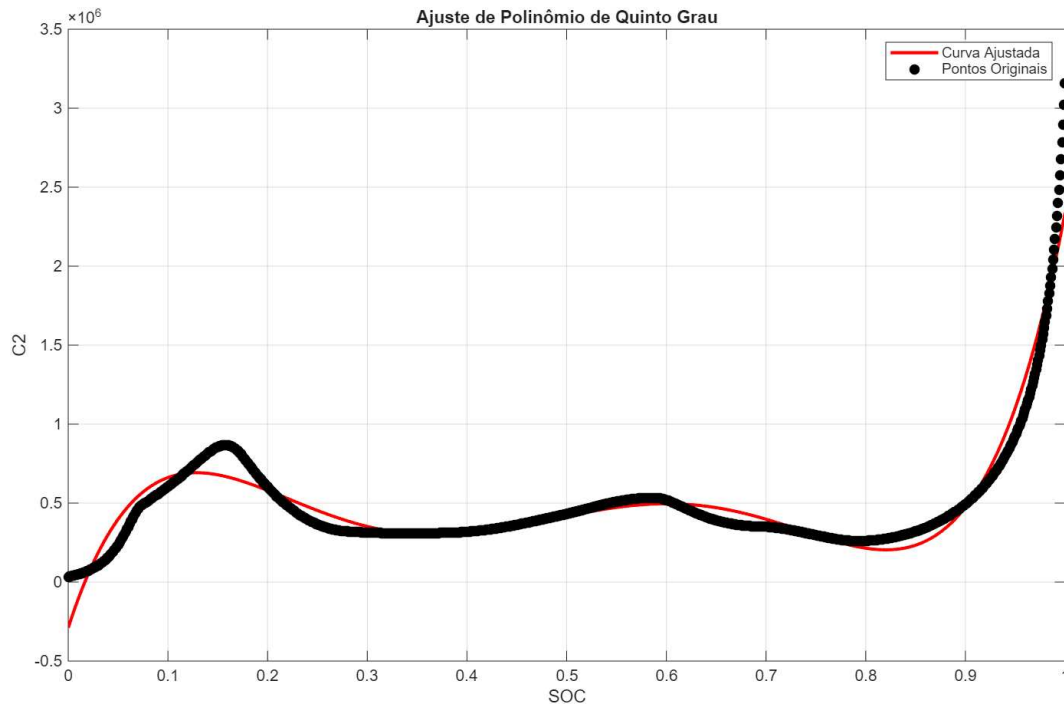
Fonte: Autoria própria (2025)

**Figura 14: Curva ajustada de C1.**  
Ajuste de Polinômio de Quinto Grau



Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 15: Curva ajustada de C2.



Fonte: Autoria própria (2025)

Como resultado deste processamento, obteve-se o conjunto final de coeficientes que descreve matematicamente o comportamento elétrico do módulo. A Tabela 1 resume os coeficientes das equações polinomiais de quinta ordem para cada parâmetro, os quais foram inseridos nas tabelas de propriedades do material no ANSYS.

Tabela 1: Coeficientes dos polinômios de 5ª ordem.

Parâmetro	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$
$V_{oc}$ (V)	5,722	19,3991	-76,1331	145,282	-130,0038	44,0701
$R_s$ ( $\Omega$ )	0,0003	0,0138	-0,0429	0,0779	-0,0832	0,0366
$R_1$ ( $\Omega$ )	0,0408	-0,575	2,852	-6,1745	6,0506	-2,1963
$R_2$ ( $\Omega$ )	0,0195	-0,2607	1,2551	-2,667	2,5946	-0,9435
$C_1$ (F)	-5600	268100	-852300	1519000	-1552500	648100
$C_2$ (F)	$-2,9 \times 10^5$	$1,939 \times 10^7$	$1,295 \times 10^8$	$3,44 \times 10^8$	$-3,96 \times 10^8$	$1,652 \times 10^8$

Fonte: Autoria própria (2025)

O código completo desenvolvido para a geração destas curvas e extração dos coeficientes encontra-se detalhado no APÊNDICE A.

### 3.5 Simulação térmica

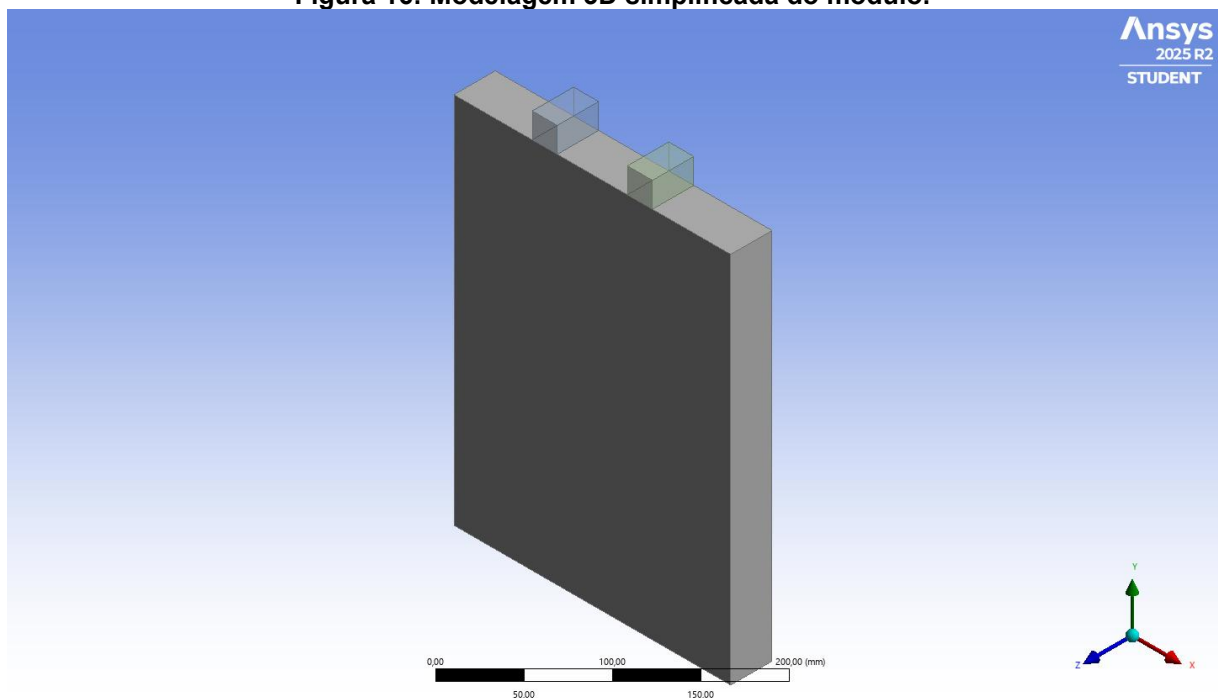
A análise térmica tridimensional foi realizada utilizando o *software* ANSYS, empregando métodos numéricos computacionais para a resolução das equações de conservação de energia e transferência de calor. A simulação foi configurada em regime transiente, permitindo a observação da evolução da temperatura em resposta aos perfis dinâmicos de carga e descarga aplicados.

#### 3.5.1 Geometria e malha

Para a análise, a geometria do módulo foi desenvolvida no ambiente CAD (computer aided design) do próprio ANSYS, reproduzindo as dimensões externas expostas anteriormente (tópico 3.1.1). Visando a otimização do custo computacional, o modelo geométrico passou por um processo de simplificação, mantendo-se apenas os volumes ativos representativos das células.

Para fins de simulação, simplificou-se a topologia dos conectores externos em detrimento da representação do terminal central de interconexão, modelou-se apenas os dois terminais de potência principais (positivo e negativo), conforme ilustrado na Figura 16. Esta abordagem foca na análise térmica global gerada pelo fluxo de corrente principal.

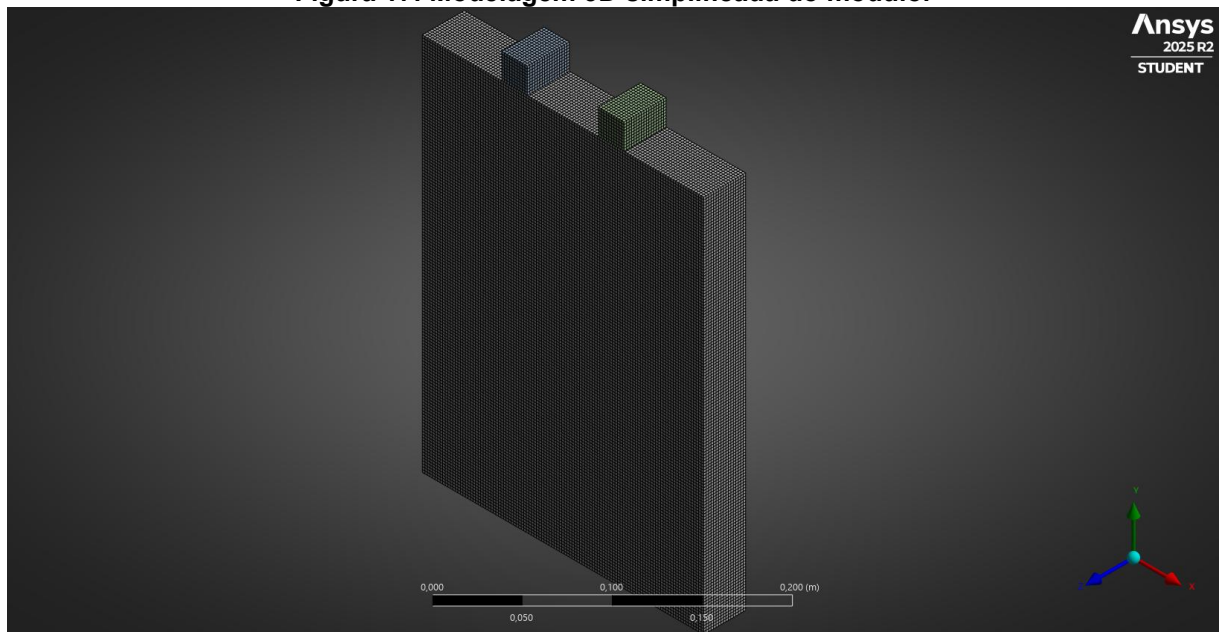
**Figura 16: Modelagem 3D simplificada do módulo.**



**Fonte: Autoria própria (2025)**

Sobre esta geometria simplificada, gerou-se o domínio discreto utilizando uma malha estruturada, composta predominantemente por elementos hexaédricos com tamanho médio de 2 mm. Esta topologia foi selecionada por garantir a ortogonalidade dos elementos, o que favorece a estabilidade numérica, a convergência do solver e a precisão na captura dos gradientes térmicos nas interfaces. A Figura 17 apresenta a malha computacional final utilizada.

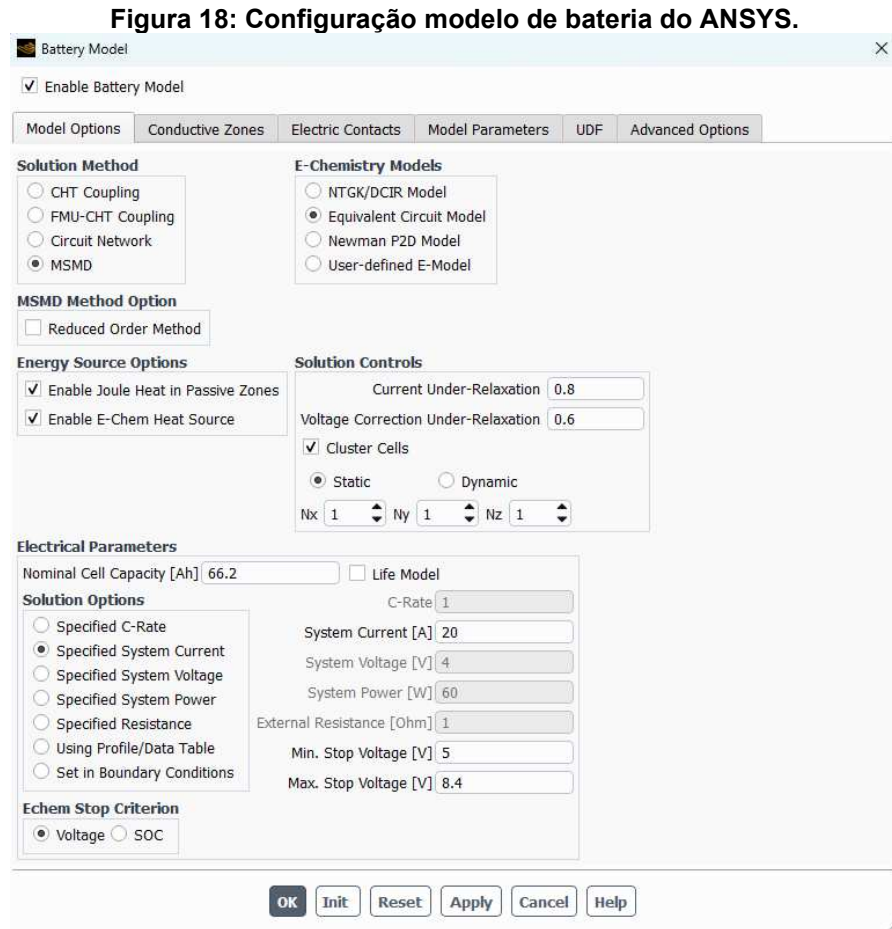
**Figura 17: Modelagem 3D simplificada do módulo.**



**Fonte: Autoria própria (2025)**

### 3.5.2 Modelo físico e acoplamento térmico

Para a realização da simulação térmica utilizou-se o modelo de bateria (Battery Model) na interface do ANSYS Fluent, este modelo foi selecionado por permitir o acoplamento direto entre a eletroquímica (geração de calor) e a termodinâmica (dissipação). Dentro das opções do modelo foi selecionado o método MSMD e a abordagem de Circuito Equivalente (ECM), ainda na mesma aba foram inseridos alguns valores importantes para a simulação, tais configurações podem ser observadas na Figura 18.



**Fonte: Autoria própria (2025)**

A Figura 19 exibe a tela de configuração onde estão às funções polinomiais para a tensão, resistências e capacitâncias, nesta etapa, os coeficientes dos polinômios de 5ª ordem (previamente obtidos no MATLAB e listados na Tabela 2) foram inseridos.

**Figura 19: Configuração dos parâmetros do modelo ECM.**

The screenshot shows the 'Battery Model' configuration window. It includes a checkbox for 'Enable Battery Model' which is checked. Below this are tabs for 'Model Options', 'Conductive Zones', 'Electric Contacts', 'Model Parameters', 'UDF', and 'Advanced Options'. The 'Model Parameters' tab is active, showing the following sections:

- Equivalent Circuit Model Parameters:**
  - Initial State of Charge: 1
  - Reference Capacity [Ah]: 60.97
  - Use Different Coefficients for Charging and Discharging:
- Data Types:**
  - Chen's original:
  - Polynomial:
  - Table:
  - Parameter Estimation... button
- Discharging Parameters:**
  - Rs Coefficients:**

rs0	0.0003	rs1	0.0138	rs2	-0.0429
rs3	0.0779	rs4	-0.0832	rs5	0.0366
  - R1 Coefficients:**

r10	0.0408	r11	-0.575	r12	2.852
r13	-6.1745	r14	6.0506	r15	-2.1963
  - R2 Coefficients:**

r20	0.0195	r21	-0.2607	r22	1.2551
r23	-2.667	r24	2.5946	r25	-0.9435
- Visualize Model Parameters:**
  - Parameter list: Rs Function, R1 Function, R2 Function, Voc Function, C1 Function, C2 Function, Time Constant 1 (R1\*C1), Time Constant 2 (R2\*C2)

At the bottom of the window are buttons for 'OK', 'Init', 'Reset', 'Apply', 'Cancel', and 'Help'.

Fonte: Autoria própria (2025)

### 3.5.3 Propriedades dos materiais e definição de zonas

A configuração do domínio computacional exigiu a distinção explícita entre as zonas ativas e passivas. Estipulou-se o volume correspondente às células como zona ativa eletroquímica, onde as equações do modelo de Bernardi são resolvidas. Em contrapartida, as regiões dos terminais positivo e negativo foram configuradas como zonas de contato elétrico, responsáveis apenas pela condução de corrente, sem atividade química.

As propriedades termofísicas dos materiais (densidade, calor específico e condutividade térmica) foram também inseridas nas configurações, para o caso dos terminais foi considerado que eram compostos por cobre e foram utilizadas as

propriedades fornecidas pelo próprio *software*. Em relação as células de íons de lítio NMC, as propriedades foram definidas com base na literatura, conforme detalhado na Tabela 2.

**Tabela 2: Propriedades das células de íons de lítio NMC.**

Propriedade	$\text{Li}_{1.1}(\text{Ni}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3})_{0.9}\text{O}_2$
Densidade ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	2380
Calor específico ( $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )	710
Condutividade térmica ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )	1.50

**Fonte: Adaptado de Peng e Jiang (2016).**

As condições de contorno e inicialização foram estabelecidas com o objetivo de replicar o ambiente da bancada experimental. Do ponto de vista térmico, aplicou-se às superfícies externas da carcaça uma condição de convecção natural, adotando-se um coeficiente de transferência de calor estimado na faixa de 5 a 10  $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$  e uma temperatura de referência de 18°C, igual à do ambiente de teste.

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Este capítulo apresenta os resultados obtidos através das simulações realizadas no ANSYS Fluent e a validação do modelo proposto mediante comparação com os dados experimentais. A discussão é dividida em duas etapas, inicialmente verifica-se a fidelidade do modelo computacional frente aos dados de bancada (validação) e na sequência, utiliza-se o modelo validado para realizar uma análise paramétrica, explorando o comportamento térmico do módulo sob diferentes regimes de corrente.

### **4.1 Validação experimental do modelo**

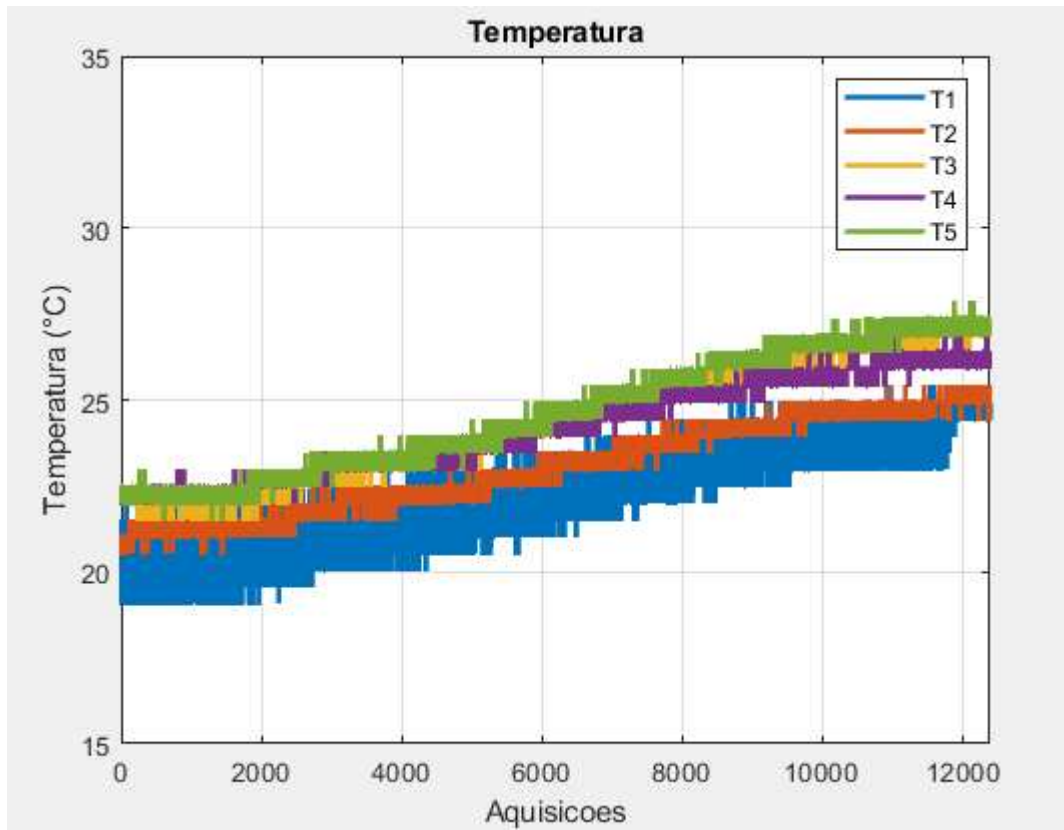
Para atestar a confiabilidade das previsões numéricas, realizou-se o confronto direto entre a curva de aquecimento simulada e os dados reais aquiridos pelos sensores LM35. O cenário de referência para esta comparação foi um perfil de carga constante de 20 A, partindo de um módulo descarregado, com tensão de 5V, até a tensão máxima de 8,4 V.

A análise do comportamento térmico é apresentada separadamente a seguir, detalhando primeiramente a resposta dos sensores e, na sequência, o resultado médio obtido computacionalmente.

#### **4.1.1 Resultados experimentais**

O gráfico 1 apresenta a evolução da temperatura registrada pelos cinco sensores (LM35) distribuídos na superfície do módulo.

**Gráfico 1: Temperatura experimental durante carga a 20 A.**



**Fonte: Autoria própria (2025)**

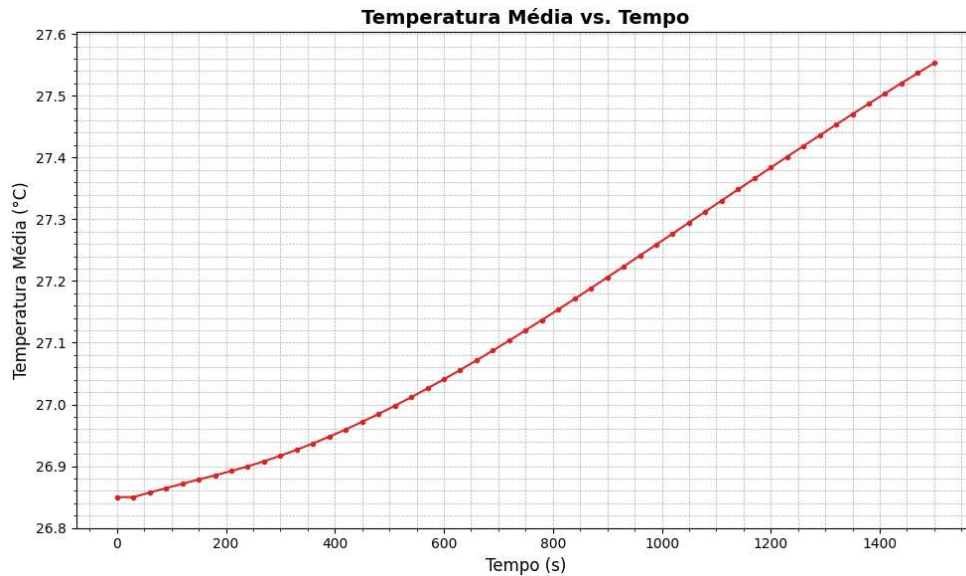
A análise das temperaturas obtidas no ensaio experimental revela um aumento moderado da temperatura do módulo ao longo do ensaio, em torno de 9°C. Este comportamento é corroborado pelo estado de saúde (SOH) do mesmo, estimado em aproximadamente 93%, tal valor foi obtido a partir dos testes de carga/descarga realizados em laboratório, mencionados no capítulo 3. Este alto índice de saúde implica na preservação de uma baixa resistência interna, o que limita significativamente a geração de calor por efeito Joule, resultando em um aquecimento mais controlado.

Observa-se também uma dispersão nas leituras dos cinco sensores, tornando-as não lineares, isso ocorre devido a presença de ruído no sinal dos sensores LM35. Este fenômeno é atribuído à interferência eletromagnética induzida nos cabos utilizados para a aquisição dos dados.

#### 4.1.2 Resultados da simulação

O Gráfico 2 ilustra o comportamento térmico durante o estágio final da simulação numérica no ANSYS, sob as mesmas condições operacionais previamente estabelecidas.

**Gráfico 2: Temperatura simulada no ANSYS.**



**Fonte: Autoria própria (2025)**

Ao comparar o resultado simulado (Gráfico 2) com os dados experimentais apresentados anteriormente (Gráfico 1), observa-se uma concordância significativa no comportamento das temperaturas nos testes. Buscando uma validação quantitativa, comparou-se a temperatura final atingida no teste experimental com o valor final obtido pela simulação, na Tabela 3 é possível observar os valores comparados e o erro calculado.

**Tabela 3: Comparação dos resultados.**

Variável	Valor experimental	Valor simulado	Erro (%)
Temperatura inicial	18°	18° (*)	0
Temperatura final	26,88°	27,56°	2,53

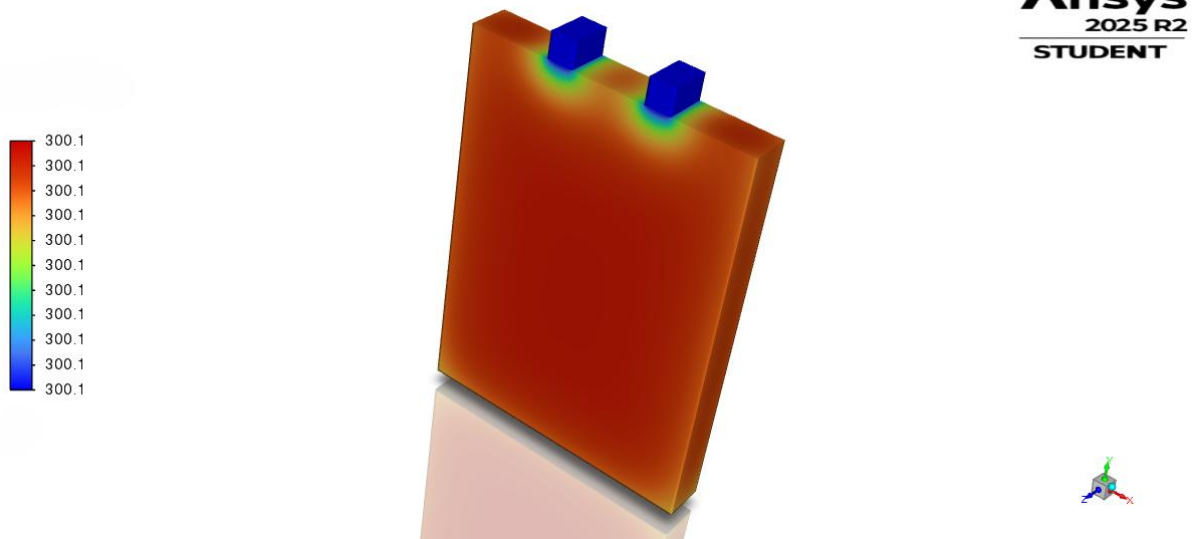
(\*) Valor arbitrado para temperatura inicial da simulação.

**Fonte: Autoria própria (2025)**

## 4.2 Distribuição de temperatura

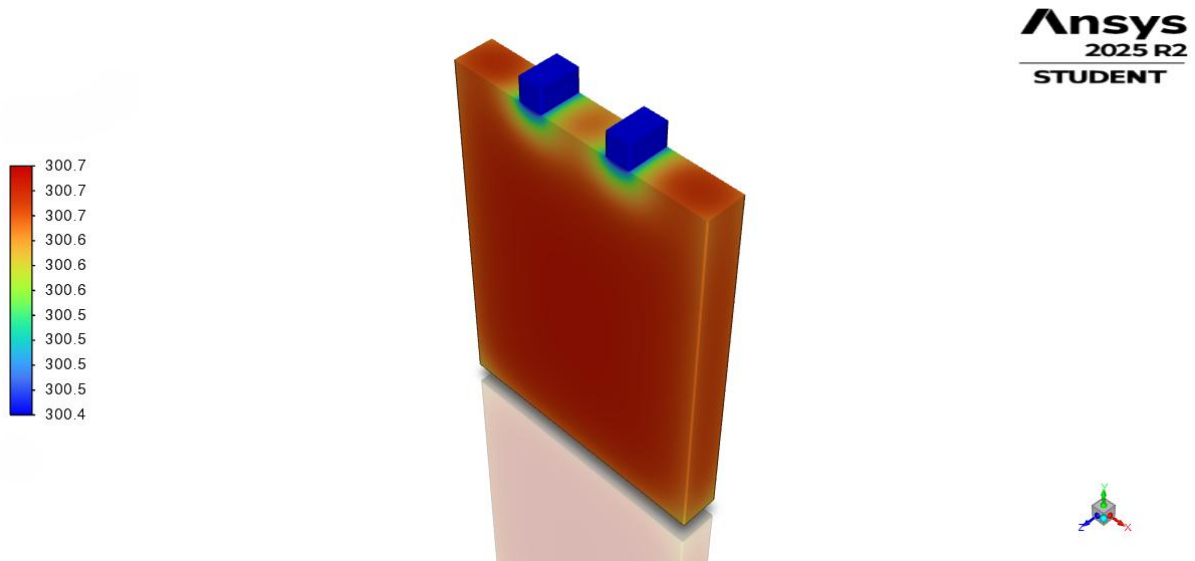
A seguir, são expostos os resultados obtidos na simulação para diferentes valores de corrente. As figuras 20, 21, 22 e 23 ilustram a distribuição de temperatura na superfície do módulo, possibilitando a visualização das regiões mais aquecidas. Na sequência, no Gráfico 3, é possível observar os valores máximos de temperatura obtidos nos testes para cada uma das correntes utilizadas.

Figura 20: Distribuição de temperatura para 10 A.



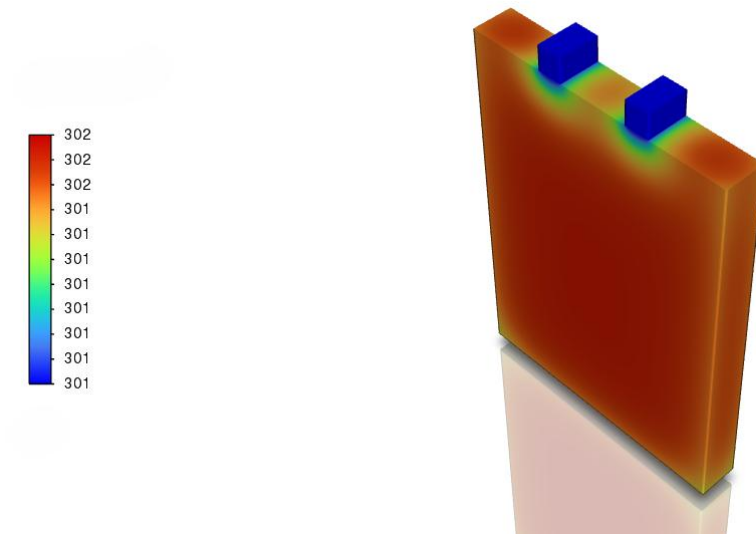
Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 21: Distribuição de temperatura para 20 A.



Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 22: Distribuição de temperatura para 30 A.

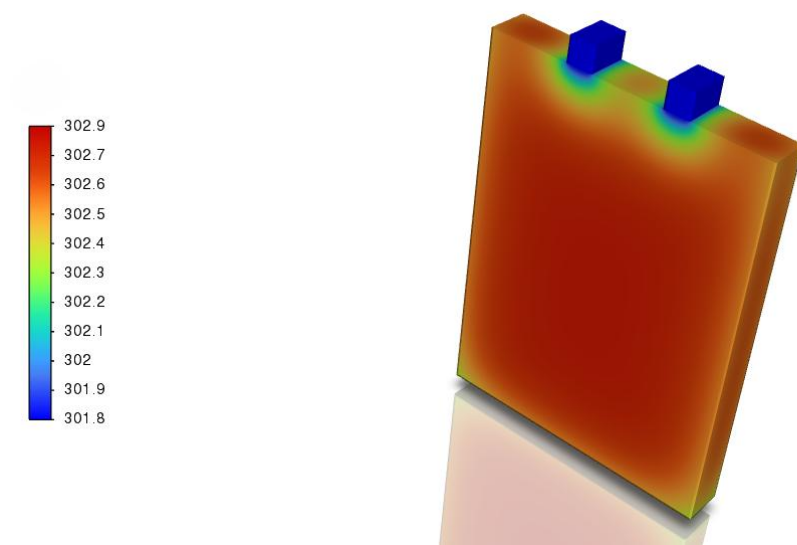


**Ansys**  
2025 R2  
STUDENT



Fonte: Autoria própria (2025)

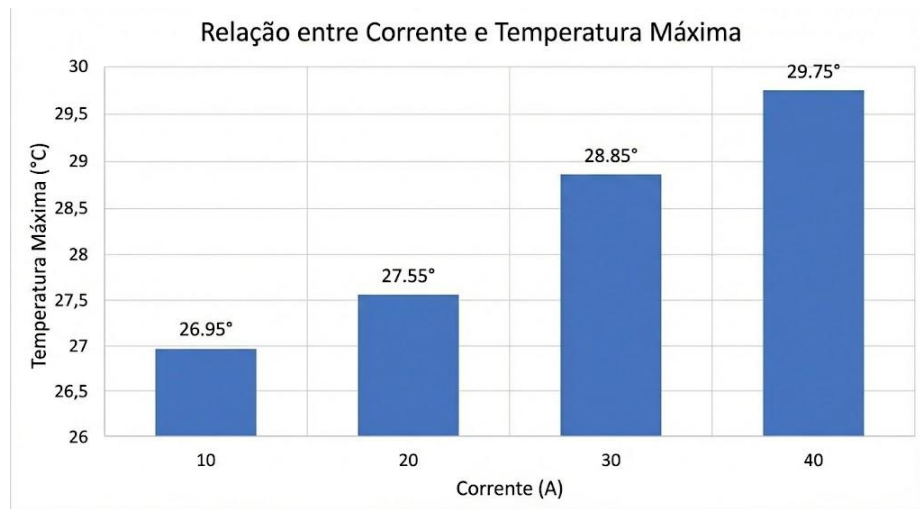
Figura 23: Distribuição de temperatura para 40 A.



**Ansys**  
2025 R2  
STUDENT



Fonte: Autoria própria (2025)

**Gráfico 3: Relação entre corrente e temperatura máxima.**

**Fonte: Autoria própria (2025)**

A partir das imagens expostas é possível visualizar que não houve discrepâncias de temperatura entre os diferentes cenários. De modo geral, o aquecimento do módulo manteve-se baixo, mesmo na corrente mais alta, esse comportamento estável pode ser explicado pelo estado de saúde do módulo de 93%.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo central o desenvolvimento e a validação de um modelo computacional capaz de prever o comportamento térmico de módulos de baterias de segunda vida, visando fundamentar sua reutilização segura em sistemas de armazenamento de energia.

A metodologia proposta, que integrou a caracterização experimental (HPPC), o equacionamento do circuito, o tratamento matemático de dados e a simulação numérica, demonstrou-se satisfatória. A comparação entre os resultados obtidos na prática e os resultados obtidos através do *software* ANSYS revelou boa correlação entre os dados, com um erro inferior a 3% para a temperatura final no cenário de validação.

Portanto, conclui-se que a ferramenta de simulação utilizada tem grande potencial, pois permite prever o comportamento térmico sob diferentes condições de operação. Com isso, é possível trabalhar com cenários mais complexos, possibilitando acompanhar a resposta do sistema e a viabilização técnica e segura da utilização de baterias de segunda vida em aplicações estacionárias.

## REFERÊNCIAS

CHEN, S.; CHEN, Z.; LIU, Z. Preparation and application of lithium batteries, nickel-hydrogen batteries and nickel-cadmium batteries. *Applied and Computational Engineering*, v. 23, 2023. DOI: 10.54254/2755-2721/23/20230612.

CORRÊA, Paulo Henrique Strauss. Estimação do Estado de Carga (SoC) e do Estado de Saúde (SoH) por filtro de Kalman estendido considerando a perda de capacidade em baterias de veículos elétricos e híbridos. 2025. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2025.

DINI, P.; COLICELLI, A.; SAPONARA, S. Review on modeling and soc/soh estimation of batteries for automotive applications. *Batteries*, v. 10, n. 1, p. 34, 2024.

FONT, C. H. I. et al. Second Life of Lithium-Ion Batteries of Electric Vehicles: A Short Review and Perspectives. *Energies*, v. 16, n. 2, p. 953, jan. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en16020953>.

KIM, T. et al. Lithium-ion batteries: outlook on present, future, and hybridized technologies. *Journal of Materials Chemistry A*, v. 7, n. 7, p. 2942–2964, 2019.

LAI, X.; ZHENG, Y.; SUN, T. A comparative study of different equivalent circuit models for estimating state-of-charge of lithium-ion batteries. *Electrochimica Acta*, v. 259, p. 566-577, 2018. DOI: 10.1016/j.electacta.2017.10.153.

LI, F. et al. Analysis and Verification of Equivalent Circuit Model of Soft-Pack Lithium Batteries. *Energies*, v. 18, n. 3, p. 510, jan. 2025. DOI: 10.3390/en18030510.

LIU, H. et al. Thermal issues about Li-ion batteries and recent progress in battery thermal management systems: A review. *Energy Conversion and Management*, v. 150, p. 304–330, out. 2017.

MAY, G. J.; DAVIDSON, A.; MONAHOV, B. Lead batteries for utility energy storage: A review. *Journal of Energy Storage*, v. 15, p. 145-157, 2018.

MORA-PAZ, J. High-order transient multidimensional simulation of a thermo-electro-chemo-mechanical model for Lithium-ion batteries. *ArXiv*, abs/2403.16928, 2024. DOI: 10.48550/arxiv.2403.16928.

NAZARI, A.; FARHAD, S. Heat generation in lithium-ion batteries with different nominal capacities and chemistries. *Applied Thermal Engineering*, v. 125, p. 1501-1517, 2017. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.07.126.

OLABI, A. G. et al. Rechargeable batteries: technological advancement, challenges, current and emerging applications. *Energy*, v. 266, p. 126408, 2023.

PENG, P.; JIANG, F. Thermal safety of lithium-ion batteries with various cathode materials: A numerical study. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 103, p. 1008–1016, dez. 2016.

ROMMEL, F. J. Determinação das características térmicas de um pack de baterias de lítio por meio de simulação multifísica. 2023. Dissertação (Mestrado em Física e Astronomia) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2023.

SIMIC, Z.; TOPIĆ, D.; KNEŽEVIĆ, G.; PELIN, D. Battery energy storage technologies overview. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, v. 12, p. 53-65, 2021. DOI: 10.32985/ijeces.12.1.6.

WHITTINGHAM, M. S. History, evolution, and future status of energy storage. *Proceedings of the IEEE*, v. 100, n. Special Centennial Issue, p. 1518–1534, 2012.

**APÊNDICE A - Código implementado no MATLAB**

```
dados = readmatrix('Voc.txt');

a = dados(:,1);
b = dados(:,2);
x = linspace(0, 1, 1000);

% Ajuste de um polinômio de quinto grau aos dados

p = polyfit(a, b, 5); % Obter os coeficientes do polinômio de quinto grau

% Exibir os coeficientes do polinômio
disp('Coeficientes do polinômio de quinto grau:');
disp(p);

% Cálculo dos valores de y ajustados usando a função polyval
y_fit = polyval(p, x);

% Plotagem da curva ajustada
plot(x, y_fit, 'r-', 'LineWidth', 2); % curva ajustada em vermelho
hold on;
plot(a, b, 'ko', 'MarkerFaceColor', 'k'); % pontos originais
grid on;
xlabel('SOC');
ylabel('Voc');
title('Ajuste de Polinômio de Quinto Grau');
legend('Curva Ajustada', 'Pontos Originais');
```