



UFPA

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ (UFPA)  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA (ITEC)  
FACULDADE DE ENGENHARIAS ELÉTRICA E BIOMÉDICA (FEEB)

WALLACE SANTA BRIGIDA OLIVEIRA

**MODELAGEM TÉRMICA DE SUPERCAPACITORES VIA MÉTODO DOS  
ELEMENTOS FINITOS NO SOFTWARE ELMER**

BELÉM  
2025

WALLACE SANTA BRIGIDA OLIVEIRA

**MODELAGEM TÉRMICA DE SUPERCAPACITORES VIA MÉTODO DOS  
ELEMENTOS FINITOS NO SOFTWARE ELMER**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Universidade Federal do Pará (UFPA), como pré-  
requisito para a obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia Elétrica.

Orientador(a): Prof. Reinaldo Correa Leite.

BELÉM  
2025

WALLACE SANTA BRIGIDA OLIVEIRA

MODELAGEM TÉRMICA DE SUPERCAPACITORES VIA MÉTODO DOS  
ELEMENTOS FINITOS NO SOFTWARE ELMER

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Universidade Federal do Pará (UFPA), como pré-  
requisito para a obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia Elétrica.

Data da aprovação: 16/09/2025

Conceito: EXCELENTE (E)

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Reinaldo Correa Leite.

---

Prof. Dr. Allan Manito

---

Prof. Dr. Thiago Mota Soares

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus, pelo dom da vida, pela força e pela sabedoria concedidas em cada etapa desta jornada, me permitindo superar os desafios e alcançar esta conquista.

À Nossa Senhora de Nazaré, por ter intercedido tantas vezes por mim e me ajudado nesta jornada.

Aos meus pais, pelo amor incondicional, paciência, apoio e por me guiarem sempre lembrando do meu objetivo.

A todos que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a concretização deste trabalho, deixo registrado meu sincero reconhecimento e gratidão.

## RESUMO

O presente trabalho investiga o comportamento térmico de supercapacitores por meio de modelagem tridimensional utilizando o Método dos Elementos Finitos (FEM) no software Elmer. A pesquisa parte da relevância da gestão térmica para a confiabilidade e a vida útil desses dispositivos, que, embora apresentem elevada densidade de potência e longa durabilidade, são fortemente impactados pela dissipação de calor interno. Para tanto, foi construída uma geometria paramétrica no Gmsh, representando a estrutura empilhada típica de supercapacitores, composta por coletores de alumínio, eletrodos de carbono ativado e separadores de polietileno. Foram simulados diferentes números de camadas (2, 10, 30, 50), além de variações nas condições de contorno, geração interna de calor e espessura do separador. Os resultados demonstraram que a dissipação térmica apresenta comportamento cumulativo ao longo dos ciclos de carga e descarga, favorecendo a formação de pontos quentes. A elevação da temperatura ambiente e a redução da convecção intensificaram o superaquecimento, enquanto o resfriamento mais eficiente mitigou o acúmulo térmico. Adicionalmente, maiores taxas de geração de calor e aumento da espessura do separador elevaram os gradientes internos, ao passo que reduções na geração contribuíram para temperaturas médias mais baixas. Conclui-se que a modelagem térmica via FEM é uma ferramenta eficaz para prever a distribuição de calor em supercapacitores, permitindo identificar condições críticas de operação e subsidiar estratégias de gerenciamento térmico para ampliar a confiabilidade e a vida útil dos dispositivos.

**Palavras-chave:** Supercapacitores; Modelagem térmica; Método dos Elementos Finitos; Elmer; Dissipação de calor.

## ABSTRACT

This work investigates the thermal behavior of supercapacitors through three-dimensional modeling using the Finite Element Method (FEM) in the Elmer software. The research stems from the relevance of thermal management to ensure the reliability and lifetime of these devices, which, although characterized by high power density and long durability, are strongly affected by internal heat dissipation. A parametric geometry was built in Gmsh to represent the typical stacked structure of supercapacitors, consisting of aluminum current collectors, activated carbon electrodes, and polyethylene separators. Simulations were performed with different numbers of layers (2, 10, 30, 50), as well as variations in boundary conditions, internal heat generation, and separator thickness. Results showed that thermal dissipation exhibits a cumulative behavior throughout charge and discharge cycles, favoring the formation of hot spots. Increased ambient temperature and reduced convection intensified overheating, while more efficient cooling mitigated thermal accumulation. In addition, higher heat generation rates and increased separator thickness raised internal gradients, whereas reduced generation contributed to lower average temperatures. It is concluded that FEM-based thermal modeling is an effective tool to predict heat distribution in supercapacitors, enabling the identification of critical operating conditions and supporting thermal management strategies to improve device reliability and lifetime.

**Keywords:** Supercapacitors; Thermal modeling; Finite Element Method; Elmer; Heat dissipation.

## Sumário

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>11</b>
1.1. Contextualização do tema.....	11
1.2. Relevância do tema .....	11
1.3. Objetivos .....	12
1.3.1. Geral .....	12
1.3.2. Específicos.....	12
1.4. Estrutura de trabalho.....	12
<b>2. REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>14</b>
2.1. Princípios de funcionamento dos supercapacitores .....	14
2.2. Condução de calor .....	16
2.2.1. Lei de Fourier.....	17
2.2.2. Tipos de condições de contorno .....	20
2.3. Métodos numéricos: Introdução ao Método dos Elementos Finitos (FEM).....	22
2.4. O software Elmer .....	22
2.4.1. Estrutura e funcionamento .....	22
2.4.2. Módulos principais .....	23
<b>3. METODOLOGIA</b> .....	<b>24</b>
3.1. Descrição geral da abordagem .....	24
3.2. Construção da geometria e geração da malha .....	25
3.3. Propriedades térmicas dos materiais .....	27
3.3.1. Condições de contorno e simulação .....	28
3.3.2. Configuração do tempo e solver .....	28
3.3.3. Condições iniciais .....	28
3.3.4. Geração interna de calor .....	28
3.3.5. Condições térmicas de contorno.....	31
3.3.6. Propriedades materiais e corpos .....	31
3.4. Modelos simulados .....	31
3.5. Ferramentas computacionais.....	32
<b>4. ANÁLISE DE SIMULAÇÕES</b> .....	<b>34</b>
4.1. Caso padrão .....	34
4.2. Variações de ambiente.....	38
4.2.1. Ambiente aquecido .....	38
4.2.2. Ambiente refrigerado .....	41
4.3. Variações de geração de calor.....	44

4.3.1. Geração aumentada .....	44
4.3.2. Geração reduzida .....	47
4.4. Variação de espessura.....	50
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>54</b>
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>56</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Propriedades dos dispositivos armazenadores de energia.....	14
Tabela 3.1: Propriedades térmicas dos materiais utilizados na simulação.....	27

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Circuito representativo da resistência interna do supercapacitor .....	16
Figura 3.1: Perfil simplificado da área central para n camadas .....	24
Figura 3.2: Captura da geometria no Gmsh para o modelo com 2 camadas .....	25
Figura 3.3: Captura da superfície BASE no Gmsh para o modelo com 2 camadas ..	26
Figura 3.4: Captura da malha gerada no Gmsh para o modelo com 2 camadas .....	27
Figura 4.1: Corte longitudinal do modelo padrão 2 camadas em 19s .....	37
Figura 4.2: Parcial do corte longitudinal do modelo padrão 10 camadas em 19s .....	37
Figura 4.3: Parcial do corte longitudinal do modelo padrão 30 camadas em 19s .....	37
Figura 4.4: Parcial do corte longitudinal do modelo padrão 50 camadas em 19s .....	38
Figura 4.5: Parcial do corte longitudinal do modelo aquecido — 10 camadas em 19s .....	40
Figura 4.6: Parcial do corte longitudinal no modelo resfriado - 10 camadas em 19s .....	43
Figura 4.7: Parcial do corte longitudinal na geração aumentada - 10 camadas em 19s .....	46
Figura 4.8: Parcial do corte longitudinal na geração reduzida - 10 camadas em 19s .....	49
Figura 4.9: Parcial do corte longitudinal na espessura duplicada - 10 camadas em 19s .....	52

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 4.1: Variação da temperatura ao longo do tempo – 2 camadas padrão.....	34
Gráfico 4.2: Variação da temperatura média ao longo do tempo - Padrão.....	36
Gráfico 4.3: Proximidade das curvas na variação da temperatura média ao longo do tempo - Padrão.....	36
Gráfico 4.4: Variação da temperatura ao longo do tempo – 2 camadas ambiente aquecido.....	39
Gráfico 4.5: Variação da temperatura média ao longo do tempo – Modelo aquecido.....	40
Gráfico 4.6: Variação da temperatura ao longo do tempo – 2 camadas ambiente refrigerado.....	42
Gráfico 4.7: Variação da temperatura média ao longo do tempo – Ambiente refrigerado.....	43
Gráfico 4.8: Comparativo das variações de ambiente em relação a temperatura média ao longo do tempo – 2 camadas .....	44
Gráfico 4.9: Variação da temperatura ao longo do tempo – 2 camadas geração aumentada .....	45
Gráfico 4.10: Variação da temperatura média ao longo do tempo – Geração aumentada .....	46
Gráfico 4.11: Variação da temperatura ao longo do tempo – 2 camadas geração reduzida .....	47

Gráfico 4.12: Variação da temperatura média ao longo do tempo – Geração reduzida .....	48
Gráfico 4.13: Comparativo das variações de geração em relação a temperatura média ao longo do tempo – 2 camadas .....	50
Gráfico 4.14: Variação da temperatura ao longo do tempo – 2 camadas espessura duplicada .....	51
Gráfico 4.15: Variação da temperatura média ao longo do tempo – Espessura duplicada .....	52
Gráfico 4.16: Variação da temperatura média ao longo do tempo de todas as simulações – 2 camadas .....	53

## **1. INTRODUÇÃO**

### **1.1. Contextualização do tema**

O avanço tecnológico e a crescente demanda por sistemas de armazenamento de energia de alta eficiência têm impulsionado o desenvolvimento de dispositivos capazes de aliar elevada densidade de potência, rápida resposta e longa vida útil. Nesse contexto, os supercapacitores destacam-se como dispositivos de armazenamento de energia que combinam características presentes tanto em capacitores convencionais quanto em baterias, apresentando elevada densidade de potência, rápida resposta e longa vida útil. Essas propriedades os tornam especialmente vantajosos em aplicações que exigem ciclos rápidos de carga e descarga, como veículos elétricos, sistemas de frenagem regenerativa, fontes ininterruptas de energia (UPS) e dispositivos eletrônicos portáteis (BURKE, 2000), sendo a aplicação em veículos elétricos um campo de estudo ativo inclusive no cenário nacional (OLIVEIRA, 2015).

Apesar de sua robustez elétrica, o desempenho e a durabilidade dos supercapacitores estão diretamente relacionados à sua estabilidade térmica. A dissipação de calor gerado internamente influencia não apenas a eficiência energética, mas também a integridade estrutural dos materiais constituintes. A presença de gradientes de temperatura elevados ou de regiões de superaquecimento (pontos quentes) pode acelerar processos de degradação e reduzir a vida útil do dispositivo (GUALOUS et al., 2003).

Estudos anteriores reforçam essa relação entre desempenho e comportamento térmico. Schiffer et al. (2006) destacaram o impacto da temperatura no processo de carga, enquanto Marcano et al. (2006) abordaram estratégias de gerenciamento térmico. Dandeville et al. (2013) aplicaram modelos térmicos em veículos elétricos, e Lajnef et al. (2014) analisaram técnicas de resfriamento em dispositivos comerciais. Mais recentemente, Li et al. (2018) confirmaram a relevância da modelagem térmica para a confiabilidade dos supercapacitores.

### **1.2. Relevância do tema**

Modelos clássicos de análise, como os circuitos equivalentes, são úteis para estudos elétricos, mas apresentam limitações ao representar fenômenos térmicos internos, pois não capturam a distribuição espacial de temperatura nem a formação

de pontos quentes. Nesse sentido, o Método dos Elementos Finitos (FEM) apresenta vantagens significativas, permitindo avaliar a influência da geometria, dos materiais e das condições de operação diretamente. Essa abordagem é particularmente relevante em um cenário de crescente integração dos supercapacitores em sistemas de alta potência, nos quais a robustez térmica é essencial (LI et al., 2018), sendo a gestão térmica um campo de pesquisa contínuo e de grande importância, como destacado em revisões recentes da área (ZHOU et al., 2023) e objeto de estudo em aplicações de alta potência na comunidade científica brasileira (VOLPATO; GRUN; WALTRICH, 2017).

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1. Geral**

Estudar o comportamento térmico de supercapacitores por meio de simulação computacional baseada em elementos finitos utilizando o software Elmer, avaliando os efeitos de diferentes condições estruturais e operacionais sobre a distribuição de temperatura.

#### **1.3.2. Específicos**

- i. Implementar a modelagem paramétrica da geometria tridimensional no software Gmsh;
- ii. Simular diferentes números de camadas empilhadas, representando variações construtivas do dispositivo;
- iii. Avaliar o impacto da espessura do separador na dissipação de calor;
- iv. Analisar a influência da temperatura ambiente e do coeficiente de troca térmica convectiva;
- v. Investigar o efeito da variação da geração interna de calor, associada a diferentes regimes de corrente;
- vi. Comparar a evolução temporal e espacial da temperatura, identificando pontos quentes e regiões críticas.

### **1.4. Estrutura de trabalho**

Este trabalho está organizado da seguinte forma:

- i. **Capítulo 2 – Referencial Teórico:** apresenta os conceitos fundamentais sobre supercapacitores, mecanismos de condução de calor, condições de contorno, introdução ao Método dos Elementos Finitos (FEM) e uma descrição do software Elmer;
- ii. **Capítulo 3 – Metodologia:** descreve a construção da geometria e da malha, as propriedades dos materiais, as condições de contorno adotadas e o planejamento das simulações;
- iii. **Capítulo 4 – Análise de Simulações:** discute os resultados obtidos, comparando diferentes cenários de temperatura ambiente, geração de calor, espessura de separador e número de camadas;
- iv. **Capítulo 5 – Conclusão:** sintetiza as principais contribuições do estudo e apresenta sugestões para trabalhos futuros.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1. Princípios de funcionamento dos supercapacitores

Supercapacitores (ou ultracapacitores) são dispositivos de armazenamento de energia elétrica que se destacam pela alta densidade de potência, eficiência em ciclos de carga/descarga e longa vida útil. Sua estrutura básica inclui dois eletrodos condutores (geralmente de materiais porosos como carvão ativado ou grafeno) imersos em um eletrólito e separados por um material poroso, permitindo alta acumulação de cargas devido à grande área superficial (CONWAY,1999).

Os supercapacitores armazenam energia através de dois principais mecanismos:

- i. Capacitância de dupla camada elétrica (EDLC – Electric Double Layer Capacitance):

Esse fenômeno ocorre na interface entre o eletrodo condutor e o eletrólito, onde íons de carga oposta se acumulam, formando uma "dupla camada" de carga. Essa camada é puramente eletrostática, sem transferência de elétrons ou reações químicas, o que permite uma resposta extremamente rápida.

- ii. Capacitância pseudocapacitiva:

Neste caso, há reações eletroquímicas reversíveis superficiais, como dopagem ou oxirredução, que contribuem para o armazenamento de carga adicional. Materiais como óxidos metálicos (ex:  $\text{MnO}_2$ ,  $\text{RuO}_2$ ) ou polímeros condutores são empregados nesse tipo de supercapacitor.

A combinação de ambos os mecanismos resulta nos chamados supercapacitores híbridos, que visam maximizar tanto a densidade de energia quanto a de potência (SIMON; GOGOTSI,2008, p. 845-854).

Tabela 2.1: Propriedades dos dispositivos armazenadores de energia

Propriedade	Capacitor	Supercapacitor	Bateria
Densidade de energia	Baixa	Média	Alta
Densidade de potência	Alta	Muito alta	Média
Tempo de carga	Muito rápido	Rápido	Lento
Ciclos de vida	>1 milhão	500 mil – 1 milhão	500 – 2 mil
Mecanismo de carga	Eletrostático	Eletrostático / Eletroquímico	Eletroquímico

Fonte: Elaborada pelo autor

Como mostra a tabela 2.1, os supercapacitores se posicionam entre capacitores convencionais e baterias. São ideais para aplicações que exigem picos rápidos de potência e alta durabilidade, como frenagem regenerativa em veículos elétricos, sistemas UPS (Uninterruptible Power Supply), e dispositivos eletrônicos portáteis.

Para prever o comportamento do supercapacitor e otimizar seu gerenciamento, diversos modelos foram desenvolvidos. A modelagem precisa é fundamental, pois o desempenho e a vida útil do dispositivo são fortemente influenciados por fatores elétricos e térmicos. De acordo com a revisão de Zhang et al. (2018), os modelos de supercapacitores podem ser classificados em quatro categorias principais:

i. Modelos Eletroquímicos

Baseados em equações diferenciais parciais que descrevem os processos físicos e químicos internos, como a difusão de íons e a formação da dupla camada elétrica. São modelos de alta fidelidade, mas sua complexidade e alto custo computacional os tornam mais adequados para o projeto e a análise de materiais do que para simulações de sistemas em tempo real;

ii. Modelos de Circuito Equivalente (ECM - Equivalent Circuit Models)

São os mais utilizados em aplicações de engenharia por seu baixo custo computacional e facilidade de implementação. Eles utilizam uma combinação de componentes elétricos (resistores e capacitores) para simular o comportamento dinâmico do supercapacitor. O modelo clássico, também descrito por Fornaro et al. (2016), representa o supercapacitor por um circuito simples, frequentemente chamado de modelo de três ramos, composto por:

- a) Uma capacitância principal (C), que representa o armazenamento de energia.
- b) Uma resistência série equivalente (ESR), que modela as perdas ôhmicas imediatas durante a carga e descarga.
- c) Um ou mais ramos RC em paralelo para simular a redistribuição de carga e os processos de difusão lenta no interior dos eletrodos porosos. Uma resistência paralela também pode ser incluída para representar a corrente de fuga e a autodescarga.

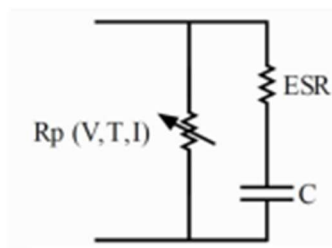


Figura 2.1: Circuito representativo da resistência interna do supercapacitor

Fonte: FORNARO et al. (2016)

### iii. Modelos Inteligentes

Utilizam algoritmos de inteligência artificial, como redes neurais e lógica fuzzy, para modelar o comportamento do supercapacitor a partir de dados experimentais. Embora possam atingir alta precisão, exigem grandes volumes de dados para treinamento e seu comportamento pode ser imprevisível fora das condições testadas;

### iv. Modelos de Ordem Fracionária

Empregam cálculo de ordem fracionária para descrever com maior precisão a dinâmica complexa dos processos de difusão nos eletrodos porosos, oferecendo um balanço entre a precisão dos modelos eletroquímicos e a simplicidade dos ECMs (ZHANG et al., 2018).

Para a análise térmica deste trabalho, a dissipação de calor por efeito Joule na resistência interna é o fator preponderante. Nesse contexto, o modelo de circuito equivalente fornece uma representação eficaz e simplificada das perdas internas, sendo fundamental para quantificar a geração de calor que impacta o comportamento térmico do dispositivo.

## 2.2. Condução de calor

A condução de calor é o principal mecanismo de transporte térmico em meios sólidos e ocorre devido à interação entre partículas adjacentes, como átomos ou moléculas, sem movimento macroscópico do material. No caso de supercapacitores, o calor gerado internamente devido à dissipação resistiva (efeito Joule) é transmitido principalmente por condução através dos eletrodos, separadores e encapsula. A condução de calor é o principal mecanismo de transporte térmico no interior dos supercapacitores, ocorrendo através dos materiais sólidos, como coletores metálicos, eletrodos porosos e separadores poliméricos. Nessa etapa, a energia térmica gerada

internamente devido ao efeito Joule é transmitida por interação entre partículas adjacentes (átomos ou moléculas), sem movimento macroscópico de massa.

Entretanto, quando essa energia atinge a parede externa (invólucro), o mecanismo predominante de troca térmica com o ambiente passa a ser a convecção, seja natural ou forçada, em função das condições do meio externo (ÇENGEL; GHAJAR, 2020). A irradiação também contribui para a dissipação, porém em menor escala, e neste trabalho será desconsiderada para simplificação da modelagem.

Dessa forma, o comportamento térmico do supercapacitor pode ser dividido em duas etapas principais:

- i. Condução interna: responsável pela propagação de calor entre as diferentes camadas do dispositivo;
- ii. Convecção externa: responsável pela transferência de calor da superfície do supercapacitor para o meio ambiente.

### 2.2.1. Lei de Fourier

A Lei de Fourier é a base da condução de calor em meios contínuos e estabelece que o fluxo de calor é proporcional ao gradiente de temperatura no meio. INCROPERA et al. (2017) cita que na forma vetorial tridimensional, ela é expressa como:

$$\vec{q} = -k\nabla T \quad (2.1)$$

Onde:

- i.  $\vec{q}$  é o vetor densidade de fluxo de calor [ $\text{W}/\text{m}^2$ ];
- ii.  $k$  é a condutividade térmica do material [ $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ ];
- iii.  $\nabla T$  é o gradiente de temperatura [ $\text{K}/\text{m}$ ];
- iv. O sinal negativo indica que o calor flui da região de maior para a de menor temperatura.

E para a condução de calor em um meio tridimensional com geração interna de calor a forma geral da equação é:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k\nabla T) + Q \quad (2.2)$$

Onde:

- i.  $\rho$  é a densidade do material [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ];
- ii.  $c_p$  é o calor específico a pressão constante [ $\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$ ];
- iii.  $T$  é a temperatura [ $\text{K}$ ];
- iv.  $t$  é o tempo [ $\text{s}$ ];
- v.  $Q$  é a taxa de geração volumétrica de calor [ $\text{W}/\text{m}^3$ ];
- vi.  $\nabla \cdot (k\nabla T)$  representa a difusão de calor no meio.

Essa equação representa o balanço de energia dentro de um volume infinitesimal,

A geração de calor em um supercapacitor é um fenômeno complexo, originado por múltiplos mecanismos. De forma geral, as fontes de calor podem ser divididas em duas categorias principais: irreversíveis e reversíveis.

- i. Fontes de calor irreversível estão associadas principalmente às perdas ôhmicas, resultantes da passagem da corrente elétrica pela resistência interna do dispositivo (ESR). Este é o conhecido efeito Joule, que é sempre dissipativo (gera calor), independentemente da direção da corrente. Incluem também o calor gerado por outros processos de perda, como a polarização dos eletrodos;
- ii. Fontes de calor reversível estão ligadas a mudanças na entropia do sistema durante os processos de carga e descarga, como a adsorção e dessorção de íons na interface eletrodo-eletrólito. Diferente do efeito Joule, este componente pode tanto gerar quanto absorver calor, dependendo da direção da corrente e do estado de carga do dispositivo.

Em aplicações com altas correntes, o efeito Joule é a principal fonte de calor, superando o componente entrópico.

O componente entrópico está associado às variações de entropia que ocorrem durante os processos de adsorção e dessorção de íons na interface eletrodo-eletrólito. Diferente do efeito Joule, que é sempre dissipativo, o componente entrópico pode tanto liberar calor (quando a entropia diminui) quanto absorvê-lo (quando a entropia aumenta), dependendo da direção da corrente e do estado de carga do dispositivo (RAHIMI-ESBOUEI; GUALOUS et al., 2003).

Por isso, este trabalho simplifica a análise e considera apenas o efeito Joule como a fonte de calor interna. Essa abordagem é comum em engenharia e permite uma avaliação robusta do comportamento térmico sem a complexidade adicional dos fenômenos entrópicos.

Assim, a potência térmica dissipada devido a essa fonte de calor pode ser expressa por:

$$P = I^2 \cdot R \quad (2.3)$$

Onde:

- i.  $P$  é a potência térmica dissipada [W];
- ii.  $I$  é a intensidade da corrente elétrica aplicada [A];
- iii.  $R$  é a resistência interna [ $\Omega$ ].

Para utilizar essa potência em uma simulação de volume contínuo, ela precisa ser convertida para uma forma volumétrica:

$$q''' = \frac{P}{V} \quad (2.4)$$

Onde:

- i.  $P$  é a potência térmica dissipada [W];
- ii.  $V$  é volume da região onde o calor é dissipado [ $m^3$ ];
- iii.  $q'''$  é a densidade volumétrica da potência térmica, ou seja, é o termo  $Q$  da equação geral da condução de calor.

No caso de operação em corrente contínua (DC), a dissipação volumétrica de calor é constante no tempo e pode ser definida como:

$$Q_0 = \frac{P}{V} = \frac{I^2 R}{V} \quad (2.5)$$

Onde:

- i.  $Q_0$  é a densidade volumétrica de geração de calor [ $W/m^3$ ];
- ii.  $P$  é a potência térmica dissipada [W];
- iii.  $I$  é a intensidade da corrente elétrica aplicada [A];
- iv.  $R$  é a resistência série equivalente [ $\Omega$ ];
- v.  $V$  é o volume da região onde o calor é dissipado [ $m^3$ ].

Assim, a equação final utilizada nas simulações transientes será:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q_0 \quad (2.6)$$

Dessa forma é possível obter a evolução temporal e espacial da temperatura dentro do supercapacitor ao longo de seu ciclo de operação (LI, Y. et al., 2018, p. 112-120).

### 2.2.2. Tipos de condições de contorno

Para resolver a equação da condução de calor, é necessário definir condições de contorno (ÇENGEL; GHAJAR,2020). As mais comuns são:

i. Condição de Dirichlet

Define a temperatura diretamente em uma superfície:

$$T = T_0 \quad em \Gamma_D \quad (2.7)$$

Onde:

- a)  $T$  é a temperatura no domínio [K];
  - b)  $T_0$  é o valor fixo que a variável  $T$  deve assumir na região do contorno [K];
  - c)  $\Gamma_D$  é a porção do contorno onde a condição de Dirichlet é aplicada.
- ii. Condição de Neumann

Define o fluxo de calor normal à superfície (ÇENGEL; GHAJAR,2020):

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = q_n \quad em \Gamma_N \quad (2.8)$$

Onde:

- a)  $k$  é a condutividade térmica [W/(m·K)];
  - b)  $\frac{\partial T}{\partial n}$  é o gradiente da temperatura na direção normal ao contorno;
  - c)  $q_n$  é o fluxo térmico aplicado [W/m<sup>2</sup>];
  - d)  $\Gamma_N$  é a porção do contorno onde a condição de Neumann é aplicada;
  - e) O sinal negativo indica que o calor flui de regiões mais quentes para mais frias.
- iii. Condição convectiva (Robin)

Representa a troca de calor com o ambiente por convecção (ÇENGEL; GHAJAR,2020):

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h(T - T_\infty) \quad em \Gamma_R \quad (2.9)$$

Onde:

- a)  $k$  é a condutividade térmica [W/(m·K)];
- b)  $\frac{\partial T}{\partial n}$  é o gradiente da temperatura na direção normal ao contorno;
- c)  $h$  é o coeficiente de transferência de calor por convecção [W/m<sup>2</sup>·K];
- d)  $T$  é a temperatura na superfície [K];
- e)  $T_\infty$  é a temperatura do ambiente externo [K];
- f)  $h(T - T_\infty)$  é o fluxo de calor por convecção;

- g)  $\Gamma_R$  é a porção do contorno onde a condição de Robin é aplicada;
- h) O sinal negativo indica que o calor flui de regiões mais quentes para mais frias.

Essas condições são essenciais para simular o comportamento térmico de dispositivos reais. No caso dos supercapacitores, a aplicação dessas condições deve levar em conta a natureza estrutural complexa do dispositivo. Devido à sua construção empilhada, que consiste em camadas alternadas de diferentes materiais (coletores de corrente, eletrodos, separador), o supercapacitor exibe um comportamento térmico anisotrópico. Isso significa que a condutividade térmica do conjunto não é um valor único, mas depende da direção do fluxo de calor.

Conforme detalhado por Li et al. (2018), podemos analisar a condução de calor em duas direções principais:

- i. Condução perpendicular às camadas

Quando o calor flui através da espessura do dispositivo, ele encontra os diferentes materiais dispostos em série. Nessa direção, a resistência térmica total é a soma das resistências de cada camada. Materiais com baixa condutividade, como o separador de polietileno, atuam como barreiras, resultando em uma baixa condutividade térmica efetiva para o conjunto.

- ii. Condução paralela às camadas

Quando o calor flui ao longo do plano das camadas (por exemplo, do centro para as bordas), os materiais estão dispostos em paralelo. Neste caso, o fluxo de calor tende a seguir o caminho de menor resistência, que é predominantemente através dos materiais de alta condutividade, como os coletores de corrente de alumínio. Isso resulta em uma condutividade térmica efetiva muito maior nessa direção.

Essa distinção é fundamental, pois o calor gerado internamente nos eletrodos se propagará de maneiras distintas para as superfícies externas do dispositivo, onde a dissipação ocorre. As superfícies externas geralmente estão sujeitas à convecção (natural ou forçada) com o ambiente, enquanto regiões internas podem ser consideradas isoladas ou ter um fluxo de calor prescrito. Portanto, uma modelagem precisa, como a realizada por meio do Método dos Elementos Finitos (FEM), deve considerar essas propriedades direcionais para prever corretamente a formação de gradientes de temperatura e pontos quentes no interior do supercapacitor.

### **2.3. Métodos numéricos: Introdução ao Método dos Elementos Finitos (FEM)**

A equação da condução de calor apresentada anteriormente é uma equação diferencial parcial (EDP) de segunda ordem. Resolver essa equação de forma analítica é possível apenas para casos muito simples e idealizados, com geometria e condições de contorno uniformes (REDDY, 2019). No entanto, dispositivos reais apresentam:

- i. Geometrias complexas;
- ii. Materiais com propriedades distintas em diferentes regiões;
- iii. Condições de contorno não triviais;
- iv. Fontes internas de calor variadas.

O Método dos Elementos Finitos (FEM) é uma técnica numérica popular na engenharia que divide um domínio contínuo em pequenos elementos. Ele converte a equação diferencial do calor em integrais que são resolvidas numericamente, compondo a solução final a partir das respostas de cada elemento. O processo envolve a criação de uma malha seguida da conversão da equação do calor, o cálculo de matrizes e vetores de cada elemento, a agregação em um sistema global, a aplicação de condições de contorno e, por fim, a resolução do sistema para obter a distribuição de temperatura e fluxos de calor (LEWIS et al, 2004).

### **2.4. O software Elmer**

O Elmer é um software de código aberto desenvolvido pelo CSC – IT Center for Science (Finlândia) para resolver equações diferenciais parciais (EDPs) via Método dos Elementos Finitos (FEM). Destaca-se em simulações multifísicas, como condução térmica, escoamento de fluidos, eletromagnetismo e mecânica estrutural, permitindo também acoplamentos entre esses fenômenos (RÅBACK; MALINEN, 2023).

#### **2.4.1. Estrutura e funcionamento**

O Elmer é composto por diversos módulos integrados que permitem ao usuário:

- i. Definir a geometria do domínio de estudo;
- ii. Gerar ou importar a malha computacional;
- iii. Atribuir propriedades físicas aos materiais;
- iv. Especificar condições de contorno e fontes internas;
- v. Selecionar os solvers adequados (térmico, elétrico, mecânico etc.);
- vi. Executar a simulação numérica.

Seu funcionamento segue o fluxo tradicional de softwares baseados em elementos finitos, estruturado em três etapas principais:

i. Pré-processamento

A etapa de preparação do modelo inclui a definição geométrica e geração de malha, que pode ser realizada com ferramentas como ElmerGUI, ElmerGrid ou softwares externos como o Gmsh.

ii. Solver principal (ElmerSolver)

A resolução das EDPs é realizada pelo ElmerSolver, que utiliza métodos numéricos para calcular a solução do sistema montado com base nas propriedades físicas e nas condições de contorno especificadas.

iii. Pós-processamento

Os resultados obtidos podem ser visualizados por ferramentas como o ParaView e ElmerPost.

#### **2.4.2. Módulos principais**

Entre os diversos módulos do Elmer, destacam-se:

- i. HeatSolver na resolução da equação da condução de calor (regimes estacionário ou transiente);
- ii. Electrostatics na análise de campos elétricos e capacitores;
- iii. FluidSolver na simulação de escoamentos de fluidos incompressíveis;
- iv. MeshSolver na atualização da malha em problemas com grandes deslocamentos.

No presente trabalho, o módulo HeatSolver será utilizado para simular a distribuição de temperatura dentro de um supercapacitor tridimensional, considerando as propriedades térmicas dos materiais envolvidos e as condições de dissipação de calor por efeito Joule (CSC, 2025).

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1. Descrição geral da abordagem

O modelo físico adotado neste trabalho baseia-se na estrutura empilhada típica dos supercapacitores, composta por camadas alternadas de eletrodos porosos, separadores e coletores de corrente. Essa configuração foi representada tridimensionalmente, utilizando uma camada unitária que agrega as principais regiões do dispositivo: coletor de corrente inferior (alumínio), eletrodo poroso (carbono ativado), separador (polietileno), outro eletrodo poroso e coletor de corrente superior (LI, Y. et al., 2018, p. 112-120).

Cada célula completa possui espessura total de 350  $\mu\text{m}$ , com as seguintes células e respectivas espessuras:

- i. Coletor de corrente: Alumínio – 30  $\mu\text{m}$ ;
- ii. Eletrodo poroso: Carbono ativado – 120  $\mu\text{m}$  (em cada lado do separador);
- iii. Separador: Polietileno – 50  $\mu\text{m}$ .

As dimensões laterais do modelo foram fixadas em 1 mm  $\times$  1 mm, representando uma seção transversal representativa do supercapacitor. A construção geométrica foi parametrizada para permitir a simulação de múltiplas camadas empilhadas assim variando o número entre 2, 10, 30 e 50, a fim de analisar a influência da espessura total sobre o comportamento térmico do dispositivo.

E para facilitar definições em código utilizou-se da lógica que uma camada é o conjunto de uma célula de eletrodo e uma célula de separador, o gráfico abaixo demonstra essa disposição.

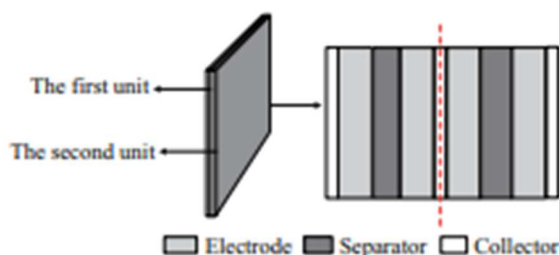


Figura 3.1: Perfil simplificado da área central para n camadas

Fonte: LI, Y. et al. (2018, p. 112-120)

Assim, pela imagem é possível analisar que o supercapacitor de 2 camadas se trata de um supercapacitor simples pois ele possui dois coletores e somente dois eletrodos, o mesmo será usado de forma comparativa com os demais.

As propriedades térmicas de cada material (condutividade, densidade e capacidade térmica) foram definidas conforme dados técnicos, mantendo-se seus valores reais em todas as simulações, sem simplificações. Essa abordagem garantiu maior precisão na análise do comportamento térmico do supercapacitor.

O modelo térmico considerou apenas condução em regime estacionário, ignorando convecção (eletrólito imóvel), radiação e reações químicas. As fontes de calor incluíram efeito Joule e polarização interna, modeladas como fontes volumétricas uniformes nas regiões condutivas. A equação 3D da condução térmica foi resolvida via Método dos Elementos Finitos (software Elmer), proporcionando uma representação realista do comportamento térmico em condições operacionais típicas para análises comparativas.

### 3.2. Construção da geometria e geração da malha

A construção da geometria tridimensional do supercapacitor foi realizada no software Gmsh. Cada modelo foi criado de forma paramétrica, a fim de representar configurações os diferentes números de camadas empilhadas entre 2, 10, 30 e 50 camadas completas.

Para organizar a estrutura em camadas, foi utilizado um laço de repetição (for) no script de construção, onde as cinco regiões de cada camada (coletor, eletrodo, separador, eletrodo, coletor) eram empilhadas sequencialmente ao longo do eixo z. Essa abordagem garantiu que a espessura final total do modelo fosse proporcional ao número de camadas simuladas, mantendo a consistência geométrica entre os casos analisados. A figura 3.2 é um exemplo da geometria gerada pelo Gmsh de forma que a construção dela respeite as espessuras de cada camada.

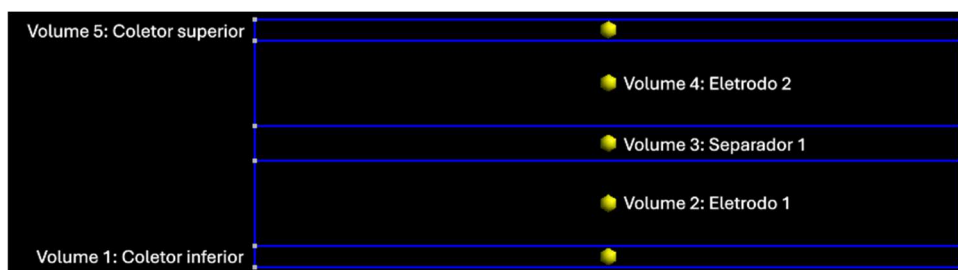


Figura 3.2: Captura da geometria no Gmsh para o modelo com 2 camadas

Fonte: Elaborada pelo autor

A geometria utilizou dimensões fixas de 1 mm × 1 mm, representando uma célula 2D em seção transversal capaz de capturar a condução térmica perpendicular

às camadas. Os volumes e superfícies físicas foram definidos no final do script, permitindo a atribuição de materiais e condições de contorno no Elmer. Cada camada foi identificada numericamente e nominalmente para garantir precisão na modelagem.

As superfícies foram agrupadas para aplicação de condições de contorno térmicas e nomeadas individualmente, como evidente na figura 3.3. Essa segmentação permite aplicar fluxos de calor, isolamentos ou simulações de dissipação térmica conforme a necessidade.

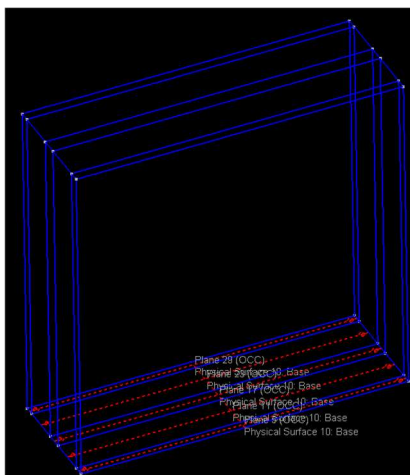


Figura 3.3: Captura da superfície BASE no Gmsh para o modelo com 2 camadas

Fonte: Elaborada pelo autor

Ao final da construção, foi ativada a otimização da malha com suavização e recombinação, visando melhorar a qualidade dos elementos e reduzir distorções. O modelo foi exportado em formato .msh versão 2 e convertido para o formato de malha do Elmer (.mesh) com o utilitário ElmerGrid.

A malha foi construída com elementos do tipo tetraédrico pelo algoritmo Delaunay (Mesh.Algorithm3D = 1), adotando refinamentos distintos para cada região, de modo a assegurar pelo menos três elementos em cada camada fina. Para os coletores de alumínio (30  $\mu\text{m}$ ) foram utilizados elementos de  $\sim 10 \mu\text{m}$ , para os eletrodos de carbono ativado (120  $\mu\text{m}$ )  $\sim 27 \mu\text{m}$ , e para os separadores de polietileno (50  $\mu\text{m}$ )  $\sim 14 \mu\text{m}$ . Esse balanceamento resulta em aproximadamente 3 a 4 elementos por camada, atendendo às recomendações da literatura para garantir boa resolução espacial em simulações térmicas.

Além disso, foram aplicadas 10 iterações de suavização (Mesh.Smoothing = 10) e otimização global de qualidade (Mesh.Optimize = 1), minimizando distorções geométricas e melhorando a relação de aspecto dos elementos. Em um modelo com

2 camadas, o total de elementos ficou em torno de 721.674, aumentando proporcionalmente para os casos de 10, 30 e 50 camadas.

A análise preliminar da malha indicou que mais de 90% dos elementos apresentaram aspect ratio inferior a 3, valor considerado aceitável em problemas de condução térmica tridimensional. Dessa forma, a malha gerada está representada na Figura 3.4, onde equilibra eficiência computacional e precisão numérica, permitindo capturar adequadamente os gradientes de temperatura dentro da estrutura do supercapacitor.

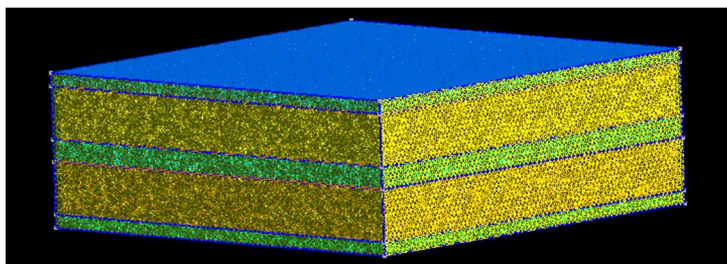


Figura 3.4: Captura da malha gerada no Gmsh para o modelo com 2 camadas

Fonte: Elaborada pelo autor

### 3.3. Propriedades térmicas dos materiais

A simulação térmica do supercapacitor exige a definição precisa das propriedades físicas de cada material envolvido, com foco na condução de calor em regime estacionário. Os parâmetros considerados foram: condutividade térmica ( $\kappa$ ), densidade ( $\rho$ ) e capacidade térmica específica ( $c_p$ ) que compõem a Equação 1.6 de condução de calor já mencionada.

LI, Y. et al (2018, p. 112-120) cita que as propriedades térmicas dos materiais utilizados no modelo estão apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Propriedades térmicas dos materiais utilizados na simulação

Material	Condutividade térmica $k [W/m \cdot K]$	Densidade $\rho [kg/m^3]$	Capacidade térmica específica $c_p [J/kg \cdot K]$
Alumínio	238	2700	900
Carbono ativado	5	700	700
Polietileno	0.38	930	1900

Fonte: LI, Y. et al (2018, p. 112-120)

Os materiais selecionados foram:

- i. Alumínio: Sua alta condutividade térmica, atuando como coletor de corrente e dissipador de calor;
- ii. Carbono ativado: Sua baixa condutividade térmica impõe resistência à condução, utilizado nos eletrodos porosos;
- iii. Polietileno: Possuir propriedades isolantes e baixa condutividade térmica, empregado como separador.

Esses valores foram utilizados diretamente nos arquivos de simulação do Elmer, permitindo uma análise da distribuição de temperatura nas diferentes regiões do dispositivo. A homogeneidade de cada material foi assumida, e eventuais porosidades ou impurezas não foram consideradas nesta etapa do modelo.

### **3.3.1. Condições de contorno e simulação**

A simulação do comportamento térmico do supercapacitor foi realizada com o software Elmer, utilizando o método dos elementos finitos para resolver a equação da condução de calor tridimensional em regime transiente. O processo considerou tanto a geometria tridimensional gerada no Gmsh quanto os parâmetros físicos e operacionais implementados no solver.

### **3.3.2. Configuração do tempo e solver**

A simulação foi configurada como transiente, com integração temporal baseada no método BDF (Backward Differentiation Formula), ordem 1. O intervalo de tempo adotado foi de 0,5 segundos, com um total de 60 intervalos, totalizando 30 segundos simulados. Os resultados foram exportados a cada dois passos de tempo, permitindo observar a evolução térmica do sistema durante dois ciclos completos de carga, autodescarga e descarga.

### **3.3.3. Condições iniciais**

Toda a estrutura foi inicializada a uma temperatura uniforme de 293,15 K (20 °C) simulando uma situação em repouso térmico antes do início da geração de calor no interior do dispositivo (LI, Y. et al 2018, p. 112-120).

### **3.3.4. Geração interna de calor**

A geração de calor nos eletrodos foi modelada como fonte volumétrica dependente do tempo, refletindo um ciclo operativo típico de supercapacitores com

corrente contínua aplicada por janelas de tempo (carga), seguida de autodescarga (corrente quase nula, apenas perdas internas) e descarga (corrente menor que na carga, mas ainda com dissipação ôhmica e perdas de polarização). Essa abordagem por trechos é coerente com a literatura de supercapacitores, que aponta dissipação mesmo fora do regime de carga plena devido a resistência interna e autodissipação (CONWAY, 1999; BURKE, 2000; DANDEVILLE et al., 2013; GAUTHIER et al., 2019).

A expressão adotada já mencionada foi a Equação 1.6:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q_0 \quad (2.6)$$

Nesta ocorre uma separação pois o software Elmer usa no solver um módulo que implementa internamente o termo  $\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T)$ , sendo necessário somente fornecer os parâmetros e condições, que no caso padrão foram:

- i. O solver HeartSolver que implementa a equação;
- ii. Os valores de:  $\rho$  (densidade),  $c_p$  (calor específico) e  $k$  (condutividade térmica);
- iii. As condições de contorno (temperatura fixa, fluxo de calor etc.);
- iv. As condições iniciais (por exemplo,  $T=293.15$  K);
- v. O tipo de simulação (estacionária ou transiente).

Assim restando o termo  $Q_0$ , que será implementado explicitamente na forma de perfis por trechos de período operativo de 30 segundos, com intervalos de 5 segundos representando:

- i. Carga (corrente DC elevada): maior dissipação por  $I^2 \cdot R$ ;
- ii. Autodescarga: pequenas perdas internas (autodissipação);
- iii. Descarga (corrente DC moderada): dissipação positiva, porém menor que na carga.

Matematicamente, no intervalo de interesse  $t \in [0,30]$  s:

$$Q(t) = \begin{cases} 15000 \text{ W/m}^3, & 0 \leq t < 5 \text{ (carga)}; \\ 1000 \text{ W/m}^3, & 5 \leq t < 10 \text{ (autodescarga)}; \\ 4000 \text{ W/m}^3, & 10 \leq t < 15 \text{ (descarga)}; \\ 15000 \text{ W/m}^3, & 15 \leq t < 20 \text{ (carga)}; \\ 1000 \text{ W/m}^3, & 20 \leq t < 25 \text{ (autodescarga)}; \\ 4000 \text{ W/m}^3, & 25 \leq t < 30 \text{ (descarga)}; \end{cases}$$

Onde:

- i.  $Q_0 = 15000$  é um valor representativo dentro da faixa utilizada na literatura para simulações térmicas em dispositivos eletroquímicos de pequena escala;

- ii.  $Q_0 = 1000$  são perdas internas (autodissipação, corrente de fuga e polarização lenta), bem menores que na carga, mas não nulas (CONWAY, 1999; BURKE, 2000);
- iii.  $Q_0 = 4000$  são correntes e dissipação menores que na carga, porém positivas (GAUTHIER et al., 2019).

Os valores de geração volumétrica de calor ( $Q_0$ ) adotados neste trabalho são representativos e consistentes com a faixa utilizada em estudos de simulação térmica em dispositivos eletroquímicos. Para fornecer um contexto físico a essas grandezas, é possível relacioná-las aos parâmetros elétricos do dispositivo através da equação do efeito Joule, adaptada para uma densidade volumétrica:

$$Q_0 = \frac{P}{V_{\text{eletrodos}}} = \frac{I^2 R_{ESR}}{V_{\text{eletrodos}}} \quad (3.1)$$

Onde  $I$  é a corrente aplicada,  $R_{ESR}$  é a Resistência Série Equivalente e  $V_{\text{eletrodos}}$  é o volume total dos eletrodos onde o calor é gerado. Com base na geometria do modelo, de dimensões laterais de 1 mm x 1 mm e dois eletrodos de 120  $\mu\text{m}$  de espessura cada, o volume de geração de calor é:

$$V_{\text{eletrodos}} = (1 \cdot 10^{-3} \text{m}) \cdot (1 \cdot 10^{-3} \text{m}) \cdot (2 \cdot 120 \cdot 10^{-6} \text{m}) = 2,4 \cdot 10^{-10} \text{m}^3 \quad (3.2)$$

A título de exemplo, considerando uma hipotética  $R_{ESR}$  de 25 m $\Omega$  (valor típico para células de supercapacitores), a geração de calor de 15000 W/m<sup>3</sup> durante o ciclo de carga corresponderia a uma corrente de:

$$I = \sqrt{\frac{Q_0 \cdot V_{\text{eletrodos}}}{R_{ESR}}} = \sqrt{\frac{15000 \text{ W/m}^3 \cdot (2,4 \cdot 10^{-10} \text{m}^3)}{0,025 \Omega}} \approx 0,012 \text{A} = 12 \text{mA} \quad (3.3)$$

Essa corrente é compatível com a operação de uma pequena seção transversal de um dispositivo maior, validando que a ordem de grandeza da fonte de calor utilizada na simulação está em uma faixa fisicamente coerente. Essa conexão entre os parâmetros térmicos e elétricos confere uma escala tangível para a interpretação dos resultados.

A função foi aplicada exclusivamente aos corpos correspondentes dos eletrodos porosos, onde a dissipação por efeito Joule e polarização é mais significativa.

### 3.3.5. Condições térmicas de contorno

Todas as superfícies externas do modelo (base, topo, faces laterais, frontal e traseira) foram submetidas a uma condição de convecção forçada com o meio externo, utilizando um coeficiente de troca térmica de  $20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  e uma temperatura externa de referência de  $293,15 \text{ K}$  (LI, Y. et al 2018, p. 112-120). Isso representa uma situação de resfriamento natural e moderado ao redor do supercapacitor.

### 3.3.6. Propriedades materiais e corpos

Cada volume do modelo foi associado a um material específico e a um conjunto de condições. Os coletores foram modelados com propriedades do alumínio; os eletrodos porosos, com propriedades do carbono ativado; e os separadores, com polietileno.

## 3.4. Modelos simulados

Com o objetivo de investigar o comportamento térmico do supercapacitor em diferentes configurações construtivas, foram elaborados modelos tridimensionais com as seguintes quantidades de camadas empilhadas: 2, 10, 30 e 50. O empilhamento reflete a forma construtiva real de módulos supercapacitores, permitindo analisar os efeitos da quantidade de camadas sobre a distribuição de temperatura.

Além da comparação entre diferentes quantidades de camadas, o estudo foi planejado para contemplar variações de condições operacionais e estruturais, a fim de investigar sua influência sobre o desempenho térmico. As principais variações previstas são:

- i. Padrão geral
  - a. Temperatura padrão:  $293,15 \text{ K}$  ( $20 \text{ }^\circ\text{C}$ );
  - b. Coeficiente de troca térmica:  $20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ ;
  - c. Geração interna de calor padrão:  $15000 \text{ W/m}^3$  na carga,  $1000 \text{ W/m}^3$  na autodescarga e  $4000 \text{ W/m}^3$ ;
  - d. Espessura padrão do separador:  $50 \text{ }\mu\text{m}$ .

Essa variação visa servir de base geral para a análise das demais variações.

- ii. Variação de ambiente
  - a. Aquecido:  $313,15 \text{ K}$  ( $40 \text{ }^\circ\text{C}$ ) e  $10 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ ;
  - b. Resfriado:  $273,15 \text{ K}$  ( $0 \text{ }^\circ\text{C}$ ) e  $50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ .

Essa variação visa analisar a capacidade do supercapacitor de dissipar calor sob diferentes ambientes térmicos e ventilações.

- iii. Geração interna de calor

- a. Aumento da geração: 25000 W/m<sup>3</sup> na carga, 1667 W/m<sup>3</sup> na autodescarga e 6667 W/m<sup>3</sup> na descarga;
- b. Redução da geração: 5000 W/m<sup>3</sup> na carga, 334 W/m<sup>3</sup> na autodescarga e 1334 W/m<sup>3</sup> na descarga.

Esses cenários simulam diferentes regimes do ciclo carga, autodescarga e descarga, refletindo operações com maiores ou menores correntes elétricas, com todos tendo acréscimos e reduções de 2/3 do valor original.

- iv. Variação estrutural
  - a. Espessura aumentada do separador: 100 µm.

A alteração da espessura do separador tem como objetivo avaliar seu efeito sobre a resistência térmica global da camada e, por consequência, sobre a uniformidade do gradiente de temperatura ao longo do empilhamento.

Cada uma dessas variações será aplicada a todos os modelos (de 2 a 50 camadas), possibilitando a comparação sistemática dos resultados simulados. Ao todo, esse planejamento experimental resulta em um conjunto abrangente de simulações, que permitirá estudar o comportamento térmico do dispositivo tanto em regimes normais de operação quanto em condições extremas (SCHIFFER. et al, 2006, p. 765-772).

### 3.5. Ferramentas computacionais

O estudo empregou três ferramentas computacionais de código aberto para modelagem, simulação e análise térmica de supercapacitores, selecionadas por sua acessibilidade, robustez e ampla adoção na comunidade científica.

- i. Gmsh  
O Gmsh foi utilizado para a criação dos modelos tridimensionais dos supercapacitores. Sua interface baseada em scripts permitiu a geração automatizada e parametrizada das geometrias, facilitando a replicação de diferentes configurações de número de camadas. Além da modelagem geométrica, o Gmsh também foi responsável pela geração da malha, fundamental para a aplicação do Método dos Elementos Finitos (FEM) (GEUZAINÉ; GEUZAINÉ, 2009, p. 1309-1331);
- ii. Elmer FEM  
O Elmer foi a ferramenta principal do estudo, sendo utilizada para a realização das simulações térmicas transientes. Através da definição dos domínios, materiais, condições de contorno, propriedades térmicas e geração interna de calor, foi possível resolver numericamente a distribuição de temperatura nos

diferentes modelos. O ElmerSolver e o ElmerGUI foram empregados em conjunto para estruturar os arquivos de entrada (.sif), processar os cálculos e controlar a simulação;

iii. ParaView

O ParaView foi utilizado para a visualização e análise dos resultados obtidos nas simulações. Com ele, foi possível gerar gráficos de temperatura e cortes axiais que auxiliam na interpretação dos gradientes térmicos internos. As imagens extraídas do ParaView foram também empregadas para compor as figuras dos resultados neste trabalho (AHRENS et al, 2005).

O fluxo de trabalho envolveu, portanto, três etapas principais: modelagem e malha com o Gmsh, simulação com o Elmer e visualização com o ParaView. Essa abordagem integrada permitiu um controle completo sobre todas as fases da análise térmica dos supercapacitores.

## 4. ANÁLISE DE SIMULAÇÕES

### 4.1. Caso padrão

O caso padrão foi definido como referência para as demais análises, com parâmetros térmicos e estruturais constantes: temperatura ambiente de 293,15 K (20 °C), coeficiente de troca térmica convectiva de 20 W/m<sup>2</sup>·K, separador com espessura de 50 µm e geração interna de calor: 15000 W/m<sup>3</sup> na carga, 1000 W/m<sup>3</sup> na autodescarga e 4000 W/m<sup>3</sup>. Os materiais considerados seguiram os valores médios de condutividade térmica para alumínio (coletor), carbono ativado (eletrodos) e polietileno (separador).

As temperaturas mínima, média e máxima apresentadas ao longo desta seção foram calculadas considerando todo o volume sólido do supercapacitor (coletores, eletrodos e separadores), e não valores pontuais. Nesse contexto, a temperatura mínima permanece constante, uma vez que não foi considerado nenhum volume de ar externo para troca térmica além das superfícies do próprio dispositivo. Assim, os valores representam estatísticas globais do domínio simulado. Esse mesmo critério de cálculo foi adotado em todas as demais análises (itens 4.2 a 4.4).

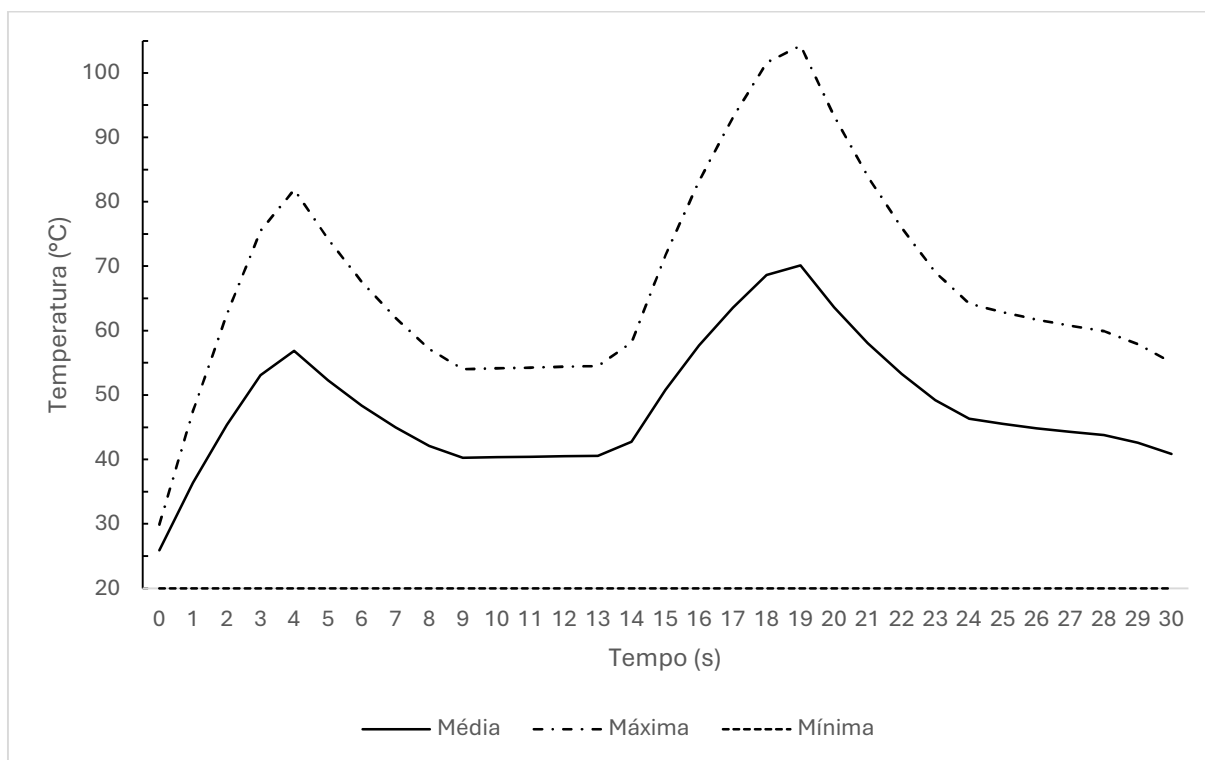


Gráfico 4.1: Variação da temperatura ao longo do tempo – 2 camadas padrão

Fonte: Elaborada pelo autor

No caso padrão, observa-se no gráfico 4.1 que a evolução térmica ao longo dos ciclos de operação apresenta um comportamento cumulativo, em que a dissipação durante as autodescargas não é suficiente para retornar aos níveis iniciais de temperatura. No primeiro ciclo (0–15 s), a fase de carga provoca um aumento acentuado da temperatura, atingindo aproximadamente 55 °C em valores médios e mais de 80 °C na máxima. Durante a autodescarga seguinte, embora haja uma redução, o patamar estabiliza em torno de 40–45 °C, revelando a retenção de calor nos materiais. Na descarga, a curva mantém-se praticamente estável, sugerindo equilíbrio momentâneo entre geração e dissipação. No segundo ciclo (15–30 s), a situação torna-se mais crítica: o novo período de carga parte de um patamar superior, elevando a temperatura média para cerca de 70 °C e a máxima acima de 100 °C. Mesmo após a autodescarga e a descarga finais, os valores permanecem acima do ciclo inicial, evidenciando um acúmulo residual de calor.

Além disso, a diferença entre as curvas média e máxima destaca a formação de pontos quentes internos, que representam risco à integridade do dispositivo (LI, Y. et al 2018, p. 112-120). Esses resultados indicam que, sob corrente contínua e ciclos curtos de carga e descarga, o supercapacitor tende a acumular calor progressivamente, sendo necessárias estratégias de resfriamento ou ajustes nas condições operacionais para mitigar a elevação térmica.

Assim, tal comportamento das curvas de temperatura estará presente em todos os modelos como evidente no gráfico 4.2.

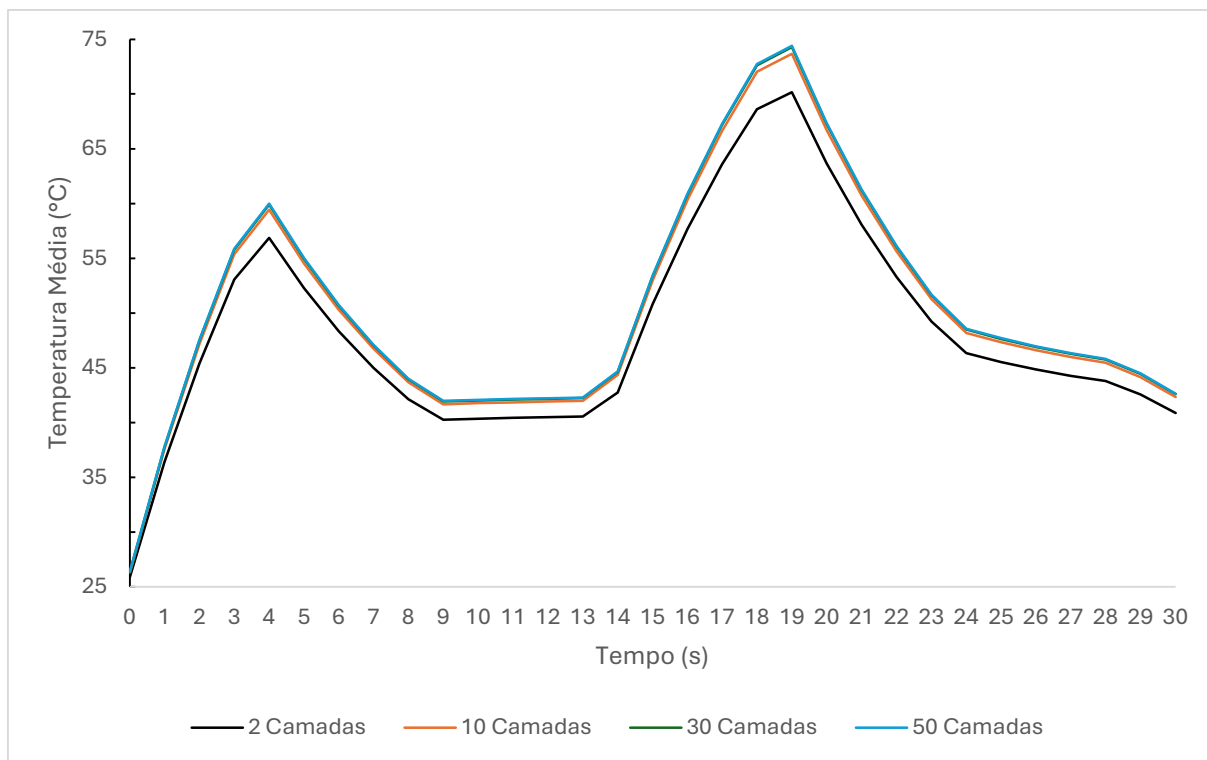


Gráfico 4.2: Variação da temperatura média ao longo do tempo - Padrão

Fonte: Elaborada pelo autor

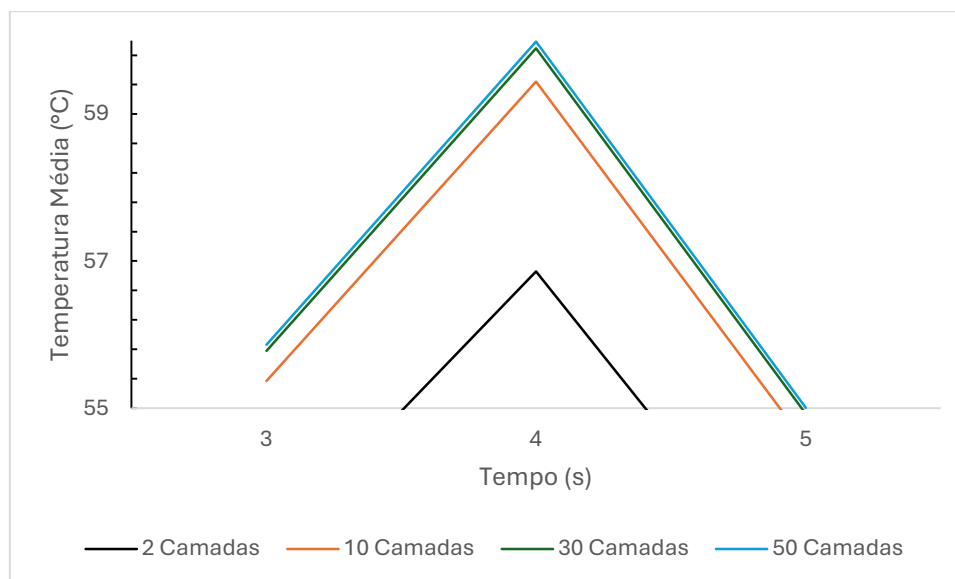


Gráfico 4.3: Proximidade das curvas na variação da temperatura média ao longo do tempo - Padrão

Fonte: Elaborada pelo autor

Nota-se pelos gráficos 4.2 e 4.3 que as curvas apresentam variações muito próximas entre si, com diferenças máximas inferiores a 4°C ao longo de todo o período analisado. Ou seja, o aumento do número de camadas leva a uma pequena elevação

da temperatura média e essas diferenças são mais perceptíveis nos instantes de pico térmico devido a maior espessura contribuir para um ligeiro aumento da temperatura ocasionado pelo maior caminho térmico interno. Esse comportamento irá se perpetuar ao longo de todas as variações.

Porém, analisar somente pela temperatura média é limitante pois as variações internas são significativas como mostrado nas figuras de cortes abaixo.

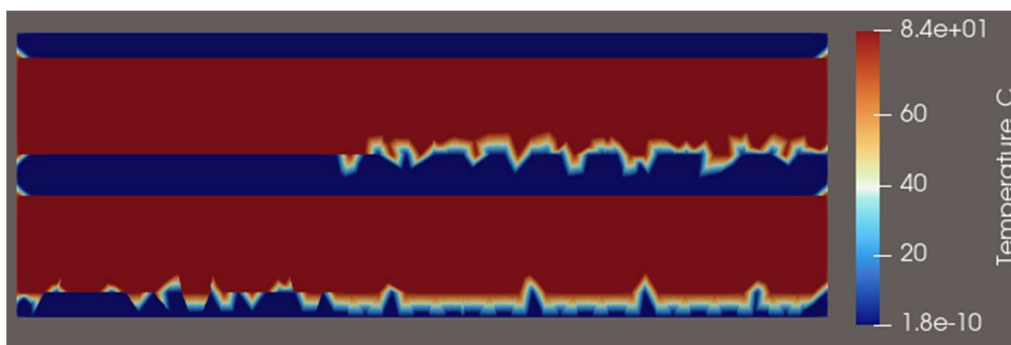


Figura 4.1: Corte longitudinal do modelo padrão 2 camadas em 19s

Fonte: Elaborada pelo autor

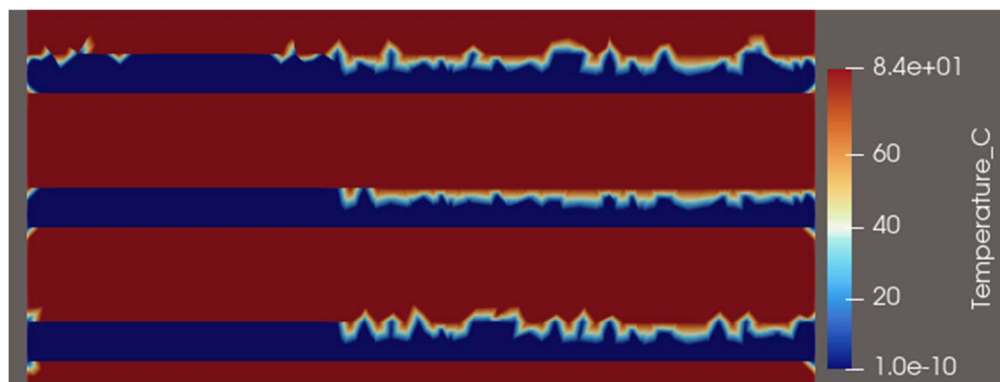


Figura 4.2: Parcial do corte longitudinal do modelo padrão 10 camadas em 19s

Fonte: Elaborada pelo autor

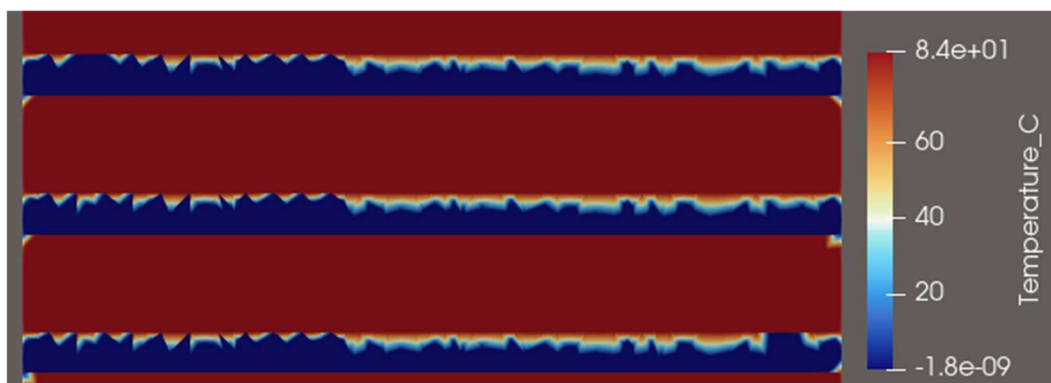


Figura 4.3: Parcial do corte longitudinal do modelo padrão 30 camadas em 19s

Fonte: Elaborada pelo autor

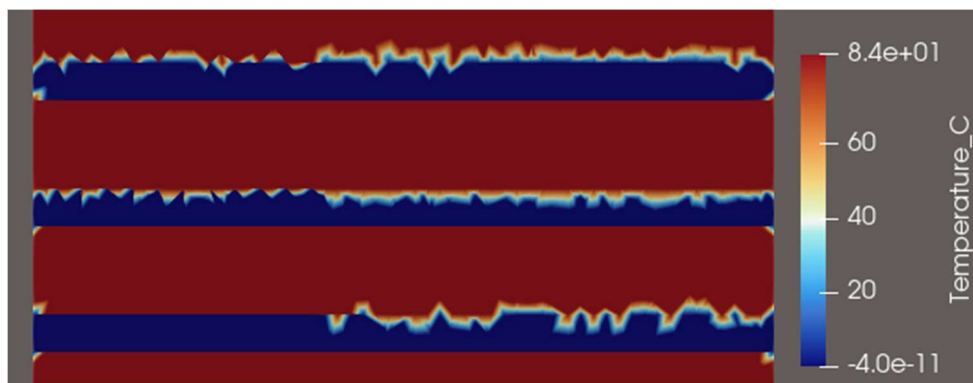


Figura 4.4: Parcial do corte longitudinal do modelo padrão 50 camadas em 19s

Fonte: Elaborada pelo autor

Pelas figuras 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4 é possível analisar que apesar de as configurações de 2 a 50 camadas apresentarem temperaturas médias semelhantes em  $t=19s$ , a análise dos cortes longitudinais revela que a distribuição interna de calor varia significativamente. Modelos com mais camadas, especialmente 50, concentram calor no centro, enquanto as bordas permanecem mais frias. Isso indica que o aumento de camadas dificulta a dissipação de calor, ressaltando a importância da análise espacial para identificar pontos de superaquecimento (LI, Y. et al, 2018, p. 112-120).

Essa distribuição de temperatura é uma clara demonstração do comportamento térmico anisotrópico discutido no referencial teórico. A alta temperatura no núcleo do dispositivo evidencia a elevada resistência térmica na direção perpendicular, onde o fluxo de calor é barrado pelas camadas de baixa condutividade do separador e dos eletrodos. Em contrapartida, as temperaturas mais amenas nas bordas laterais são resultado da condução paralela, onde o calor se propaga eficientemente através dos coletores de alumínio, que funcionam como dissipadores internos, distribuindo a energia térmica ao longo do plano das camadas.

## 4.2. Variações de ambiente

### 4.2.1. Ambiente aquecido

Para o caso de ambiente aquecido considerou-se a mudança de dois parâmetros sendo: a temperatura ambiente de 293,15K (20°C) para 313,15K (40°C) e o coeficiente de troca térmica convectiva de 20 W/m<sup>2</sup>·K para 10 W/m<sup>2</sup>·K. Ambas as alterações foram feitas pois após análise de simulações notou-se que variar somente

a temperatura ambiente implicava em um acréscimo de temperatura em todos os pontos da curva o que não mudava em si o comportamento da curva.

Além de que foi considerado a relação de a temperatura aumentar além do projetado significa que de alguma forma esse sistema ficou mal ventilado, o que é evidenciado pela mudança no valor do coeficiente de troca térmica (GUALOUS et al, 2003, p. 86-93).

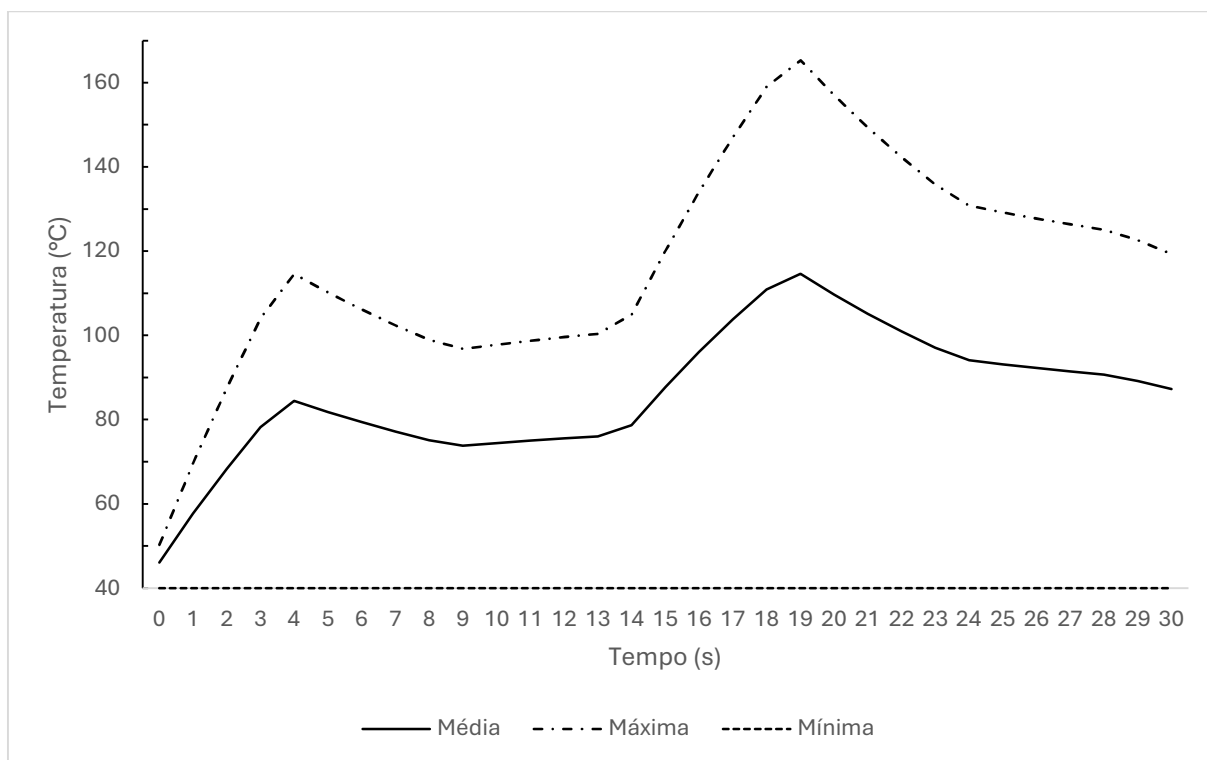


Gráfico 4.4: Variação da temperatura ao longo do tempo – 2 camadas ambiente aquecido

Fonte: Elaborada pelo autor

Pelo gráfico 4.4 é possível observar que no primeiro ciclo (0–4s) as temperaturas médias e máximas são significativamente mais elevadas em relação ao caso padrão, com crescimento em torno de +55% na média e +55% na máxima. Durante o intervalo de 5–9s, quando ocorre a autodescarga e início da descarga, o caso aquecido ainda mantém temperaturas mais altas, apresentando crescimento relativo aproximado de +45% na média e +48% na máxima. No período de 10–14s, o crescimento relativo se intensifica novamente, atingindo valores próximos de +75% na média e +80% na máxima, evidenciando que mesmo em regime de estabilização parcial, o dispositivo aquecido acumula calor de forma muito mais acentuada que no cenário padrão.

No segundo ciclo de carga (15–19s), a diferença se mantém expressiva, mas com ligeira redução em relação ao pico anterior, resultando em taxas de crescimento de aproximadamente +60% na média e +65% na máxima. Já no intervalo de 20–24s, observa-se um arrefecimento parcial, com taxas na faixa de +55% para a média e +55–60% para a máxima, mas ainda superiores ao caso padrão. Por fim, no período de 25–30s, em que se completa o segundo ciclo de descarga, a discrepância cresce novamente, chegando a aproximadamente +100% na média e +115% na máxima, ou seja, o dobro da temperatura média do caso padrão nesse estágio final.

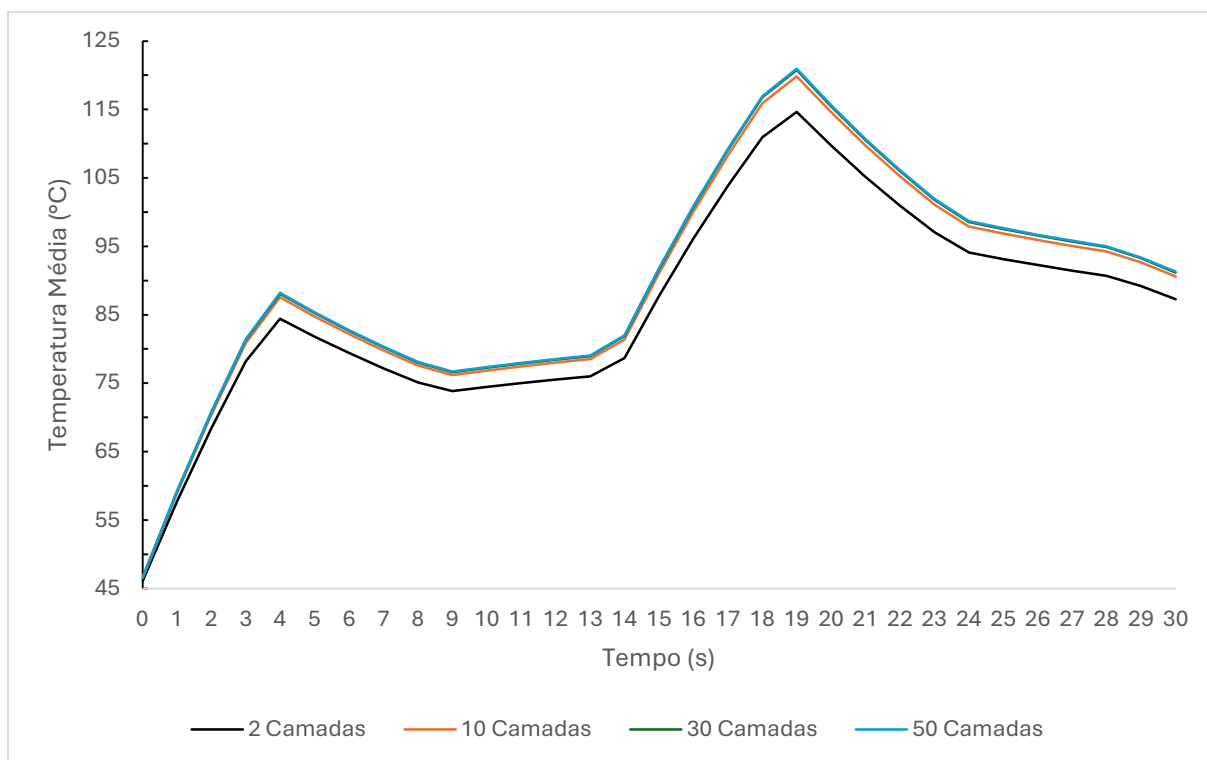


Gráfico 4.5: Variação da temperatura média ao longo do tempo – Modelo aquecido

Fonte: Elaborada pelo autor

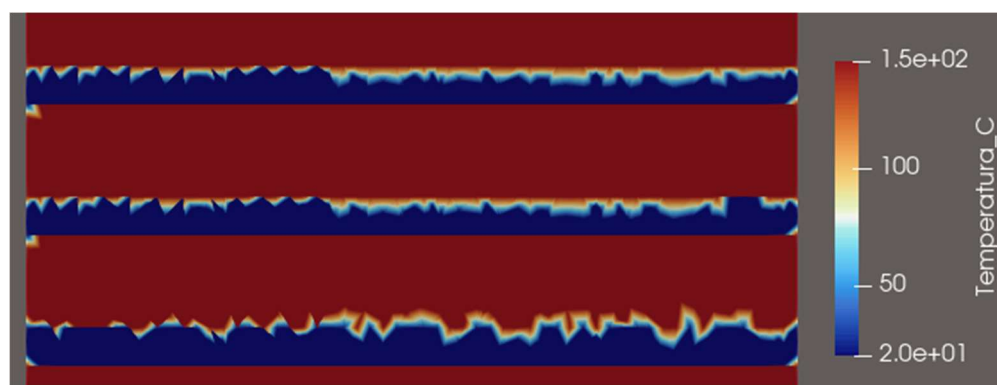


Figura 4.5: Parcial do corte longitudinal do modelo aquecido — 10 camadas em 19s

Fonte: Elaborada pelo autor

No cenário de ambiente aquecido, a elevação da temperatura ambiente ( $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) combinada à redução do coeficiente convectivo ( $10\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ ) resultou em forte elevação térmica interna, atingindo valores máximos de até  $165\text{ }^{\circ}\text{C}$  em  $t = 19\text{ s}$ , como mostrado no gráfico 4.5 e figura 4.5. Esse comportamento está diretamente relacionado à condição de contorno de Robin: um valor menor de  $h$  reduz a capacidade de dissipação do dispositivo, ampliando o acúmulo térmico. Além disso, a maior temperatura externa reduz o gradiente entre o núcleo e o ambiente, limitando ainda mais a transferência de calor.

Tal resultado corrobora com Gualous et al. (2003), que destacam a importância da ventilação em supercapacitores, e reforça a anisotropia térmica descrita por Li et al. (2018), já que os pontos quentes se concentram no núcleo devido à baixa condutividade dos separadores. Em aplicações práticas, como módulos de veículos elétricos em climas quentes, esse superaquecimento poderia comprometer a vida útil do eletrólito e reduzir a capacitância ao longo do tempo. Para mitigar esses efeitos, recomenda-se adotar estratégias de resfriamento forçado ou otimizações estruturais, como coletores mais espessos ou materiais com maior condutividade térmica.

#### **4.2.2. Ambiente refrigerado**

Para o caso de ambiente refrigerado foi alterado os parâmetros para os seguintes valores: a temperatura ambiente de  $293,15\text{K}$  ( $20^{\circ}\text{C}$ ) para  $273,15\text{K}$  ( $0^{\circ}\text{C}$ ) e o coeficiente de troca térmica convectiva de  $20\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  para  $50\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ .

A redução da temperatura além do esperado indica um resfriamento mais eficiente do sistema. Isso é comprovado pela mudança no valor do coeficiente de troca térmica, que aponta para uma melhor capacidade de dissipação de calor.

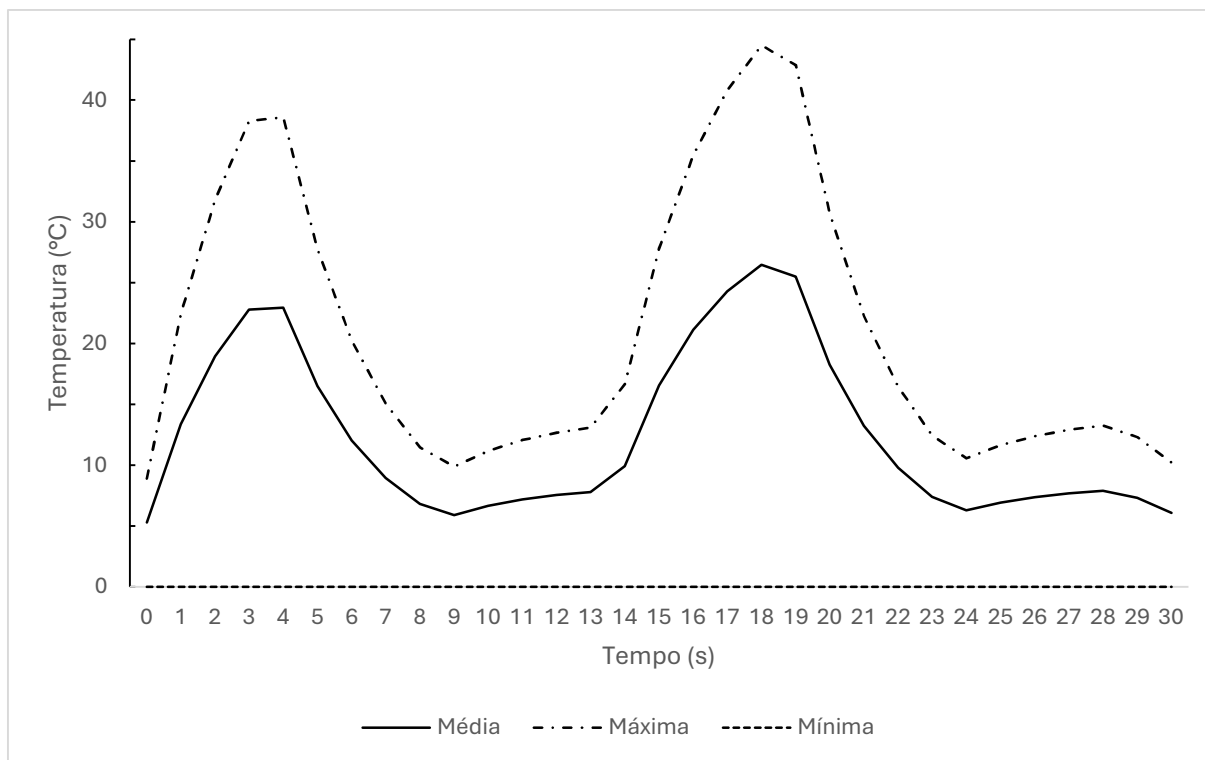


Gráfico 4.6: Variação da temperatura ao longo do tempo – 2 camadas ambiente refrigerado

Fonte: Elaborada pelo autor

Pelo gráfico 4.6, observa-se que as temperaturas do supercapacitor apresentaram valores significativamente inferiores aos do cenário padrão. Durante o primeiro ciclo (0–4s), a redução foi de cerca de –65% na média e –55% na máxima, mostrando um forte efeito inicial da refrigeração. Entre 5–9s, essa diferença aumentou ainda mais, atingindo aproximadamente –80% na média e –74% na máxima. No intervalo de 10–14s, a tendência se manteve, com reduções próximas de –82% na média e –76% na máxima.

Já no ciclo de 15–19s, quando ocorre nova elevação de temperatura, as diferenças diminuíram levemente, ficando em torno de –65% na média e –58% na máxima em relação ao padrão. Nos períodos seguintes, 20–24s e 25–30s, o comportamento voltou a evidenciar quedas expressivas, com reduções na faixa de –81% a –84% na média e –77% a –80% na máxima, reforçando que a refrigeração manteve o dispositivo em níveis de aquecimento muito inferiores ao caso padrão em todos os instantes simulados.

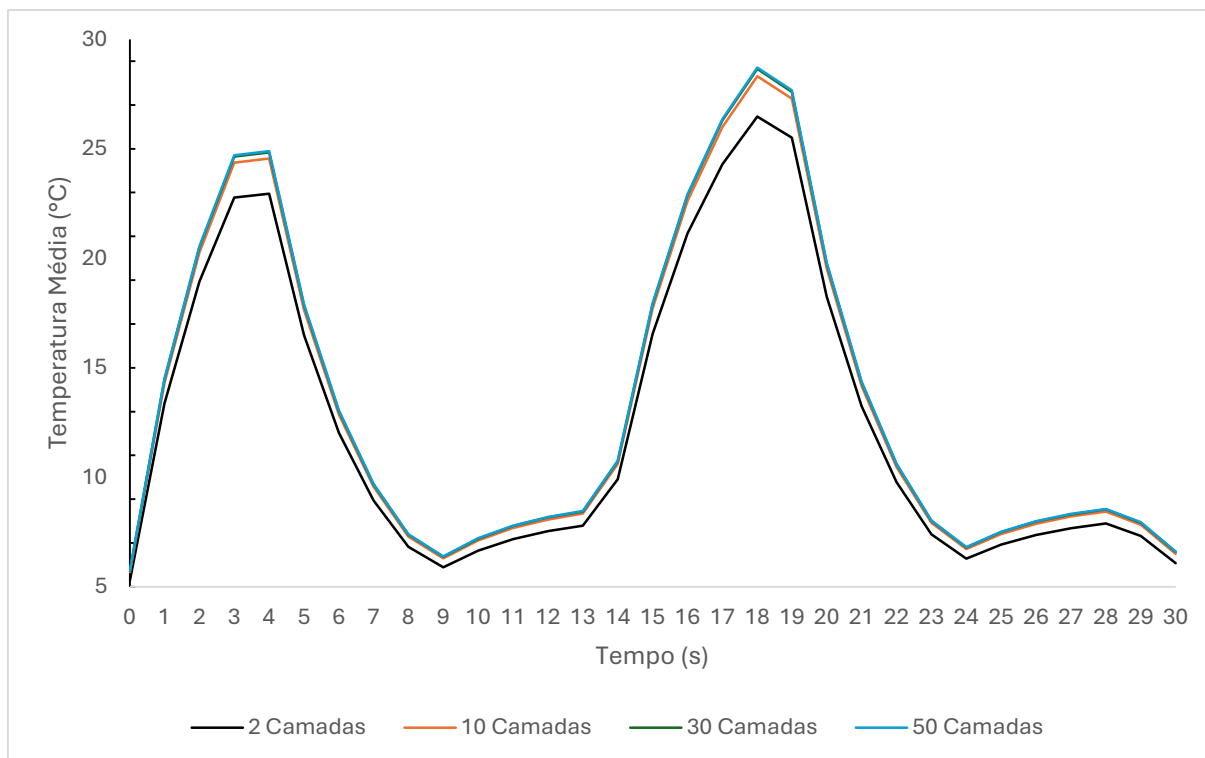


Gráfico 4.7: Variação da temperatura média ao longo do tempo – Ambiente refrigerado

Fonte: Elaborada pelo autor

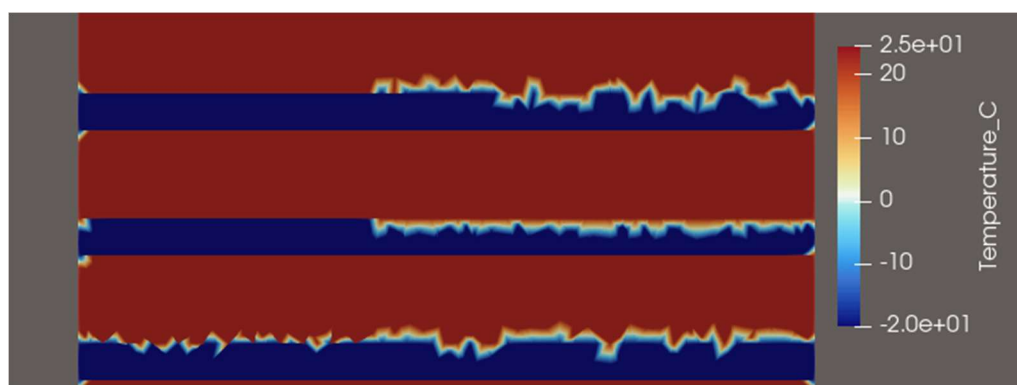


Figura 4.6: Parcial do corte longitudinal no modelo resfriado - 10 camadas em 19s

Fonte: Elaborada pelo autor

A análise do gráfico 4.7 e da figura 4.6 evidencia que a redução da temperatura ambiente para 0 °C, combinada ao aumento do coeficiente convectivo para 50 W/m<sup>2</sup>·K, melhora significativamente a capacidade de dissipação térmica do supercapacitor. Esse resultado pode ser explicado pela condição de Robin: valores mais altos de  $h$  intensificam o fluxo de calor para o ambiente, enquanto a maior diferença de temperatura entre o núcleo e o meio externo aumenta o gradiente térmico, reduzindo a resistência global à transferência de calor.

Como consequência, as temperaturas máximas caem e a formação de pontos quentes é mitigada, mesmo em configurações com elevado número de camadas. Além disso, a estabilização térmica ocorre de forma mais rápida, reduzindo o risco de acumulação de calor cíclico. Esse comportamento está alinhado com Marcano et al. (2006), que destacam a importância do gerenciamento térmico eficiente para preservar a confiabilidade estrutural de supercapacitores, e reforça que condições ambientais favoráveis, associadas a convecção eficiente, não apenas prolongam a vida útil do dispositivo como também permitem sua operação em regimes de corrente mais elevados.

Essas variações de forma de onda sobre ambiente aquecido ou resfriado em comparação com o modelo padrão estão melhor apresentadas no gráfico 4.8 a seguir:

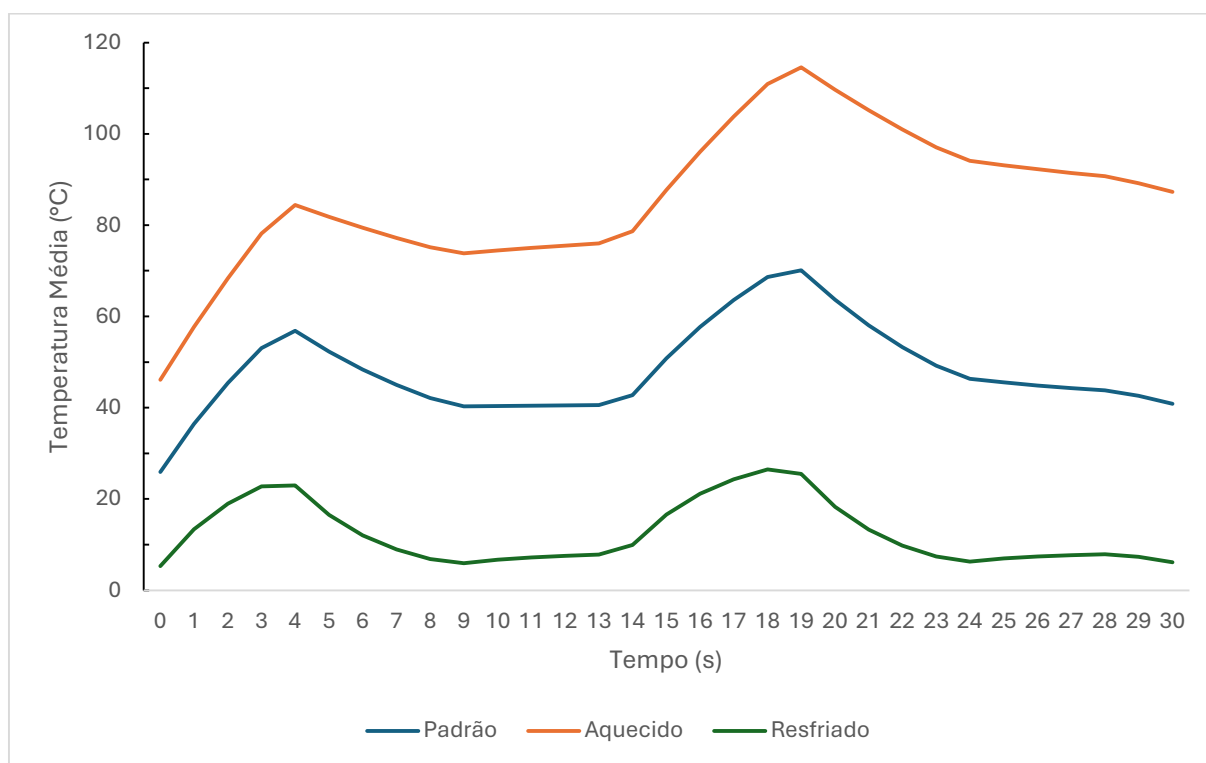


Gráfico 4.8: Comparativo das variações de ambiente em relação a temperatura média ao longo do tempo – 2 camadas

Fonte: Elaborada pelo autor

### 4.3. Variações de geração de calor

#### 4.3.1. Geração aumentada

Na geração aumentada partiu-se do princípio do modelo padrão e alterou-se somente o valor da geração térmica de  $25000 \text{ W/m}^3$  na carga,  $1667 \text{ W/m}^3$  na autodescarga e  $6667 \text{ W/m}^3$  na descarga; ou seja, a partir da forma volumétrica da lei

de joule, com o aumento em cerca de 66% de geração térmica isso implica que a densidade de corrente aumento aproximadamente 29%, assim sendo correntes de carga/descarga mais intensas.

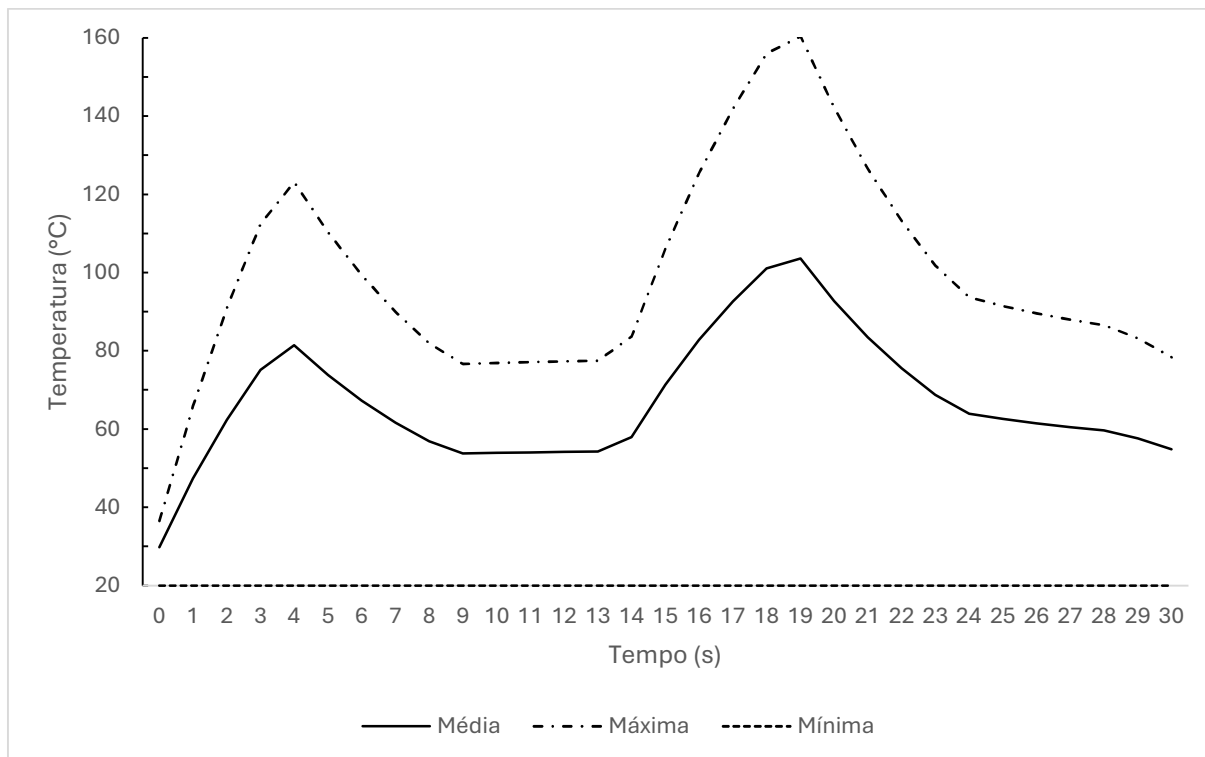


Gráfico 4.9: Variação da temperatura ao longo do tempo – 2 camadas geração aumentada

Fonte: Elaborada pelo autor

Pelo gráfico 4.9, as temperaturas médias e máximas do supercapacitor foram consistentemente superiores às do caso padrão. No primeiro ciclo (0–4s), o crescimento relativo foi de cerca de +28% na média e +41% na máxima. Durante o intervalo de 5–9s, o aumento manteve-se elevado, atingindo aproximadamente +31% na média e +45% na máxima. Entre 10–14s, os valores permaneceram estáveis em torno de +28% na média e +42% na máxima, evidenciando que o efeito do aumento de geração se sustenta ao longo do tempo.

No ciclo de 15–19s, os acréscimos se intensificaram, alcançando cerca de +37% na média e +52% na máxima, o que demonstra maior acúmulo térmico em condições de geração intensificada. Já no período de 20–24s, a diferença manteve-se expressiva, com crescimento em torno de +35% na média e +49% na máxima. Por fim, no intervalo de 25–30s, a taxa de crescimento ainda se manteve elevada, próxima de +30% na média e +44% na máxima, confirmando que o aumento da geração interna de calor impacta todo o ciclo de operação do dispositivo.

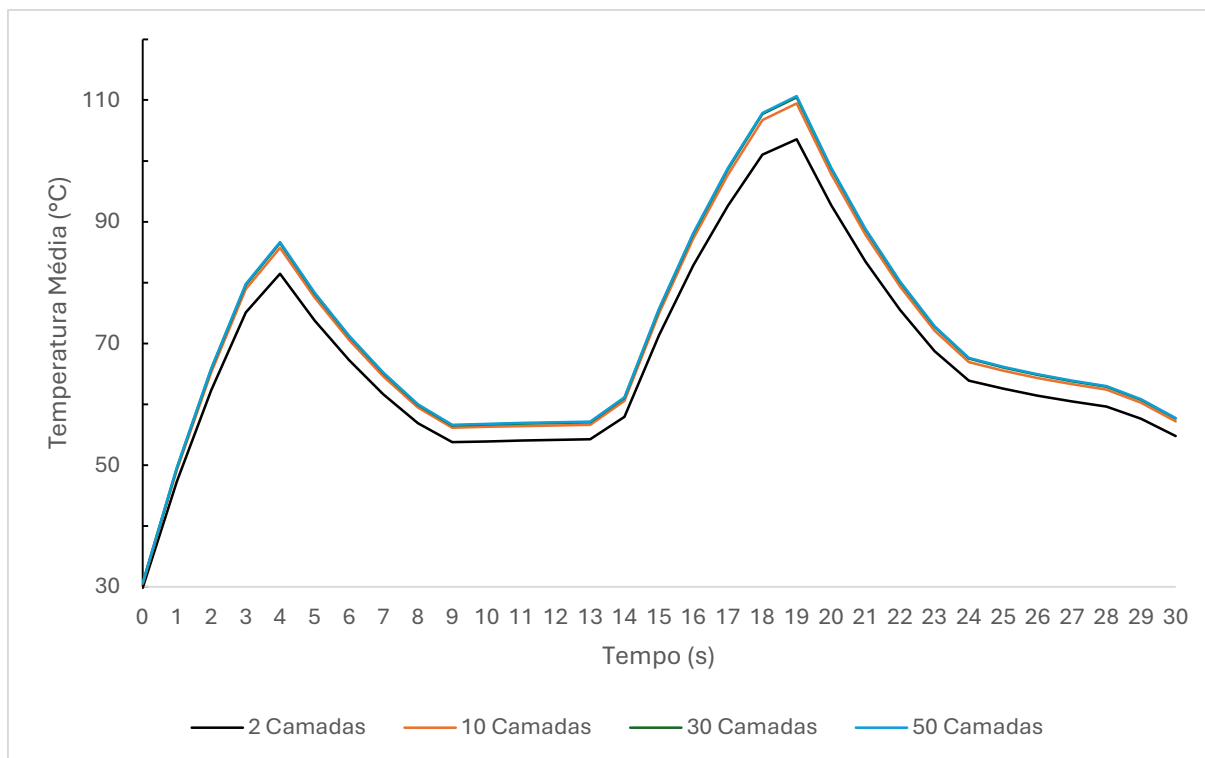


Gráfico 4.10: Variação da temperatura média ao longo do tempo – Geração aumentada

Fonte: Elaborada pelo autor

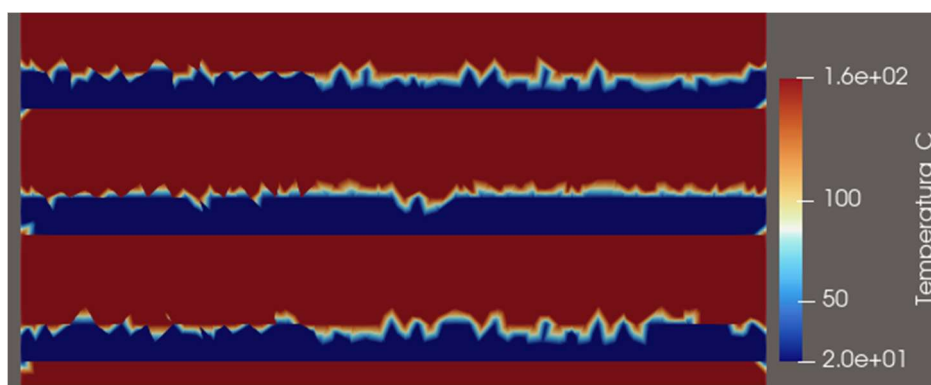


Figura 4.7: Parcial do corte longitudinal na geração aumentada - 10 camadas em 19s

Fonte: Elaborada pelo autor

A análise do gráfico 4.10 e da figura 4.7 evidencia uma intensificação significativa no aquecimento interno do supercapacitor quando a geração térmica é aumentada em 66%. Esse comportamento decorre diretamente do efeito Joule, cujo termo dissipativo é proporcional ao quadrado da corrente aplicada, fazendo com que temperaturas mais elevadas sejam alcançadas em menor intervalo de tempo. Como resultado, forma-se um gradiente térmico mais acentuado no interior do dispositivo e

há maior propensão ao surgimento de pontos quentes, sobretudo nas regiões de menor condutividade térmica, como o separador.

Esse fenômeno foi também descrito por Marcano et al. (2006), ao destacar que regimes de corrente elevados intensificam as perdas térmicas e reduzem a confiabilidade do componente. Schiffer et al. (2006) complementam essa análise ao relacionar o aumento da resistência interna e do calor gerado à diminuição da vida útil em aplicações de alta potência. Na prática, portanto, a operação em condições de corrente intensa pode comprometer a estabilidade estrutural e acelerar a degradação eletroquímica, a menos que sejam adotadas estratégias de gerenciamento térmico adequadas, como resfriamento forçado ou o uso de materiais com maior condutividade térmica.

#### 4.3.2. Geração reduzida

Sobre a geração reduzida partiu-se do princípio do modelo padrão e alterou-se o valor da geração térmica de  $5000 \text{ W/m}^3$  na carga,  $334 \text{ W/m}^3$  na autodescarga e  $1334 \text{ W/m}^3$  na descarga; ou seja, a partir da redução em cerca de 66% de geração térmica isso implica que a densidade de corrente reduziu aproximadamente 29%, assim sendo correntes de carga/descarga com menos intensidade.

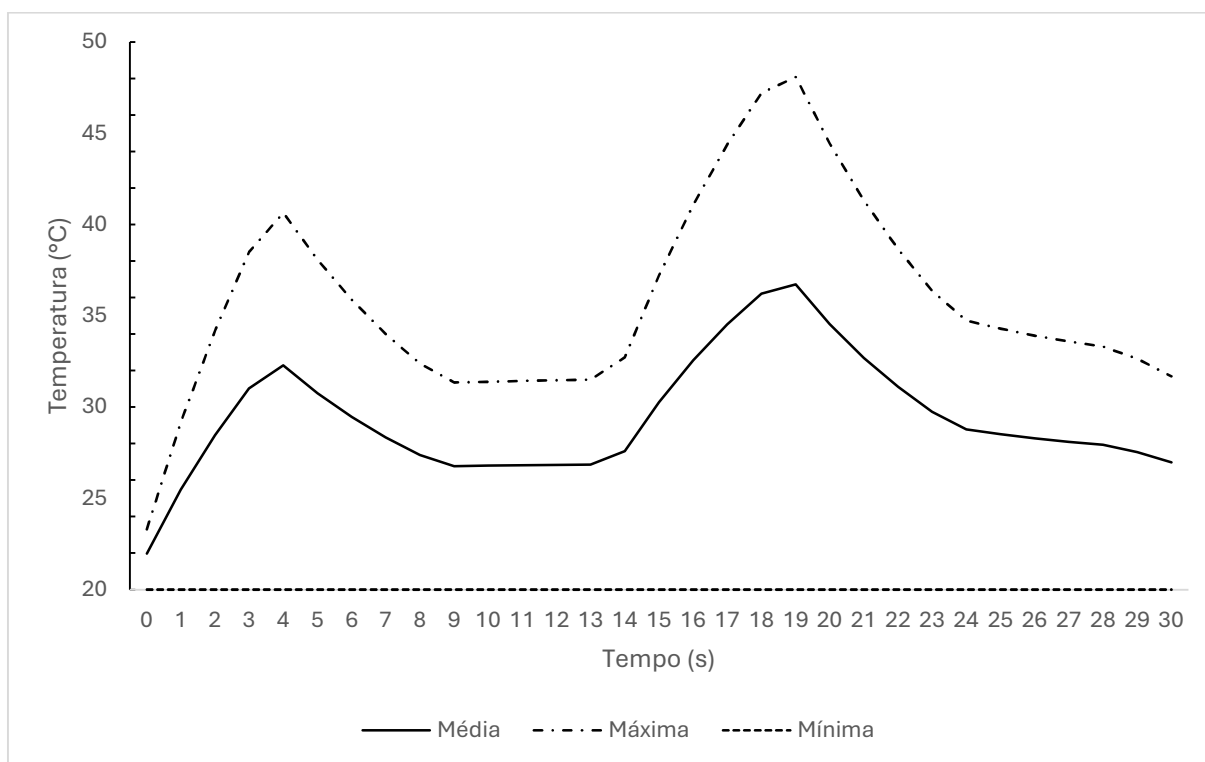


Gráfico 4.11: Variação da temperatura ao longo do tempo – 2 camadas geração reduzida

Fonte: Elaborada pelo autor

O gráfico 4.11 mostra um as temperaturas do supercapacitor apresentaram-se consistentemente inferiores às do cenário padrão. No primeiro intervalo (0–4s), a diferença foi de aproximadamente –36% na média e –41% na máxima, indicando um aquecimento consideravelmente mais baixo. Durante o intervalo de 5–9s, a redução se intensificou, alcançando cerca de –40% na média e –45% na máxima. Entre 10–14s, os valores se mantiveram próximos, em torno de –37% na média e –42% na máxima.

Em 15–19s, a discrepância aumentou ainda mais, com reduções de aproximadamente –48% na média e –52% na máxima, configurando o ponto de maior afastamento em relação ao padrão. Já no período de 20–24s, as diferenças permaneceram elevadas, próximas de –45% na média e –49% na máxima. Por fim, no intervalo de 25–30s, a redução estabilizou em torno de –39% na média e –44% na máxima, confirmando que a menor geração de calor interno resulta em temperaturas significativamente mais baixas ao longo de todo o processo.

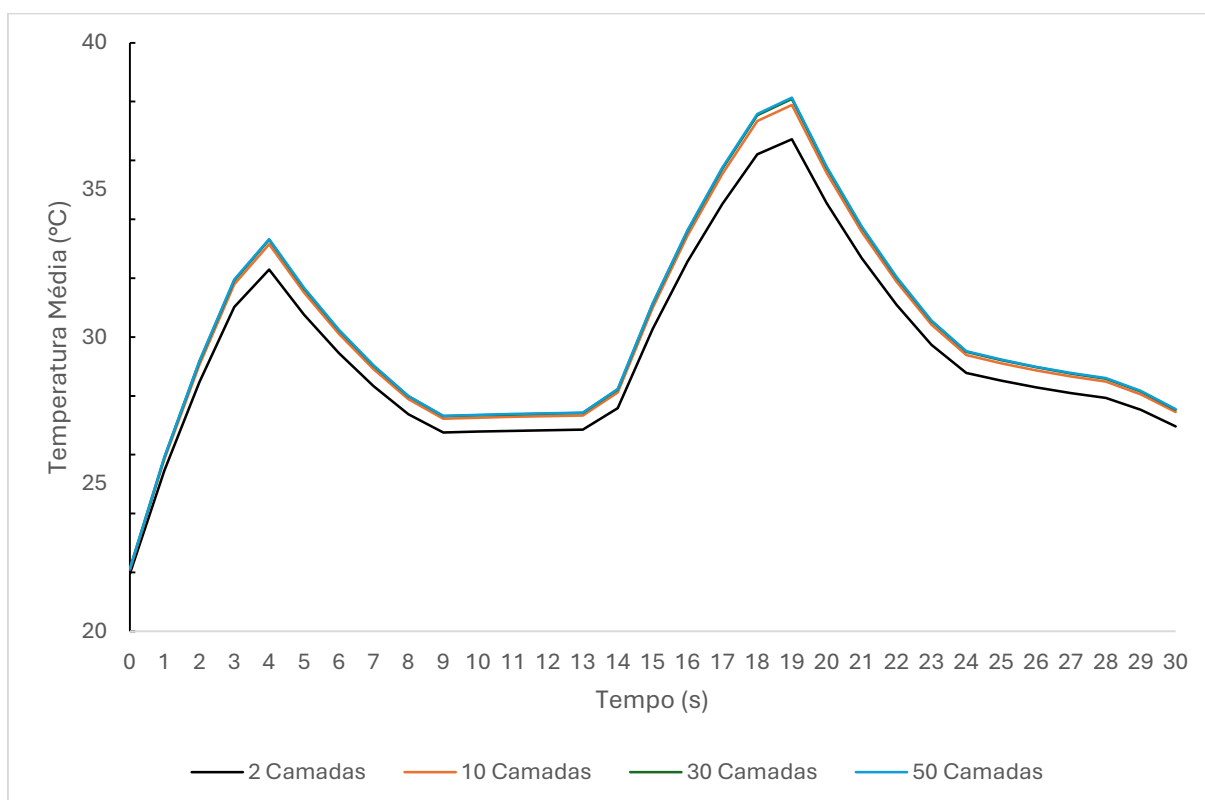


Gráfico 4.12: Variação da temperatura média ao longo do tempo – Geração reduzida

Fonte: Elaborada pelo autor

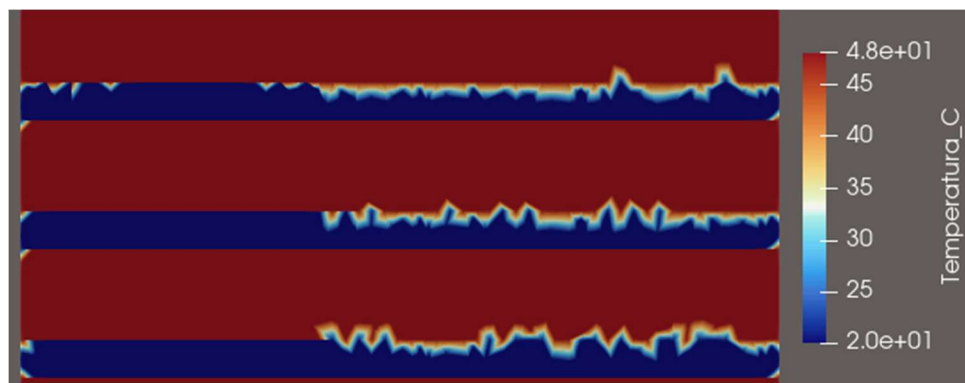


Figura 4.8: Parcial do corte longitudinal na geração reduzida - 10 camadas em 19s

Fonte: Elaborada pelo autor

A análise da figura 4.8 e do gráfico 4.12 demonstra que a redução da taxa de geração de calor interno resulta em gradientes térmicos mais suaves e na mitigação significativa de pontos quentes. Com isso, as temperaturas médias do dispositivo permanecem em níveis mais baixos e a estabilização térmica ocorre de maneira mais rápida, refletindo um regime de operação mais estável. Essa condição equivale ao funcionamento em correntes menores, nas quais o efeito Joule é menos pronunciado, diminuindo o estresse térmico sobre os materiais constituintes.

Segundo Marcano et al. (2006), operar em regimes de menor dissipação térmica aumenta a confiabilidade estrutural e prolonga a vida útil dos supercapacitores. De forma complementar, Schiffer et al. (2006) destacam que a redução da resistência interna e das perdas associadas ao aquecimento contribui para maior eficiência energética e menor degradação eletroquímica ao longo dos ciclos de carga e descarga. Dessa forma, cenários de baixa geração térmica ampliam a margem de segurança operacional, permitindo maior durabilidade do dispositivo em aplicações que demandam confiabilidade prolongada.

Essas variações de forma de onda sobre gerações de calor em comparação com o modelo padrão estão melhor apresentadas no gráfico 4.13 a seguir:

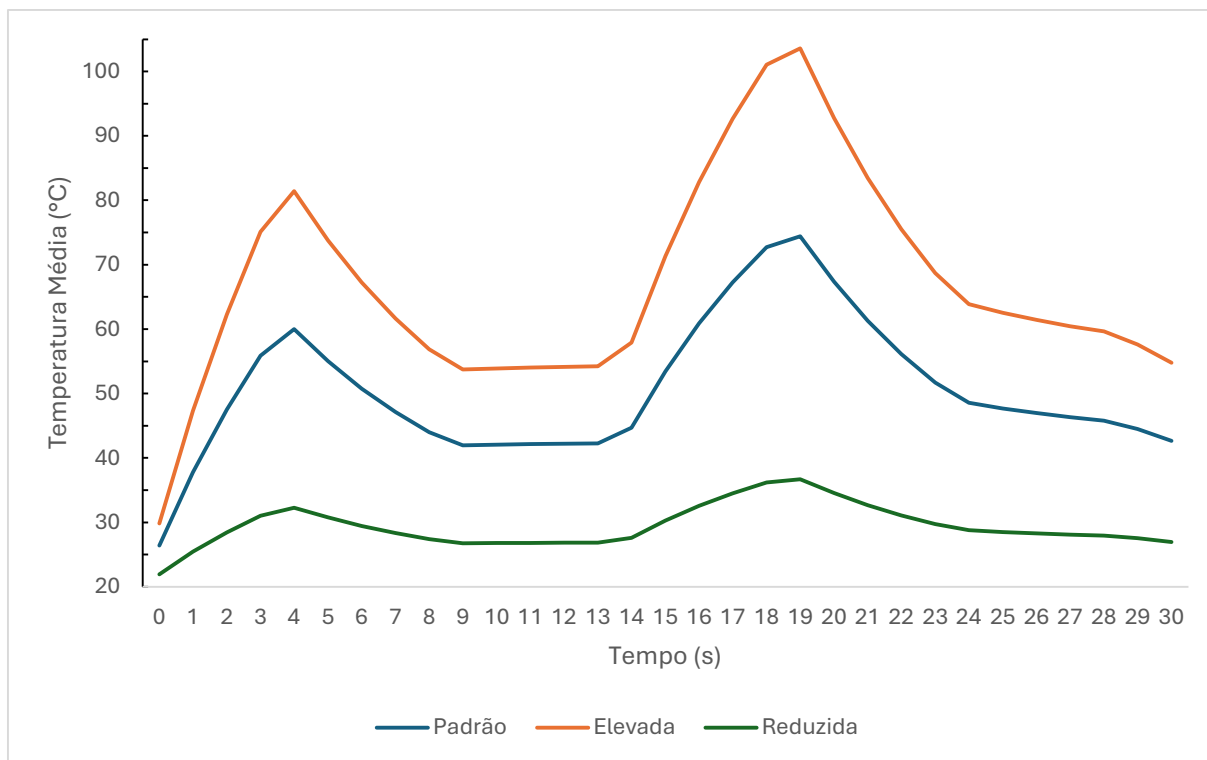


Gráfico 4.13: Comparativo das variações de geração em relação a temperatura média ao longo do tempo – 2 camadas

Fonte: Elaborada pelo autor

#### 4.4. Variação de espessura

Sobre o caso da variação de espessura alterou-se de 50  $\mu\text{m}$  para 100  $\mu\text{m}$  do separador. Como ele é composto de polietileno, material com baixa condutividade térmica, o aumento da espessura implica maior resistência à condução de calor entre os eletrodos, alterando tanto a dissipação quanto a distribuição interna de temperatura.

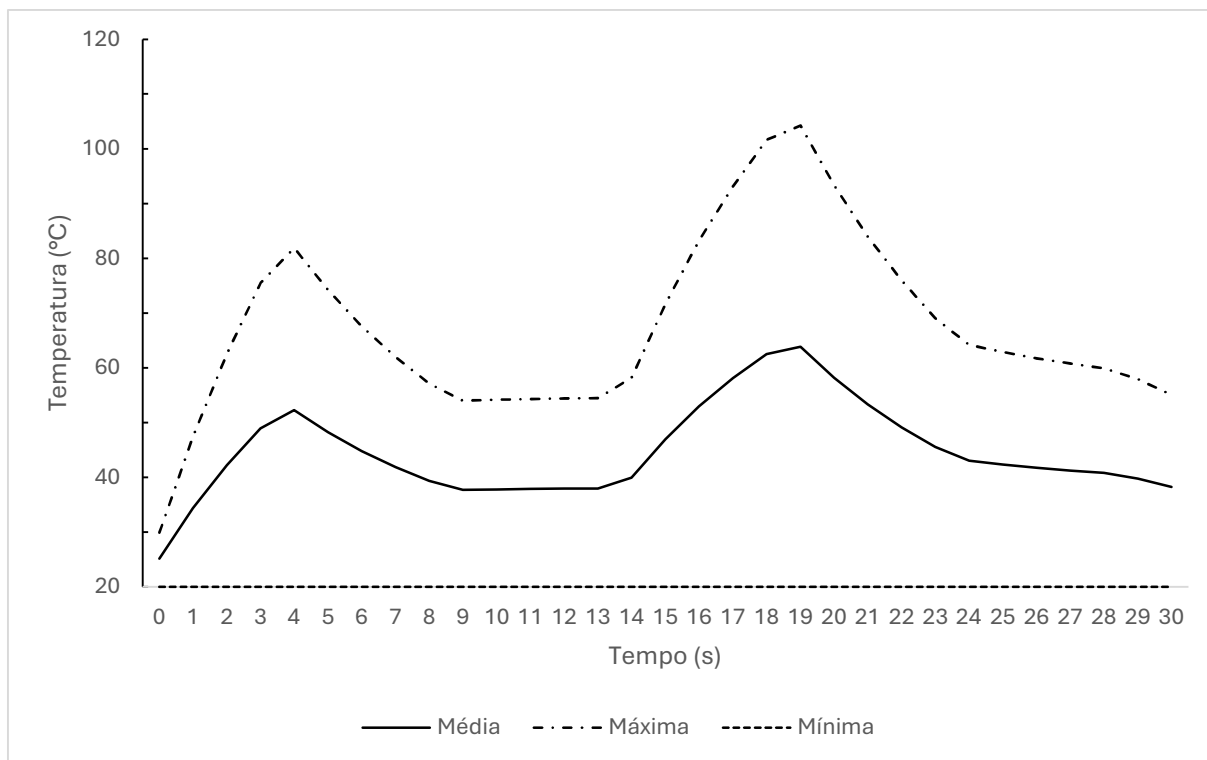


Gráfico 4.14: Variação da temperatura ao longo do tempo – 2 camadas espessura duplicada

Fonte: Elaborada pelo autor

O gráfico demonstra que o aquecimento interno não é uniforme, com a temperatura média apresentando dois picos (53 °C e 63 °C) e a máxima atingindo aproximadamente 82 °C e 105 °C, respectivamente. Isso indica uma forte diferença entre as temperaturas máxima e mínima, com a média oscilando entre elas.

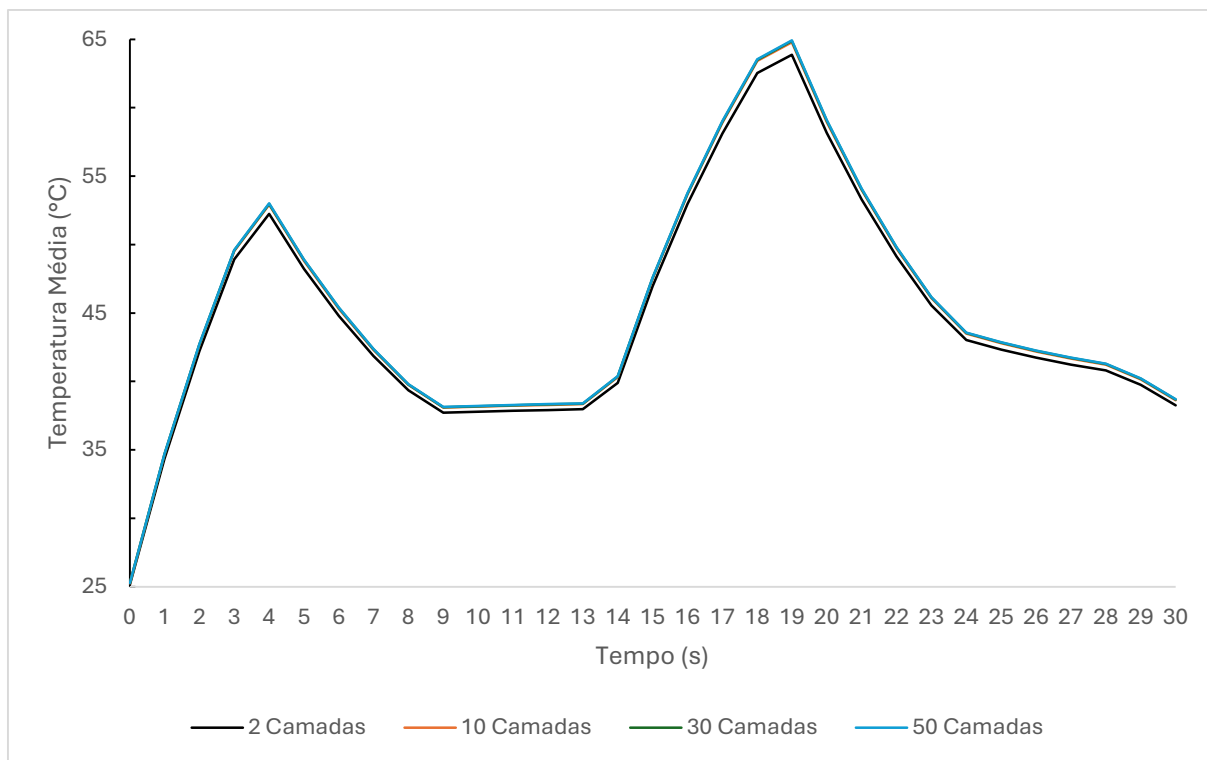


Gráfico 4.15: Variação da temperatura média ao longo do tempo – Espessura duplicada

Fonte: Elaborada pelo autor

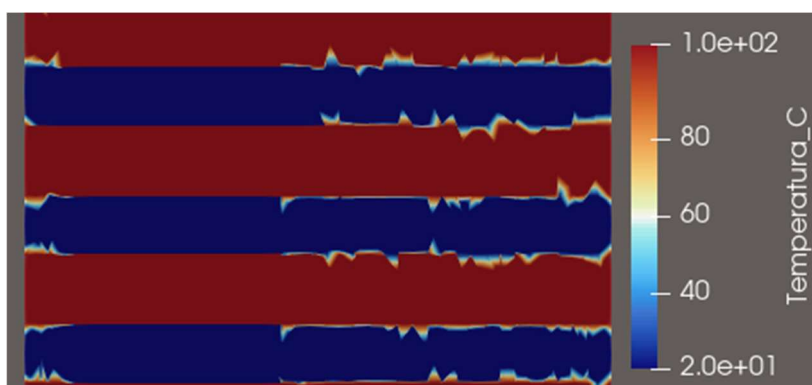


Figura 4.9: Parcial do corte longitudinal na espessura duplicada - 10 camadas em 19s

Fonte: Elaborada pelo autor

Com base na figura 4.9 e no gráfico 4.15, a dupla espessura do separador aumenta a resistência térmica, dificultando a dissipação de calor e intensificando o gradiente de temperatura. Essa intensificação do gradiente é, na verdade, uma exacerbação do efeito anisotrópico, pois ao duplicar a espessura do separador de polietileno (o principal isolante térmico na direção perpendicular), a resistência à passagem de calor do núcleo para as superfícies superior e inferior aumenta

drasticamente. Conseqüentemente, o fluxo de calor é forçado a seguir, de forma ainda mais preferencial, os caminhos de menor resistência ao longo dos coletores de alumínio (condução paralela). Isso acentua a diferença de temperatura entre o centro e as bordas, tornando a distribuição de calor ainda menos uniforme.

Além disso, o separador mais espesso aumenta a resistência iônica e o ESR, podendo reduzir o desempenho e gerar mais calor. Embora possa haver benefícios como maior robustez mecânica, dobrar o separador penaliza a dissipação térmica e favorece pontos quentes, exigindo compensações no projeto (LAJNEF et al, 2014, p. 488-495).

O gráfico 4.16 reúne todas as variações simuladas para o modelo de 2 camadas, permitindo uma visualização consolidada do efeito de cada condição sobre a evolução térmica do dispositivo.

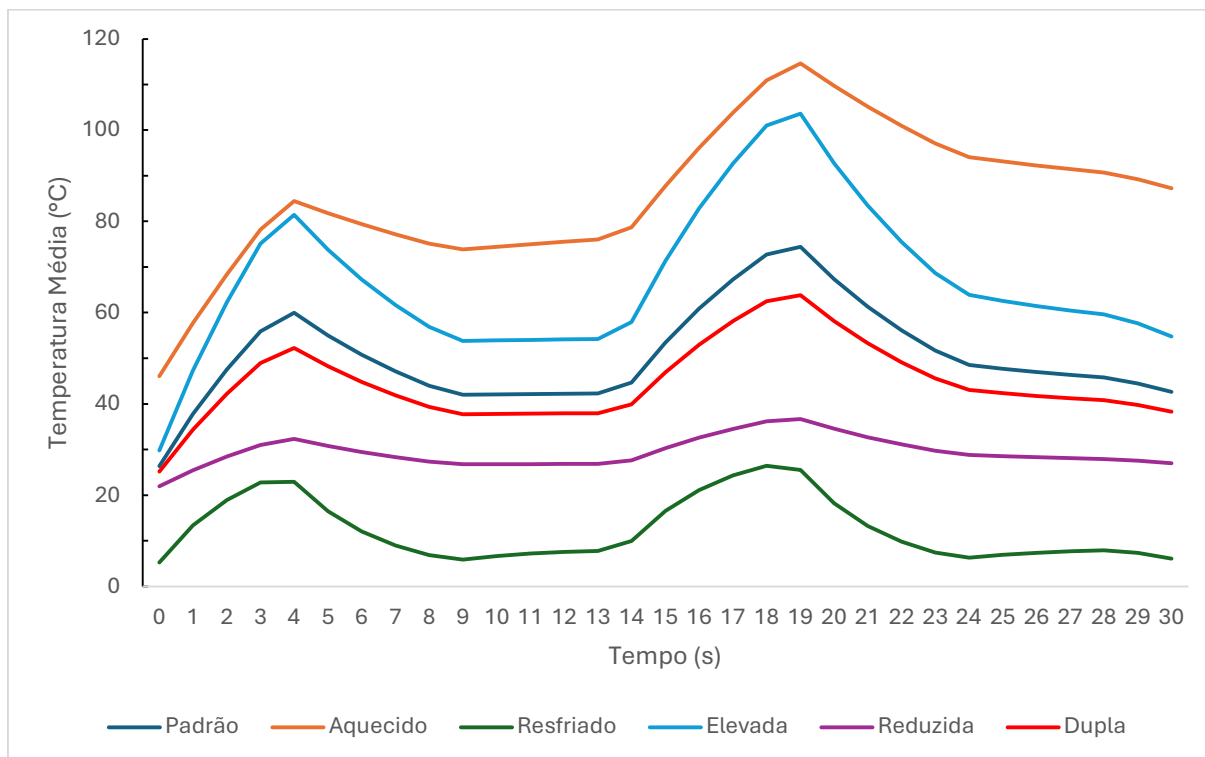


Gráfico 4.16: Variação da temperatura média ao longo do tempo de todas as simulações – 2 camadas

Fonte: Elaborada pelo autor

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho apresentou uma análise detalhada do comportamento térmico de supercapacitores empilhados, modelados tridimensionalmente e simulados no software Elmer por meio do Método dos Elementos Finitos (FEM). A abordagem permitiu atender ao objetivo geral de investigar, de forma comparativa, os efeitos de diferentes condições estruturais e operacionais sobre a evolução da temperatura nesses dispositivos.

Os resultados obtidos confirmaram os objetivos específicos: foi possível implementar a modelagem paramétrica da geometria, simular diferentes números de camadas, analisar a influência da espessura do separador, da variação da temperatura ambiente, do coeficiente convectivo e da intensidade da geração de calor. Dessa forma, o estudo evidenciou que:

- i. O número de camadas influencia de maneira discreta a temperatura média global, mas altera significativamente a distribuição espacial do calor, com surgimento de pontos quentes em configurações mais espessas;
- ii. Condições ambientais adversas (temperatura externa elevada e baixa convecção) ampliam a retenção de calor e podem comprometer a confiabilidade do dispositivo;
- iii. Cenários de resfriamento eficiente reduzem os gradientes térmicos, favorecendo a estabilidade e a vida útil;
- iv. O aumento da geração interna de calor mostrou-se diretamente proporcional à intensificação dos pontos críticos, enquanto reduções mitigaram significativamente os gradientes;
- v. A duplicação do separador aumentou a resistência térmica, reforçando a necessidade de otimizar o equilíbrio entre robustez mecânica e dissipação térmica.

Do ponto de vista prático, os resultados reforçam a importância do gerenciamento térmico em supercapacitores aplicados a sistemas de alta potência, nos quais pequenas diferenças de dissipação podem levar a falhas aceleradas. Assim, o trabalho contribui para orientar estratégias de projeto que considerem não apenas parâmetros elétricos, mas também limitações térmicas.

Entretanto, algumas limitações precisam ser reconhecidas: foram adotadas propriedades térmicas médias e isotrópicas, sem considerar variações dependentes

da temperatura; os fenômenos eletroquímicos foram representados apenas pela geração de calor volumétrica; e o horizonte temporal das simulações foi restrito a poucos ciclos de operação.

Como perspectivas para trabalhos futuros, recomenda-se:

- i. A criação de um volume de ar ao redor do supercapacitor para analisar de forma mais realista as trocas térmicas com o ambiente;
- ii. A inclusão da radiação térmica nas simulações, ampliando a fidelidade do modelo;
- iii. A avaliação de diferentes materiais de separador e eletrodo, buscando alternativas que conciliem desempenho elétrico e dissipação de calor;
- iv. O estudo de geometrias alternativas do dispositivo, além da estrutura empilhada clássica, a fim de identificar configurações mais eficientes do ponto de vista térmico;
- v. Simulações com ciclos mais longos e cargas térmicas maiores, aproximando os resultados de condições reais de uso prolongado;
- vi. A validação experimental dos resultados numéricos, etapa fundamental para consolidar a confiabilidade do modelo.

Em síntese, a modelagem térmica via FEM mostrou-se uma ferramenta eficaz para prever a distribuição de calor em supercapacitores, permitindo identificar condições críticas de operação e auxiliar no desenvolvimento de soluções de resfriamento. O trabalho cumpriu seus objetivos e abre perspectivas para estudos mais avançados na área de gerenciamento térmico de dispositivos de armazenamento de energia.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- LI, Y.; WANG, S.; ZHENG, M.; LIU, J. **Thermal behavior analysis of stacked-type supercapacitors with different cell structures**. CSEE Journal of Power and Energy Systems, v. 4, n. 1, p. 112–120, Mar. 2018.
- BURKE, A. **Ultracapacitors: why, how, and where is the technology**. Journal of Power Sources, v. 91, n. 1, p. 37-50, 2000.
- GUALOUS, H.; BOUQUAIN, D.; BERTHON, A.; KAUFFMANN, J.M. **Experimental study of supercapacitor serial resistance and capacitance variations with temperature**. Journal of Power Sources, v. 123, n. 1, p. 86-93, 2003.
- FORNARO, P.; TALPONE, J. I.; MORÉ, J.; RIVA, D. **Diseño y construcción de un banco de supercapacitores**. In: REUNIÓN DE TRABAJO DE LA ASOCIACIÓN ARGENTINA DE ENERGÍAS RENOVABLES Y MEDIO AMBIENTE, 39., 2016, Argentina. Acta de la XXXIX Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente. Argentina: AADERyMA, 2016. v. 4, p. 08.45–08.56. ISBN 978-987-29873-0-5.
- CONWAY, B. E. **Electrochemical Supercapacitors: Scientific Fundamentals and Technological Applications**. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 1999.
- SIMON, P.; GOGOTSI, Y. **Materials for electrochemical capacitors**. Nature Materials, v. 7, n. 11, p. 845–854, 2008.
- INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. **Fundamentals of Heat and Mass Transfer**. 8. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2017.
- ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. **Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications**. 6. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2020.
- REDDY, J. N. **An Introduction to the Finite Element Method**. 4. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2019.
- LEWIS, R. W.; NITHIARASU, P.; SEETHARAMU, K. N. **Fundamentals of the Finite Element Method for Heat and Fluid Flow**. Chichester: John Wiley & Sons, 2004.
- RÅBACK, P.; MALINEN, M. et al. **Elmer Models Manual**. CSC – IT Center for Science, 2023.
- CSC - IT Center for Science. **Elmer FEM Solver**. Disponível em: <https://www.csc.fi/web/elmer>. Acesso em: 13 ago. 2025.

- DANDEVILLE, Y.; GUALOUS, H.; MIRAOU, A. **Thermal modeling and characterization of supercapacitor for vehicle applications**. IEEE Transactions on Industry Applications, v. 49, n. 4, p. 1709-1715, 2013.
- SCHIFFER, J.; SAUER, D. U.; BINDER, H.; SCHUSTER, A.; POKALYKIN, A. **The influence of temperature on the charging behavior of electrochemical double-layer capacitors**. Journal of Power Sources, v. 160, n. 1, p. 765-772, 2006.
- GEUZAIN, C.; REMACLE, J.-F. Gmsh: **A 3-D finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities**. International Journal for Numerical Methods in Engineering, v. 79, n. 11, p. 1309–1331, 2009.
- AHRENS, J.; GEVECCI, B.; LAW, C. **ParaView: An End-User Tool for Large Data Visualization**. In: HANSEN, C. D.; JOHNSON, C. R. (eds.). The Visualization Handbook. Elsevier, 2005.
- MARCANO, F. C.; BÉGUIN, F.; KODAMA, T. **Thermal management of electrochemical double layer capacitors**. Journal of Power Sources, v. 156, n. 2, p. 696-702, 2006.
- LAJNEF, N.; DHAOU, I. B.; GUALOUS, H.; VAN MIERLO, J. **Thermal modeling and heat management of commercial supercapacitors**. Journal of Power Sources, v. 247, p. 488-495, 2014.
- ZHOU, W. et al. **A Review on Thermal Behaviors and Thermal Management Systems for Supercapacitors**. Batteries, v. 9, n. 128, p. 1-40, 2023.
- ZHANG, L. et al. **A review of supercapacitor modeling, estimation, and applications: A control/management perspective**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 81, p. 1868-1878, Jan. 2018.
- GAUTHIER, M. et al. **A Review on Electro-thermal Modeling of Supercapacitors for Energy Storage Applications**. In: 2019 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2019, San Diego, CA, USA. p. 1992-1998.
- VOLPATO, A. F.; GRUN, L. T.; WALTRICH, G. **Análise Eletrotérmica de Supercapacitores para Aplicações de Alta Potência**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA (COBEP), 14., 2017, Juiz de Fora. Anais... Juiz de Fora: SBA, 2017. p. 1-6.
- OLIVEIRA, T. C. M. de. **Modelagem e Simulação de um Banco de Supercapacitores para Aplicação em Veículos Elétricos**. 2015. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.