



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E BIOMÉDICA

**ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DA
INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NO PROCESSO DE
CARGA E DESCARGA DE SUPERCAPACITORES**

Belém – PA

2025

SÉRGIO MURILO LIMA CUNHA – 202107140003

ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NO PROCESSO DE CARGA E DESCARGA DE SUPERCAPACITORES

Trabalho de Conclusão de Curso orientado pelo Prof.^a Reinaldo Correa Leite, apresentado ao Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará, como requisito para obtenção do grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Belém – PA

2025



FEEB

SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
FACULDADE DE ENGENHARIAS ELÉTRICA E BIOMÉDICA

SÉRGIO MURILO LIMA CUNHA

“ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NO
PROCESSO DE CARGA E DESCARGAS DE SUPERCAPACITORES”

Monografia apresentada como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica pela Faculdade de Engenharias Elétrica e Biomédica do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal Pará, submetida à apreciação da banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Orientador:

Prof. Dr. Reinaldo Corrêa Leite

(Faculdade de Engenharia Elétrica e Biomédica – FEEB - UFPA)

Examinador 1:

Prof. Dr. André Melo de Moraes

(Faculdade de Engenharia Elétrica e Biomédica – FEEB - UFPA)

Examinador 2:

Allan Rodrigo A. Manito.

Prof. Dr. Allan Rodrigo Arrifano Manito

(Faculdade de Engenharia Elétrica e Biomédica – FEEB - UFPA)

Belém, Pará

17 de setembro de 2025.



Secretaria da Faculdade de Engenharias Elétrica e Biomédica (FEEB)
Instituto de Tecnologia (ITEC) / Universidade Federal do Pará (UFPA)
End. Rua Augusto Corrêa nº 01- Guamá – Belém – PA – CEP: 66.075-110
E-mail: fee@ufpa.br – Tel.: (91) 3201-7250 / 7248

AGRADECIMENTOS

Sou muito grato, primeiramente, aos meus pais, Murilo Cunha Campos e Patrícia da Conceição Lima, que sempre me incentivaram a continuar no curso mesmo nos momentos mais complicados.

Aos meus colegas e amigos do curso, que me ajudaram e compartilharam seu conhecimento comigo para a realização das atividades do curso de engenharia elétrica.

Ao Professor e orientador Dr. Reinaldo Correa Leite, que além de me orientar de forma sublime na confecção desse trabalho, também permitiu que eu participasse do projeto de pesquisa que deu origem ao meu trabalho de conclusão de curso.

Ao Professor Dr. Allan Rodrigo Arrifano Manito, que me direcionou à realização dos ensaios e me auxiliou na coleta dos dados das medições durante os ensaios.

Os autores do deste trabalho agradecem o apoio da Norte Energia para a realização do presente trabalho, no âmbito do projeto intitulado “Sistema de Geração de Energia para Atendimento de Demandas de Pequeno Porte Utilizando Banco de Supercapacitores Integrados com Geração Fotovoltaica” (PD-07427-0522/2022), realizado através do Programa de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PDI) da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), derivado da Chamada Externa nº 001/2022

Por fim, aos laboratórios LEAT e CEAMAZON, que me acolheram para o desenvolvimento do projeto de pesquisa, proporcionando um ambiente confortável e acolhedor, sempre atentos ao meu bem-estar e disponibilizando os melhores materiais de trabalho.

MUITO OBRIGADO!

RESUMO

Este trabalho investiga a influência da temperatura na carga e descarga de supercapacitores, analisando suas implicações no desempenho e na eficiência energética desses dispositivos. Para isso, foram conduzidos ensaios experimentais e simulações numéricas a fim de avaliar o comportamento térmico e elétrico dos supercapacitores em diferentes condições operacionais. Os resultados demonstram que a temperatura impacta diretamente a distribuição interna de calor e a resposta da tensão de saída, influenciando a estabilidade e a durabilidade do componente. Observou-se que o supercapacitor degradado descarrega cerca de 40% mais rápido que o modelo novo, destacando o impacto do envelhecimento térmico na eficiência energética. A comparação entre o modelo simulado e o ensaio em bancada reforça a importância das ferramentas computacionais para otimização do projeto e previsibilidade de desempenho. O estudo destaca a relevância do controle térmico em aplicações práticas e sugere futuras investigações para aprimoramento da tecnologia de armazenamento de energia.

ABSTRACT

This work investigates the influence of temperature on the charging and discharging processes of supercapacitors, analyzing its impact on performance and energy efficiency. Experimental tests and numerical simulations were conducted to evaluate the thermal and electrical behavior of supercapacitors under different operating conditions. The results indicate that temperature significantly affects the internal heat distribution and output voltage response, directly influencing the component's stability and lifespan. It was observed that degraded supercapacitors discharge approximately 40% faster than new ones, highlighting the effects of thermal aging. The comparison between the simulated model and the bench test highlights the importance of computational tools for optimizing design and predicting performance. This research underscores the relevance of thermal management in practical applications and suggests further investigations to enhance energy storage technology.

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| AGRADECIMENTOS | 4 |
| RESUMO | 5 |
| ABSTRACT | 6 |
| 1. INTRODUÇÃO | 8 |
| 1.1 JUSTIFICATIVA | 8 |
| 1.2 MOTIVAÇÃO..... | 8 |
| 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO | 9 |
| 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 10 |
| 2.1 O QUE SÃO SUPERCAPACITORES | 10 |
| 2.2 EFEITO DA TEMPERATURA EM SUPERCAPACITORES | 12 |
| 2.3 MODOS DE FALHA DO CAPACITOR..... | 15 |
| 2.4 CONCLUSÃO..... | 16 |
| 3. METODOLOGIA | 17 |
| 3.1 SIMULAÇÃO NUMÉRICA | 17 |
| a) MODELO ELÉTRICO..... | 17 |
| b) MODELO TÉRMICO | 20 |
| 3.2 TESTES EM BANCADA..... | 22 |
| 3.3 CONCLUSÕES..... | 27 |
| 4. RESULTADOS | 28 |
| 5. CONCLUSÃO | 33 |
| 6. REFERENCIAS | 34 |

1. INTRODUÇÃO

1.1 JUSTIFICATIVA

Supercapacitores ou ultracapacitores, são componentes que se destacam por sua alta densidade de potência e rápida taxa de carga e descarga. Eles desempenham um papel crucial em aplicações que exigem fornecimento imediato de energia como em veículos elétricos (ou híbridos), sistemas de energia renovável e dispositivos eletrônicos portáteis.

A eficiência e a durabilidade dos supercapacitores são influenciadas por diversos fatores, sendo a temperatura um dos mais significativos, conforme destaca os trabalhos de Gualous. Variações térmicas podem afetar diretamente ou indiretamente os parâmetros elétricos do supercapacitor (SC), como capacitância, resistência interna, e a tensão de saída. Compreender como a temperatura impacta o desempenho dos supercapacitores é fundamental para otimizar seu uso em diferentes condições ambientais e aplicações práticas.

Realizar estudos acerca da temperatura nos supercapacitores é fundamental devido à crescente demanda por sistemas de armazenamento de energia eficientes e confiáveis. Em regiões de clima ensolarado, como por exemplo as regiões Norte e Nordeste do Brasil. Portanto, é vital garantir que os supercapacitores mantenham o desempenho consistente e seguro para garantir sistemas fotovoltaicos seguros e confiáveis.

1.2 MOTIVAÇÃO

A motivação central deste estudo surge da necessidade de aprimorar a eficiência e a confiabilidade dos supercapacitores em diferentes condições operacionais, especialmente em aplicações ligadas ao sistema elétrico de potência. Com a crescente transição global para fontes de energia renováveis e a eletrificação de sistemas de transporte, torna-se essencial o desenvolvimento de dispositivos de armazenamento que operem de forma eficiente sob variações térmicas.

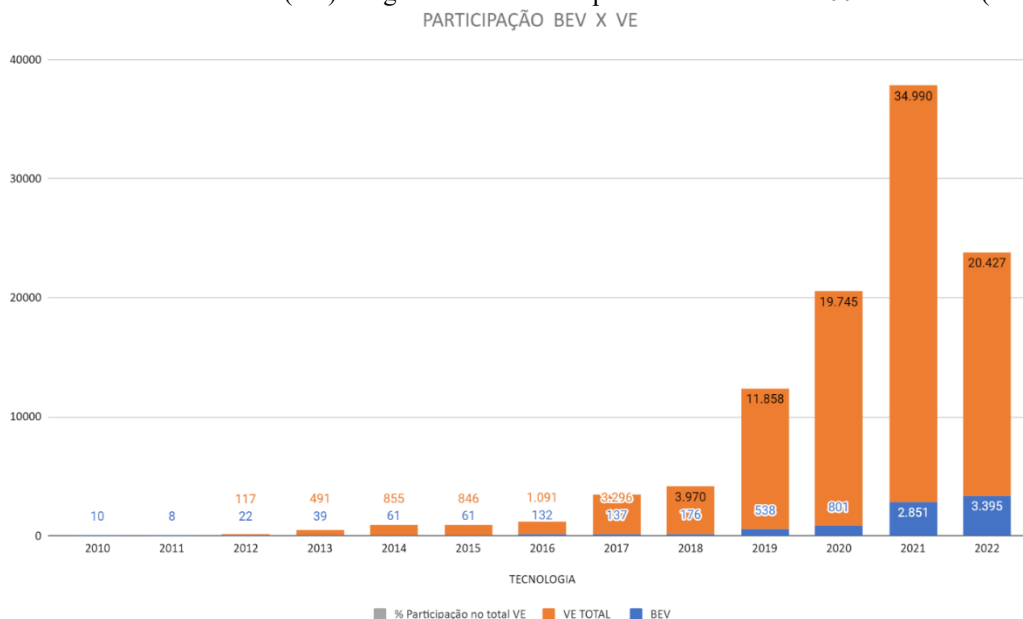
No contexto dos veículos elétricos e híbridos, os supercapacitores atuam como elementos complementares às baterias, oferecendo suporte em momentos de alta demanda energética, como acelerações rápidas e frenagens regenerativas. Essa integração contribui para a otimização do desempenho e para o prolongamento da vida útil dos sistemas de armazenamento.

No cenário brasileiro, segundo o relatório anual de 2023 da Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (ANFAVEA), observa-se um crescimento expressivo na comercialização de veículos elétricos e híbridos. Esse aumento é detalhado na pesquisa da

Associação Brasileira do Veículo Elétrico (ABVE), representada na Figura 1, que evidencia a expansão das categorias de veículos eletrificados, reforçando a importância de estudos voltados à avaliação de seus componentes.

Além disso, considerando as condições climáticas de regiões tropicais e equatoriais, como a Amazônia, onde os dispositivos podem ser submetidos a temperaturas elevadas, torna-se relevante investigar o comportamento térmico dos supercapacitores. Este trabalho, desenvolvido no âmbito do projeto com a Norte Energia, tem como objetivo contribuir para o avanço de metodologias que avaliem o desempenho desses dispositivos em sistemas híbridos de armazenamento, visando aplicações em ambientes de alta exigência térmica e energética.

Figura 1: Total de veículos elétricos vendidos no Brasil, desde o início das vendas, em 2010. Cor laranja representa os veículos elétricos (VE) em geral e a cor azul representa os veículos 100% a bateria (BEV)



Fonte: ABVE – Associação Brasileira do Veículo Elétrico. Publicado em 4 jul. 2022. Disponível em: <https://abve.org.br/bevs-puxam-aumento-de-eletrificados-no-semester>.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

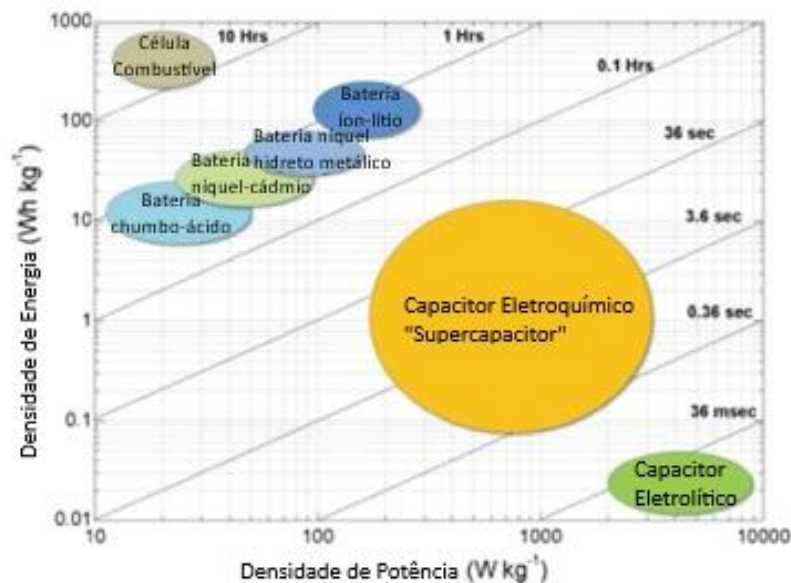
O primeiro capítulo apresenta uma introdução ao tema e à relevância da pesquisa. O segundo capítulo aborda os conceitos fundamentais dos supercapacitores, suas diferenças em relação aos capacitores tradicionais e os modelos matemáticos que descrevem a distribuição de calor interna. O terceiro capítulo apresenta os resultados obtidos por meio das simulações digitais, seguidos da descrição do protótipo físico de bancada, que reproduz o comportamento observado nas simulações. O quarto capítulo analisa como a elevação da temperatura afeta a tensão de saída dos supercapacitores, tanto nos modelos digitais quanto físicos, aprofundando a discussão sobre a condução de calor interna. Por fim, o quinto capítulo apresenta as conclusões sobre a metodologia adotada e os impactos da temperatura no desempenho dos supercapacitores.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 O QUE SÃO SUPERCAPACITORES

Os supercapacitores são dispositivos de armazenamento de energia amplamente utilizados em diversas aplicações, incluindo eletrônica de potência, sistemas de energia renovável e veículos. Sua crescente adoção se deve às suas características vantajosas, como alta densidade de potência, longa vida útil e capacidade de carregar e descarregar rapidamente. Além disso, de acordo com Ratha 2018, os supercapacitores apresentam alta densidade de potência, isto é, conseguem fornecer energia de forma rápida, principalmente durante o descarregamento, como pode ser visto na Figura 2, o que o torna ideal para aplicações que exigem picos de energia. Em contrapartida, os supercapacitores diferenciam-se das baterias que se destacam pela alta densidade de energia, garantindo armazenamento prolongado. Essa complementaridade é explorada em Sistemas Híbridos de Armazenamento de Energia (HESS), onde os SCs suportam demandas transitórias (como acelerações e frenagens regenerativas em veículos elétricos), aliviando o estresse sobre as baterias e prolongando sua vida útil. Conforme discutido por Jing (2018), a combinação otimiza o desempenho global do sistema, equilibrando a capacidade de armazenamento (baterias) com a resposta dinâmica (supercapacitores), especialmente em aplicações como energias renováveis e mobilidade elétrica.

Figura 2: Comparativo do supercapacitor em relação ao capacitor comum e à bateria

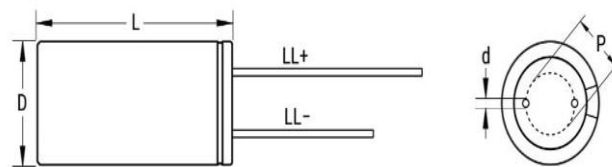


Fonte: Zhang et al., 2015 (Adaptado)

Os capacitores possuem uma unidade de medida para dimensioná-los, denominada farad (F). Na indústria eletrônica, é comum trabalhar com componentes na faixa de microfarads (μF) ou nanofarads (nF). No entanto, os supercapacitores destacam-se por

apresentarem valores de capacitância significativamente superiores, podendo alcançar centenas ou mesmo milhares de farads, como demonstrado por Kötzt e Carlen (2000) em seu estudo sobre os princípios dos capacitores eletroquímicos. Essa diferença de escala está diretamente relacionada à sua estrutura eletroquímica única, que permite armazenamento energético muito mais elevado do que os capacitores convencionais. Outro ponto importante a se destacar seria a diferença na geometria dos componentes. Supercapacitores apresentam dimensões maiores se comparados ao de capacitores normais. Por exemplo, um capacitor de $100 \mu\text{F}$ do fabricante KEMET (como pode ser visto na figura 3) e um supercapacitor de 360 F do fabricante NESSCAP (capacitor esse que será usado nos ensaios e circuitos elétricos deste trabalho e representado pela figura 4), podem ser analisados de acordo com suas especificações de medidas, conforme representadas, respectivamente, pelas tabelas 1 e 2.

Figura 3: Representação longitudinal e transversal do capacitor de $100 \mu\text{F}$ do fabricante KEMET



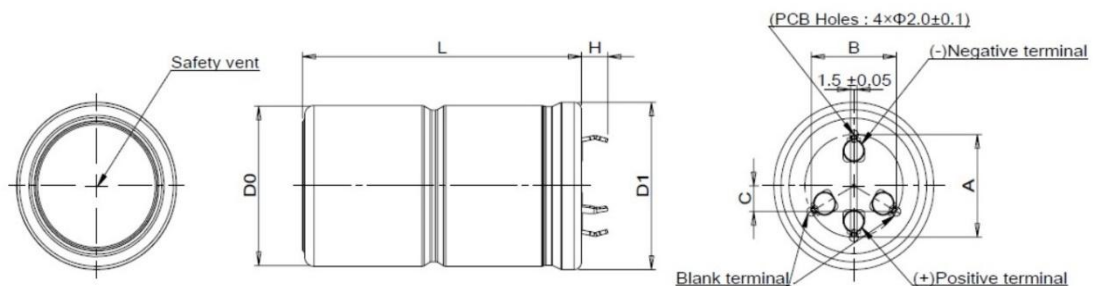
Fonte: datasheet do fabricante

Tabela 1: Valores das dimensões do capacitor, para modelo de referência C3

| Size Code | D | L | P | D | LL+/LL- |
|-----------|-------|--------|-------|-------|---------|
| C3 | 5.0mm | 11.0mm | 2.0mm | 0.5mm | 20/15mm |

Fonte: datasheet do fabricante

Figura 4: Representação longitudinal e transversal do supercapacitor de 360 F , modelo NESSCAP



Fonte: datasheet do fabricante

Tabela 2: Valores das dimensões do supercapacitor

| | |
|----|--------|
| D0 | 35.5mm |
| D1 | 35.7mm |
| L | 63.5mm |
| H | 5.6mm |
| A | 22.5mm |
| B | 19.5mm |
| C | 5.6mm |

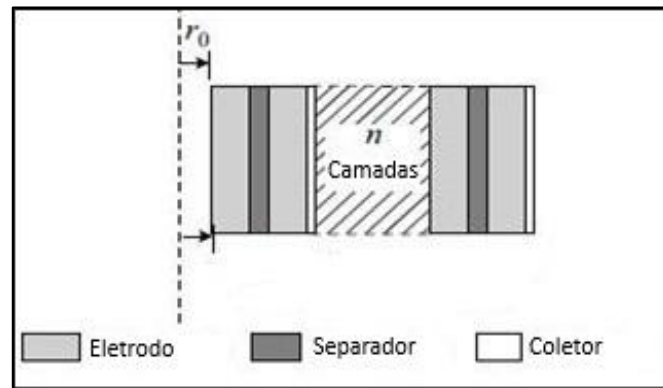
Fonte: datasheet do fabricante

2.2 EFEITO DA TEMPERATURA EM SUPERCAPACITORES

Supercapacitores estão sujeitos ao estresse térmico devido às suas características operacionais, como a alta densidade de corrente presente durante o processo de carga e descarga, que tem como resultado a geração de uma elevada quantidade de calor que depende das condições de operação, do design das células e das propriedades do material, que podem causar envelhecimento acelerado (Kundu, 2021).

Durante o processo de carregamento e descarregamento, o calor produzido pelos supercapacitor pode ser reversível ou irreversível, porém, neste trabalho será abordado apenas os casos em que o calor for irreversível. Três tipos de mecanismos de transferência de calor estão envolvidos na circulação de calor em supercapacitores: que são condução, convecção e irradiação (esta última não será abordada neste trabalho). Como o eletrólito está em repouso, a convecção dentro do supercapacitor pode ser desconsiderada. Assim, o único mecanismo existente dentro do supercapacitor é a condução de calor nas partes sólidas, tais como: eletrodos, coletores e separadores. Na superfície externa do supercapacitor, os mecanismos de transferência de calor são a convecção natural e a radiação Li et al. (2018). O supercapacitor cilíndrico de multicamadas utilizado neste trabalho pode ser dividido em duas regiões: um núcleo multicamadas e uma carcaça que encapsula o núcleo. A Figura 5 abaixo ilustra a estrutura do núcleo. O núcleo do supercapacitor é formado por 30 camadas enroladas ao redor do eixo, sendo que cada camada contém um eletrodo poroso, o separador, outro eletrodo poroso e um coletor, dispostos nessa ordem.

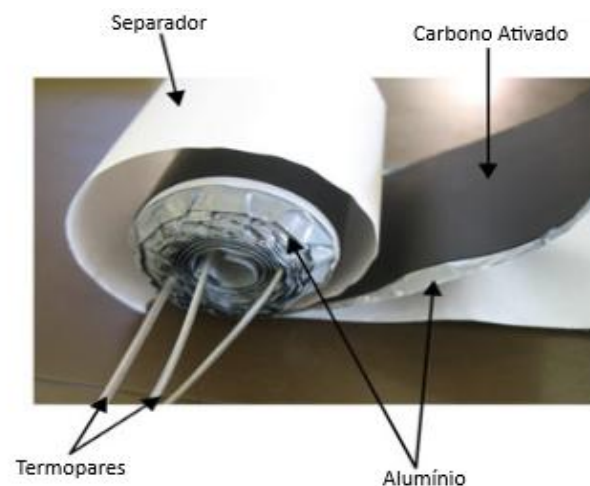
Figura 5: Estrutura multicamadas do núcleo do supercapacitor



Fonte: Li et al., 2018 (Adaptado)

A Figura 6 apresenta uma visão interna da estrutura de um supercapacitor enrolado, evidenciando suas multicamadas constituintes. O dispositivo é formado por camadas alternadas de materiais condutores e dielétricos, os quais desempenham papéis essenciais no armazenamento e transferência de carga elétrica. Tem-se a camada de carbono ativado (Activated carbon) que é responsável pelo armazenamento da carga elétrica devido à sua alta área superficial e estrutura porosa, que facilita a adsorção e a liberação de íons; o separador (Separator) que corresponde a um material dielétrico que impede o contato direto entre as camadas condutoras, evitando o curto-circuito entre os eletrodos e garantindo a eficiência do armazenamento de carga; a camada de alumínio (Aluminum) que é utilizada como coletor de corrente, permitindo a condução eficiente dos elétrons para os eletrodos.

Figura 6: Estrutura interna de um supercapacitor



Fonte: Gualous, 2010 (Adaptado)

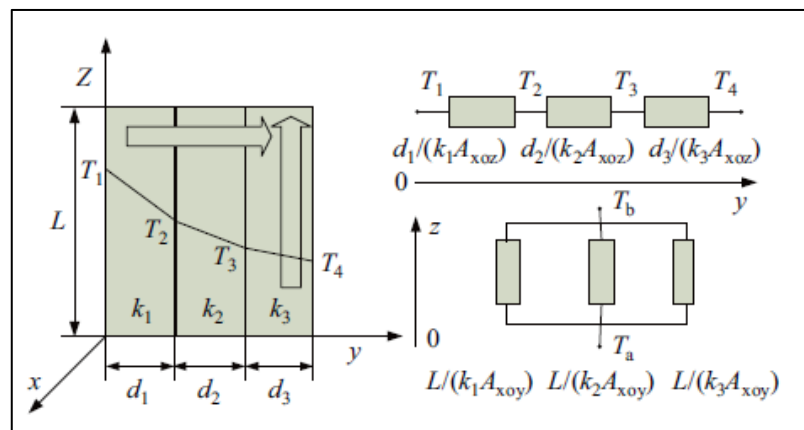
Como foi visto anteriormente, o mecanismo de transferência de calor presente no supercapacitor corresponde a condução, que ocorre na região do núcleo e a convecção que ocorre na extremidade do SC. Estes processos transportam todo o calor produzido

internamente ao SC para o ambiente externo. A transferência de calor no supercapacitor é modelada conforme exposto em Li (2018). A condução de calor é modelada pela Eq. (1)

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + q . \quad (1)$$

Onde ρ é a massa específica, q o calor, c_p o calor específico, k a condutividade térmica e T a temperatura. Os valores destas propriedades serão considerados como valores equivalente pois o fluxo de calor passa pelos diferentes materiais que compõe o núcleo do supercapacitor. Estes parâmetros equivalentes influenciam na propagação de calor do sistema, e serão melhor abordados no Capítulo 3 deste trabalho. A figura 7 mostra que para o supercapacitor, na direção axial (vertical) o calor distribuído possui um fluxo para o qual existe uma resistência térmica do material na direção contrária ao sentido do calor como resistências em paralelo, diferentemente da direção radial, onde comporta-se como se fossem resistências em série.

Figura 7: Fluxo de calor dentro do núcleo do capacitor



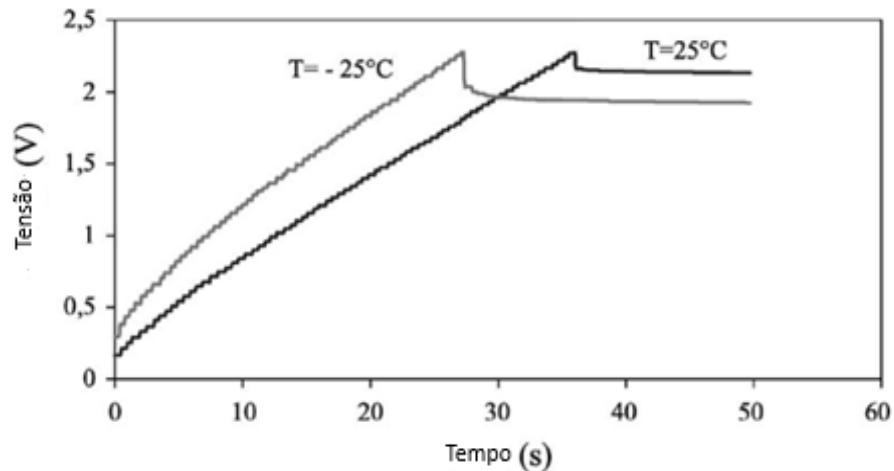
Fonte: Li, 2018

A variação da temperatura influencia diretamente o desempenho dos supercapacitores, em especial na resistência série equivalente (ESR). Segundo Gualous et al. (2003), o aumento da temperatura reduz a viscosidade do eletrólito, o que melhora a mobilidade dos íons e, conseqüentemente, diminui a ESR do componente. Essa redução de resistência interna resulta em menor queda de tensão durante a descarga, permitindo que o supercapacitor mantenha uma performance mais eficiente e estável. Por outro lado, em temperaturas mais baixas, a ESR se eleva devido à limitação na movimentação dos íons, provocando dissipações internas maiores e acelerando a queda de tensão.

Essa dinâmica entre temperatura e ESR afeta diretamente a taxa de descarga do supercapacitor. Em temperaturas elevadas, isto é, próximas ou superiores à máxima temperatura suportável conforme especificada no datasheet do fabricante do componente,

como a ESR é reduzida, a energia armazenada é liberada de forma mais controlada, favorecendo uma descarga mais lenta e otimizada. Já em ambientes frios, ou seja, abaixo da especificada pelo datasheet do fabricante, a alta ESR impõe uma maior perda de energia por efeito resistivo, o que leva a uma descarga mais rápida e menos eficiente.

Figura 8: Tensão do supercapacitor no ciclo de carregamento



Fonte: H. Gualous et al. / *Journal of Power Sources* 123 (2003) 86–93 (Adaptado)

Portanto, a gestão térmica é um fator crítico no dimensionamento e aplicação dos supercapacitores em sistemas eletrônicos, sendo essencial considerar as condições ambientais de operação para maximizar o desempenho energético (GUALOUS et al., 2003).

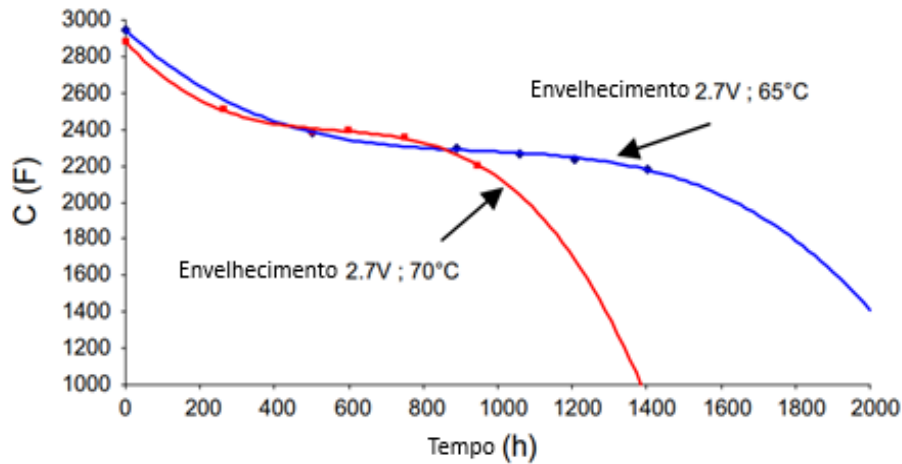
2.3 MODOS DE FALHA DO CAPACITOR

O desempenho dos supercapacitores está diretamente relacionado à sua vida útil, que pode ser comprometida por diversos fatores ambientais e elétricos. De acordo com Gualous 2010, entre os modos de falha observados em supercapacitores, será destacado o mecanismo crítico que diz respeito à perda significativa de capacitância (superior a 20%) causada pela diminuição da superfície ativa do carbono e pela redução da disponibilidade de íons durante os ciclos eletroquímicos, afetando diretamente a capacidade de armazenamento de energia. Além disso, verifica-se que o aumento acentuado da resistência série equivalente (ESR), acima de 100%, decorrente da degradação da aderência entre o eletrodo e o coletor, intensificada pela ação térmica, também impacta negativamente na movimentação iônica e na eficiência geral do dispositivo.

Na figura 9 é apresentado um capacitor da marca Maxwell Technologies modelo MC2600 de 2600F operando em duas faixas de temperaturas distintas e por longos horas. Nessa figura é possível observar que o envelhecimento em decorrência do tempo prolongado

de operação é impulsionado pela maior temperatura (70°C) a qual o supercapacitor degrada-se com maior rapidez a sua capacitância, em comparação com o de menor temperatura.

Figura 9: Variação da capacitância de acordo com o tempo de envelhecimento do capacitor em diferentes temperaturas



Fonte: Gualous, 2010 (Adaptado)

A exposição prolongada à tensão elétrica e os ciclos repetidos de carga e descarga fazem com que ocorra a redução da capacitância — que pode ser acelerada pelo efeito da temperatura a qual se encontra exposto —, o que por consequência resulta em ciclos mais rápidos por conta que a camada dielétrica do capacitor se degrada, o que aumenta a corrente de fuga (permitindo que o capacitor perca carga mesmo sem estar conectado).

2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foi possível discutir os principais conceitos acerca do funcionamento e da composição de um supercapacitor, suas diversas aplicações no contexto tecnológico atual, sua associação com a bateria em sistemas híbridos de armazenamento de energia, além de diferenciá-lo em relação ao capacitor comum. O conhecimento da distribuição de temperatura, inicialmente apresentada como modelo matemático é de suma importância para se estudar seu comportamento térmico, pois como se viu neste capítulo, seu aumento impacta na vida útil do supercapacitor. Portanto o estudo da distribuição de temperatura será abordado posteriormente em detalhes, e com parâmetros definidos, em um exemplo prático no capítulo seguinte.

3. METODOLOGIA

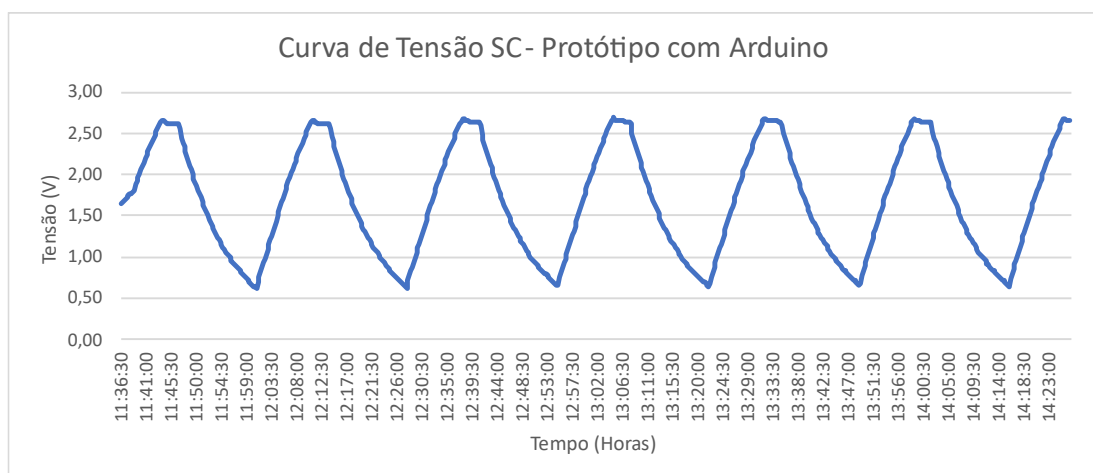
3.1 SIMULAÇÃO NUMÉRICA

a) MODELO ELÉTRICO

Para a verificação da influência da temperatura no supercapacitor é fundamental que, em um primeiro momento, haja uma caracterização de como um supercapacitor funciona. Para isso, foi realizada uma modelagem de circuito de carregamento e descarga utilizando o software PSIM. Neste ambiente de simulação, é possível definir parâmetros que alterem a curva de tensão do capacitor, nas etapas de carregamento, auto-descarga e descarregamento. A utilização de ambiente de simulação auxilia no estudo do comportamento de supercapacitores com diferentes circuitos e parâmetros, sendo esta uma grande vantagem da utilização deste software.

De acordo com a metodologia do Digital Twin, é necessário que o comportamento descrito pelo modelo digital se apresente de forma equiparada ao do sistema físico (Yang 2021). Para isso foi adquirido um supercapacitor de 360F de 2.7Volts modelo NESSCAP (será abordado mais aprofundado na próxima seção deste capítulo) onde se realizou um monitoramento de sua tensão por meio do Analisador de Energia HIOKI, conforme pode ser verificado na figura 10, para que, a partir de sua análise possa ser realizada a modelagem no software PSIM.

Figura 10: Ensaio de carregamento e descarregamento do supercapacitor à temperatura ambiente



Fonte: Autoria Própria

Os dados foram obtidos e carregados para o software que, por meio da ferramenta *Ultracapacitor Model Tool* analisou ponto a ponto da curva carregada do capacitor físico e

determinou os parâmetros a serem definidos no modelo do SC do PSIM conforme mostra a tabela 3.

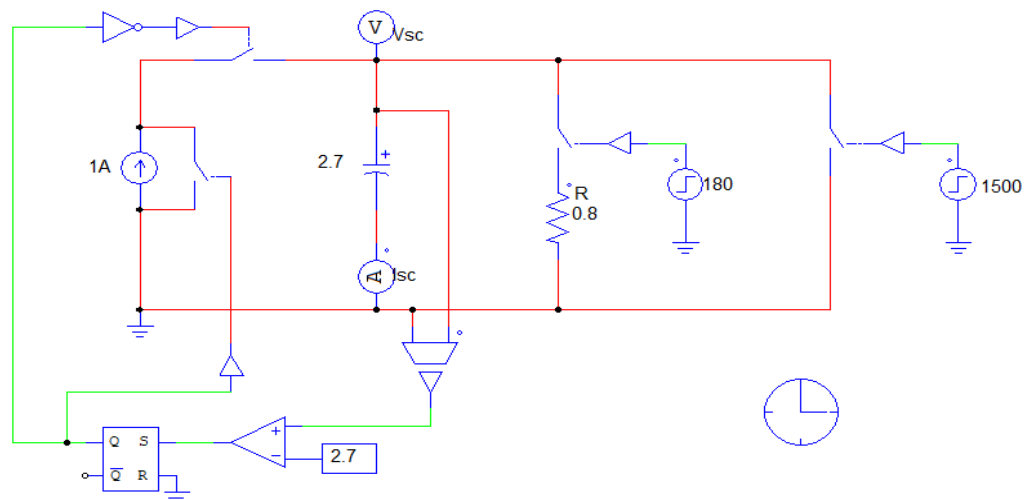
Tabela 3: Parâmetros de simulação do SC Digital, fornecidos pelo software PSIM

| Parâmetros | Valores |
|------------|-----------------|
| R1 | 0.0227 Ω |
| C1 | 47.25 F |
| R2 | 41.4 Ω |
| C2 | 2.5 F |
| R3 | 284.4 Ω |
| C3 | 7.2 F |

Fonte: Autoria própria

É importante destacar que os valores de referência, após obtidos, são inseridos no bloco do supercapacitor (presente no circuito da figura 11), contribuindo para a simulação, onde R1 e C1 estão associados com a resposta à curto prazo, R2 e C2 com a resposta a médio prazo e R3 e C3 com a resposta à longo prazo. Para o nosso exemplo, equivalem, respectivamente, às respostas nas etapas de carregamento, auto-descarga e descarregamento do supercapacitor. Portanto, sua influência reflete diretamente na curva de tensão do supercapacitor.

Figura 11: Circuito digital do supercapacitor no software de simulação PSIM

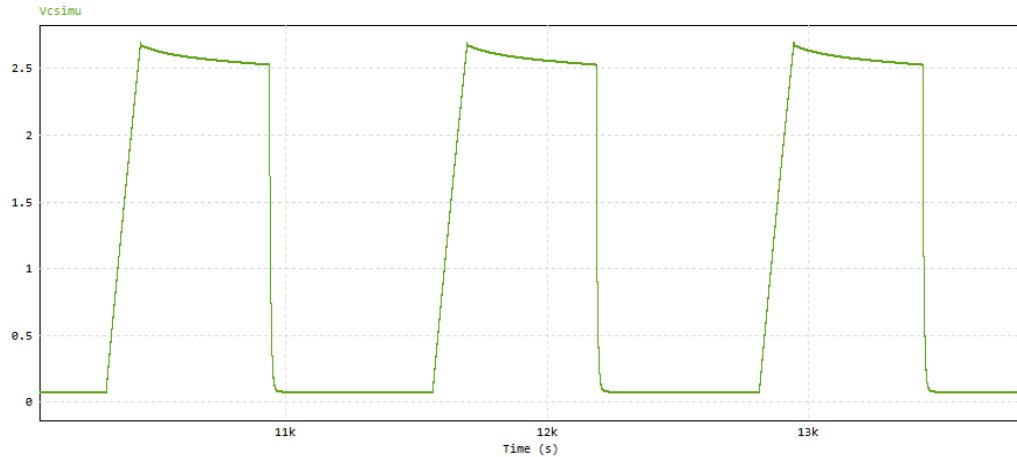


Fonte: Documentação oficial do software PSIM

O circuito da figura 11 representa o supercapacitor que será carregado a uma fonte CC (Corrente Constante) de 1A , até atingir sua tensão máxima que corresponde a 2.7 Volts e então entrará em autodescarga, ou seja, o circuito será aberto e o mesmo permanecerá nesse estado por 180 segundos (3 minutos) e então será acoplado a uma resistência de 0.8 Ω onde ele descarregará nessa carga e, por meio de um flip-flop, ocorrerá de maneira repetidamente, formando ciclos, os quais são compostos pelas três etapas (carregamento, autodescarga e

descarregamento). Na figura abaixo é apresentado o resultado de uma simulação iniciada contendo amostra de três ciclos.

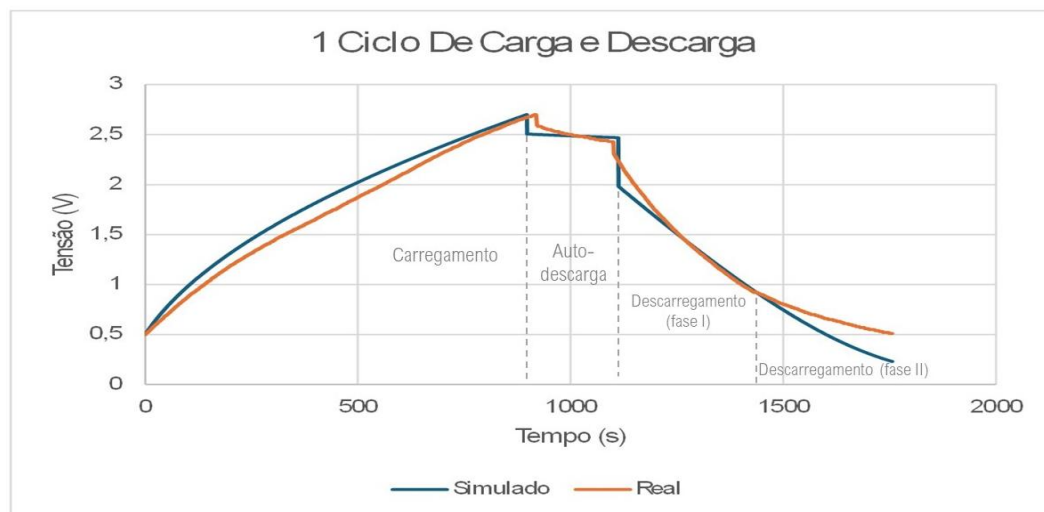
Figura 12: Tensão do SC durante ciclos de carga e descarga



Fonte: Autoria Própria

Após a obtenção da curva do modelo digital, houve a necessidade de comparar o comportamento em relação ao protótipo físico. Para isso foi adotado o procedimento em que se baseia em subdividir o período do ciclo completo do supercapacitor em quatro intervalos menores e então comparar seus respectivos valores, conforme mostra a figura 13.

Figura 13: Comparativo entre as curvas de tensão em um ciclo completo



Fonte: Autoria Própria

A ferramenta Ultracapacitor Model Tool, presente no software PSIM, apresenta maior precisão na simulação dos processos de carregamento e autodescarga dos supercapacitores, com foco especial na dinâmica inicial de armazenamento de energia. No entanto, observa-se que o modelo não representa com a mesma fidelidade o comportamento durante o período prolongado de descarga (como pode ser observado na tabela 4), o que pode gerar imprecisões na curva de tensão em aplicações que exigem maior tempo de operação. Essa limitação se

deve à menor ênfase dada aos parâmetros de descarga profunda, o que impacta diretamente na análise de desempenho térmico e elétrico em cenários reais.

Tabela 4: Percentual do erro médio em cada etapa constituinte do ciclo de carga e descarga do supercapacitor

| Etapas do Ciclo | Erro (%) |
|---------------------------|----------|
| Carregamento | 7,28 |
| Auto-Descarga | 1,26 |
| Descarregamento (Fase I) | 3,00 |
| Descarregamento (Fase II) | 28,85 |

Fonte: Autoria Própria

Portanto o modelo é justificado em grande parte da análise, que contempla as etapas de carregamento, auto-descarga e descarregamento inicial, divergindo-se após um longo período de descarga do supercapacitor.

b) MODELO TÉRMICO

Para que seja possível a compreensão completa acerca da temperatura no supercapacitor, é necessário analisar a sua distribuição internamente, pois, além da resposta provoca na curva de tensão do mesmo, é importante realizar uma verificação acerca do comportamento térmico do supercapacitor. Para isso, foi utilizado o software COMSOL Multiphysics (o qual realiza análises por meio do método de elementos finitos) para que seja possível acompanhar essa distribuição. Para realizar esta simulação, considerou-se uma temperatura ambiente de 30° em torno do supercapacitor e também foram definidos parâmetros equivalentes de simulação, de acordo com a tabela abaixo.

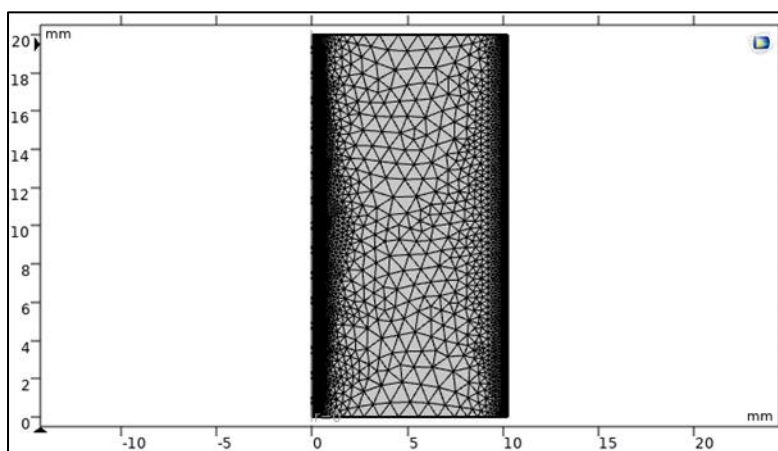
Tabela 5: Parâmetros Equivalentes do Material

| Parâmetros | Valores |
|---------------------------------------|----------------|
| Massa Específica (kg/m ³) | 928.87 |
| Calor Específico (J/(mK)) | 943.296 |
| Condutividade Radial (W/(mK)) | 1.786 |
| Condutividade Axial (W/(mK)) | 26.782 |

Fonte: Li et al., 2018

Para essa simulação foi considerado um capacitor de 20x20mm onde a modelagem parte da configuração das medidas do raio de uma malha que possui 10244 vértices e é composta por 19452 elementos triangulares, e então rotaciona-se 360° até formar uma geometria cilíndrica conforme mostra a figura 14.

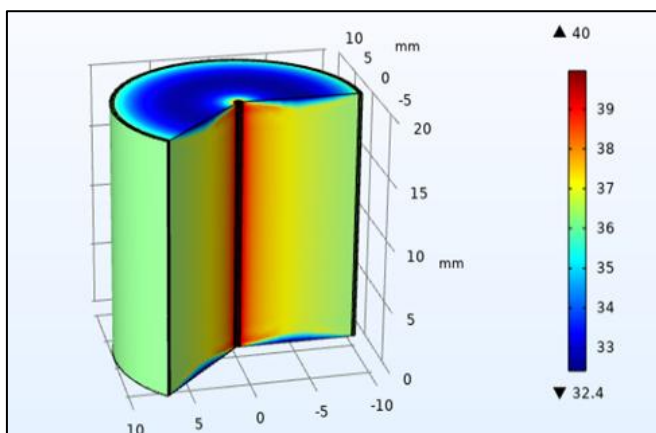
Figura 14: Malha disposta sobre o domínio da simulação



Fonte: Thermoelectrical model of supercapacitor for a digital twin application on hybrid energy storage system, CBPE, 2024

O calor presente no interior do supercapacitor é gerado a partir do efeito joule nos eletrodos, o que pode ser verificado experimentalmente, servindo como base para a implementação do modelo térmico. A figura 15 possibilita visualizar detalhadamente a forma pela qual a temperatura se distribui ao longo da estrutura interna do supercapacitor. É importante ressaltar que a parte central do componente exibe uma temperatura maior, em torno de 40°C. Esta temperatura reduz consideravelmente, alcançando 36.5°C na parede externa do supercapacitor.

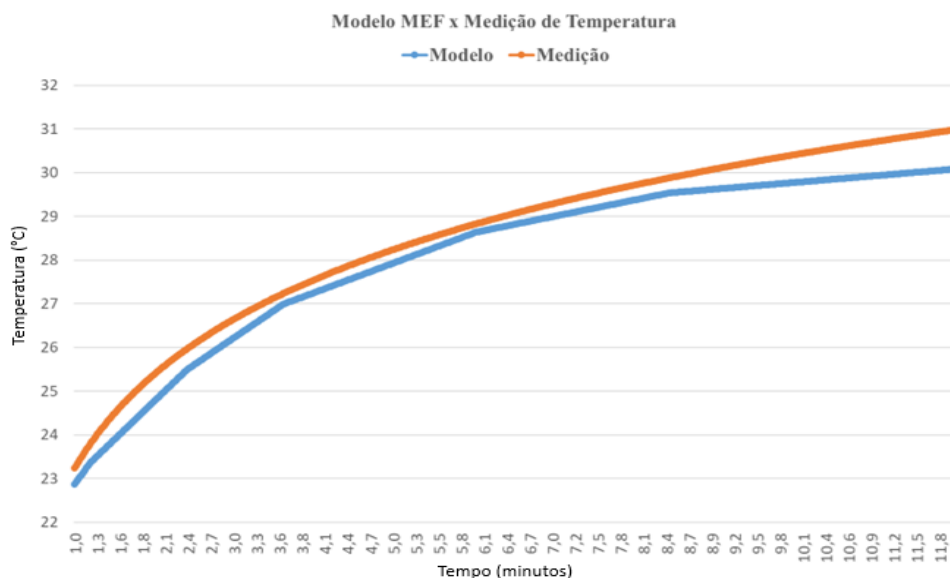
Figura 15: Distribuição de temperatura dentro do supercapacitor



Fonte: Thermoelectrical model of supercapacitor for a digital twin application on hybrid energy storage system, CBPE, 2024

Após estabelecido o modelo térmico torna-se necessário a validação do mesmo, para isso foi conduzido um ensaio onde foram comparadas as temperaturas medidas pelo sensor de tensão do supercapacitor modelo NESCAP de 360 F e comparado com os dados exportados pelo modelo térmico conforme mostra a figura 16.

Figura 16: Comparativo entre a elevação de temperatura do modelo térmico com o modelo de bancada



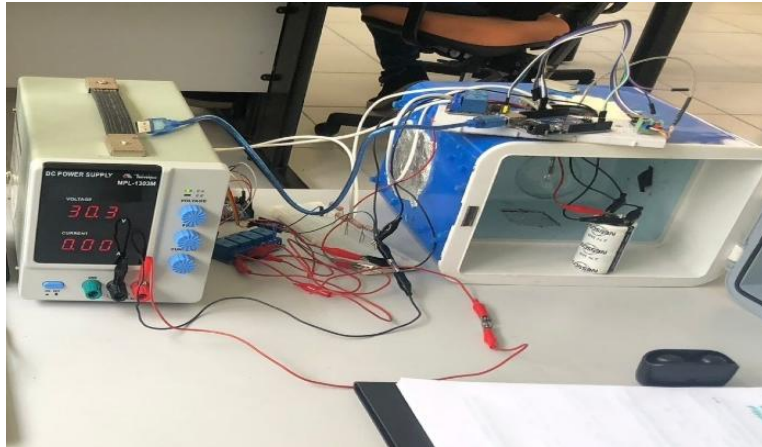
Fonte: Autoria Própria

A partir da análise gráfica é possível destacar que o modelo térmico possui cerca de 2,25% de erro médio com desvio padrão de 0,003, o que consolida a utilização do modelo térmico.

3.2 TESTES EM BANCADA

Foi utilizado o supercapacitor de 360F-2.7V da NESSCAP em um circuito elétrico de bancada que consiste em uma fonte de alimentação DC ajustada para 1A de corrente alimentando o supercapacitor (armazenado dentro de uma câmara térmica de temperatura monitorada por um sensor termopar MAX6675) e então é visualizado no computador os valores de tensão por meio de um sensor de tensão, até atingir a tensão máxima de 2.7 volt, onde um relé é responsável por abri o circuito e deixando o capacitor em um estágio de auto-descarga por um intervalo de 180 segundos (3 minutos), e por fim, novamente um relé é acionado para conectar o supercapacitor a um banco de resistores de resistência equivalente de 0.8Ω , onde o mesmo será descarregado até atingir a tensão mínima de 0.5 volt e então o processo é reiniciado. A câmara térmica possui um revestimento interno de isopor, responsável por impedir a troca de calor do meio interno para o meio externo, funcionando como isolamento térmico. O controle do chaveamento dos relés, bem como o monitoramento de variáveis como tensão e temperatura é realizado por meio de microcontrolador Arduino.

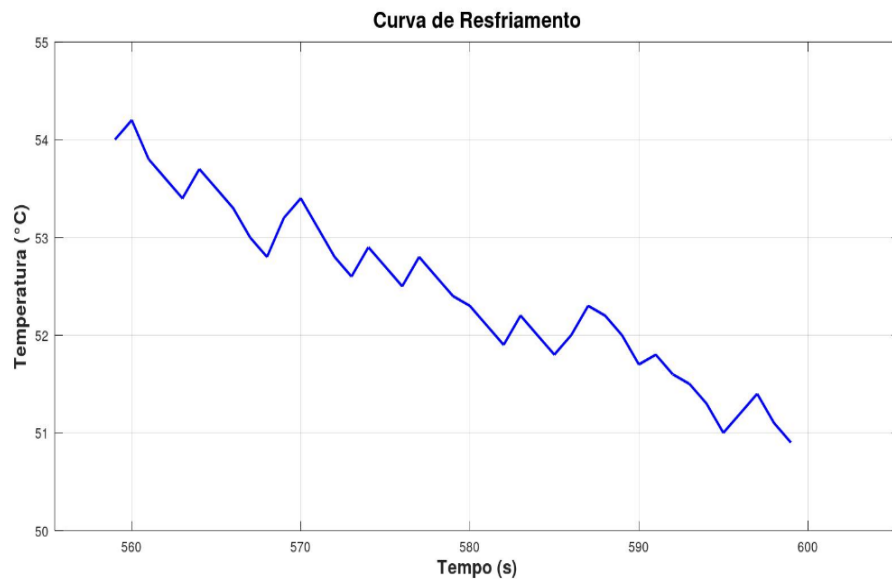
Figura 17: Circuito de bancada para ensaio de carregamento e descarregamento de Supercapacitor



Fonte: Autoria Própria.

Os dados de tensão são obtidos por meio de um analisador de energia modelo HIOKI (acoplado na saída do capacitor) o qual registra os dados de tensão e os armazena em arquivo de texto. Com relação a temperatura da câmara, esta precisa ser previamente ajustada do código do Arduino e então iniciada, o aquecimento é realizado por meio de uma lâmpada incandescente, e a leitura da temperatura, por meio de um termopar, que enviava os dados para o serial monitor do Arduino, o que possibilita a visualização em tempo real como mostra a figura 18.

Figura 18: Monitoramento da redução da temperatura (Resfriamento) no interior da câmara térmica.



Fonte: Autoria Própria

Figura 19: Supercapacitor utilizado em circuito de bancada.



Fonte: Autoria Própria

O código utilizado no módulo Arduino Uno presente na câmara térmica foi escrito em linguagem de programação Arduino e inicia-se com a chamada da biblioteca <max6675.h> que é responsável por possuir rotinas pré-programadas de sensoriamento e medição do termopar MAX6675. Esta biblioteca necessita de três variáveis para funcionar, sendo a primeira a que deve ser conectada para a saída dos dados, a segunda deve ser utilizada para a seleção do microcontrolador utilizado (no caso o ATmega328P presente no módulo do Arduino Uno) e por fim, a terceira deve conter o clock. Após receber estas informações contidas nas variáveis, deve-se realizar a chamada da biblioteca por meio da função “MAX6675 thermocouple” que recebe as variáveis declaradas e inicia a medição de temperatura pelo termopar, conforme mostra a figura 20.

Figura 20: Código em Arduino utilizado para realizar o gerenciamento da câmara térmica

```
#include <max6675.h>
// Define os pinos do MAX6675
const int thermoSO = 8; // Pino de saída de dados (SO)
const int thermoCS = 9; // Pino de seleção de chip (CS)
const int thermoCLK = 10; // Pino de clock (CLK ou SLK)

// Define o pino do relé
#define relayPin 5

// Define a temperatura de referência desejada em Celsius
const float temperaturaDesejada = 60.0;

// Define a tolerância de variação de temperatura
const float tolerancia = 1.0;

MAX6675 thermocouple(thermoCLK, thermoCS, thermoSO);
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode(relayPin, OUTPUT);
  digitalWrite(relayPin, LOW); // Desliga o relé inicialmente
  Serial.println("Controle de Temperatura com MAX6675 e Relé");
}
```

Fonte: Autoria Própria

No código também se encontra presente a declaração de uma variável chamada “tolerância”, que possui função regulação da temperatura, em que caso a temperatura esteja

abaixo da tolerância, a lâmpada acende aquecendo a câmara; e caso a temperatura esteja acima dessa margem, a lâmpada é apagada permitindo que o meio interno troque calor com o meio externo. Na figura 21 é apresentado o restante da lógica de programação utilizada no código da câmara térmica, onde se utiliza da função loop para enviar de forma cíclica, os dados de leitura da temperatura, em uma taxa de 1 em 1 segundo os quais são apresentados no serial monitor.

Figura 21: Código em Arduino utilizado para realizar monitoramento da câmara térmica

```
void loop() {  
  // Lê a temperatura em graus Celsius  
  float tempC = thermocouple.readCelsius();  
  
  // Verifica se a leitura é válida  
  if (isnan(tempC)) {  
    Serial.println("Erro ao ler o termopar!");  
  } else {  
  
    // Exibe a temperatura no Monitor Serial  
    Serial.print("Temperatura: ");  
    Serial.print(tempC);  
    Serial.println(" °C");  
  
    // Controle de temperatura  
    if (tempC < (temperaturaDesejada)) {  
      digitalWrite(relayPin, LOW); // Liga o relé  
    } if(tempC > (temperaturaDesejada + tolerancia)) {  
      digitalWrite(relayPin, HIGH);} // Desliga o relé  
    }  
  
    // Aguarda um segundo antes da próxima leitura  
    delay(1000);  
  }  
}
```

Fonte: Autorial Própria

Figura 22: Interior da Câmara térmica, onde se encontram a lâmpada incandescente e o sensor de temperatura termopar MAX6675



Fonte: Autorial Própria

Para a operação com os relés, é necessário a utilização de um outro módulo Arduino que recebe os dados do sensor de tensão e também realizará o chaveamento dos relés com base na tensão desejada (no caso as tensões de 0.5V e 2.7V). Este segundo módulo atua de

forma isolada do primeiro módulo de Arduino Uno responsável por regular a temperatura. A coleta das amostras de dados pode ser realizada por meio do próprio sensor de tensão (como utilizado na figura 31) ou pelo analisador de energia HIOKI (que foi responsável pela medição presente na figura 10); em ambos os casos, os dados de tensão gravados são exportados em arquivo .csv para a realização de estudos e análises de respostas.

Figura 23: Dispositivos de medição de tensão. A) Analisador de qualidade de energia HIOKI. B) Sensor de Tensão



Fonte: Autoria Própria

É importante destacar que o ensaio por obtenção da resposta da saída de tensão do supercapacitor não necessita obrigatoriamente do manuseio do HIOKI, sendo este optado por apresentar melhor precisão dos dados se comparado com o sensor. O protótipo funciona de forma autônoma, sendo este controlado por chaves (relés eletromagnéticos) e sensor de tensão. Em cada uma das três etapas, seja de carregamento, de autodescarga e de descarregamento, existe uma rotina de programação em Arduino com o objetivo de que, após o término de uma etapa, outra já se inicie de forma automática. Em um primeiro ensaio, foi realizado com câmara térmica desligada, ou seja, com o capacitor operando em temperatura de 25°C e então registrada a amostra nos valores de tensão conforme verificado na figura 10. Na figura 24 é apresentado de forma resumida, a metodologia do protótipo de bancada.

Figura 24: Fluxograma da obtenção de dados por meio do HIOKI acoplado à saída do capacitor



Fonte: Autoria Própria

3.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

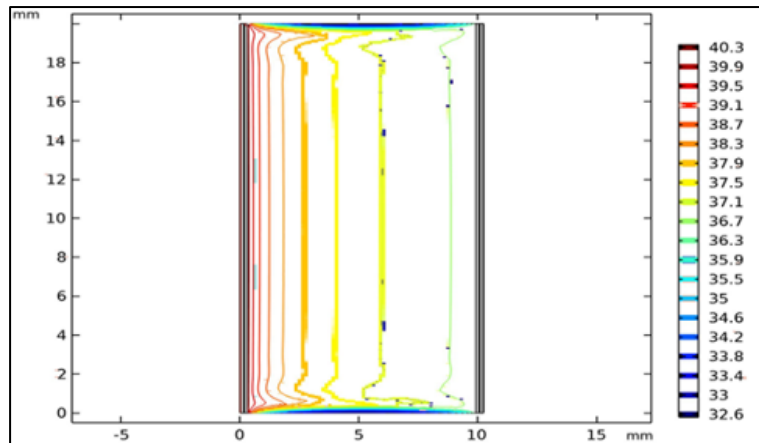
Para este trabalho, os modelos elétricos e térmicos foram fundamentais para demonstrar o comportamento do SC, em relação à sua utilização em um circuito elétrico, quanto para compreender a forma pela qual a temperatura atua internamente a este componente. Estes modelos também auxiliaram nos estudos para o desenvolvimento do protótipo de bancada, haja vista que, através dos resultados obtidos, foi possível adquirir um parâmetro para a elaboração do circuito elétrico e da lógica de programação utilizada no Arduino, destacando a importância de possuir um projeto inicial acerca de uma implementação em circuitos elétricos. Também é importante destacar que projetos realizados, em uma primeira abordagem, de forma simulada, proporciona acesso inúmeras possibilidades de escolha de parâmetros, faixas operacionais, utilização de componentes, bem como o entendimento acerca do supercapacitor, dessa forma, é possível utilizar a mesma metodologia abordada neste trabalho, porém com finalidades distintas, ressaltando a versatilidade do conhecimento acerca da abordagem utilizada.

Por fim, é interessante destacar que a modelagem do supercapacitor e os estudos acerca da sua distribuição de temperatura, abordada neste trabalho corresponde a uma metodologia acessível, haja visto que sua implementação inicial, necessita apenas de um computador convencional, para a realização nas análises que foram discutidas no início deste capítulo. Além de democratizar o conhecimento por meio da facilidade de implementação de simulações de componentes eletrônicos, é importante também destacar o baixo custo dos materiais utilizados no protótipo de bancada, a exemplo de jumpers, protoboard, relés e do próprio microprocessador Arduino, correspondendo, portanto, a uma contribuição para o aprendizado e possibilitando um ambiente propício para o surgimento de novas ideias e projetos.

4. RESULTADOS

Com objetivo de fazer um estudo mais apurado têm-se que, através do modelo térmico do SC podemos evidenciar que a temperatura se distribui do centro para as extremidades. Por meio dos resultados obtidos é possível destacar que a forma pela qual a temperatura transferida internamente ocorre por meio da condução, internamente e, externamente por convecção – onde há troca de calor com o meio externo. Como foi apresentado anteriormente na figura 15, é possível evidenciar que a temperatura não se propaga de forma homogênea dentro do supercapacitor, isto é, ela apresenta variações na forma em sua distribuição. Essa distribuição pode ser melhor estudada através da vista em corte, conforme mostra a figura 25.

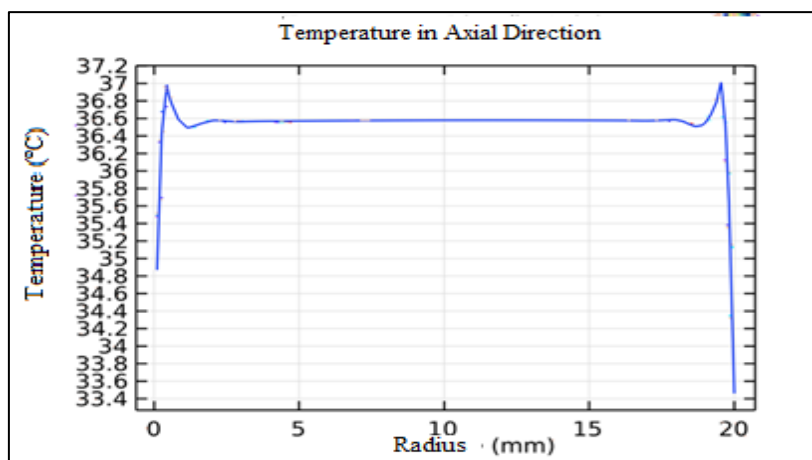
Figura 25: Distribuição de temperatura, dentro do supercapacitor, vista em corte.



Fonte: Thermoelectrical model of supercapacitor for a digital twin application on hybrid energy storage system, CBPE, 2024

A modelagem em corte na direção axial revela a temperatura apresenta valores menores e permanece aproximadamente constante ao longo do eixo z, com uma variação súbita próxima às bases, onde o mecanismo de convecção domina sobre a condução.

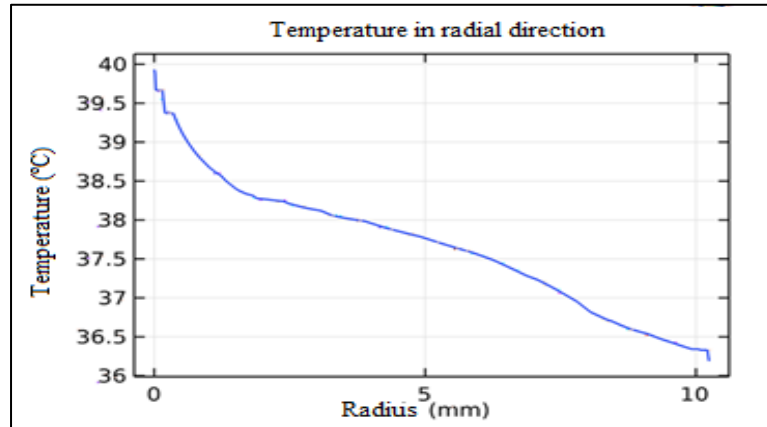
Figura 26: Perfil de temperatura, na direção axial, dentro do supercapacitor



Fonte: Thermoelectrical model of supercapacitor for a digital twin application on hybrid energy storage system, CBPE, 2024

Em contrapartida, ao analisar a direção radial do supercapacitor é possível observar que a temperatura reduz à medida que se aproxima da extremidade externa do componente.

Figura 27: Perfil de temperatura, na direção radial, dentro do supercapacitor

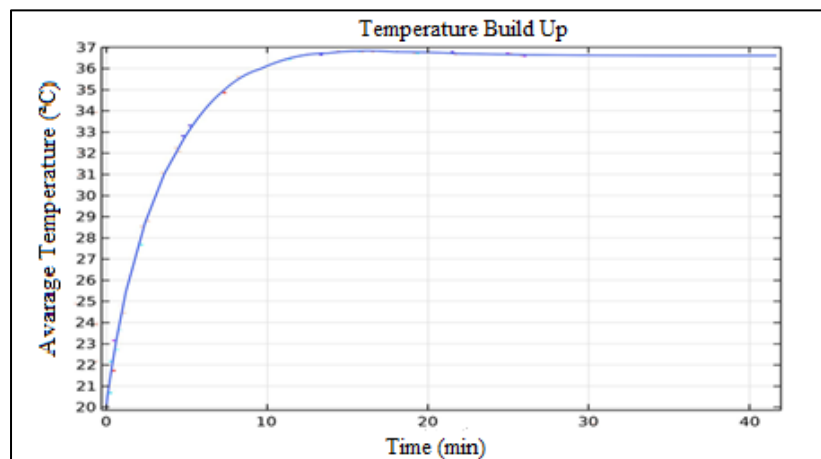


Fonte: Thermoelectrical model of supercapacitor for a digital twin application on hybrid energy storage system, CBPE, 2024

Essa queda abrupta de temperatura é atribuída aos diferentes materiais que compõem o supercapacitor, formando uma estrutura com resistências térmicas variadas que se opõem ao fluxo de calor e à convecção que ocorre na parede externa do supercapacitor.

Por fim, tem-se a figura, que ilustra a forma pela qual temperatura média dentro do SC aumenta progressivamente ao longo do intervalo de 40 minutos até se estabilizar. Esta é uma métrica crucial para estimar o tempo necessário para o SC atingir uma temperatura específica. Essas informações são particularmente úteis para prever quando medidas de resfriamento, como a utilização de um cooler, podem ser necessárias para evitar que a temperatura interna atinja níveis que possam levar a uma falha catastrófica da célula capacitiva.

Figura 28: Aumento da temperatura média ao longo do tempo dentro do SC.



Fonte: Thermoelectrical model of supercapacitor for a digital twin application on hybrid energy storage system, CBPE, 2024

Uma segunda análise pode ser realizada ao compararmos a curva de tensão do ultracapacitor operando em uma temperatura específica e, em seguida, haver a elevação da

temperatura. Como foi explicado no capítulo 2, a elevação da temperatura provoca o aumento da capacitância o que por consequência resulta no aumento da constante de tempo que tem como consequência provocar o carregamento e descarregamento mais demorado do supercapacitor. Para isso, inicialmente avalia-se o comportamento do modelo digital com o intuito de reproduzir o efeito estudado em um ambiente simulado. Por não conter perdas, como troca de calor com o meio externo e degradação interna, o modelo digital, é capaz de fornecer uma representação aproximada do comportamento esperado ao se variar a temperatura de operação do SC. Para realizarmos esta simulação devemos variar os parâmetros de simulação do software PSIM de maneira crescente, para demonstrar a elevação da temperatura. A tabela 6 apresenta três configurações de simulações adotadas, onde teremos as curvas A, B e C, que representam respectivamente as tensões V_a , V_b e V_c . Foram considerados parâmetros contendo valores inteiros para a facilidade no cálculo e na representação em tabela. Posteriormente simulados, e plotados em um gráfico as curvas sobrepostas, como mostra a figura 29.

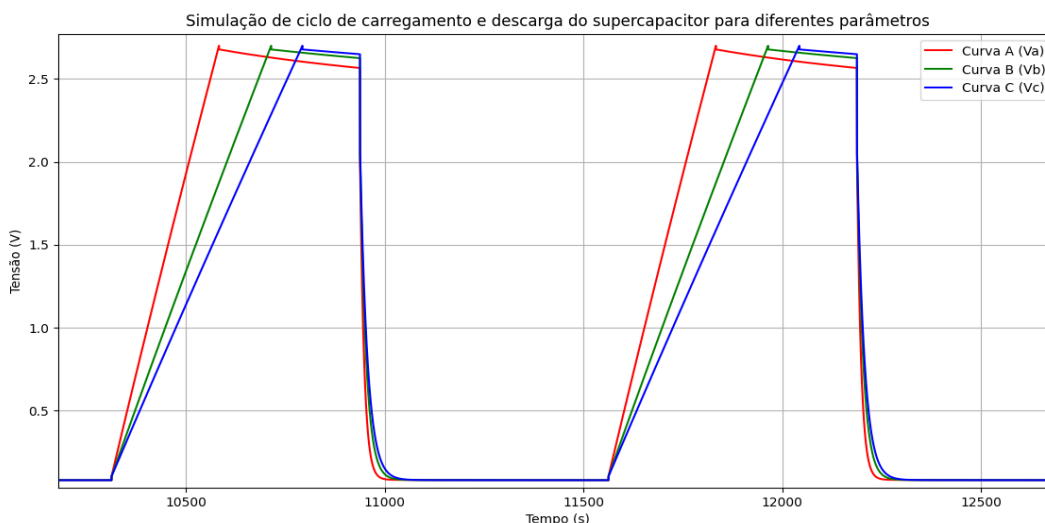
Tabela 6: Parâmetros utilizados na simulação.

| Parâmetros\Curva | A (V_a) | B (V_b) | C (V_c) |
|------------------|--------------|--------------|--------------|
| C1 | 100 F | 150 F | 180 F |
| R2 | 50 Ω | 55 Ω | 60 Ω |
| C2 | 10 F | 15 F | 20 F |
| R3 | 290 Ω | 300 Ω | 310 Ω |
| C3 | 20 F | 30 F | 35 F |

Fonte: Autoria Propria

Os parâmetros foram variados de forma sucinta para que o supercapacitor não apresente anomalias na curva de tensão de saída do SC, além da não utilização do Parâmetro R1 pelo mesmo motivo.

Figura 29: Tensão do supercapacitor digital para parâmetros variáveis.



Fonte: Autoria Própria

As curvas B e C que representam o aumento da temperatura durante os ciclos de carregamento e descarregamento provocando o efeito de defasagem entre as curvas. Como é possível observar, com o aumento da constante de tempo provocado pela elevação da temperatura, teremos uma representação na curva C, onde mostra um intervalo maior para carregar e descarregar, em contrapartida da curva A que por ter uma constante de tempo menor, apresenta um carregamento e descarregamento mais rápido.

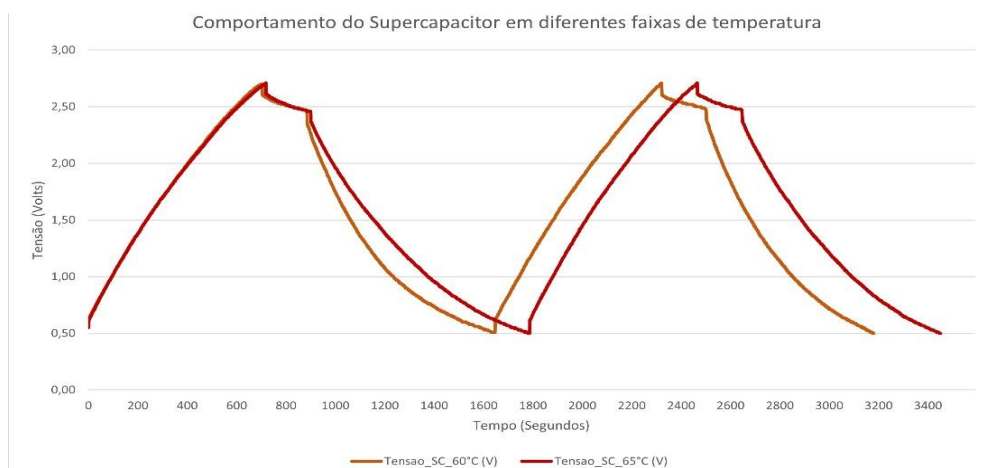
Para que seja possível verificar a veracidade dos resultados anteriores foi utilizado o protótipo físico do supercapacitor e então realizado dois ensaios, o primeiro com a câmara térmica ajustada para 60°C e o segundo à 65°C e então os dados foram registrados por meio do analisador de energia. As informações acerca do ensaio estão descritas na tabela 7. Ambos os ensaios iniciaram com o supercapacitor em uma tensão inicial de 0.5 volts e foram registrados para o total de 3 ciclos, além disso as amostras coletadas foram obtidas com uma taxa de amostragem de 1 em 1 segundo e então plotado o gráfico contendo as duas curvas sobrepostas, conforme mostra a figura 30.

Tabela 7: Descrição dos ensaios realizados na câmara térmica e registros coletados das amostras obtidas do analisador de energia

| Temperatura (°C) | Duração do ensaio |
|------------------|-------------------|
| 60 | 1h23min |
| 65 | 1h29min |

Fonte: Autoria Própria

Figura 30: Tensão do supercapacitor digital para parâmetros variáveis.

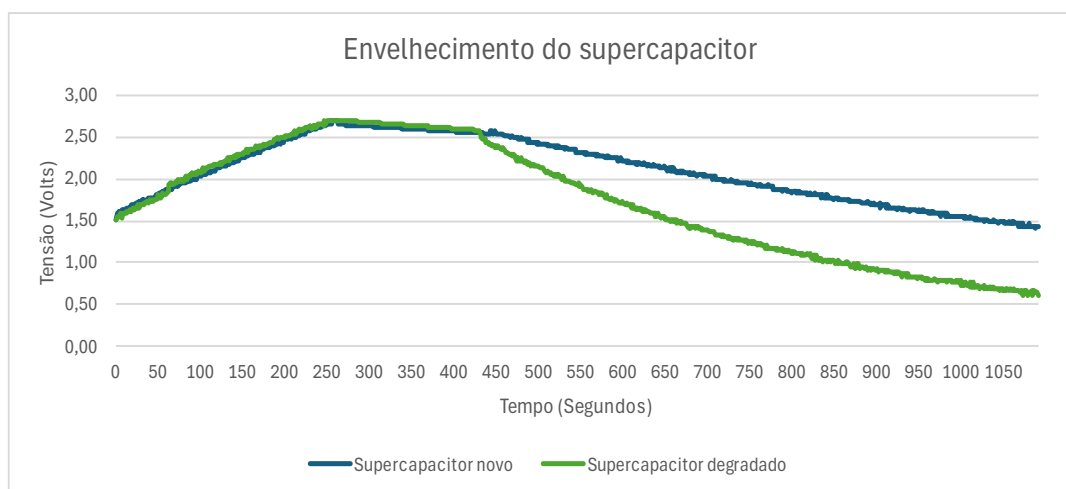


O datasheet do fabricante do Supercapacitor modelo NESCAP de 360 F indica que a faixa de temperatura operacional corresponde de -40°C a 65°C, ou seja, com base na figura 30, verificamos experimentalmente que o SC, quando exposto a uma temperatura igual à temperatura máxima suportada, apresenta um desempenho mais longo em relação à quando

situado em condições de temperatura abaixo da temperatura máxima suportada. Ao analisar o primeiro ciclo, é possível observar que inicialmente, durante o carregamento as tensões estão equivalentes, entretanto, a partir do descarregamento é que se torna possível verificar a mudança no comportamento, provocando um elevado tempo para a descarga nos resistores. Isso ocorre por conta do fluxo de calor no interior do supercapacitor, o qual é função do tempo, ou seja, o supercapacitor leva tempo para aquecer e, portanto, em um primeiro momento ocorre a equivalência aproximada entre as tensões de 60°C e 65° C. A partir do descarregamento é que, a temperatura interna se encontra distribuída de forma a provocar o aumento significativo da capacitância e dessa forma, elevar o tempo da curva de 65°C. Esse comportamento pode ser descrito por conta do processo de aquecimento do ultracapacitor, pois, à medida que o componente esquenta internamente seu desempenho também se altera, diferentemente da simulação envolvendo o modelo digital, onde essa perda de desempenho se mantinha constante.

O processo de envelhecimento do supercapacitor - causado pela exposição a elevadas temperaturas por longos períodos - também pode ser evidenciado de forma experimentalmente, onde foram coletadas amostras de ensaios de carregamento e descarregamento de supercapacitores, onde foi medido a resposta de um único supercapacitor que foi estressado de forma não-contínua por cerca 4 meses e 22 dias e então avaliado as respostas de tensão. Conforme ilustrado na Figura 31, o supercapacitor em melhor estado apresenta uma curva de descarga mais lenta, evidenciando maior capacidade de retenção de energia. Em contraste, o modelo degradado descarrega-se com aproximadamente 40% menos tempo, devido à deterioração de sua estrutura interna, o que compromete sua eficiência e acelera a perda de tensão.

Figura 31: Tensão do supercapacitor digital para parâmetros variáveis.



Fonte: Autoria Propria

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho permitiu uma compreensão detalhada sobre a influência da temperatura na operação de supercapacitores, evidenciando como variabilidades térmicas afetam diretamente o desempenho desses dispositivos. Através das simulações e ensaios experimentais, foi possível constatar que o aumento da temperatura altera significativamente a resposta da tensão de saída, impactando tanto a eficiência do armazenamento de energia quanto a sua vida útil.

Os resultados mostraram que a distribuição interna de calor não ocorre de forma homogênea, sendo mais intensa no núcleo do componente e dissipando-se gradativamente até as extremidades. Esse comportamento pode comprometer a estabilidade operacional do supercapacitor, tornando necessárias estratégias de controle térmico para mitigar possíveis perdas.

A análise comparativa entre o modelo digital e o protótipo físico revelou a importância das simulações numéricas para prever e otimizar o comportamento térmico e elétrico do componente antes de sua implementação em sistemas reais. Além disso, os experimentos em bancada demonstraram a viabilidade de se desenvolver metodologias acessíveis para avaliação de dispositivos de armazenamento de energia, possibilitando estudos futuros voltados para a melhoria da eficiência dos supercapacitores em aplicações práticas.

Como trabalhos futuros é possível sugerir a realização da análise de longo prazo da curva de tensão do supercapacitor para diferentes faixas de temperatura, com o objetivo de verificar qual o tempo necessário para que a defasagem entre as curvas visto na figura 30 se estabilizasse. Como segunda sugestão tem-se o estudo da sensibilidade do supercapacitor, isto é, verificar se, além da temperatura, há parâmetros que também possam degradar o supercapacitor, e qual o que diminui mais a vida útil.

Assim, o estudo reafirma a relevância dos supercapacitores no contexto tecnológico atual e destaca a necessidade de mais pesquisas que aprofundem a interação entre temperatura e desempenho elétrico, contribuindo para avanços na área de eletrônica de potência e armazenamento de energia.

6. REFERENCIAS

S. Ratha, A.K. Samantara: Supercapacitor: instrumentation, measurement and performance evaluation techniques, XVII + 52 p. Springer, Singapore 2018

H. Gualous, R. Gallay, G. Alcicek, B. Tala-Ighil, A. Oukaour, B. Boudart, Ph. Makany. Supercapacitor ageing at constant temperature and constant voltage and thermal shock. *Microelectronics Reliability*, 2010.

JING, W. et al. A comprehensive study of battery-supercapacitor hybrid energy storage system for standalone PV power system in rural electrification. *Applied Energy*, [S. l.], v. 224, p. 340-356, 2018

ANFAVEA. (2023). Anuário da Indústria Automobilística Brasileira. Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (ANFAVEA).

ABVE (Associação Brasileira do Veículo Elétrico)

H. Gualous, R. Gallay, M. Al Sakka, A. Oukaour, B. Tala-Ighil, B. Boudart. Calendar and cycling ageing of activated carbon supercapacitor for automotive application. *Microelectronics Reliability*, 2012.

YANG, Yingze; ZHAO, Qinxian; GAO, DianZhu; RONG, Jieqi; FAN, Yunsheng; LI, Heng; PENG, Jun. Supercapacitor Digital Twin Management System Based on Cloud Environment. In: 2021 IEEE 23rd International Conference on High Performance Computing & Communications; 7th International Conference on Data Science & Systems; 19th International Conference on Smart City; 7th International Conference on Dependability in Sensor, Cloud & Big Data Systems & Application. IEEE, 2021

KUNDU, Arpan; PILON, Laurent; FISHER, Timothy S. A continuum model of heat transfer in electrical double-layer capacitors with porous electrodes under constant-current cycling. *Journal of Power Sources*, v. 511, p. 230404, 2021.

Thermoelectrical model of supercapacitor for a digital twin application on hybrid energy storage system, CBPE, 2024

LI, Yansong; WANG, Sihan; LIU, Jun. 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, 2018.

KÖTZ, R.; CARLEN, M. Principles and applications of electrochemical capacitors. *Electrochimica Acta*, v. 45, n. 15-16, p. 2483-2498, 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, p. 86–93, 2003.

GUALOUS, H.; GALLAY, R.; ALCICEK, G.; TALA-IGHIL, B.; OUKAOUR, A.; BOUDART, B.; MAKANY, Ph. *Supercapacitor ageing at constant temperature and constant voltage and thermal shock*. *Microelectronics Reliability*, [s.l.], v. 50, n. 10, p. 1783-1788, 2010.