

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ENGENHARIA DE ENERGIA

**AVALIAÇÃO DE MODELO TÉRMICO PARA CAPACITOR DE FILME PLÁSTICO EM
OPERAÇÃO**

por

RAFAEL CRISTIANO PORTO

Monografia apresentada à Comissão de Graduação do Curso de Engenharia de Energia da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Bacharel em Engenharia de Energia.

Porto Alegre, Abril de 2023

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

ESCOLA DE ENGENHARIA

ENGENHARIA DE ENERGIA

**AVALIAÇÃO DE MODELO TÉRMICO PARA CAPACITOR DE FILME PLÁSTICO EM
OPERAÇÃO**

por

RAFAEL CRISTIANO PORTO

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE

BACHAREL EM ENGENHARIA DE ENERGIA.

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dr^a. Thamy Cristina Hayashi

Coordenadora do Curso de Engenharia de Energia

Orientador: Prof. Dr. Valner João Brusamarello

Banca examinadora:

Prof. Dr. Valner João Brusamarello - DELAE / UFRGS

Prof. Dr. Flávio Antônio Becon Lemos - DELAE / UFRGS

Prof^a. Dr^a. Letícia Jenisch Rodrigues - DEMEC / UFRGS

Porto Alegre, Abril de 2023

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Paulo e Brígida, que nunca pouparam esforços para me apoiar em minhas escolhas.

Aos meus irmãos, meus amigos mais próximos, que apesar da vida levar a morarmos distantes, estamos sempre juntos.

À Jéssica Bittencourt, minha companheira, por estar sempre comigo para superar os desafios da vida.

Aos meus colegas e professores, em especial ao meu orientador Prof. Dr. Valner João Brusamarello, nesta jornada de compartilhamento de conhecimentos.

Aos colegas de trabalho da TDK Electronics, pelo companheirismo na minha primeira experiência profissional em engenharia.

Por fim agradeço a todos que de alguma forma estiveram presentes nesta conquista.

PORTO, R. **Avaliação de Modelo Térmico para Capacitor de Filme Plástico em Operação.** 2023 28 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia de Energia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023.

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo a análise e caracterização do comportamento térmico de capacitores de filme plástico metalizado em operação, utilizando dados de aplicação em sistemas fotovoltaicos em modo DC-Link. Sistemas fotovoltaicos têm sido cada vez mais utilizados e com isso a sua caracterização térmica do circuito, em particular dos capacitores, é fundamental para implementação de técnicas visando o aumento do tempo de vida útil dos circuitos eletrônicos. Os dados de medições elétricas são utilizados para determinação das perdas devido a resistências dos materiais da bobina, espraiamento metálico e terminais, bem como a capacidade de propagação de calor dos materiais que o compõe para elaboração do circuito térmico. A aplicação em sistemas fotovoltaicos é formulada com base em modelos da literatura e *datasheets*, sendo que a partir de seu comportamento é possível estimar as correntes de ondulação que geram o aumento de temperatura para utilização no circuito térmico equivalente. Por fim, foram realizados testes de auto aquecimento utilizando um Analisador de Correntes de Ondulação (do inglês, *Ripple Current Tester*) para comparação e mensuração de erros do modelo de circuito térmico proposto. Foram obtidos resultados que sugerem mais condições a serem consideradas do que o proposto, como a variação da temperatura ambiente e aquecimento dos cabos e terminais devido ao efeito Skin em alta frequência. Nos ensaios com temperatura ambiente estável, os resultados foram satisfatórios.

PALAVRAS-CHAVE: Capacitores de filme. Comportamento térmico. Aplicação em sistemas fotovoltaicos

PORTO, R. **Evaluation of Thermal Model for Plastic Film Capacitor in Operation.** 2023. 28 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia de Energia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023.

ABSTRACT

This work aims to analyze and characterize the thermal behavior of metallized plastic film capacitors in operation, using application data in photovoltaic systems in DC-Link mode. Photovoltaic systems have been used more and more and with that their thermal characterization of the circuit, in particular of the capacitors, is fundamental for the implementation of techniques aimed at increasing the useful life of electronic circuits. The electrical measurement data are used to experience the losses due to resistance of the coil materials, metallic smearing and terminals, as well as the heat pressure capacity of the materials that compose it for the elaboration of the thermal circuit. The application in photovoltaic systems is formulated based on literature models and datasheets, and from their behavior it is possible to estimate the ripple currents that generated the temperature increase for use in the equivalent thermal circuit. Finally, self-heating tests were performed using a Ripple Current Tester for comparison and measurement of errors of the standard thermal circuit model. Results were obtained that suggested more conditions to be considered than the standard, such as variation in ambient temperature and heating of cables and terminals due to the Skin effect at high frequency. In controlled trials, the results were good.

KEYWORDS: Film capacitors. Thermal analysis. Photovoltaic systems.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	2
2.1	Capacitores na História	2
2.2	Fundamentos básicos sobre capacitores	2
2.3	Revisão Bibliográfica	4
2.4	Construção de capacitores de filme plástico	5
2.5	Fatores que influenciam a vida útil de um capacitor	6
2.6	Capacitores aplicados em sistemas fotovoltaicos em modo DC-Link	7
3	METODOLOGIA	8
3.1	Preparação dos protótipos para testes	8
3.2	Caracterização elétrica do capacitor	9
3.3	Modelo Térmico	11
3.4	Ensaio de auto aquecimento	13
3.5	Análise dos resultados práticos e teóricos	13
4	RESULTADOS	14
4.1	Montagem e caracterização dos protótipos	14
4.2	Parâmetros e resultados do ensaio de auto aquecimento	15
4.3	Cálculos teóricos do modelo térmico proposto	19
4.4	Comparação dos resultados teóricos e práticos	21
5	CONCLUSÃO	27
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	28
7	ANEXOS	29
	Anexo A – Datasheet do Capacitor	29

1 INTRODUÇÃO

O crescente uso de energias renováveis nas últimas décadas tem atraído investimentos, uma vez que apenas no Brasil já existem mais de um milhão de sistemas de geração solar distribuída instalados, somando 10,6 GW, segundo mapeamento da Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (Absolar, 2022). Existe a expectativa de que a potência instalada dobre nos próximos anos, a qual atualmente 45,4% são gerados por consumidores residenciais, o que por sua vez resulta na diversificação de modelos de placas solares e componentes como inversores.

Em qualquer investimento o tempo operacional do ativo é de extrema importância para o retorno do investimento. Os sistemas fotovoltaicos não fogem a essa regra. Logo, a pesquisa sobre características que impactam diretamente na vida útil dos equipamentos eletrônicos deste tipo de sistema é de grande importância para o desenvolvimento tecnológico e financeiro pelo impacto que pode causar. A maneira como a potência dissipada de componentes eletrônicos afeta a vida útil de sistemas são estudadas tanto na indústria quanto em trabalhos científicos, como no artigo *Instantaneous Thermal Modeling of the DC-Link Capacitor in Photovoltaic Systems* (YANG, Y. et al. 2015). De acordo com o artigo, os capacitores têm sido considerados como um dos pontos fracos em sistemas fotovoltaicos conectados à rede, o que resultou em estudos acerca da modelagem do comportamento térmico para maior confiabilidade e desenvolvimento de novas tecnologias, visto que a concentração de calor gerado nos capacitores é um dos motivos de falha.

Desta forma, neste trabalho é apresentada uma análise de modelo de circuito térmico equivalente para capacitores de filme plástico em aplicações de sistemas fotovoltaicos. A revisão bibliográfica do tema pôde elucidar o comportamento das correntes de ondulação a qual o capacitor está exposto em circuitos eletrônicos nesta aplicação, de maneira que estes dados foram utilizados na determinação da temperatura do capacitor. A comparação dos resultados do circuito equivalente térmico com ensaios de auto aquecimento utilizando um Analisador de Correntes de Ripple foi realizada para validar o modelo proposto em condições de temperatura estável no entorno do capacitor.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O presente capítulo apresenta o objeto central deste trabalho, os capacitores. São expostos dados de uma breve revisão sobre a história, fundamentos básicos de funcionamento tratando de equacionamentos e construção, modelo térmico e aplicação de capacitores em sistemas fotovoltaicos em modo DC-Link.

2.1 Capacitores na História

No ano de 1745, Pieter van Musschenbroek, um professor da Universidade de Leyden na Holanda desenvolveu a chamada "Jarra de Leyden", a primeira forma de capacitor conhecida. O interior da garrafa possuía suas paredes revestidas por uma folha de metal, era preenchida por água e uma rolha com uma haste metálica atravessando seu centro a tampava, como pode-se observar na Figura 2.1. O professor notou que a garrafa acumulava cargas elétricas no seu interior com uma polaridade e a parede externa com polaridade contrária quando um operador tocou a garrafa e recebeu uma descarga elétrica (SPARK Museum of Electrical Invention).

Figura 2.1 – Garrafa de Leyden



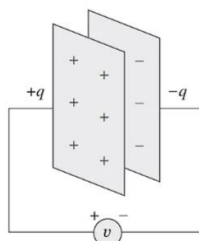
Fonte: Spark Museum (2022)

2.2 Fundamentos básicos sobre capacitores

O capacitor é um elemento passivo projetado para armazenar energia em seu campo elétrico, sendo formado por duas placas condutoras separadas por um isolante ou dielétrico. A indústria atual é capaz de produzir diversos tipos de capacitores com diferentes materiais, formas de construção e processos para se comportar da melhor maneira possível em função da sua utilização.

Quando uma fonte de tensão v é conectada ao capacitor como na Figura 2.2, a fonte deposita uma carga positiva (+q) sobre uma placa e outra negativa (-q) na outra placa. (Sadiku; Alexander, 2013)

Figura 2.2 – Modelo de capacitor com tensão aplicada



Fonte: Fundamentos de Circuitos Elétricos com Aplicações (Sadiku; Alexander, 2013)

A quantidade de carga armazenada é diretamente proporcional à tensão aplicada, de acordo com a equação 2.1, onde a constante de proporcionalidade é C , conhecida como capacitância do capacitor e possui unidade chamada de farad (F) em homenagem ao físico Michael Faraday. Para obter a relação de corrente e capacitância é necessário levar em consideração a equação 2.2, a qual descreve a corrente como uma variação de cargas e após, diferenciar os dois lados da equação 2.1, levando a relação na equação 2.3.

$$q = C \cdot v \quad (2.1)$$

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (2.2)$$

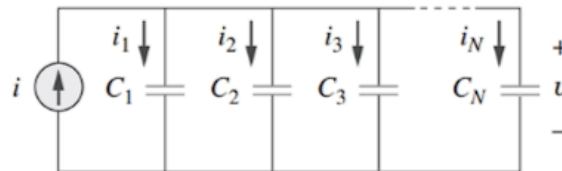
$$i = C \cdot \frac{dv}{dt} \quad (2.3)$$

De posse da equação 2.3 já é possível entender o funcionamento de associações em série e em paralelo de capacitores. Ao analisar a Figura 2.3, na qual são apresentados N capacitores em paralelo, percebe-se que todos os capacitores possuem a mesma tensão em seus terminais, logo o divisor de corrente do arranjo paralelo é representado pela equação 2.4, que combinado a equação 2.3 resulta na equação 2.5.

$$i = i_1 + i_2 + i_3 \dots + i_n \quad (2.4)$$

$$i = c_1 \frac{dv}{dt} + c_2 \frac{dv}{dt} + c_3 \frac{dv}{dt} \dots + c_n \frac{dv}{dt} \quad (2.5)$$

Figura 2.3 – Circuito de capacitores em paralelo.



Fonte: Fundamentos de Circuitos Elétricos com Aplicações (Sadiku; Alexander, 2013)

Por fim, é possível reduzir a equação 2.5 na equação 2.6 que por sua vez implica na equação 2.7, ou seja, a capacitância equivalente é a soma de suas capacitâncias individuais.

$$i = \sum_{k=1}^n c_k \frac{dv}{dt} \quad (2.6)$$

$$C_{eq} = c_1 + c_2 + c_3 \dots + c_n \quad (2.7)$$

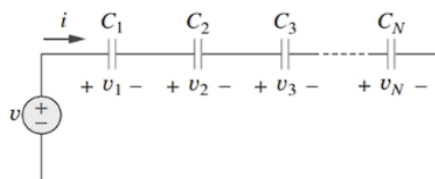
Já para capacitores em série pode-se representá-los utilizando a Figura 2.4, em que se percebe que a corrente passa por todos os capacitores, então cada um está submetido a uma tensão diferente. Ao isolar a tensão na equação 2.1 e seguir o mesmo raciocínio utilizado para a associação paralelo chega-se à equação 2.8.

$$v = \frac{1}{\sum_{k=1}^n \left(c_k \int_{t_0}^t i(\tau) d\tau + v_k(t_0) \right)} \quad (2.8)$$

Logo, obtém-se a equação 2.9, a qual infere que a capacitância equivalente dos capacitores associados em série é o inverso da soma dos inversos das capacitâncias individuais, tal que:

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2} + \frac{1}{c_3} \dots + \frac{1}{c_n} \quad (2.9)$$

Figura 2.4 – Circuito de capacitores em série.



Fonte: Fundamentos de Circuitos Elétricos com Aplicações (Sadiku; Alexander, 2013)

Ao rearranjar a equação 2.1, nota-se que a capacitância é a razão entre a carga e a tensão aplicada, entretanto, ela não é dependente da carga ou da tensão aplicada, mas das dimensões físicas e do material que o constituem. Para um capacitor de placas paralelas a capacitância é dada pela equação 2.10.

$$C = \frac{\epsilon \cdot A}{d} \quad (2.10)$$

Onde a área de cada placa é representada por A , d é a distância entre as placas e ϵ é a permissividade do material dielétrico. Apesar deste trabalho ser focado em capacitores de filme que em sua maioria são arranjados em formato de bobina, a equação 2.10 mostra que a relação da área e da permissividade do dielétrico são proporcionais a capacitância, enquanto o espaçamento entre as placas é inversamente proporcional.

2.3 Revisão Bibliográfica

A confiabilidade dos capacitores possui dependência com resultados da sua análise térmica uma vez que a vida útil estimada deste componente é determinada principalmente pela temperatura do capacitor em seu ponto mais quente (LLEDÓ-PONSATI et al., 2021). Portanto, diversos métodos para simulação, caracterização ou modelos térmicos são propostos na literatura de modo a retratar de maneira mais precisa o comportamento térmico de capacitores em operação.

Em (PARLER, 1999) foi desenvolvido um modelo térmico para capacitores eletrolíticos de alumínio com terminais de parafuso. Para tanto a análise de transferência de calor levou em conta efeitos de condução, convecção natural, convecção forçada e da radiação através de equações de calor multidimensionais e simulação de modelo de análise de elementos finitos. (EL-HUSSEINI et al., 2000) propôs um modelo analítico para calcular as perdas em capacitores de filme de polipropileno metalizados e a otimização de seu desempenho térmico através da distribuição de temperaturas na bobina. O modelo foi experimentado em capacitores com mesma capacitância, porém com diferentes geometrias, sendo finalizado como um modelo de simulação térmica para otimização geométrica em (EL-HUSSEINI et al., 2002).

Nos últimos anos, a engenharia de aplicação tem sido essencial no projeto e desenvolvimento de novos modelos de capacitores para se adequarem ao máximo aos mais diferentes e particulares tipos de operação. (LI et al., 2015) investiga o comportamento térmico de capacitores sob aplicações de pulso repetitivo de tensão. Em (YANG et al., 2015) o tema principal é a modelagem instantânea térmica de capacitores eletrolíticos atuando como *DC-link* em aplicações fotovoltaicas ligadas à rede, uma vez que estes capacitores são considerados um dos pontos fracos deste tipo de circuito, já que são expostos a oscilações da geração e rede. Nesse trabalho são consideradas condições de campo que um capacitor realmente enfrentaria, sendo considerados parâmetros como a variação de irradiação solar em um dia e simulado um circuito para um sistema fotovoltaico de 3kW ligado à rede. Outro exemplo de modelagem térmica voltada para uma determinada pela aplicação pode ser visto em (HJERT, 2017) que trata de um modelo que simula correntes elétricas e transferência de calor sob condições de estabilidade em capacitores sob operações em corrente contínua e alta tensão, tratando de modelar em várias escalas a bobina de filmes metalizados e, portanto, estimar os pontos quentes e temperaturas médias e máximas.

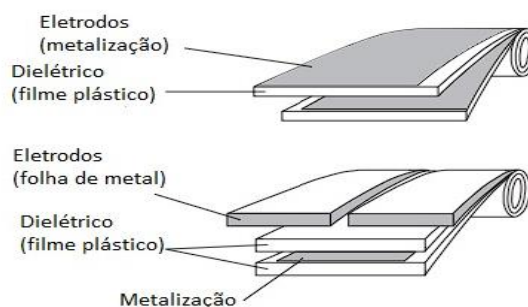
A grande maioria destes trabalhos são teóricos-experimentais de modo a tentar validar os modelos propostos. No Brasil alguns trabalhos que tratam deste tema são (DUARTE, 2000), que avalia o desempenho de capacitores de potência sob influência de harmônicos levando em conta mecanismos de degradação de longa duração, e (GIRARDI, 2015) que propõe circuitos térmicos equivalentes para

capacitores eletrolíticos de alumínio utilizados em aplicações automotivas. Algo que estes trabalhos têm em comum é o foco na utilização de normas já consagradas como a IEC e AEC-Q200 que são padrões para qualificações de capacitores para usos industriais e automotivos respectivamente.

2.4 Construção de capacitores de filme plástico

Os capacitores de filme plástico são comumente projetados com polietileno, polipropileno ou outro composto isolante. Suas armaduras são compostas por folhas de alumínio ou com metalização direta no próprio dielétrico de zinco ou misturas de alumínio com zinco. De qualquer maneira os filmes são bobinados de acordo com a Figura 2.5, possuindo um escorregamento lateral entre os filmes de maneira a aumentar a superfície de contato, a qual posteriormente passa por um processo de espraçamento metálico, melhorando a robustez do capacitor a variações de tensão. A capacitância é dependente do número de voltas da bobina, uma vez que de acordo com a equação 2.10 aumentando este valor a área de contato entre dielétrico e metalização é aumentada e conseqüentemente a capacitância também. Diversos outros fatores são de suma importância na construção de capacitores de filme plástico, como desmetalização das voltas finais, compactação do núcleo e dimensões a serem atendidas do projeto, porém esta discussão não possui lugar no foco deste trabalho.

Figura 2.5 – Exemplos de bobinagem de capacitores de filme



Fonte: Databook TDK Electronics – Capacitores de filme

Ainda pode-se classificar os capacitores de filme quanto ao arranjo de metalização empregado. Alguns destes arranjos estão dispostos na Figura 2.6, e podem ser empregados de acordo com a necessidade de tensão e capacitância para bobinas de diferentes tamanhos.

Figura 2.6 – Classificação de capacitores de filme quanto ao design de metalização

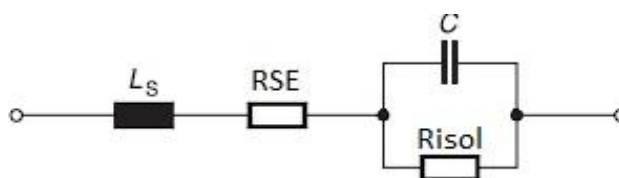
Conexão equivalente	Arranjos de filme e folhas	Tipos de capacitores
		MKP MKT MKN EMI Capacitores de supressão
		MFP
Folha de metal 	Filme plástico metalizado 	Filme plástico sem metalização

Fonte: Databook TDK Electronics – Capacitores de filme

Uma vez sabendo da equação 2.10, entende-se que ao arranjar a metalização dos filmes com um espaçamento, isto faz com que o material se comporte como capacitores em série, o que diminui a capacitância total da bobina. O objetivo disso é que a quantidade de cargas máxima no dielétrico permanece a mesma e a partir da equação 2.1, de relação entre carga, capacitância e tensão, a tensão máxima a qual a bobina pode ser submetida sem quebra por curto-circuito torna-se maior do que em filmes com arranjo simples. Outros critérios para limite de tensão alternada em capacitores de filme são as descargas por efeito corona devido a quantidade de ar que pode existir entre os filmes e em altas frequências, além da própria frequência.

Como disposto anteriormente, o processo de construção de capacitores possui suas imperfeições, bem como seus materiais. A equação 2.1 trata de um capacitor ideal de placas paralelas, entretanto um capacitor real possui um modelo mais próximo ao da Figura 2.7, a qual está exposta a representação das perdas devido aos contatos pelos terminais, metal espreado e metalização dos filmes através da resistência série (RSE), resistência de isolamento (R_{isol}) em paralelo devido a correntes de fuga ligados a autodescarga do capacitor, e a indutância série atrelada a sua disposição em bobina.

Figura 2.7 – Circuito equivalente de um capacitor



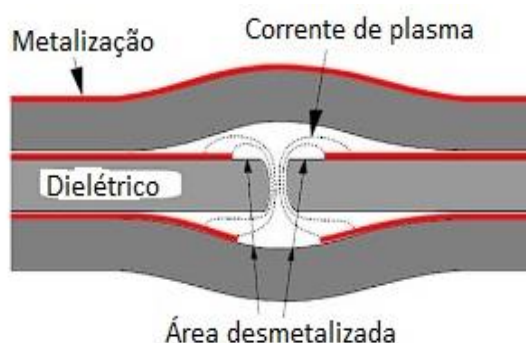
Fonte: Databook TDK Electronics – Capacitores de filme

2.5 Fatores que influenciam a vida útil de um capacitor

Diversos fatores influenciam na vida útil de um capacitor, entre eles a exposição a tensão, temperatura, umidade, variação rápida de carga e descarga, correntes de ondulação e estresse mecânico. Entretanto, todos esses fatores estão atrelados de alguma forma a degradação dos materiais que constituem um capacitor e a suas não idealidades. Em capacitores de filme metalizado os principais motivos para o desgaste estão atrelados a autocura ou a ruptura dielétrica devido à sobretensão segundo (GUPTA et al., 2018).

A autocura é uma característica de capacitores de filme metalizados decorrente da alta densidade de energia em áreas de falha no dielétrico, vaporizando os metais desta região, uma vez que eles são depositados em camadas muito finas. Como pode-se ver na Figura 2.8, uma vez que a área de falha tem sua metalização vaporizada são evitadas falhas e o capacitor pode permanecer em operação.

Figura 2.8 – Comportamento de capacitores em processo de autocura.



Fonte: Passive Components 2022. Disponível em <<https://passive-components.eu/>>

O processo de autocura é dependente da tensão de operação, temperatura, pressão entre os filmes, espessura de metalização e resistividade. Apesar de ser uma vantagem em relação a capacitores de outros modelos construtivos, a autocura é um sinal de falha do capacitor quanto a sua operação e, portanto, sua reincidência em excesso causa uma diminuição de capacitância e um aumento considerável na resistência

interna, que por sua vez pode gerar um aumento na temperatura de operação do capacitor, piorando ainda mais suas condições em um efeito cascata, até a falha completa do capacitor.

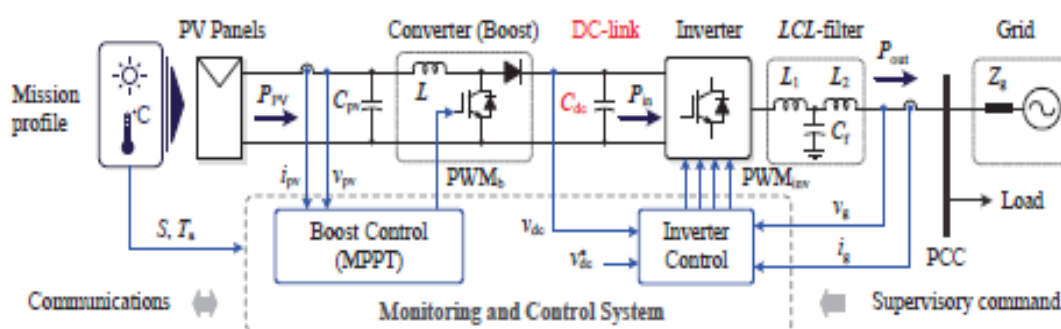
Segundo (DUARTE, 2000), a presença de componentes harmônicos pode implicar em um desempenho inferior em capacitores. Como mencionado anteriormente, a variação de tensão ou corrente pode ocasionar falhas devido ao aquecimento dos materiais, uma vez que a potência dissipada por um capacitor segue a equação 2.11 e com o passar do tempo a degradação do material exposto a este tipo de condição pode ocasionar uma falha total do componente.

$$P = i_{rms}^2 \cdot RSE \quad (2.11)$$

2.6 Capacitores aplicados em sistemas fotovoltaicos em modo DC-Link

Um modelo de sistema fotovoltaico está disposto na Figura 2.9 por meio de seu circuito equivalente, onde o capacitor tem por objetivo armazenar energia e atenuar a variação de tensão entre o conversor e o inversor. Portanto a existência de correntes de *Ripple* e flutuações de tensão são esperadas, de maneira que quedas na tensão e áreas de alta temperatura podem levar o capacitor a falha de acordo com (LEE et al., 2005). Em (YANG et al., 2015) foi proposto um estudo sobre um sistema solar fotovoltaico de 3-kW de única fase e duplo estágio para capacitores eletrolíticos e frequência da rede de 50 Hz.

Figura 2.9 – Modelo de circuito de um sistema fotovoltaico.



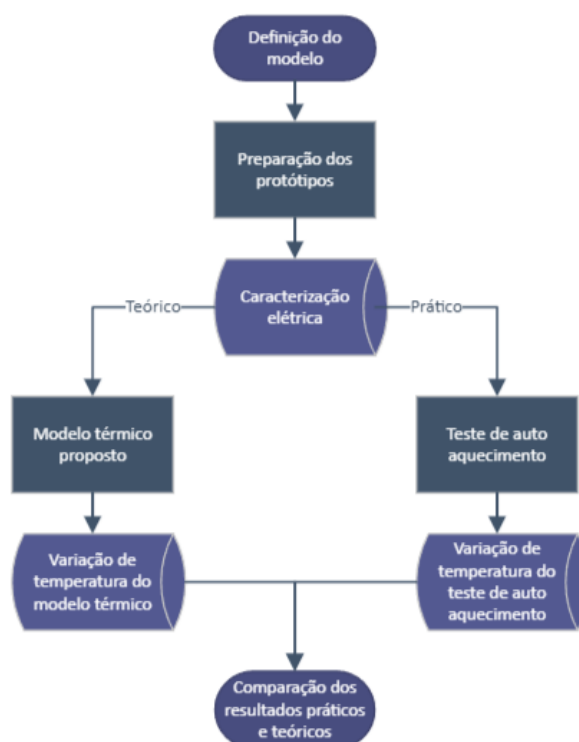
Fonte: Instantaneous Thermal Modeling of the DC-Link Capacitor in Photovoltaic Systems (YANG, Y. et al. 2015)

3 METODOLOGIA

O problema proposto neste trabalho é a modelagem térmica gerada pelas não idealidades de um capacitor aplicado como ligação entre conversor e inversor em um sistema eletrônico de potência de energia fotovoltaica. Deste modo, a comparação de abordagens práticas e teóricas são necessárias para validação do modelo em análise. Devido às limitações do trabalho, como tempo e capacidade de investimento, o estudo será feito voltado a um modelo de capacitor utilizado em sistemas fotovoltaicos e são utilizadas suas informações de funcionamento para uma simulação de uso, uma vez que a montagem de um circuito fotovoltaico real extrapola estas limitações.

O diagrama disposto na Figura 3.1 descreve a metodologia proposta, a qual tem por fase inicial a definição do modelo térmico. A etapa seguinte trata da elaboração dos protótipos de capacitores a serem utilizados nos testes bem como suas caracterizações elétricas e modo de operação. Na sequência do diagrama são divididas as abordagens teóricas, de aplicação no modelo térmico proposto através de um circuito equivalente térmico utilizando parâmetros dos materiais de construção do capacitor, e prática, de testes de auto aquecimento utilizando o equipamento Analisador de Correntes de *Ripple* da marca *Chroma* modelo 11805, termopares e *datalogger* para medição e coleta de dados de temperatura durante o ensaio. Realizados os testes, a comparação entre os dados práticos e teóricos é analisada. O detalhamento metodológico de cada etapa está disposto nas subseções seguintes.

Figura 3.1 – Diagrama que descreve a metodologia proposta.



Fonte: Elaborado pelo autor.

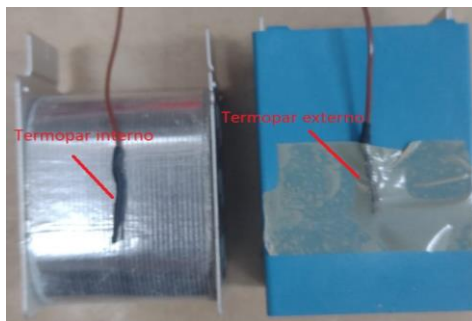
3.1 Preparação dos protótipos para testes

A fim de monitorar a temperatura interna do capacitor é necessário a inserção de um sensor de temperatura no interior da peça. Além disso, é necessário obter controle de materiais e realização das montagens, logo os protótipos devem ser produzidos e acompanhados em cada etapa do processo de produção: bobinagem, prensa sob temperatura, espreiamento metálico, teste de tensões, solda de terminais, montagem e resinagem.

A inserção de termopares no núcleo da bobina pode ocasionar em mudanças nas características elétricas, bem como falhas nas medições de temperatura ou do capacitor em teste. Logo, os termopares são

inseridos externamente, junto à caneca, e internamente, próximo a bobina. Esta montagem é realizada entre a etapa de montagem e resinagem e está ilustrada na Figura 3.2.

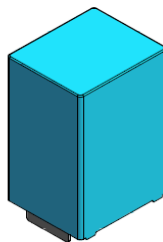
Figura 3.2 – Disposição dos termopares no capacitor



Fonte: Elaborado pelo autor.

Um modelo de capacitor de filme específico para este tipo de operação é o modelo DC-Link da TDK Electronics, com capacitância de $23\mu\text{F}$ e design de terminais já voltados ao objetivo de melhorar a transferência de calor em relação a modelos padrão com terminais tipo fio, temperatura de operação máxima de 115°C e corrente alternada de 27 A rms em uma frequência de 35 kHz. O modelo 3D deste capacitor está disposto na Figura 3.3.

Figura 3.3 – Modelo 3D Capacitor 23uF DC-Link da TDK Electronics

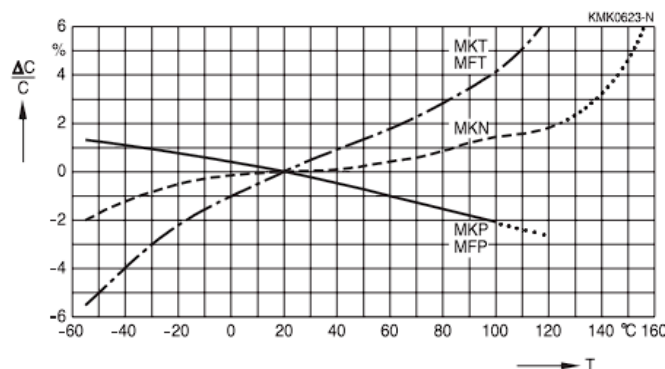


Fonte: Datasheet TDK Electronics.

3.2 Caracterização elétrica do capacitor

Inicialmente são realizadas as medições elétricas do capacitor utilizando o equipamento analisador de impedância da marca Wayne Kerr modelo 6440B para capacitância e RSE com faixas de medição de frequência que podem variar de 20 Hz a 3 MHz. Estas medições precisam ser feitas em laboratório com condições climáticas controladas e equipamentos devidamente calibrados, uma vez que a variação na temperatura e umidade impactam diretamente nos parâmetros elétricos de capacitores de filme plástico como pode-se ver na Figura 3.4, onde é apresentado o gráfico da variação de capacitância relativa em relação a temperatura.

Figura 3.4 – Variação de capacitância relativa em relação a temperatura.



Fonte: Databook TDK Electronics

O modelo de capacitor foco deste trabalho utiliza como filme base o polipropileno, sendo classificado como MKP, ou seja, com o aumento de temperatura o capacitor tem diminuição em seu valor de capacitância, bem como de sua capacidade de armazenamento de cargas.

Como padrão de medição alguns parâmetros devem seguir normas a fim de manter a repetibilidade e controle das condições de medição, logo o ambiente de laboratório para ensaios com capacitores deve ter este padrão. Esses parâmetros e valores estão dispostos na tabela 3.1.

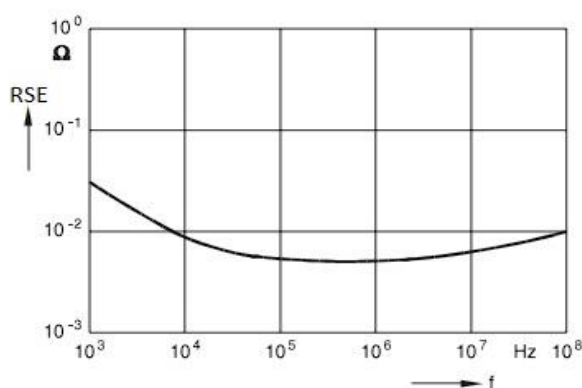
Tabela 3.1 – Condições de medição para caracterização elétrica de capacitores

Condições de medição	Condições padrão	Condições referência
Temperatura	15 a 35°C	23 ±1 °C
Umidade Relativa	45 a 75%	50 ±2 %
Pressão atmosférica ambiente	86 a 106 kPa	86 a 106 kPa
Frequência	1 kHz	1 kHz
Tensão	3% da Tensão padrão (máx. 5V)	3% da Tensão padrão (máx. 5V)

Fonte: Norma IEC 60068-1:2013

Além disso, a resistência série do capacitor é altamente dependente da frequência para capacitores de filme, onde a baixas frequências o RSE é praticamente a representação de perdas no dielétrico, com decréscimo inversamente proporcional a frequência. Em médias a altas frequências as perdas nos condutores são dominantes e o RSE se torna praticamente constante, enquanto em frequências muito altas o efeito pele (do inglês, *Skin effect*) passa a influenciar gradativamente e aumenta de acordo com a raiz da frequência como pode ser visto na Figura 3.5. Para todos os capacitores alvos de testes as medidas de RSE de frequências de 20 Hz a 120 MHz devem ser medidas para garantir que as condições de testes estejam condicionadas a região de frequências com RSE mais constante e distante da frequência de ressonância do capacitor.

Figura 3.5 – Variação de resistência série equivalente em relação a frequência.

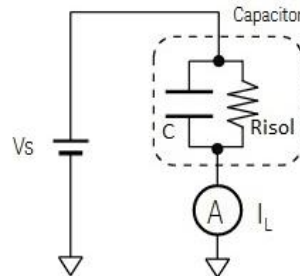


Fonte: Databook TDK Electronics.

Outro fator que deve ser avaliado é a resistência paralelo do capacitor, parâmetro que é determinado pela capacidade de reter cargas, ou dificultar as correntes de fuga do auto descarregamento do capacitor. As medições são realizadas com um megômetro o qual aplica uma tensão sobre o capacitor de acordo com a figura 3.6 por um determinado período e após realiza a medição da corrente existente. Quanto maior este valor, menos perdas o capacitor tem. Capacitores no final da sua vida útil costumam apresentar baixo valor

de resistência de isolamento, o que significa que tem baixa capacidade de armazenamento de cargas e por muitas vezes um grande período ou incapacidade de carregamento.

Figura 3.6 – Circuito equivalente de um megômetro

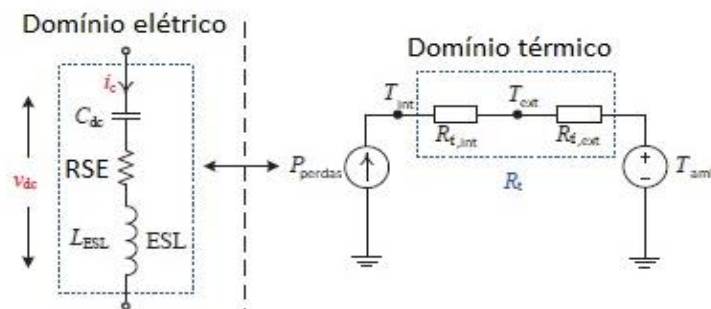


Fonte: Databook TDK Electronics.

3.3 Modelo Térmico

Seguindo o que foi proposto por (YANG, Y. et al. 2015), o qual apresenta um modelo térmico para capacitores eletrolíticos, o modelo geral apresentado na Figura 3.7 pode ser adaptado a capacitores de filme, uma vez que seu circuito elétrico equivalente é o mesmo. Neste modelo obtêm-se um equivalente do circuito elétrico transferido para o circuito térmico equivalente a partir de parâmetros dos materiais de fabricação do capacitor.

Figura 3.7 – Diagrama de modelo térmico.



Fonte: Instantaneous Thermal Modeling of the DC-Link Capacitor in Photovoltaic Systems (YANG, Y. et al. 2015)

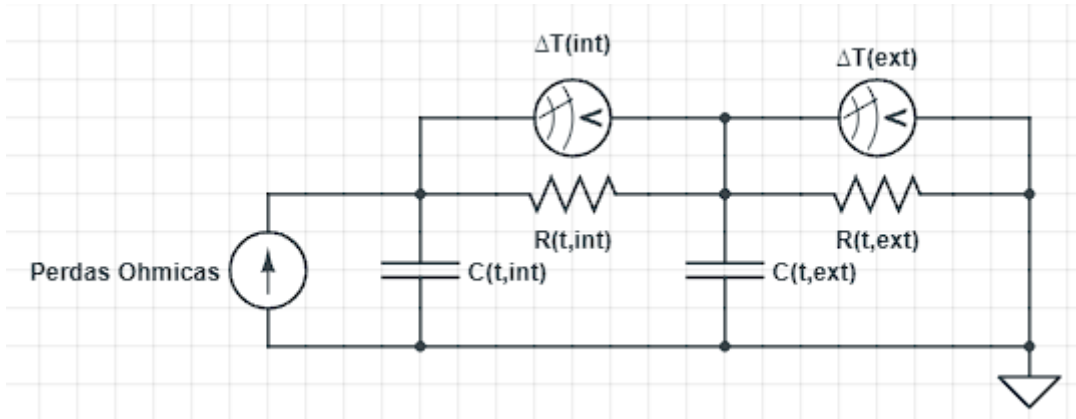
Para melhor compreensão do circuito térmico equivalente, a Tabela 3.2 está disposta para elucidar qual grandeza física cada componente de circuito elétrico representa e por conseguinte o circuito equivalente térmico, objetivo alvo deste trabalho, o qual está desenhado na Figura 3.8.

Tabela 3.2 – Elucidação de representação de circuito equivalente térmico.

Propriedade térmica	Propriedade elétrica do circuito equivalente térmico
Taxa de transferência de calor [W]	Corrente elétrica [A]
Temperatura [°C]	Potencial elétrico [V]
Resistência térmica [°C/W]	Resistência elétrica [Ω]
Capacitância térmica [J/°C]	Capacitância elétrica [F]

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 3.8 – Circuito equivalente térmico.



Fonte: Elaborado pelo autor

Onde $R_{t,int}$ representa a resistência térmica da resina para o invólucro do capacitor (comumente chamado de caneca), $R_{t,ext}$ a resistência térmica da caneca para o ambiente (convectivo apenas), $C_{t,int}$ a capacidade de armazenamento térmico na parte interna do capacitor e $C_{t,ext}$ na parte externa, as perdas ôhmicas como um fluxo através da fonte de corrente, e as tensões dos voltímetros nos nós do circuito representam as variações de temperatura da bobina e caneca, além do aterramento que representa a temperatura ambiente.

As transferências do domínio elétrico para o térmico são aproximações a partir de não-idealidades conhecidas e já apresentadas do capacitor, ou seja, os valores de resistência térmica podem ser estimados a partir de dados já conhecidos dos materiais e nos *datasheets* dos capacitores. Por exemplo, as perdas ôhmicas já foram apresentadas na equação 2.11 de potência dissipada devido às não idealidades dos materiais, sendo dependente da corrente elétrica e da resistência elétrica do capacitor. As resistências e capacitâncias térmicas por sua vez são dependentes das características dos materiais que compõem o capacitor de dissipação e condutividade térmica e devem ser obtidas a partir das equações 3.1 a 3.4.

$$R_{t,int} = \frac{l_{resina}}{A_{resina} \cdot k_{resina}} + \frac{l_{caneca}}{A_{caneca} \cdot k_{caneca}} \quad (3.1)$$

$$C_{t,int} = m_{bobina} cp_{bobina} \quad (3.2)$$

$$R_{t,ext} = \frac{1}{A_{caneca} \cdot h_{caneca}} \quad (3.3)$$

$$C_{t,ext} = m_{caneca} cp_{caneca} + m_{resina} cp_{resina} \quad (3.4)$$

Onde A_{resina} é a área superficial da resina, k_{resina} o coeficiente de condutividade térmica da resina, m_{bobina} é a massa da bobina, cp_{bobina} é o calor específico da bobina, A_{caneca} é a área de seção da caneca, h_{caneca} é o coeficiente convectivo da caneca, m_{caneca} a massa da caneca e cp_{caneca} o calor específico da caneca. Todos estes valores podem ser obtidos nos *datasheets* de capacitores ou em tabelas de propriedades termodinâmicas dos materiais. Portanto, é possível calcular essas resistências e capacitâncias e, a partir da lei de Ohm de circuitos elétricos, determinar as variações de temperaturas utilizando as equações 3.5 e 3.6.

$$\Delta T_{ext} = (R_{t,ext} \times P) \times (1 - e^{\frac{-t}{\tau_{temp,ext}}}) \quad (3.5)$$

$$\Delta T_{int} = (R_{t,int} \times P) \times (1 - e^{\frac{-t}{\tau_{temp,int}}}) \quad (3.6)$$

Para finalizar o modelo térmico proposto é necessário analisar o tempo para que o aquecimento atinja o regime permanente e uma vez que o circuito térmico equivalente possui um formato de circuito

característico de resistores e capacitores, pode-se determinar a constante de tempo térmica τ_{temp} que corresponde ao tempo necessário para a temperatura chegar a aproximadamente 63% do valor final através da equação 3.9 e definir a função de variação de temperatura esperado. Para tanto, primeiramente é necessário definir a os valores de resistência térmica e capacitância térmica equivalentes do circuito calculados nas equações 3.7 e 3.8 de acordo com o que foi apresentado na seção de fundamentação teórica.

$$R_{t,equivalente} = R_{t,capacitor} + R_{t,caneca} \quad (3.7)$$

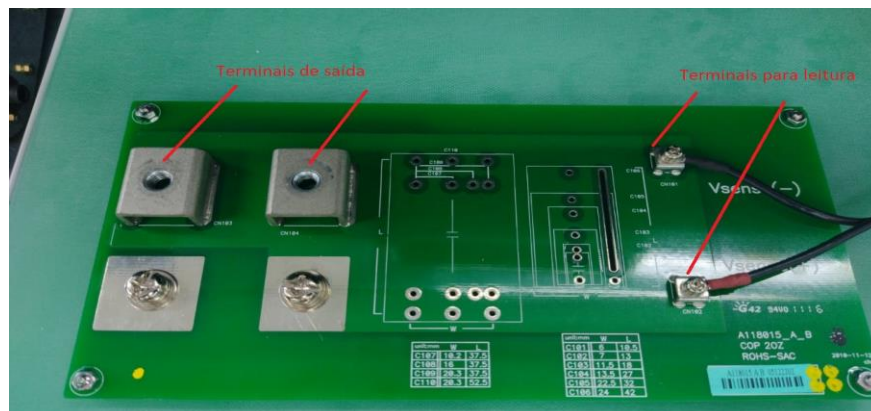
$$C_{t,equivalente} = C_{t,ext} + C_{t,int} \quad (3.8)$$

$$\tau_{temp} = R_{t,equivalente} \times C_{t,equivalente} \quad (3.9)$$

3.4 Ensaio de auto aquecimento

O ensaio de auto aquecimento de um capacitor tem por objetivo mensurar a variação de temperatura em determinados pontos de medição devido a potência dissipada em forma de calor pela resistência série (RSE) exposta a corrente alternada em uma determinada frequência. Cada capacitor é ligado individualmente ao equipamento para que os ensaios sejam conduzidos sem possíveis interferências de uma peça em outra, tanto por motivos elétricos quanto térmicos. A Figura 3.9 ilustra o circuito elétrico de ligações do equipamento.

Figura 3.9 – Circuito elétrico de ligações do teste de auto aquecimento.



Fonte: Elaborado pelo autor

Para medição em diferentes pontos do capacitor, foram colocados termopares do tipo K conforme explicado anteriormente, próximo ao centro da bobina e externamente, fixada à caneca. Os termopares são da empresa Ômega modelo TT-K-36-1000, com temperatura máxima de 260°C e limites de erro de 2,2°C ou 0,75% da medida, o que tiver maior valor de acordo com o *datasheet* do produto. Esse tipo de termopar foi utilizado devido a facilidade na manipulação e tempo de resposta de poucos segundos, além da falta de tempo hábil e recursos econômicos, apesar de agregar erros às medições maiores do que outros tipos de sensores térmicos.

Com o objetivo de não existir interferências ou risco de curto-circuito do termopar com a bobina, utilizou-se um material isolante termo retrátil que ao ser aquecido contrai-se e fixa o termopar com o ponto de contato. Ainda, para diminuir a interferência de possíveis fatores externos e ao mesmo tempo garantir a segurança durante a realização, o teste é realizado no interior de uma cabine de testes. A coleta dos valores de temperatura é feita com um *datalogger* a cada 1 segundo sendo por fim exportada a uma tabela no *software* Excel para posterior análise dos resultados do ensaio.

3.5 Análise dos resultados práticos e teóricos

A etapa final da metodologia trata da comparação entre os resultados obtidos do modelo térmico e os obtidos com o experimento. Os resultados teóricos e práticos ajudam na identificação de erros e na determinação das possíveis soluções para minimizá-los, por exemplo, ajustando o modelo.

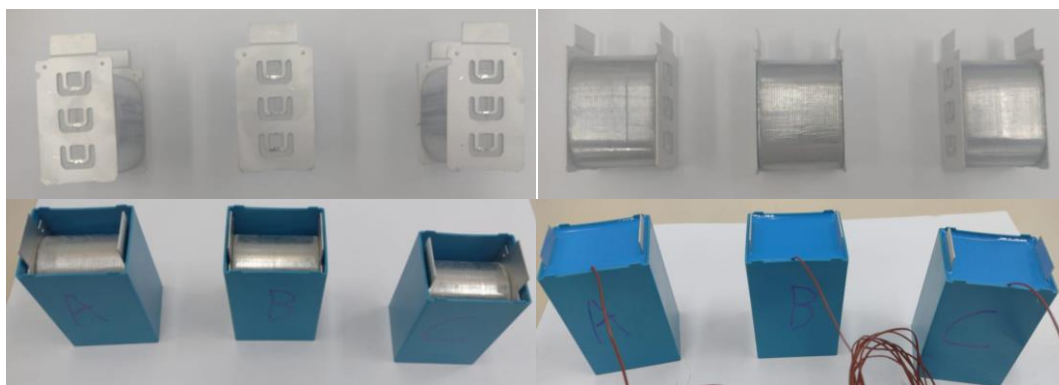
4 RESULTADOS

Esta seção tem como objetivo a descrição da elaboração dos protótipos, realização dos ensaios de auto aquecimento e apresentação dos cálculos do modelo térmico para o capacitor escolhido. Além disso, trata da análise dos resultados a partir da comparação entre resultados práticos e teóricos, bem como determinação de possíveis causas para as diferenças encontradas.

4.1 Montagem e caracterização dos protótipos

A montagem dos protótipos para a realização dos testes foi executada manualmente utilizando 3 bobinas já soldadas com seus terminais coletadas da fábrica de capacitores. Primeiramente estas bobinas foram pesadas para determinação da massa dos materiais, assim como a caneca e a peça final. Com essas medidas é possível calcular a massa da resina de cada protótipo por meio da diferença entre a peça final subtraída da massa da caneca e da bobina. Durante a montagem as bobinas foram inseridas dentro das canecas plásticas, posicionando os termopares no centro e travados na etapa de resinagem da peça para garantir a sua imobilidade como mostra a Fig. 4.1.

Figura 4.1 – Elaboração dos protótipos



Fonte: Elaborado pelo autor

Na sequência, segue-se para a etapa de caracterização elétrica. As medições elétricas dispostas na Tabela 4.1 foram realizadas a uma temperatura de 25°C utilizando o equipamento Wayne Kerr modelo 6440B de acordo com parâmetro e frequência desejada. Os parâmetros de capacitância e resistência série equivalente (RSE) de acordo com a frequência são utilizados diretamente no modelo térmico proposto, enquanto os demais são realizados para assegurar a qualidade do capacitor (variação da capacitância relativa, de acordo com a tolerância especificada, e resistência de isolamento para garantir que as peças estão carregando normalmente).

Tabela 4.1 – Resultado das medições elétricas dos protótipos.

Parâmetro	Capacitância relativa (%)	RSE (mΩ)	RSE (mΩ)	RSE (mΩ)	R_{isol} (GΩ)
Frequência	1 kHz	10 kHz	35 kHz	100 kHz	
A	-5,78%	0,91	1,25	2,61	8,60
B	-6,03%	0,89	1,23	2,56	10,83
C	-5,52%	0,90	1,26	2,49	10,02
Limites	> -10,00%		< 2,70		> 0,43

Fonte: Elaborado pelo autor

Percebe-se que os protótipos foram fabricados de maneira a respeitar os limites especificados no *datasheet* do capacitor. Os valores obtidos nas medições elétricas dos protótipos na tabela 4.1 servem como dado inicial, uma vez que o *datasheet* apenas provém os dados de limites, mas não os típicos para as resistências série equivalente por frequência. Para obter as características térmicas foi realizada a medição de massa dos materiais em cada peça durante a elaboração dos protótipos utilizando uma balança de precisão. Os valores de condutância térmica e calor específico para os materiais de acordo com os *datasheets* e documentações de materiais estão organizados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Parâmetros dos materiais para modelo térmico.

Material	K	Cp	Massa (Peça A)	Massa (Peça B)	Massa (Peça C)
Filme metalizado	0,42 [$\frac{W}{m.K}$]	1,88 [$\frac{J}{g.K}$]	52,14 g	52,00 g	50,81 g
Resina	0,40 [$\frac{W}{m.K}$]	2,50 [$\frac{J}{g.K}$]	33,29 g	31,43 g	29,48 g
Caneca	0,24 [$\frac{W}{m.K}$]	2,50 [$\frac{J}{g.K}$]	16,43 g	16,43 g	16,43 g

Fonte: Elaborado pelo autor

Nota-se a variação entre as peças na ordem de poucas gramas, mas destaca-se o caso da Peça C, que apesar de ser a bobina com maior capacitância tem a menor massa. Isto pode ocorrer porque o que determina a capacitância é o chamado comprimento capacitivo efetivo, ou seja, a totalidade de filme plástico metalizado. As voltas finais e iniciais são desmetalizadas (não fazem parte do comprimento capacitivo) para evitar problemas no centro da bobina e para proteger o seu exterior de exposição à umidade e temperaturas. Além disso, a compactação da bobina também pode influenciar na capacitância total.

4.2 Parâmetros e resultados do ensaio de auto aquecimento

Com os protótipos prontos e devidamente caracterizados, têm-se todos os pré-requisitos para a realização do ensaio de auto aquecimento. As condições descritas na tabela 4.3 foram implementadas por meio da aplicação de corrente alternada, e as variáveis foram monitoradas com o auxílio de um osciloscópio. Assim, foram testadas condições limítrofes, evitando danos no capacitor ensaiado.

Tabela 4.3 – Parâmetros do teste de auto aquecimento.

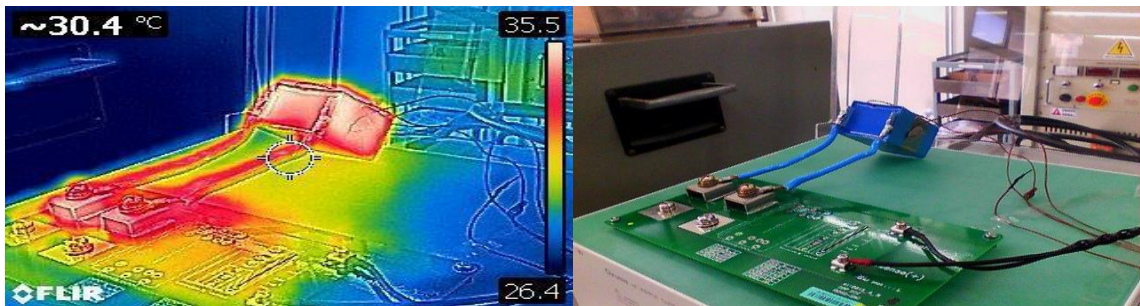
Peça	Irms	Vrms	Frequência	Tempo
A	23,07 A	4,01 V	35 kHz	60 minutos
A	23,00 A	0,48 V	100 kHz	15 minutos
B	22,73 A	3,97 V	35 kHz	60 minutos
B	20,84 A	0,48 V	100 kHz	15 minutos
C	23,05 A	3,7 V	35 kHz	60 minutos
C	23,02 A	1,49 V	100 kHz	15 minutos

Fonte: Elaborado pelo autor

Durante a montagem dos experimentos foram registradas algumas imagens utilizando uma câmera térmica. A partir da Figura 4.2 notou-se que a temperatura dos cabos é alta o suficiente para interferir no

resultado obtido no ensaio, principalmente devido à alta frequência utilizada, possivelmente causando efeito *skin*. Esse efeito causa a migração da carga para a parte exterior dos cabos, aumentando sua resistência e consequentemente gerando um aumento de temperatura.

Figura 4.2 – Fotos do ensaio de auto aquecimento.

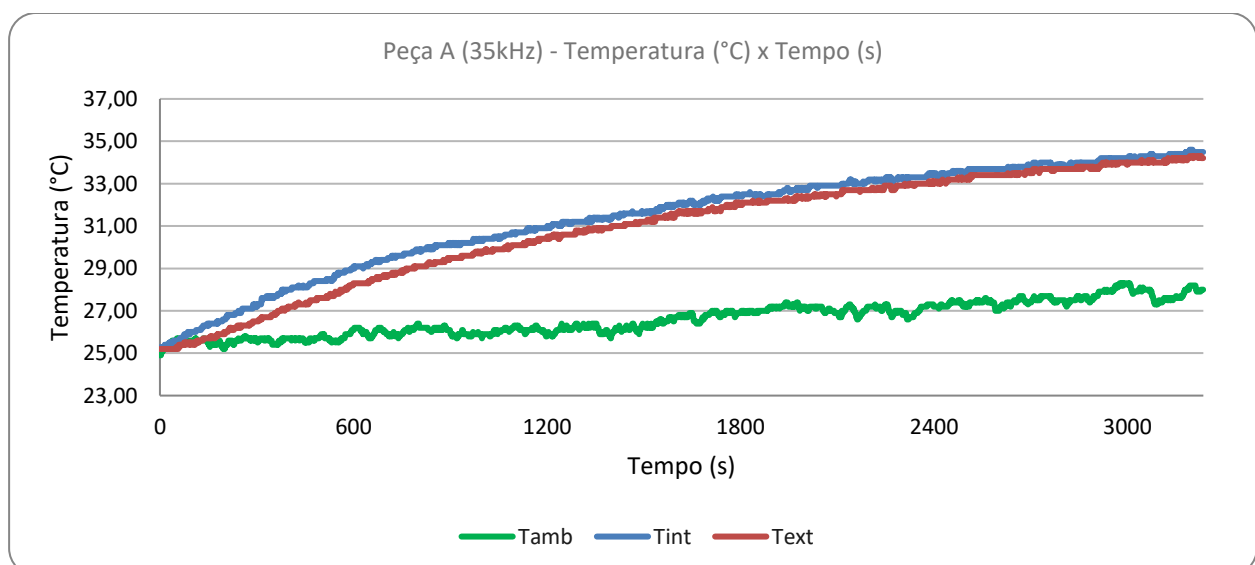


Fonte: Elaborado pelo autor

O ambiente próximo a peça tem sua temperatura aumentada também, o que seria amplificado com o fechamento da cabine de segurança visto que seu volume de ar interno receberia calor por radiação sem a possibilidade de troca térmica. Portanto, o ensaio precisou ser realizado com o dispositivo de segurança aberto, mas com acompanhamento e avisos para o risco de choque elétrico. Os experimentos foram realizados em intervalos de aproximadamente 3h para garantir o resfriamento das peças e do equipamento.

Os dados capturados dos sensores de temperatura através do *datalogger* foram organizados em tabelas no *software* Excel e analisados, em formato de gráficos para identificar o aumento da temperatura com o tempo. Além disso, foi verificado que a variação da temperatura inicial e final pode ter sido influenciada pela variação da temperatura do ambiente, que não é totalmente controlada, e efeitos de fenômenos de convecção e radiação. Isto pode ser observado no gráfico da temperatura x tempo do ensaio a 35 kHz da Peça A disposto na Figura 4.3, onde a temperatura ambiente varia praticamente 3°C. Esse efeito levou a temperatura externa a aumentar e, com isso, diminuir a diferença com a temperatura interna. Assim, foi decidido analisar os dados da variação de temperatura interna teórica e prática a 35 kHz em um período de ensaio curto, de 900 segundos. Posteriormente é visto que esta diminuição no tempo de ensaio não causa prejuízo, uma vez que é praticamente 8 vezes o valor da constante de tempo térmica interna dos capacitores.

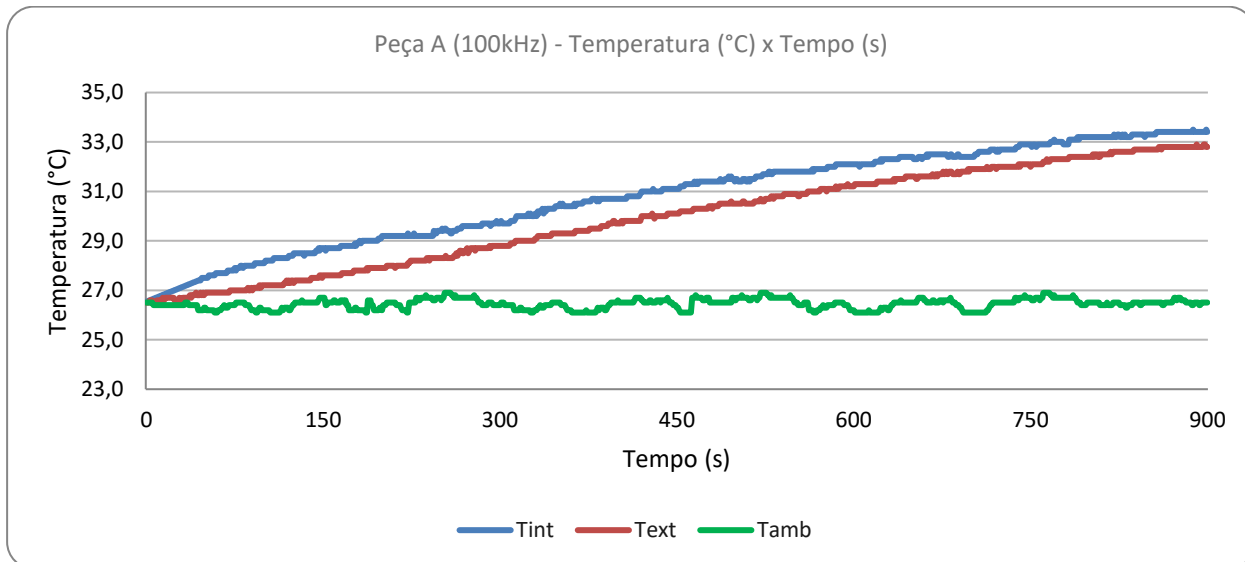
Figura 4.3 – Gráfico de Temperatura x Tempo do ensaio a 35 kHz da Peça A.



Fonte: Elaborado pelo autor

A amplitude da variação total de temperaturas ao longo do tempo tende a estabilizar-se de acordo com a constante térmica. Isto também pode ser notado nos gráficos seguintes, dispostos na Figura 4.4 e Figura 4.5.

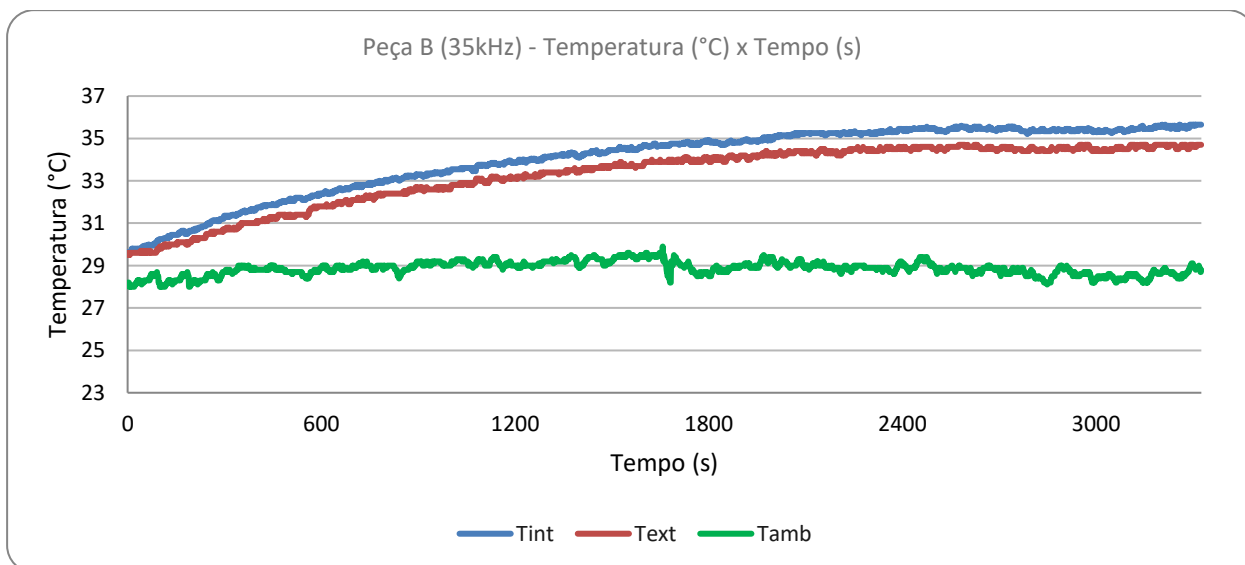
Figura 4.4 – Gráfico de Temperatura x Tempo do ensaio a 100 kHz da Peça A



Fonte: Elaborado pelo autor

No ensaio a 100kHz da peça A (Fig. 4.4), a temperatura ambiente teve uma variação total menor. Mas também é possível perceber que com o tempo a temperatura externa se aproxima da temperatura interna. Isto deve-se ao calor transferido do cabeamento para os terminais que tem contato tanto com a caneca como com a bobina, ocasionando uma homogeneidade de temperaturas no capacitor. Assim, o período analisado na comparação de variação da temperatura interna teórica e prática a 100 kHz foi de 300 segundos, numa tentativa de diminuir a influência destes fatores não considerados nos cálculos teóricos. Posteriormente é visto que esta diminuição no tempo de ensaio não causa prejuízo, uma vez que é praticamente 3 vezes o valor da constante de tempo térmica interna dos capacitores.

Figura 4.5 – Gráfico de Temperatura x Tempo do ensaio a 35 kHz da Peça B

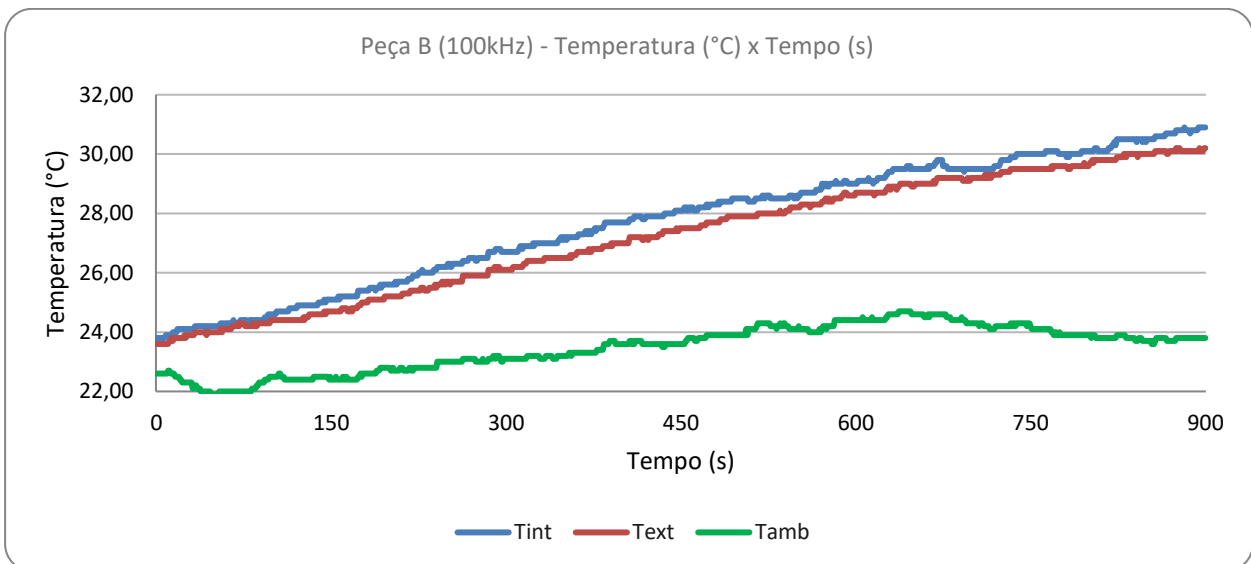


Fonte: Elaborado pelo autor

A análise do gráfico da Figura 4.5 indica que as condições de ensaio estavam mais estáveis, com pouca variação na temperatura ambiente. Entretanto, ao analisar o início do gráfico, nota-se que não há uniformidade nas temperaturas iniciais, com a peça mais quente que o local de ensaios. Isto gera um deslocamento também no gráfico comparativo de variação de temperatura externa teórico e prático.

O ensaio da peça B a 100 kHz também possui esta variação inicial de acordo com o gráfico da Figura 4.6.

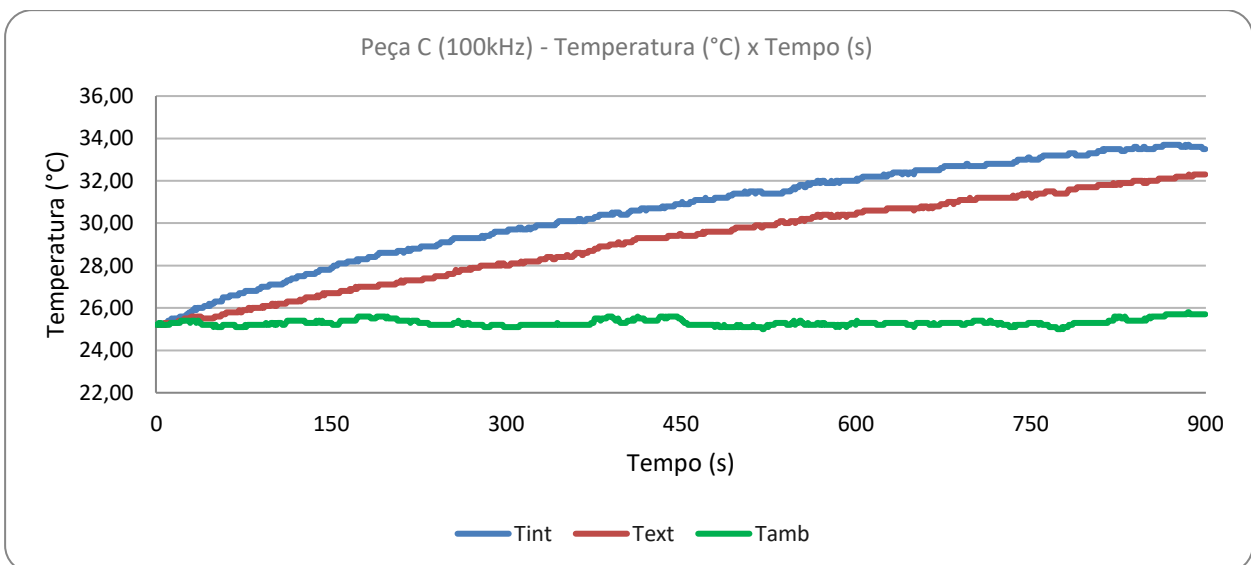
Figura 4.6 – Gráfico de Temperatura x Tempo do ensaio a 100 kHz da Peça B



Ao analisar o gráfico da Figura 4.6 percebe-se que não foi um ensaio bem controlado, possuindo grande variação de temperatura ambiente em um curto período (3,5°C em 15 minutos), bem como a influência dos cabamentos e terminais no período final de ensaio.

Segue-se então para o ensaio a 100 kHz desta peça, com seu gráfico de temperaturas disposto na Figura 4.7.

Figura 4.7 – Gráfico de Temperatura x Tempo do ensaio a 100 kHz da Peça C



Nota-se deste gráfico que entre os ensaios a 100 kHz é o que foi mais controlado, com variações pequenas da temperatura ambiente, mas ainda assim é possível notar a aproximação das curvas de temperatura interna e externa do capacitor ao final do gráfico, indicando mais uma vez a influência do cabeamento e terminais.

4.3 Cálculos teóricos do modelo térmico proposto

O modelo de circuito térmico equivalente pode então ser calculado de acordo com as informações já citadas nas tabelas 4.1 e 4.2. As equações 4.1 e 4.2 das resistências térmicas equivalentes são válidas para todos os protótipos, uma vez que dependem apenas das dimensões e propriedades dos materiais. Além disso, foi utilizado o valor de coeficiente convectivo de 10 W/m².K do ar em convecção natural por ser uma prática empregada na indústria.

$$R_{t,ext} = \frac{1}{A_{caneca} \cdot h_{caneca}} = \frac{1}{0,0096 \cdot 10} = 10,41 \left[\frac{^{\circ}C}{W} \right] \quad (4.1)$$

$$R_{t,int} = \frac{l_{resina}}{A_{resina} \cdot k_{resina}} + \frac{l_{caneca}}{A_{caneca} \cdot k_{caneca}} = \frac{0,00075}{0,0052 \cdot 0,4} + \frac{0,001}{0,0052 \cdot 0,24} = 1,16 \left[\frac{^{\circ}C}{W} \right] \quad (4.2)$$

Percebe-se que a resistência térmica da parte interior da caneca é pequena, principalmente devido à espessura pequena da caneca e camada de resina. No caso da capacitância térmica equivalente, os valores dependem das massas dos materiais que são diferentes em cada protótipo.

$$C_{t,ext,A} = m_{caneca,A} \times cp_{caneca,A} = 124,29 \left[\frac{J}{^{\circ}C} \right] \quad (4.3)$$

$$C_{t,int,A} = m_{bobina,A} \times cp_{bobina,A} = 98,01 \left[\frac{J}{^{\circ}C} \right] \quad (4.4)$$

$$C_{t,ext,B} = m_{caneca,B} \times cp_{caneca,B} = 119,64 \left[\frac{J}{^{\circ}C} \right] \quad (4.5)$$

$$C_{t,int,B} = m_{bobina,B} \times cp_{bobina,B} = 97,77 \left[\frac{J}{^{\circ}C} \right] \quad (4.6)$$

$$C_{t,ext,C} = m_{caneca,C} \times cp_{caneca,C} = 115,03 \left[\frac{J}{^{\circ}C} \right] \quad (4.7)$$

$$C_{t,int,C} = m_{bobina,C} \times cp_{bobina,C} = 95,52 \left[\frac{J}{^{\circ}C} \right] \quad (4.8)$$

De posse da capacitância e da resistência, pode-se então calcular a constante de tempo térmica do capacitor. As equações 4.9 a 4.14 ilustram este cálculo para cada peça.

$$\tau_{temp,int,A} = R_{t,int,A} \times C_{t,int,A} = 113,69 \text{ s} \quad (4.9)$$

$$\tau_{temp,ext,A} = R_{t,ext,A} \times C_{t,ext,A} = 1292,86 \text{ s} \quad (4.10)$$

$$\tau_{temp,int,B} = R_{t,int,B} \times C_{t,int,B} = 113,41 \text{ s} \quad (4.11)$$

$$\tau_{temp,ext,B} = R_{t,ext,B} \times C_{t,ext,B} = 1245,45 \text{ s} \quad (4.12)$$

$$\tau_{temp,int,C} = R_{t,int,C} \times C_{t,int,C} = 110,80 \text{ s} \quad (4.13)$$

$$\tau_{temp,ext,C} = R_{t,ext,C} \times C_{t,ext,C} = 1202,56 \text{ s} \quad (4.14)$$

Desta maneira, sabe-se que é necessário um tempo próximo de 2 minutos para que a peça atinja 63% da variação de temperatura que sofrerá em regime permanente na parte interior e 22 minutos na parte externa. Esta variação total de temperatura é calculada utilizando os valores de perdas ôhmicas, expressado nas equações 4.15 a 4.20:

$$P_{35kHz,A} = I_{35kHz,A}^2 \times RSE_{35kHz,A} = 0,66 \text{ W} \quad (4.15)$$

$$P_{100kHz,A} = I_{100kHz,A}^2 \times RSE_{100kHz,A} = 1,38 \text{ W} \quad (4.16)$$

$$P_{35kHz,B} = I_{35kHz,B}^2 \times RSE_{35kHz,B} = 0,63 \text{ W} \quad (4.17)$$

$$P_{100kHz,B} = I_{100kHz,B}^2 \times RSE_{100kHz,B} = 1,11 \text{ W} \quad (4.18)$$

$$P_{35kHz,C} = I_{35kHz,C}^2 \times RSE_{35kHz,C} = 0,67 \text{ W} \quad (4.19)$$

$$P_{100kHz,C} = I_{100kHz,C}^2 \times RSE_{100kHz,C} = 1,32 \text{ W} \quad (4.20)$$

Por fim, as variações de temperatura estão calculadas nas equações 4.21 a 4.32 levando em conta o tempo total de cada ensaio e os valores calculados das resistências térmicas externas e internas, potência dissipada por perdas ôhmicas e constantes térmicas dos capacitores.

$$\Delta T_{35kHz,ext,A} = (R_{t,ext,A} \times P_{35kHz,A}) \times (1 - e^{\frac{-t}{\tau_{temp,ext,A}}}) = 6,35^\circ\text{C} \quad (4.21)$$

$$\Delta T_{35kHz,int,A} = (R_{t,int} \times P_{35kHz,A}) \times (1 - e^{\frac{-t}{\tau_{temp,int,A}}}) = 0,77^\circ\text{C} \quad (4.22)$$

$$\Delta T_{100kHz,ext,A} = (R_{t,ext} \times P_{100kHz,A}) \times (1 - e^{\frac{-t}{\tau_{temp,ext,A}}}) = 7,20^\circ\text{C} \quad (4.23)$$

$$\Delta T_{100kHz,int,A} = (R_{t,int} \times P_{100kHz,A}) \times (1 - e^{\frac{-t}{\tau_{temp,int,A}}}) = 1,60^\circ\text{C} \quad (4.24)$$

$$\Delta T_{35kHz,ext,B} = (R_{t,ext} \times P_{35kHz,B}) \times (1 - e^{\frac{-t}{\tau_{temp,ext,B}}}) = 6,14^\circ\text{C} \quad (4.25)$$

$$\Delta T_{35kHz,int,B} = (R_{t,int} \times P_{35kHz,B}) \times (1 - e^{\frac{-t}{\tau_{temp,int,B}}}) = 0,70^\circ\text{C} \quad (4.26)$$

$$\Delta T_{100kHz,ext,B} = (R_{t,ext} \times P_{100kHz,B}) \times (1 - e^{\frac{-t}{\tau_{temp,ext,B}}}) = 5,95^\circ\text{C} \quad (4.27)$$

$$\Delta T_{100kHz,int,B} = (R_{t,int} \times P_{100kHz,B}) \times (1 - e^{\frac{-t}{\tau_{temp,int,B}}}) = 1,29^\circ\text{C} \quad (4.28)$$

$$\Delta T_{35kHz,ext,C} = (R_{t,ext} \times P_{35kHz,C}) \times (1 - e^{\frac{-t}{\tau_{temp,ext,C}}}) = 6,41^\circ\text{C} \quad (4.29)$$

$$\Delta T_{35kHz,int,C} = (R_{t,int} \times P_{35kHz,C}) \times (1 - e^{\frac{-t}{\tau_{temp,int,C}}}) = 0,78^\circ\text{C} \quad (4.30)$$

$$\Delta T_{100kHz,ext,C} = (R_{t,ext} \times P_{100kHz,C}) \times (1 - e^{\frac{-t}{\tau_{temp,ext,C}}}) = 7,26^\circ\text{C} \quad (4.31)$$

$$\Delta T_{100kHz,int,C} = (R_{t,int,C} \times P_{100kHz,C}) \times (1 - e^{\frac{-t}{\tau_{temp,int,C}}}) = 1,53^\circ\text{C} \quad (4.32)$$

Percebe-se que os valores de variação de temperatura externa a 35 kHz estão próximos de 6,3°C, enquanto as variações internas de 0,75°C. Para 100 kHz os valores são menos uniformes entre si. Isto é causado pela diferença entre os RSE dos capacitores serem maiores nesta frequência. Para resumir e melhor visualização dos valores calculados nesta seção, foi elaborada a tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Resumo dos valores calculados pelo modelo de circuito equivalente térmico.

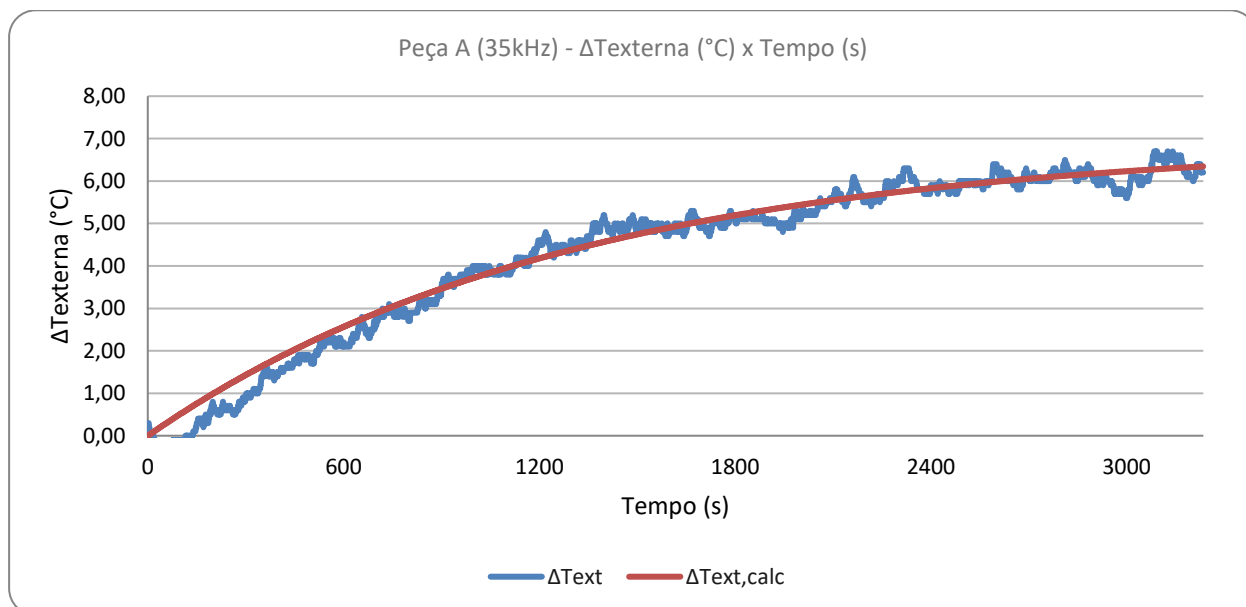
Peça	$R_{t,ext}$	$C_{t,ext}$	$R_{t,int}$	$C_{t,int}$	Perdas Ôhmicas	$\Delta T_{ext,calc}$	$\Delta T_{int,calc}$	Frequência
A	10,41 [$\frac{^{\circ}C}{W}$]	124,29 [$\frac{J}{^{\circ}C}$]	1,16 [$\frac{^{\circ}C}{W}$]	98,01 [$\frac{J}{^{\circ}C}$]	0,66 [W]	6,35 [°C]	0,77 [°C]	35 [kHz]
					1,38 [W]	7,20 [°C]	1,60 [°C]	100 [kHz]
B		119,64 [$\frac{J}{^{\circ}C}$]		97,77 [$\frac{J}{^{\circ}C}$]	0,63 [W]	6,14 [°C]	0,70 [°C]	35 [kHz]
					1,11 [W]	5,95 [°C]	1,29 [°C]	100 [kHz]
C		115,03 [$\frac{J}{^{\circ}C}$]		95,52 [$\frac{J}{^{\circ}C}$]	0,67 [W]	6,41 [°C]	0,78 [°C]	35 [kHz]
					1,32 [W]	7,26 [°C]	1,53 [°C]	100 [kHz]

Fonte: Elaborado pelo autor

4.4 Comparação dos resultados teóricos e práticos

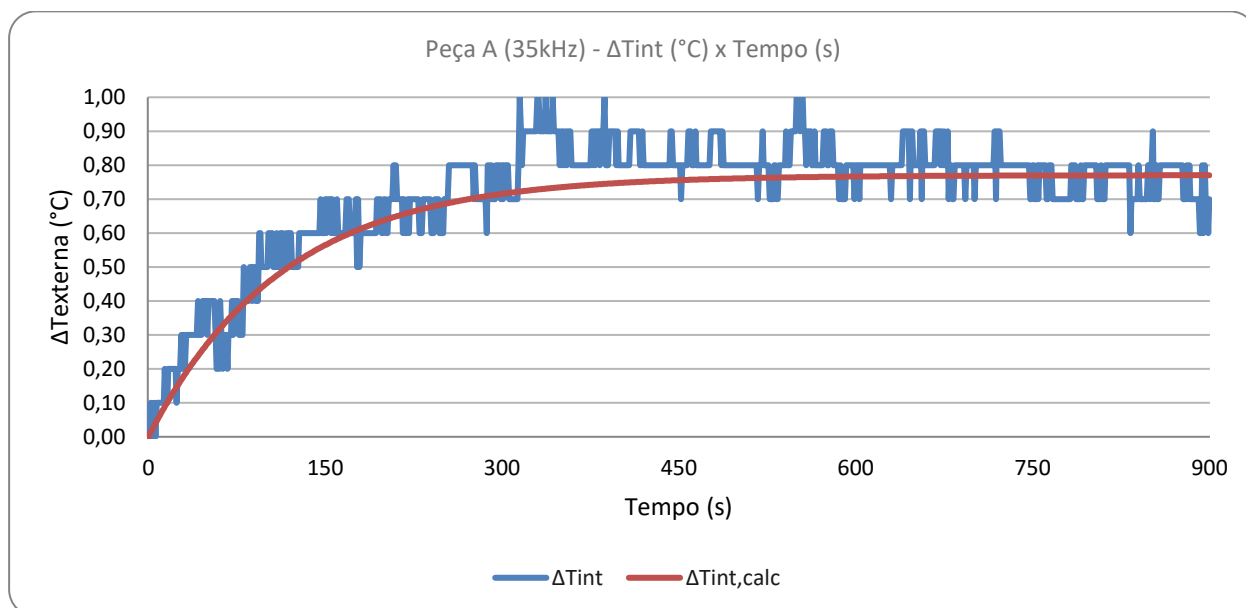
A etapa final do trabalho consiste na comparação dos resultados práticos e teóricos através da variação de temperatura interna e externa. O primeiro ensaio a ser analisado é a 35 kHz da peça A disposto nas Figuras 4.8 e 4.9 das variações externa e interna, respectivamente.

Figura 4.8 – Comparativo de Variação de Temperatura externa x Tempo a 35 kHz da Peça A



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 4.9 – Comparativo de Variação de Temperatura interna x Tempo a 35 kHz da Peça A

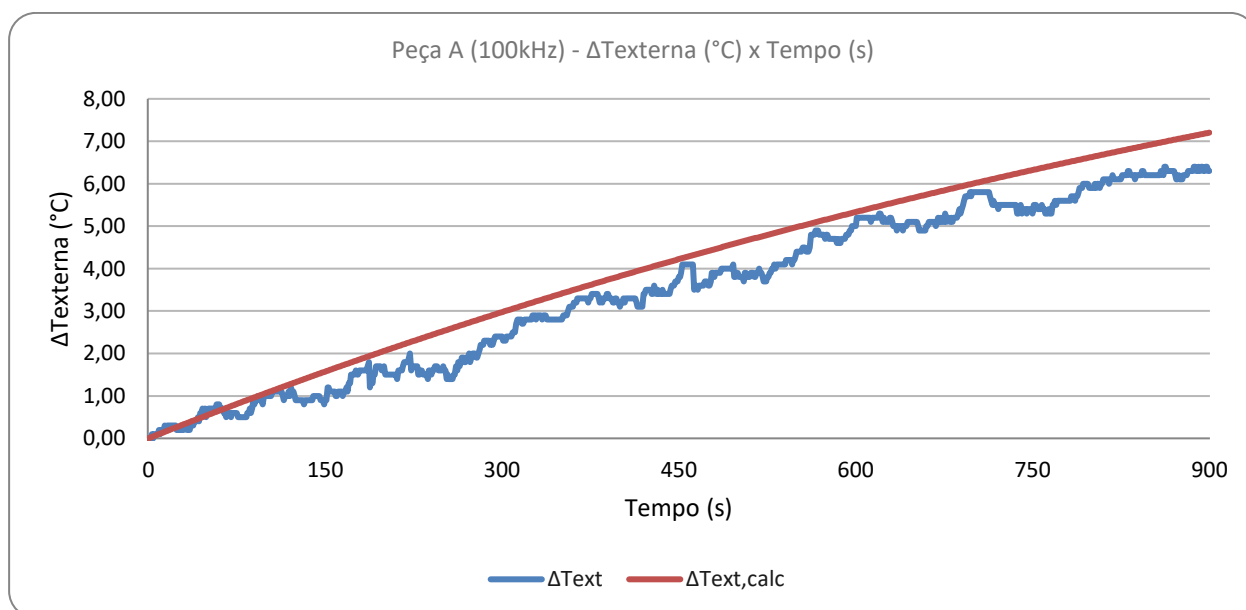


Fonte: Elaborado pelo autor

O primeiro ponto analisado é a inclinação das curvas geradas que parecem ser visivelmente bastante próximas entre valores práticos e teóricos em cada gráfico. Percebe-se também a estabilização dos valores internos no período analisado. Também é possível notar a variação externa no início do ensaio parecendo estar atrasado, mas isto pode ser explicado pela leitura da temperatura externa no início do ensaio não estar exatamente a mesma temperatura ambiente. Por fim, o valor de variação está bastante próximo em ambos os gráficos.

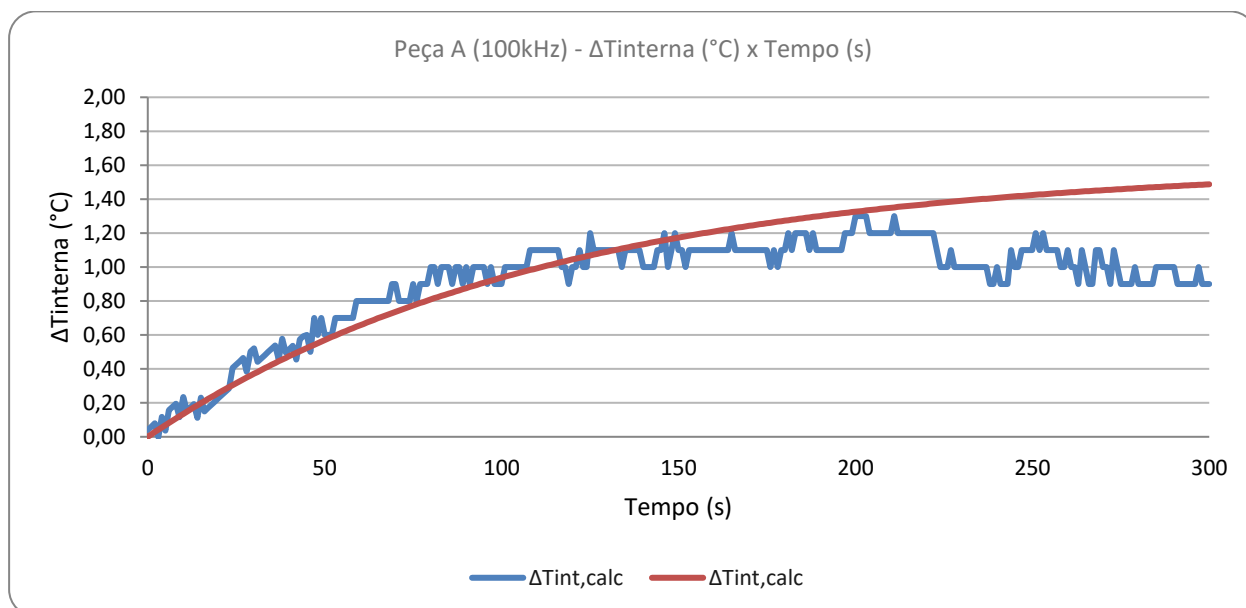
O ensaio seguinte, da Peça A com frequência de 100 kHz, tem seus gráficos comparativos dispostos nas Figuras 4.10 e 4.11.

Figura 4.10 – Comparativo de Variação de Temperatura externa x Tempo a 100 kHz da Peça A



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 4.11 – Comparativo de Variação de Temperatura interna x Tempo a 100 kHz da Peça A

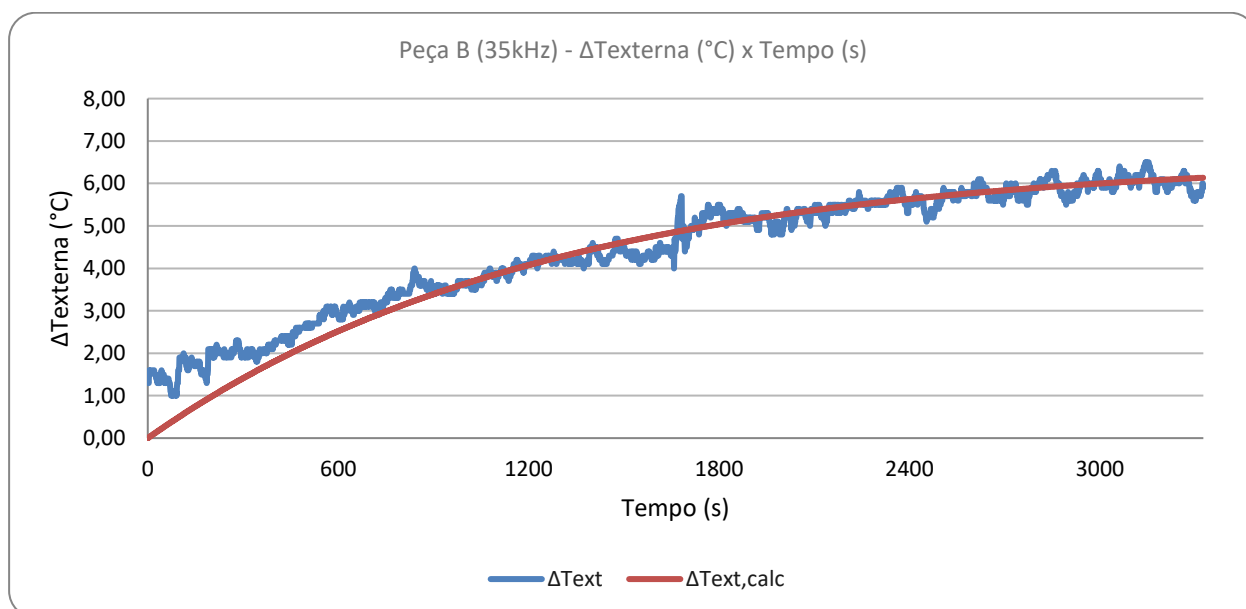


Fonte: Elaborado pelo autor

A análise deste gráfico quanto a inclinação das curvas é de que a variação da temperatura interna durante o ensaio inicia de maneira bastante similar ao teórico, mas com o tempo estes valores tendem a diminuir devido a influência do cabeamento e terminais. A variação total da temperatura interna e externa foi menor do que foi calculado justamente devido a esta tendência de homogeneidade com o tempo.

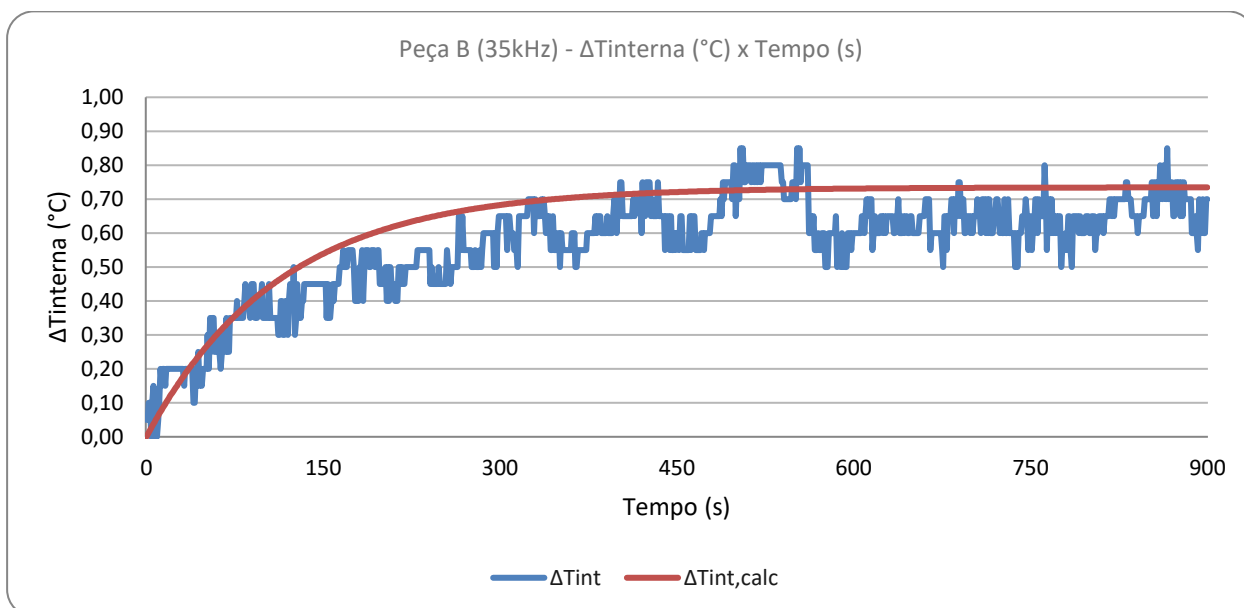
Os gráficos comparativos do ensaio a 35 kHz da peça B estão dispostos nas Figuras 4.12 e 4.13.

Figura 4.12 — Comparativo de Variação de Temperatura externa x Tempo a 35 kHz da Peça B



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 4.13 – Comparativo de Variação de Temperatura interna x Tempo a 35 kHz da Peça B

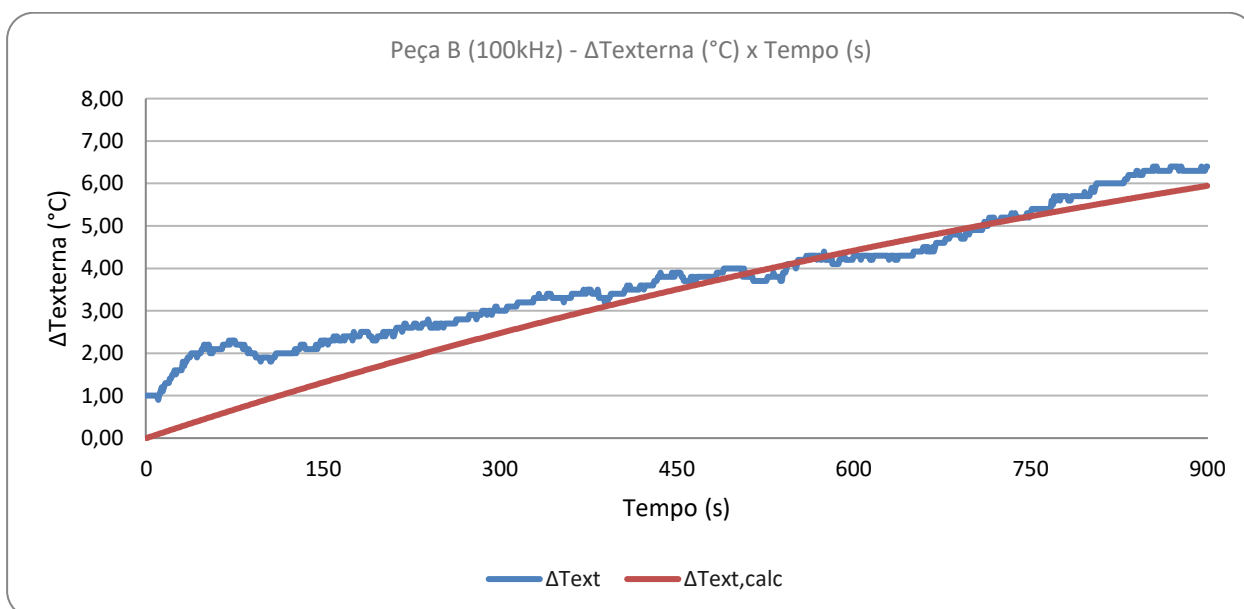


Fonte: Elaborado pelo autor

A variação inicial da temperatura externa mais uma vez teve valores iniciais deslocados da origem pois as leituras indicavam valores cerca de $1,5^{\circ}\text{C}$ na peça maiores do que o ambiente. Já quanto a inclinação dos gráficos teóricos e práticos foi bastante similar, mas com uma diferença na variação total na temperatura interna um pouco menor no ensaio de auto aquecimento.

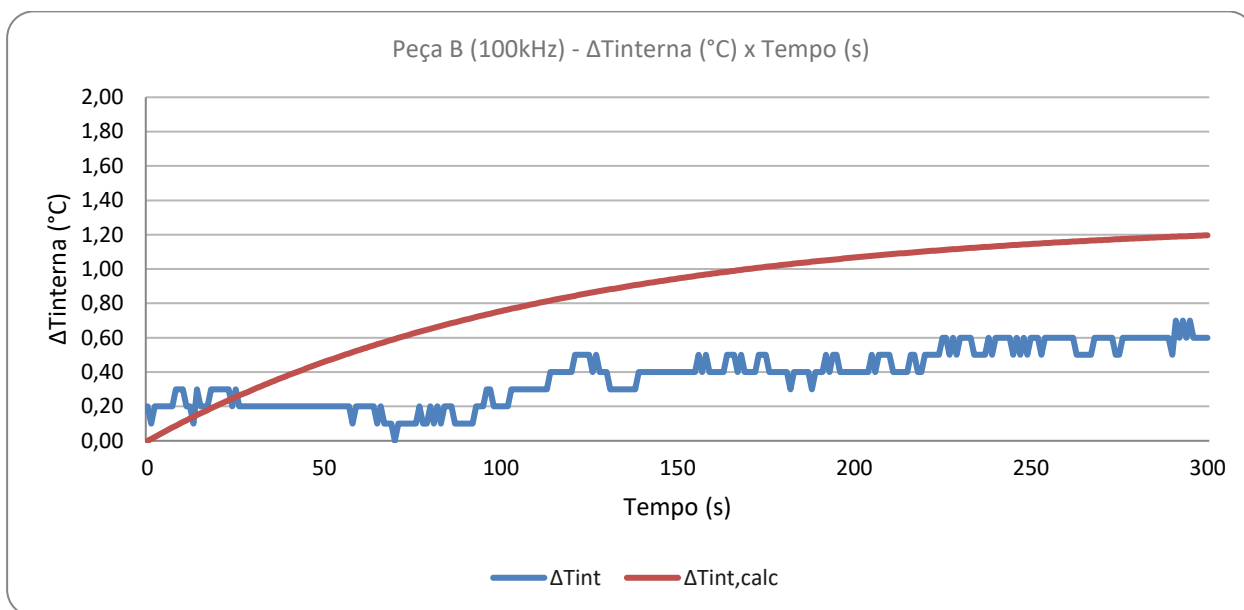
Os gráficos comparativos do ensaio a 100 kHz da peça B estão dispostos nas Figuras 4.14 e 4.15.

Figura 4.14 – Comparativo de Variação de Temperatura externa x Tempo a 100 kHz da Peça B



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 4.15 – Comparativo de Variação de Temperatura interna x Tempo do ensaio a 100 kHz da Peça B

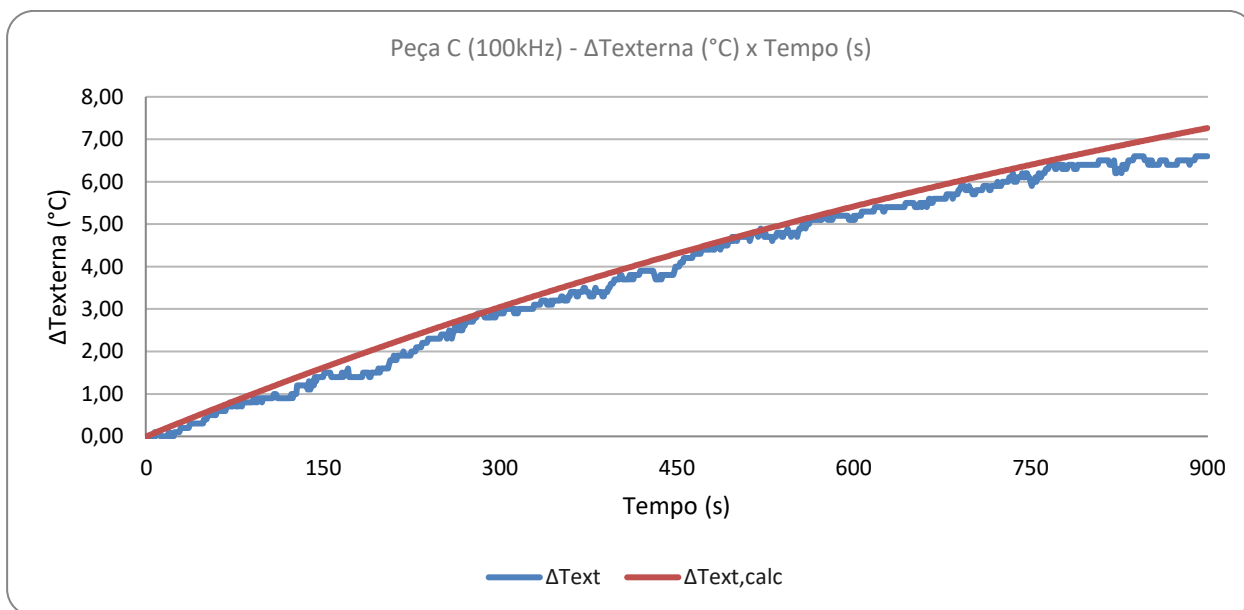


Fonte: Elaborado pelo autor

Este ensaio foi o que apresentou os piores resultados comparativos devido aos causadores de erros já citados: grande variação da temperatura ambiente em um período curto, influências do cabeamento e terminais e variação inicial de temperaturas do capacitor em relação ao ambiente. No gráfico da variação de temperatura externa até pode-se perceber uma similaridade na variação total e na inclinação dos dados teóricos e práticos, mas o gráfico variação de temperatura interna do ensaio de auto aquecimento não indica nenhuma semelhança ou formato claro.

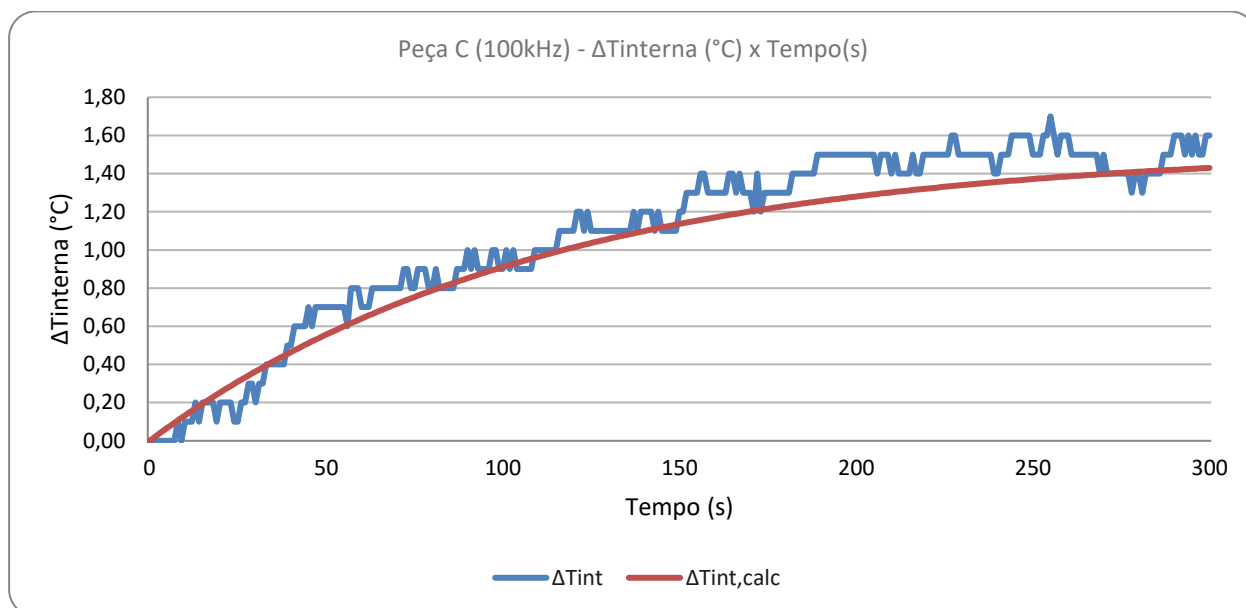
O último ensaio realizado foi o de 100 kHz da peça C e seus gráficos comparativos estão dispostos nas Figuras 4.16 e 4.17.

Figura 4.16 – Comparativo de Variação de Temperatura externa x Tempo do ensaio a 100 kHz da Peça C



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 4.17 – Comparativo de Variação de Temperatura interna x Tempo do ensaio a 100 kHz da Peça C



Fonte: Elaborado pelo autor

Este ensaio não sofreu com grandes variações de temperatura ambiente e seus valores iniciais de temperatura estavam bastante próximos, o que resultou em valores de variação total de temperatura, inclinação das curvas semelhantes entre teórico e prático. Entretanto, nota-se que a temperatura do cabeamento e dos terminais começa a influenciar a peça no final dos gráficos em tempos longos.

Com o objetivo de obter uma visão mais quantitativa das diferenças no comparativo de variação de temperatura, foi elaborada a tabela 4.5, com os valores calculados e obtidos nos experimentos das temperaturas máximas e variação média entre estes valores pelo tempo.

Tabela 4.5 – Resumo comparativo entre resultados práticos e teóricos.

Peça	Frequência	$\Delta T_{\text{ext,calc}}$	$\Delta T_{\text{int,calc}}$	ΔT_{ext}	ΔT_{int}	$(\Delta T_{\text{ext,calc}} - \Delta T_{\text{ext}})_{\text{médio}}$	$(\Delta T_{\text{int,calc}} - \Delta T_{\text{int}})_{\text{médio}}$
A	35 [kHz]	6,35 [°C]	0,77 [°C]	6,70 [°C]	1,00 [°C]	0,09 [°C]	0,04 [°C]
	100 [kHz]	7,20 [°C]	1,60 [°C]	6,40 [°C]	1,30 [°C]	0,54 [°C]	0,13 [°C]
B	35 [kHz]	6,14 [°C]	0,70 [°C]	6,30 [°C]	0,85 [°C]	-0,12 [°C]	0,08 [°C]
	100 [kHz]	5,95 [°C]	1,29 [°C]	6,40 [°C]	0,70 [°C]	-0,43 [°C]	0,46 [°C]
C	100 [kHz]	7,26 [°C]	1,53 [°C]	6,60 [°C]	1,70 [°C]	0,27 [°C]	-0,09 [°C]

Fonte: Elaborado pelo autor

A primeira coisa que se pode notar na tabela 4.5 é que os ensaios a 35 kHz apresentaram resultados muito próximos dos calculados no modelo térmico proposto, bem como os valores de variação de temperatura interna da maioria dos ensaios. A diferença média associada a variação da temperatura em parte dos ensaios ficou na casa de um décimo de grau Celsius, indicando boa aproximação com o modelo teórico proposto uma vez que as leituras do *datalogger* informam apenas uma casa após a vírgula. Além disso, nota-se que as maiores variações médias estão associadas aos ensaios de 100 kHz, principalmente o ensaio da Peça B, que tiveram mais imperfeições e condições que geraram falta de controle nas temperaturas ao redor das peças.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma proposta de modelo de circuito térmico equivalente para capacitores de filme plástico, utilizando valores de *datasheet* para simular a ligação entre conversor e inversor em um sistema eletrônico de potência de energia fotovoltaica. Foram estudados fatores elétricos e térmicos para a elaboração do modelo, assim como caracterizados utilizando equipamentos de medição como analisador de impedância, megômetro, balança de precisão e termopares. Utilizando os dados obtidos e encontrados nas especificações dos materiais, pode-se calcular a variação entre a temperatura ambiente e o exterior do capacitor e de temperatura no interior e exterior da peça.

Os ensaios a 35 kHz apresentaram resultados muito próximos dos calculados no modelo térmico proposto, bem como os valores de variação de temperatura interna da maioria dos ensaios. Além disso, nota-se que as maiores variações médias entre prático e teórico estão associadas aos ensaios de 100 kHz, principalmente o ensaio da Peça B, que tiveram a influência maior de efeito *skin* nos cabamentos e terminais, gerando aquecimento e falta de estabilidade nas temperaturas ao redor das peças.

A partir da comparação dos resultados do circuito equivalente térmico e do ensaio de auto aquecimento do capacitor percebe-se que os resultados são similares quanto a amplitude e formato da curva exponencial a partir da constante térmica. Entretanto, as incertezas atreladas às medições não possibilitam concluir o grau de assertividade do modelo. Além disso, certas condições do ensaio prático não foram levadas em conta no modelo teórico por serem relacionadas a condições no entorno do capacitor, como a variação de temperatura ambiente e aquecimento das conexões do circuito. Estas condições realmente ocorrem em circuitos elétricos em sistemas fotovoltaicos e em futuros trabalhos devem ser levados em conta no modelo a partir da consideração de fenômenos da radiação e convecção.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABSOLAR. **Panorama do solar fotovoltaico no Brasil e no mundo**. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/mercado/infografico>. Acesso em: 29 de agosto de 2022

YANG, Y. et al. **Instantaneous thermal modeling of the DC-link capacitor in PhotoVoltaic systems**. **Conference Proceedings - IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC**, v. 2015-May, n. May, p. 2733–2739, 2015.

ALEXANDER, Charles K.; SADIKU, Matthew N O. **Fundamentos de Circuitos Elétricos com Aplicações**. Grupo A, 2013. E-book. 9788580551730.

DUARTE, L. H. S. **Degradação dos Capacitores de Potência Sob Influência dos Componentes Harmônicos**. p. 1–170, 2000.

EL-HUSSEINI, M. H. et al. **Thermal optimization of metallized polypropylene film capacitors**. **Conference Record - IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society)**, v. 5, p. 3063–3068, 2000.

EL-HUSSEINI, M. H. et al. **Thermal simulation for geometric optimization of metallized polypropylene film capacitors**. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 38, n. 3, p. 713–718, 2002.

EPCOS. **Film Capacitors. General technical information**. **Technical Data**, n. June, p. 1–42, 2015.

GUPTA, A. et al. **A review of degradation behavior and modeling of capacitors**. **ASME 2018 International Technical Conference and Exhibition on Packaging and Integration of Electronic and Photonic Microsystems, InterPACK 2018**, n. October, 2018.

HJERT, A. **Multiscale Modelling of a Metallized Film Capacitor for HVDC Applications**. p. 72, 2017.

LEE, K. et al. **Impact of input voltage sag and unbalance on DC link inductor and capacitor stress in adjustable speed drives**. **Conference Record - IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society)**, v. 2, n. July 2014, p. 1457–1463, 2005.

LI, Z. et al. **Temperature Rise of Metallized Film Capacitors in Repetitive Pulse Applications**. **IEEE Transactions on Plasma Science**, v. 43, n. 6, p. 2038–2045, 2015.

LLEDÓ-PONSATI, T. et al. **Thermal modeling of large electrolytic capacitors using FEM and considering the internal geometry**. **IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics**, v. 9, n. 5, p. 6315–6328, 2021.

PARLER, S. G. **Thermal modeling of aluminum electrolytic capacitor**. **Conference Record - IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society)**, v. 4, n. October, p. 2418–2429, 1999.

YANG, Y. et al. **Instantaneous thermal modeling of the DC-link capacitor in PhotoVoltaic systems**. **Conference Proceedings - IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC**, v. 2015-May, n. May, p. 2733–2739, 2015.

7 ANEXOS

Anexo A – Datasheet do Capacitor



Film Capacitor	B32776S8236K500
Metallized Polypropylene Film Capacitors (MKP)	B32776

Preliminary 4

Technical data

Reference standard: IEC 61071:2007. All data given at T = 20°C, unless otherwise specified.

Rated DC Voltage V_R	800 VDC (at 85°C)
Continuous operation voltage V_{op}	750 VDC (at 95°C)
Rated Temperature (T_R)	85 °C
Maximum Operating Temperature $T_{max}^{op} = T_{amb} + T_{self-heating}$	$T_{max}^{op} = +115 °C$
Upper Category Temperature T_{max}	+105 °C
Lower Category Temperature	$T_{min} = -40 °C$
Rated Capacitance C	23 µF
Capacitance tolerance	± 10 % (K)
Dissipation factor $\tan \delta$ (in 10^{-3}) at 20 °C (upper limit values)	0.8 (at 1kHz) 4.2 (at 10kHz)
ESR (typical) at 35kHz	2.7 mΩ
Insulation resistance R_{ins} at 500 V, rel. humidity ≤ 65 % (minimum as delivered values)	> 430 MΩ
DC test voltage (terminal to terminal), duration	1.5 V_R , 10s
Maximum Pulse Handling Capability	35 V/µs
Damp heat test Limit values after damp heat test	1000h / 40°C / 93%RH with V_R Capacitance change $ \Delta C/C_d $ ≤ 5% Dissipation factor change $\Delta \tan \delta / \tan \delta$ ≤ 200% (at 1kHz) Insulation resistance R_{ins} ≥ 50% of minimum or time constant $\tau = C_R \cdot R_{ins}$ as-delivered values
Reliability Failure rate λ Service life t_{SL}	10 fit ($\leq 1 \cdot 10^{-9}/h$) at 0.5 · V_R , 40 °C 50 000 h at 1.0 · V_R , 85 °C For conversion to other operating conditions and temperatures, refer to chapter "Reliability", page 439
Temperature cycling, 30 min. maximum dwell time at each temperature extreme, 1 min. maximum transition time Approval criteria after temperature cycling	-40 °C...+ T_R / 1000 cycles $ \Delta C/C_d \leq 5 \%$ (small fissures on epoxy resin may occur near terminals corners)
Maximum RMS current	27 A_{RMS} (35kHz, $T_a \leq 95 °C$)
For temperatures between 85 °C and 95 °C	0.625 %/°C of V_{op} derating compared to V_{op} at 85 °C
For temperatures between 95 °C and 115 °C	1.33 %/°C of V_{op} derating compared to V_{op} at 95 °C