

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ALESSANDRO GIRARDI**

**COMPORTAMENTO TÉRMICO DE CAPACITORES ELETROLÍTICOS DE  
ALUMÍNIO PARA APLICAÇÕES AUTOMOTIVAS**

**PORTO ALEGRE  
2015**

**ALESSANDRO GIRARDI**

**COMPORTAMENTO TÉRMICO DE CAPACITORES ELETROLÍTICOS DE  
ALUMÍNIO PARA APLICAÇÕES AUTOMOTIVAS**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado como requisito parcial para a  
obtenção do grau de Bacharel em  
Engenharia Elétrica na Universidade Federal  
do Rio Grande do Sul.

**Orientador: Prof. Dr. Fausto Bastos Líbano**

**PORTO ALEGRE  
2015**

**ALESSANDRO GIRARDI**

**COMPORTAMENTO TÉRMICO DE CAPACITORES ELETROLÍTICOS DE  
ALUMÍNIO PARA APLICAÇÕES AUTOMOTIVAS**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi analisado e julgado adequado para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

---

**Prof. Dr. Fausto Bastos Líbano**

---

**Prof. Dr. Ály Flores Ferreira Filho**

**Aprovado em: \_\_\_ / \_\_\_ / \_\_\_\_\_**

**BANCA EXAMINADORA:**

**Prof. Dr. Fausto Bastos Líbano – UFRGS** \_\_\_\_\_

**Prof. Dr. Jeferson Vieira Flores – UFRGS** \_\_\_\_\_

**Prof. Dr. Valner João Brusamarello – UFRGS** \_\_\_\_\_

**PORTO ALEGRE**

**2015**

## **AGRADECIMENTOS**

À minha mãe, cujo apoio foi essencial durante toda a minha vida, proporcionando suporte para a concretização desta tão importante conquista.

À empresa EPCOS dos Brasil LTDA, pela disponibilidade de materiais e equipamentos para a realização dos estudos deste trabalho.

Ao Engenheiro Moisés Coster, pela ideia inicial do tema deste trabalho e por todos os conhecimentos fornecidos.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Fausto Bastos Líbano, pelo acompanhamento e aconselhamento ao longo do trabalho.

## RESUMO

Esse trabalho apresenta o estudo do comportamento térmico de capacitores eletrolíticos de alumínio que se destinam às aplicações automotivas embarcadas com base nos requisitos da indústria automotiva. A utilização dos sistemas eletrônicos no setor automotivo é crescente e, substitui sistemas hidráulicos e mecânicos convencionais em alguns casos. Assim, as exigências para os módulos eletrônicos e, conseqüentemente, para seus componentes, têm aumentado, tanto nos requisitos de altas correntes de ondulação, quanto para temperaturas de operação de 125 °C ou até 150 °C. Alguns módulos eletrônicos podem ser operados em situações ambientais extremas e têm seu maior pico de carga justamente nesta condição. Um modelo térmico simplificado foi proposto com o objetivo de analisar o comportamento da temperatura de operação do capacitor. Foram realizadas medições de temperatura no núcleo, na caneca e no ambiente próximo ao capacitor em teste. Foi determinado o circuito térmico equivalente, com parâmetros de resistência térmica e capacitância térmica em capacitores de diferentes dimensões. A determinação dos parâmetros térmicos foi realizada a partir da analogia com parâmetros elétricos como: potência elétrica, resistência elétrica e capacitância elétrica. Utilizou-se um simulador de circuitos elétricos para determinar as temperaturas do capacitor eletrolítico analisado em função da corrente de ondulação aplicada. Nos testes realizados, os erros entre valores medidos e simulados foram de no máximo 4 %, os maiores erros ocorreram porque o modelo proposto não considera o atraso entre o aquecimento do núcleo e da caneca. Observou-se que quanto maior a massa do capacitor, maior o atraso. Os valores em regime permanente tiveram erros menores, de 0,5 %. Para um mesmo capacitor analisado, foram encontrados diferentes parâmetros quando a temperatura ambiente foi variada de 25 °C para 125 °C, o que mostra que cada modelo pode ser considerado válido quando o aquecimento é de até 30°C em relação à temperatura ambiente. A partir dos modelos obtidos é possível aplicar um perfil de corrente e determinar o comportamento do aquecimento e resfriamento do capacitor ao longo do tempo.

Palavras-chave: Capacitores eletrolíticos de alumínio. Comportamento térmico. Aplicação automotiva.

## ABSTRACT

This paper presents the study of the thermal behavior of aluminum electrolytic capacitors that are intended for embedded automotive applications based on the requirements of the automotive industry. With the increasing use of automotive electronics systems, in some cases replacing conventional hydraulic and mechanical systems, the requirements for electronic modules and consequently to its components, have increased, the requirements have increased for high ripple current capability as well for operating temperatures of 125 °C or even 150 °C. Some modules can be operated in extreme environmental situations and has its greatest peak load precisely on this condition. In order to analyze the behavior of the operating temperature of the capacitor, it was proposed a simplified thermal model. Temperature measurements were performed in the core, in the can and in the environment next to the capacitor under test. It was determined the equivalent thermal circuit, with thermal resistance and thermal capacitance parameters from different capacitors sizes. The determination of thermal parameters was performed from the analogy with electrical parameters as electrical power, electrical resistance and electrical capacitance. Simulations were carried out with an electric circuit simulator to determine the capacitor temperatures as a function of applied ripple current. The errors between measured and simulated values were no more than 4 %. The largest errors occur because the model does not consider the delay between heating the core and the can, the greater the mass of the capacitor, the greater the delay. The simulated values in steady state condition have errors lower than 0.5%. For the same analyzed capacitor, different parameters were found when the temperature was changed from 25 °C to 125 °C, which shows that each model may be considered valid when the heating is up to 30 °C compared to the ambient temperature. From the obtained models is possible to apply a ripple current profile and determine the heating and cooling behavior of the capacitor over time.

Keywords: Aluminum electrolytic capacitors. Thermal behavior. Automotive application.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Número de ECU's em mercados desenvolvidos .....	12
Figura 2 - Sistemas eletrônicos embarcados .....	13
Figura 3 - Construção básica de um capacitor eletrolítico de alumínio .....	16
Figura 4 - Circuito equivalente simplificado de um capacitor eletrolítico .....	17
Figura 5 - Parâmetros térmicos do capacitor.....	18
Figura 6 – Circuito para o modelo térmico considerado para o capacitor.....	19
Figura 7 - Exemplo de aplicação .....	24
Figura 8 - Conversor tipo Boost.....	26
Figura 9 - Exemplo de perfil de corrente .....	31
Figura 10 – Analogia da resistência no domínio elétrico e térmico .....	34
Figura 11 - Circuito equivalente elétrico .....	38
Figura 12 - Circuito montado para teste .....	39
Figura 13 - Diagrama do circuito de teste.....	39
Figura 14 - Forma de onda da corrente.....	40
Figura 15 - Tensão sobre cada capacitor .....	41
Figura 16 - Capacitores com termopar no núcleo .....	41
Figura 17 - Termopar colocado na caneca do capacitor .....	41
Figura 18 - Capacitor com segundo isolante para fixar o termopar na caneca .....	42
Figura 19 - Capacitor com os dois termopares.....	42
Figura 20 - Capacitor de teste instalado no circuito .....	43
Figura 21 - Circuito de teste na estufa.....	43
Figura 22 - Imagem das temperaturas com termovisor (12,5 x 25 mm) .....	45
Figura 23 - Circuito obtido a partir do modelo térmico (12,5 x 25 mm).....	47
Figura 24 - Comparação entre as medidas e a simulação (12,5 x 25 mm) .....	47
Figura 25 - Erro da Temperatura de Núcleo (12,5 x 25 mm).....	48
Figura 26 - Erro na Temperatura de Caneca (12,5 x 25 mm).....	48
Figura 27 - Circuito obtido na simulação estendida (12,5 x 25 mm).....	49
Figura 28 - Comparação entre medidas e simulação estendida (12,5 x 25 mm) .....	49
Figura 29 - Imagem das temperaturas com termovisor (16 x 25 mm).....	50
Figura 30 - Circuito obtido a partir do modelo térmico (16 x 25 mm) .....	52
Figura 31 - Comparação entre as medidas e a simulação (16 x 25 mm).....	52
Figura 32 - Erro da Temperatura de Núcleo (16 x 25 mm) .....	53

Figura 33 - Erro da Temperatura de Caneca (16 x 25 mm) .....	53
Figura 34 - Imagem das temperaturas com termovisor (18 x 35 mm).....	54
Figura 35 - Circuito obtido a partir do modelo térmico (18 x 35 mm) .....	56
Figura 36 - Comparação entre as medidas e a simulação (18 x 35 mm).....	56
Figura 37 - Erro da Temperatura de Núcleo (18 x 35 mm) .....	57
Figura 38 - Erro da Temperatura de Caneca (18 x 35 mm) .....	57
Figura 39 - Imagem das temperaturas com termovisor (18 x 35 mm)(125 °C).....	58
Figura 40 - Circuito obtido a partir do modelo térmico (18 x 35 mm)(125 °C) .....	60
Figura 41 - Comparação entre as medidas e a simulação (18 x 35 mm)(125 °C).....	60
Figura 42 - Erro da Temperatura do Núcleo (18 x 35 mm)(125 °C).....	61
Figura 43 - Erro da Temperatura de Caneca (18 x 35 mm)(125 °C) .....	61
Figura 44 - Imagem das temperaturas com termovisor (18 x 40 mm).....	62
Figura 45 - Circuito obtido a partir do modelo térmico (18 x 40 mm) .....	64
Figura 46 - Comparação entre as medidas e a simulação (18 x 40 mm).....	64
Figura 47 - Erro da Temperatura do Núcleo (18 x 40 mm) .....	65
Figura 48 - Erro da Temperatura da Caneca (18 x 40 mm) .....	65
Figura 49 - Circuito obtido na simulação estendida (18 x 40 mm) .....	66
Figura 50 - Comparação entre medidas e simulação estendida (18 x 40 mm) .....	66
Figura 51 - Erro da Temperatura de Núcleo (18 x 40 mm) .....	67
Figura 52 - Erro da Temperatura de Caneca (18 x 40 mm) .....	67
Figura 54 - Perfil de corrente arbitrário.....	70
Figura 55 - Comportamento da temperatura .....	70
Figura 53 - Sistema de energia fotovoltaica .....	71

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Carga elétrica estimada em 2005.....	12
Tabela 2 - Faixa de temperatura para componentes passivos.....	28
Tabela 3 - Referências para Capacitores Eletrolíticos de Alumínio.....	29
Tabela 4 - Relação entre domínio elétrico e térmico .....	35
Tabela 5 - Equivalência de componentes elétricos .....	35
Tabela 6 - Valores medidos (12,5 x 25 mm).....	45
Tabela 7 - Valores medidos (16 x 25 mm) .....	50
Tabela 8 - Valores medidos (18 x 35 mm) .....	54
Tabela 9 - Valores medidos (18 x 35 mm)(125 °C) .....	58
Tabela 10 - Valores medidos (18 x 40 mm) .....	62
Tabela 11 - Síntese dos parâmetros térmicos obtidos .....	68
Tabela 12 – Parâmetros 18 x 35 mm em diferentes temperaturas.....	69

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>CAPACITORES ELETROLÍTICOS DE ALUMÍNIO</b>	<b>16</b>
<b>3</b>	<b>APLICAÇÕES DOS MÓDULOS ELETRÔNICOS AUTOMOTIVOS</b>	<b>20</b>
3.1	SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA – EDS	20
3.2	<i>POWERTRAIN</i>	20
3.3	SEGURANÇA	21
3.4	CONFORTO E CONVENIÊNCIA	22
3.5	INFORMAÇÃO E ENTRETENIMENTO	23
3.6	TELEMÁTICA	23
3.7	SISTEMA DE NAVEGAÇÃO	23
3.8	SISTEMAS <i>X-BY-WIRE</i>	24
3.9	APLICAÇÃO CRÍTICA PARA O CAPACITOR	25
<b>4</b>	<b>NORMAS E REQUISITOS ESPECÍFICOS</b>	<b>27</b>
4.1	AEC-Q200	27
4.2	REQUISITOS ESPECÍFICOS	31
<b>5</b>	<b>MODELAGEM TÉRMICA</b>	<b>32</b>
5.1	DEFINIÇÕES FÍSICAS	32
5.2	ANALOGIA ENTRE CIRCUITO TÉRMICO E ELÉTRICO	34
<b>6</b>	<b>TESTES E SIMULAÇÕES</b>	<b>39</b>
6.1	CAPACITOR DE DIMENSÃO $\phi = 12,5 \times L = 25 \text{ mm}$	45
6.2	CAPACITOR DE DIMENSÃO $\phi = 16 \times L = 25 \text{ mm}$	50
6.3	CAPACITOR DE DIMENSÃO $\phi = 18 \times L = 35 \text{ mm}$	54
6.3.1	Ensaio em 25 °C	54
6.3.2	Ensaio em 125 °C	58
6.4	CAPACITOR DE DIMENSÃO $\phi = 18 \times L = 40 \text{ mm}$	62
6.5	SÍNTESE DOS RESULTADOS	68
<b>7</b>	<b>OUTRAS APLICAÇÕES PARA UTILIZAÇÃO DO MODELO TÉRMICO</b>	<b>71</b>
<b>8</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>72</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>74</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os capacitores eletrolíticos de alumínio foram incorporados à indústria automotiva desde o momento em que a eletrônica começou a fazer parte dos sistemas e subsistemas dos automóveis. Hoje, com as crescentes demandas por eficiência, funcionalidades e diminuição do espaço físico ocupado, o estudo do comportamento térmico, durante a operação dos capacitores, se torna um fator determinante para a escolha correta do componente, bem como para garantir qualidade, segurança e vida útil dos módulos eletrônicos automotivos.

No século XVIII, ocasião em que surgiram os primeiros protótipos do automóvel, até a era dos carros modernos dos últimos 10 anos, a busca por desempenho, segurança e conforto foi constantemente almejada. A fim de se atingir o aperfeiçoamento contínuo, novas tecnologias foram aplicadas em sistemas internos, que embora ocultos aos usuários, foram trazidas ao alcance dos motoristas e passageiros na forma de informações e facilidades no uso dos veículos. A grande evolução tecnológica na indústria automotiva, bem como a evolução da informática e das comunicações, teve seu maior impacto ao longo dos últimos 15 anos. Um dos principais pilares da evolução no setor automotivo foi a utilização de dispositivos eletroeletrônicos com diferentes funcionalidades para o automóvel.

Um dos primeiros dispositivos eletrônicos que foi introduzido nos automóveis teve como objetivo o controle da emissão de gases proveniente da queima de combustíveis pelos motores. Desde então, os dispositivos eletrônicos foram incorporados rapidamente e hoje são utilizados por padrão em todos os veículos modernos, com impacto em todos os subsistemas automotivos. (RIBBENS, 2002)

Nos anos 70 dois eventos impulsionaram o início do uso de sistemas eletrônicos em automóveis:

- As regulamentações governamentais para emissão de gases poluentes e economia de combustível;
- O desenvolvimento da eletrônica digital de estado sólido com custos relativamente baixos;

Para a melhoria na emissão de gases e redução no consumo de combustível era necessário um melhor controle para o motor. Este controle também dependia da evolução da eletrônica. Assim, o surgimento da preocupação com o meio ambiente e

a crescente necessidade de economia, resultaram no uso de dispositivos eletrônicos no interior dos sistemas automotivos. (RIBBENS, 2002)

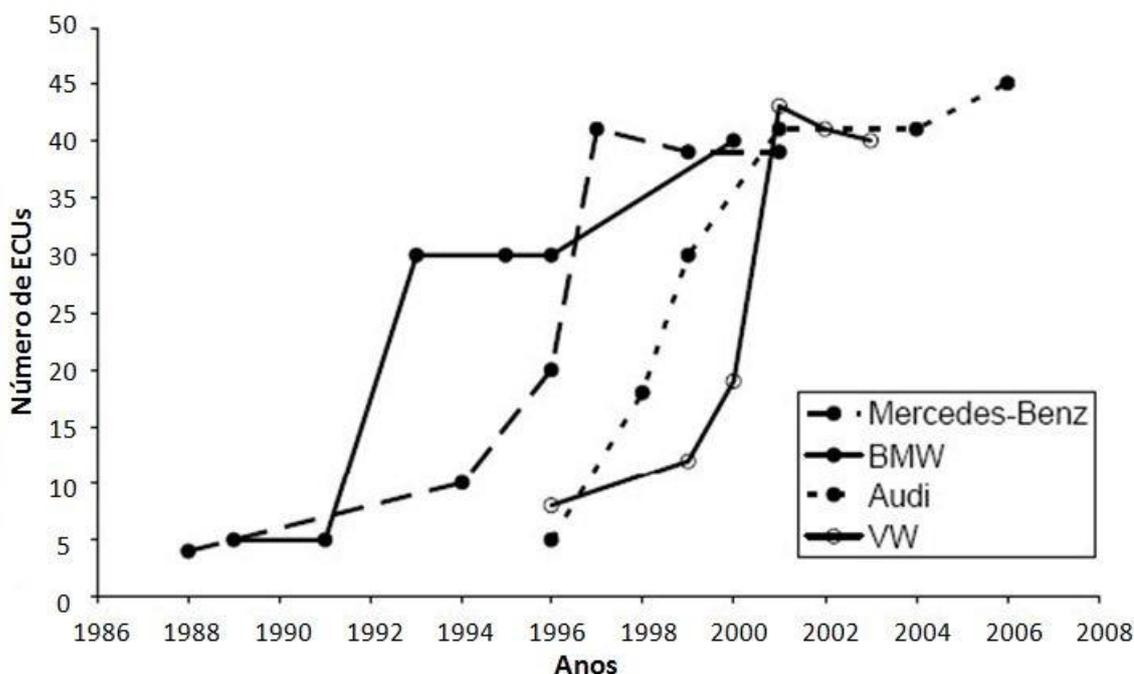
Como consequência das regulamentações, nos anos 80 entraram no mercado os módulos eletrônicos veiculares, chamados de ECU's (do inglês: *Electronic Control Units*). Estes módulos faziam o processamento dos sinais enviados por sensores de temperatura, pressão, rotação ou diversos outros sensores que monitoram parâmetros importantes para o funcionamento preciso do motor e com base no processamento das informações dos sensores, eram enviados sinais de saída para que os atuadores tivessem a ação necessária no processo controlado e com isso o funcionamento adequado fosse alcançado. Para operar no controle do motor, o módulo de controle do motor, ou ECM (do inglês: *Engine Control Module*), fazia a atuação nas funções de partida, injeção de ar e combustível, rotação de marcha lenta, substituindo inclusive o carburador. (POGGETTO, 2009)

Com os avanços nos sistemas embarcados dos veículos, a interface com o usuário também sofreu alterações. Os painéis passaram a ter informações digitais mostradas em displays de LCD (do inglês: *Liquid Crystal Display*) e também agregaram mais funcionalidades.

Como os dispositivos eletrônicos são rápidos e fáceis de controlar, aceitam variações em sua configuração de parâmetros sem a necessidade de remover partes físicas do veículo, fornecem boa precisão e possuem um desempenho superior aos sistemas hidráulicos e mecânicos convencionais, os módulos logo tiveram a sua aplicação estendida a outros diferentes sistemas em função da crescente demanda por segurança, conforto, tecnologia e redução do impacto ambiental. A Figura 1 mostra a evolução da utilização de ECU's ao longo dos anos por algumas empresas do setor automotivo em mercados desenvolvidos.

Como pode ser visto na Figura 1, o maior crescimento na utilização dos módulos eletrônicos se deu ao longo dos anos 90, sendo primeiramente implantados por empresas que historicamente desenvolvem seu produto destinado ao público consumidor de maior poder aquisitivo e com maiores demandas por tecnologia, conforto e desempenho. No ano 2000 a utilização dos módulos eletrônicos já estava em torno de 40 unidades por veículo.

Figura 1 - Número de ECU's em mercados desenvolvidos



Fonte: (POGGETTO, 2009)

Com o aumento da utilização de ECU's substituindo ou auxiliando no funcionamento de sistemas mecânicos, a carga elétrica dos veículos teve um aumento considerável. A Tabela 1 mostra a potência elétrica consumida em automóveis de topo de linha em 2005. A carga elétrica total estimada era entorno de  $2\text{ kW}$ , com tendência de aumento para  $5\text{ kW}$  nos anos seguintes. Para veículos elétricos a estimativa é de uma carga total de  $40\text{ kW}$ . Para suportar estes aumentos de carga, estão sendo utilizados sistemas de  $42\text{ V}$  ao invés de sistemas  $12\text{ V}$  que exigiriam altos níveis de corrente. (POGGETTO, 2009) (CORTEZ *et al.*, 2015)

Tabela 1 - Carga elétrica estimada em 2005

Sistema	Pico de carga (W)	Carga média (W)
Válvulas eletromecânicas	2400	800
Bomba d'água	300	300
Ventilador de refrigeração do motor	800	300
Direção elétrica	1000	100
Para-brisa aquecido	2500	200
Conversor catalítico pré-aquecido	3000	60
Suspensão ativa	12000	360
Computação embarcada, navegação		100
<b>Média Total</b>		<b>2200</b>

Fonte: (POGGETTO, 2009)



rigoroso e estar com temperatura de  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  e deve conseguir entrar em operação ao ser acionado, da mesma forma que um carro pode ter viajado por horas em um sol escaldante e ter a temperatura interna no compartimento do motor em torno de  $125\text{ }^{\circ}\text{C}$  e mesmo assim deve manter seu funcionamento. A faixa de temperatura de operação para a indústria automotiva é considerada de  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  até  $125\text{ }^{\circ}\text{C}$ , sendo que alguns pontos específicos podem atingir temperaturas maiores.

Um carro exposto ao sol pode chegar facilmente a uma temperatura de  $60^{\circ}\text{C}$  no interior da cabine. Se um carro parado e com motor desligado pode chegar a esta temperatura, quando o motor está em operação, a temperatura no compartimento do motor é muito maior. Como vários módulos eletrônicos veiculares são instalados próximos ao motor ou as vezes até mesmo fixados na mesma carcaça metálica, a temperatura máxima suportada pelos componentes eletrônicos precisa ser compatível com a temperatura no local da sua aplicação.

Além da temperatura ambiente que os componentes eletrônicos precisam suportar, no caso específico do capacitor eletrolítico de alumínio, existem situações de operação que podem estar fora da especificação de catálogo do componente, principalmente no que se refere a corrente máxima de ondulação. Algumas aplicações podem necessitar correntes que ultrapassam a máxima corrente especificada para o componente em determinados períodos de tempo. Mesmo que por curtos períodos, o uso de correntes acima das especificadas podem danificar permanentemente um capacitor, mas por outro lado, o capacitor pode suportar estas correntes sem ser danificado. Para estes casos, a indústria automotiva especifica perfis de corrente de ondulação que devem ser suportados pelo capacitor, com base nos piores casos que podem ocorrer durante o funcionamento do módulo eletrônico onde o capacitor é instalado.

Um dos principais fatores que deve ser considerado quando um capacitor eletrolítico de alumínio opera por determinados períodos de tempo com corrente acima da especificada é o efeito causado por esta sobre corrente, que se manifesta na forma de aquecimento do componente. Como o aquecimento é proporcional a corrente, quanto maior for a corrente, maior será o aquecimento. Mas este capacitor, de um ponto de vista simples, é construído por uma massa de alumínio, internamente, com suas folhas bobinadas e externamente, com sua caneca. O calor gerado nas folhas internas leva um tempo até ser transferido para a caneca externa

e, além disso, existem perdas na transferência do calor de dentro para fora do capacitor, o que gera diferentes valores de temperatura entre núcleo e caneca.

Como a sobre corrente suportada por um capacitor é dependente do calor gerado internamente, do tempo de aplicação da sobre corrente e da transferência do calor do núcleo para a caneca, este trabalho tem o objetivo de desenvolver um modelo térmico simplificado para estudar o comportamento da temperatura no núcleo e na caneca de um capacitor eletrolítico de alumínio, para que este modelo possa ser utilizado quando um perfil de corrente de ondulação é aplicado.

O modelo térmico será baseado em resistências e capacitâncias térmicas, uma analogia com resistências e capacitâncias elétricas, assim a simulação do comportamento da temperatura poderá ser feito com um simulador de circuitos elétricos, onde a tensão nos nós do circuito representarão temperaturas. Com o modelo de cada capacitor, é esperado ter a possibilidade de realizar simulações do circuito e avaliar se durante os ciclos do perfil de corrente a temperatura terá um comportamento estável ou aumentará de maneira a levar o capacitor ao colapso, porque durante os ciclos do perfil, o tempo para que a temperatura volte ao patamar inicial pode não ser suficiente e isso pode ocasionar um escalonamento térmico.

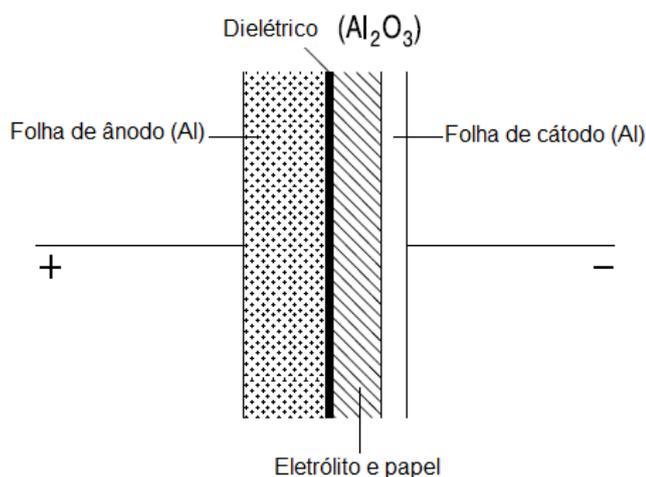
Na seção seguinte será feita uma breve abordagem da construção do capacitor eletrolítico de alumínio, o circuito equivalente com as imperfeições consideradas e uma primeira abordagem de como pode ser considerado o modelo térmico. Depois serão discutidas algumas aplicações automotivas mais comuns e quais exigem alto desempenho dos capacitores. Na outra seção serão abordadas as normas que são exigidas pela indústria automotiva e as exigências que vão além das normas e que são específicas dos fabricantes dos módulos e das aplicações. Após, será realizada a fundamentação teórica para o modelo, com considerações físicas e a analogia do circuito elétrico com o circuito térmico. Na seção seguinte será feita a modelagem considerada para cada caso, cálculos, ensaios e simulações do modelo obtido. Na sequência será feita uma breve discussão de outras aplicações para o modelo térmico de capacitores e sua importância. Na última seção serão mostradas as conclusões da realização do trabalho e qual pode ser a sequência para uma ampliação do estudo realizado.

## 2 CAPACITORES ELETROLÍTICOS DE ALUMÍNIO

A vantagem dos capacitores eletrolíticos de alumínio que levou a sua ampla gama de aplicações é a sua eficiência volumétrica (isto é, capacitância por unidade de volume), e o fato de que capacitores eletrolíticos de alumínio fornecem uma alta capacidade de corrente de ondulação (conhecida do inglês como *ripple current*). (EPCOS AG 2014, 2014)

Um capacitor eletrolítico de alumínio é construído por duas camadas de materiais eletricamente condutores que são separadas por uma camada dielétrica. Um eletrodo (o ânodo) é formado por uma folha de alumínio com uma superfície ampliada por processos de cauterização. A camada de óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) é formada sobre a folha e usada como dielétrico. Contrastando com outros capacitores, o contra-eletrodo (o cátodo) dos capacitores eletrolíticos de alumínio é um líquido condutivo, o eletrólito operacional. Uma segunda folha de alumínio, a chamada folha de cátodo serve como uma grande área de contato para a passagem de corrente para o eletrólito operacional. A Figura 3 mostra como é a construção básica de um capacitor. (EPCOS AG 2014, 2014)

**Figura 3 - Construção básica de um capacitor eletrolítico de alumínio**

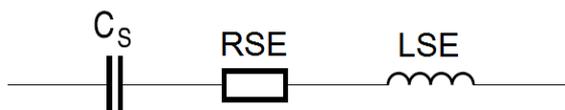


**Fonte: (EPCOS AG 2014, 2014)**

Na Figura 4 é mostrado o diagrama simplificado do circuito equivalente de um capacitor eletrolítico de alumínio, onde  $C_s$  corresponde a capacitância série equivalente, que é o parâmetro mais significativo para o componente e que está relacionado com a grandeza capacitância elétrica, em função de sua área, distância entre materiais condutores e constante dielétrica equivalente entre os metais.

Como o capacitor eletrolítico de alumínio é enrolado em forma de bobina, este enrolamento de metais aparece representado como uma indutância série equivalente, ou LSE. As imperfeições do contato entre terminais e folhas de alumínio, condutividade do eletrólito impregnado no papel e a espessura do óxido de alumínio, aparecem representadas como a RSE, ou, resistência série equivalente.

**Figura 4 - Circuito equivalente simplificado de um capacitor eletrolítico**



**Fonte: (EPCOS AG 2014, 2014)**

Existem capacitores eletrolíticos de alumínio para tensões baixas na ordem de 25 V e tensões altas na ordem de 450 V, existem capacitores que suportam altas correntes de ondulação, capacitores com baixa impedância em alta frequência, capacitores com baixos valores de RSE, capacitores na ordem de 1  $\mu F$  até 1 F. Assim, para cada tipo de aplicação, são exigidos diferentes requisitos para um capacitor. Um capacitor de construção do tipo radial, para tensões entorno de 450 V costuma ter valores de  $RSE_{120\text{ Hz}}$ , medido em temperatura ambiente (23 °C), na ordem de 2  $\Omega$ , já capacitores para tensões entorno de 25 V desenvolvidos para ter baixo valor de RSE podem ter valores entorno de 15 m $\Omega$ . Um capacitor ideal seria aquele onde a Resistência Série Equivalente tivesse valor nulo, ou seja, sem perdas. Mas, por menores que sejam, as perdas sempre estarão presentes e isso fará com que ao existir uma circulação de corrente, o capacitor tenha uma potência dissipada e aqueça.

Quando um capacitor está polarizado e faz a função de filtro de ondulação, as oscilações de tensão geram uma corrente de ondulação. Esta corrente de ondulação produz aquecimento no capacitor. A potência dissipada pelo capacitor em função da corrente de ondulação aplicada pode ser calculada a partir da Equação (1).

$$P = I_{RMS}^2 RSE \quad (1)$$

Onde,

$P$  – Potência, em Watt [W];

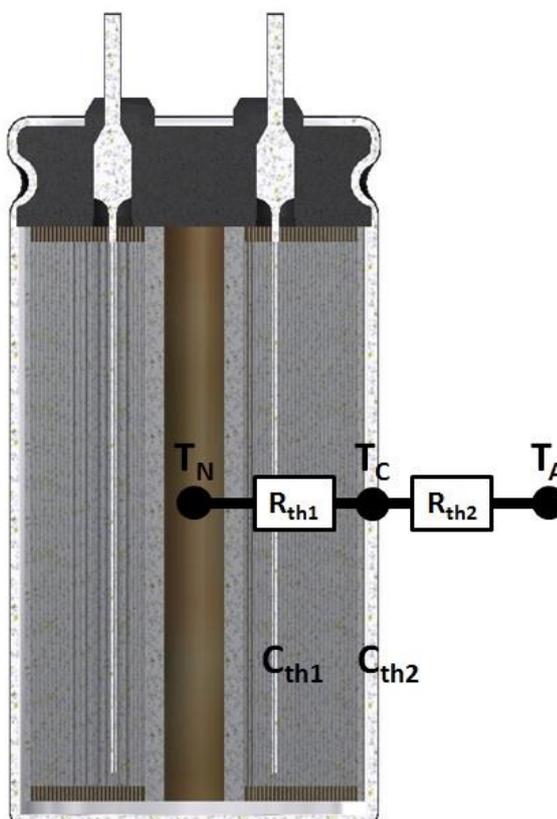
$I_{RMS}$  – Corrente eficaz ou RMS (do inglês, *Root Mean Square*), em Ampere [A];

$RSE$  – Resistência Série Equivalente, em ohm [ $\Omega$ ].

O calor gerado em função da corrente de ondulação na bobina do capacitor é transferido para todo o interior e também para a caneca externa, que também pode ser de alumínio, assim como as folhas internas. Desta maneira, existe uma transferência de calor entre o interior do capacitor e a caneca e entre a caneca e o ambiente. Dependendo se existe ou não contato entre a bobina interna do capacitor e a caneca, a transferência de calor acontecerá de maneiras diferentes, assim como as temperaturas entre núcleo e caneca terão comportamentos diferentes.

A Figura 5 apresenta os parâmetros térmicos considerados para o capacitor eletrolítico de alumínio de construção do tipo radial.

**Figura 5 - Parâmetros térmicos do capacitor**



$T_N$  – Temperatura Núcleo [°C];

$T_C$  – Temperatura Caneca [°C];

$T_A$  – Temperatura Ambiente [°C];

$R_{th1}$  – Resistência Térmica Núcleo-Caneca [°C/W];

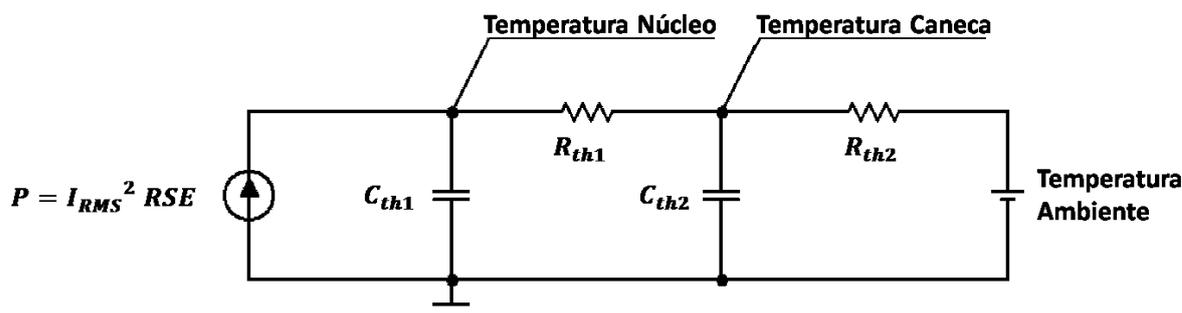
$R_{th2}$  – Resistência Térmica Caneca-Ambiente [°C/W];

$C_{th1}$  – Capacitância Térmica Núcleo [J/°C];

$C_{th2}$  – Capacitância Térmica Caneca [J/°C].

O comportamento das diferenças de temperatura pode ser interpretado como uma analogia a um circuito elétrico resistivo-capacitivo - RC. A dificuldade de condução de calor de um ponto a outro pode ser interpretado como uma Resistência Térmica, em analogia a Resistência Elétrica, onde as diferenças de temperatura corresponderiam às diferenças de tensão elétrica e o fluxo de calor corresponderia ao fluxo de corrente elétrica. O armazenamento de calor na massa de alumínio do núcleo e da caneca pode ser interpretado como uma Capacitância Térmica, em analogia a Capacitância Elétrica, onde o armazenamento de calor corresponderia ao armazenamento de cargas elétricas. A Figura 6 mostra como pode ser considerado o circuito elétrico análogo ao modelo térmico para a simulação das temperaturas de núcleo e caneca quando aplicada uma condição de corrente de ondulação, que pode ser constante ou ter um perfil de valores e intervalos de aplicação. O modelo apresentado foi obtido a partir de referências que serão citadas na seção 5.

**Figura 6 – Circuito para o modelo térmico considerado para o capacitor**



No circuito da Figura 6,  $R_{th1}$  e  $R_{th2}$  são as resistências térmicas e  $C_{th1}$  e  $C_{th2}$  são as capacitâncias térmicas. Uma fonte fixa de valor constante representa a temperatura ambiente do circuito simulado e a fonte de corrente tem seu valor dado em potência [W].

### 3 APLICAÇÕES DOS MÓDULOS ELETRÔNICOS AUTOMOTIVOS

Diante das inúmeras aplicações dos módulos eletrônicos veiculares, algumas delas conseguiram ser integradas somente ao longo dos últimos anos aos veículos comerciais mais populares. Apesar de o rádio automotivo ter sido o primeiro eletrônico a fazer parte da gama de eletrônicos de um automóvel, ele não é visto como um módulo eletrônico diretamente relacionado ao funcionamento do sistema automotivo. Algumas das aplicações mais relevantes serão apresentadas a seguir. (BOSCH, 2005) (POGGETTO, 2009)

#### 3.1 SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA – EDS

O EDS (do inglês: *Electrical Distribution System*) foi um sistema pioneiro no mundo automotivo e ainda é um sistema fundamental para a elétrica e eletrônica embarcada. Fazem parte deste sistema o alternador, bateria, fusíveis, relés, conectores, interfaces e chicotes elétricos que distribuem a energia para todos os sistemas e componentes elétricos.

Apesar de a tensão nominal dos sistemas ser em 13,5V, esta tensão pode oscilar entre 6V e 15V, dependendo das cargas consumidoras, temperatura ambiente, estado de carga e de uso da bateria. Portanto, todos os componentes desenvolvidos para este sistema devem estar preparados a trabalhar nesta mesma faixa de tensão.

#### 3.2 POWERTRAIN

*Powertrain* está relacionado com componentes de motores e transmissões. É um sistema que engloba as funções relacionadas ao motor, câmbio e diferencial. Primeiro e mais difundido sistema veicular, faz a leitura e controla parâmetros físicos como temperatura, pressão, velocidade através de sensores e atuadores, tendo seu processamento feito pelo Módulo de Controle do Motor - ECM (do inglês: *Engine Control Module*) aumentando o desempenho do motor, reduzindo também os níveis de consumo e de emissões de gases.

Os principais subsistemas gerenciados pelo ECM são a ignição, o controle da mistura ar-combustível, a injeção, o arrefecimento do motor e de escapamento, além da supervisão dos subsistemas de lubrificação. Também são gerenciadas as emissões, turbo e sobre alimentação, demais sistemas de carga mecânica, como ar-

condicionado e de diagnóstico, incluindo Diagnóstico On-Board – OBD (do inglês: *On-Board Diagnostics*).

Uma evolução neste sistema é o controle eletromecânico de válvulas. Com o sistema eletromecânico, o tempo de abertura das válvulas passa a ser uma variável controlável através do ECM, otimizando assim, seu funcionamento de acordo com a rotação do motor, torque, temperatura, e seu comportamento durante a partida a frio entre outros, também incluindo o controle de válvulas como parte do sistema de controle de emissões.

### 3.3 SEGURANÇA

São sistemas com o objetivo de proporcionar segurança e bem estar tanto dos ocupantes do veículo, dos pedestres e demais pessoas que estejam próximas a ele. Os sistemas de segurança são subdivididos em ativos, quando a intenção é evitar acidentes, e passivos, quando a intenção é minimizar os efeitos do acidente iminente.

#### **Sistemas passivos:**

- *Airbag*: Sistema em que bolsas são infladas imediatamente (cerca de 30ms) após uma colisão, protegendo os ocupantes do veículo, podem ter um ou mais estágios de acionamento.
- Detecção de ocupantes – ODS (do inglês: *Occupant Detection System*): atuando juntamente com o *Airbag*, este sistema detecta a presença de um adulto ou criança no banco de passageiros, acionando adequadamente o *Airbag*.
- Monitoramento de pressão dos pneus – TPMS (do inglês: *Tire Pressure Monitoring System*): monitora a pressão dos pneus através de sensores nas rodas, que se comunicam com o módulo de controle via radiofrequência, alertando o motorista quando a pressão atingem um valor abaixo do especificado.
- Verificação de proximidade: espécie de radar que identifica a proximidade de obstáculos do veículo, útil principalmente em manobras de estacionamento.

#### **Sistemas ativos:**

- Sistema de freio antitravamento – ABS (do inglês: *Antilock Braking System*): evita o travamento das rodas através do monitoramento

constante da velocidade em cada roda. Quando alguma delas tem velocidade próxima à zero, a pressão do fluido de freio é modulada de forma a manter a roda no limiar do travamento, possibilitando assim frenagens em menor espaço e aumentando a dirigibilidade do veículo.

- Assistente de frenagem de emergência - EBA (do inglês: *Emergency Brake Assistance*): similar ao ABS, o sistema detecta a intensidade com a qual o pedal do freio foi acionado e a velocidade em que o veículo se encontra, antecipando a frenagem aplicando pressão extra aos freios.
- Distribuição eletrônica dos freios - EBD (do inglês: *Electronic Brake Distribution*): também similar ao ABS, distribui a pressão dos freios aplicada a cada roda, aumentando a estabilidade e dirigibilidade do veículo.
- Frenagem eletro hidráulica - EHB (do inglês: *Electro Hydraulic Braking*): sistema autônomo de freios que, mesmo sem a intervenção do motorista, aplica os freios em cada roda com o intuito de aumentar a estabilidade do veículo;
- Frenagem eletro mecânica - EMB (*Electro Mechanical Braking*): evolução do EHB, o EMB possui sistema não tolerante a falhas, contando com sistemas redundantes de alimentação e sem a utilização do sistema de pressão do fluido de freio;
- Sistema de controle de tração - TCS e Regulagem antiescorregamento - ASR (do inglês: *Traction Control System* e *Anti Slip Regulation*): o ASR evita o excesso de tração nas rodas nas acelerações, evitando assim a perda de aderência. Já o TCS, atuando juntamente como ABS e ASR, evita também a perda de aderência dos pneus;
- Programa eletrônico de estabilidade - ESP (do inglês: *Electronic Stability Program*): evita a perda de aderência que causa as saídas laterais em curvas, através da análise do ângulo da direção e aceleração das rodas, corrigindo a trajetória do veículo.

### 3.4 CONFORTO E CONVENIÊNCIA

Os principais sistemas relacionados à automação de funções da carroceria dos automóveis são:

- Módulo de iluminação: controle de intensidade de iluminação de acordo com as preferências do usuário e condições do ambiente;
- Ar condicionado eletrônico: aumentam o conforto interno, além de diminuir o consumo de combustível e aumentar sua eficiência. Pode ter ajuste individual de temperatura para cada ocupante.

### 3.5 INFORMAÇÃO E ENTRETENIMENTO

- Painel de instrumentos: ao longo da evolução veicular, ganhou importância, integrando um maior número de funções, podendo atuar até como um gerenciador das diversas redes de comunicação existentes em um veículo.
- Sistema de áudio: além do aumento de sua robustez, hoje os sistemas de áudio interagem com diversas fontes de dados, e não somente de rádio, tanto analógico como digital, como tocadores de CD e memórias externas (cartões de memória, unidades de armazenamento entre outros), celulares e comandos de voz, lendo arquivos em diversos formatos, além de sistemas de informações como Sistema de dados por rádio - RDS (do inglês: *Radio Data System*) ou Canal de mensagens de tráfego - TMC (do inglês: *Traffic Message Channel*), que oferecem informações adicionais para auxílio ao motorista.
- Sistema de vídeo: associados aos sistemas de áudio, o sistema de vídeo oferece aos ocupantes do veículo os recursos de TV, DVD e outros recursos de vídeo e imagens em diversos formatos.

### 3.6 TELEMÁTICA

Este sistema troca informações em tempo real entre o veículo e uma base externa sobre dados de diagnóstico do veículo, informando a criticidade de alguma falha existente e qual o local mais próximo para fazer o reparo ou acionar o resgate em caso de pane ou acidente. Normalmente utilizam o sistema de telefonia celular para esta comunicação e Sistema de Posicionamento Global - GPS (do inglês: *Global Position System*) para localização do veículo.

### 3.7 SISTEMA DE NAVEGAÇÃO

Muito similar ao sistema de telemática (ao qual trabalha em conjunto), este sistema oferece o posicionamento do veículo através de um receptor GPS e sua

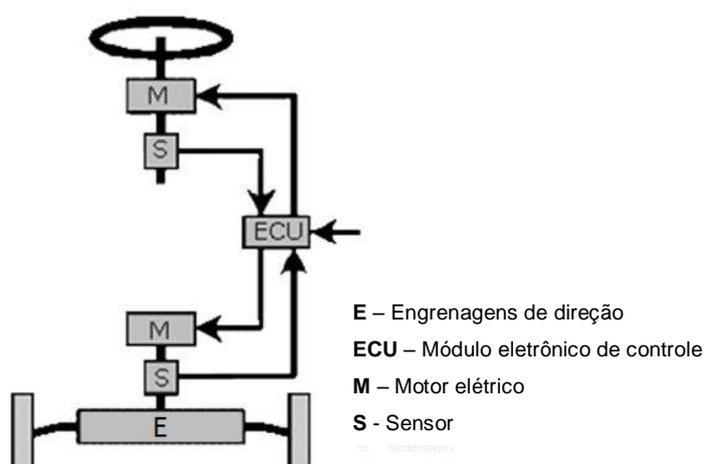
localização através de arquivos de mapas digitais - GDF (do inglês: *Geografic Data Files*), o que permite a navegação propriamente dita, isto é, a determinação de rotas, caminhos alternativos e o acesso a diversas outras informações pertinentes como pontos de interesse (postos de serviço, restaurantes, pontos turísticos, centros comerciais etc.), horários de funcionamento de estabelecimentos e transporte alternativo (ônibus e trens).

### 3.8 SISTEMAS X-BY-WIRE

Embora o conceito não seja novo, que por definição é todo e qualquer sistema acionado eletricamente via fios ou cabos, como uma simples buzina, por exemplo, sua aplicação tem se sofisticado a cada dia. Um exemplo pode ser visto na Figura 7. Atualmente, sistemas considerados *x-by-wire* são aqueles que substituem tradicionais sistemas de acionamento mecânico, hidráulico ou pneumático, como sistemas de suspensão, direção e freios, por sistemas elétricos dinamicamente configuráveis, autodiagnosticáveis e de fácil adaptação em diferentes plataformas veiculares.

Além de eliminar bombas, correias, colunas de direção e seus nocivos fluídos, oferecem maior precisão de acionamento e confiabilidade superior aos sistemas tradicionais, tornando os veículos mais leves, seguros e econômicos. A Figura 7 mostra um exemplo de sistema deste tipo.

**Figura 7 - Exemplo de aplicação**



**Fonte: (POGGETTO, 2009)**

Estes sistemas são bastante utilizados atualmente, em aplicações de injeção eletrônica de combustível, acelerador eletrônico ou turbo-carregador elétrico (*gas-by-wire*), sistemas automáticos de partida e parada (do inglês: *start-stop*), freio

regenerativo e torque (*power-by-wire*), diversos sistemas de automação de caixas de câmbio (*shift-by-wire*), ABS, TCS, EBD, EHB e ESP (*brake-by-wire*), sistema de direção (*steer-by-wire*) e sistemas de ajuste de suspensão (*suspension-by-wire*).

### 3.9 APLICAÇÃO CRÍTICA PARA O CAPACITOR

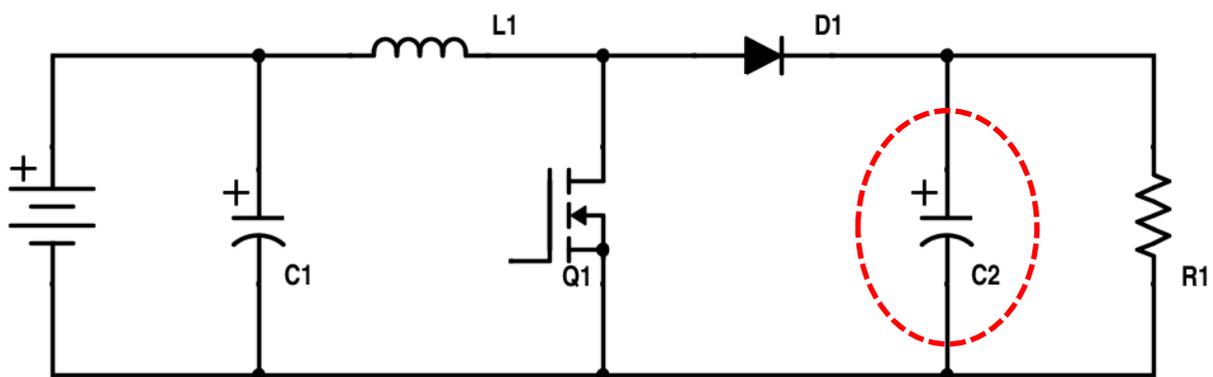
Algumas aplicações se destacam quanto ao desempenho exigido pelos capacitores eletrolíticos de alumínio. O módulo da direção elétrica – EPS (do inglês: *Electric Power Steering*), módulo do controle do arrefecimento do motor – FCU (do inglês: *Fan Control Unit*) e o módulo de controle de transmissão – TCU (do inglês: *Transmission Control Unit*), são sistemas que podem ser submetidos a elevadas temperaturas de operação e possuem altos picos de carga. O módulo de controle da transmissão possui altos picos de corrente, mas no geral, não opera continuamente fazendo a transmissão de marchas, já o módulo da direção elétrica e o módulo do controle de arrefecimento do motor, são os que possuem seus picos de carga justamente quando a temperatura ambiente pode ser a mais elevada possível.

O sistema da direção elétrica é bastante exigido em manobras de estacionamento, quando geralmente o veículo está quase parado e a direção é girada várias vezes até o carro ser estacionado. Existem módulos que são instalados na coluna de descida da direção e outros módulos que são instalados na barra de direção. Nas duas situações a temperatura ambiente pode ser elevada, mas o pior caso é quando o módulo está mais próximo às rodas do veículo.

O módulo de controle da refrigeração do motor também entra em operação quando a temperatura do motor está elevada e quando o veículo está com velocidade baixa, momento em que precisa entrar em funcionamento a ventilação forçada para diminuir a temperatura do motor. Outro fator que deixa a aplicação mais crítica é o local de instalação do módulo, que é acomodado nas proximidades do motor e algumas vezes sobre o mesmo bloco do motor.

As aplicações geralmente utilizam conversores CC-CC do tipo Boost em seus circuitos de potências. A construção básica de um conversor Boost é mostrada na Figura 8, onde o capacitor (ou banco de capacitores) C2 é o capacitor que mais é exigido, por estar ligado diretamente à carga (R1).

Figura 8 - Conversor tipo Boost



## 4 NORMAS E REQUISITOS ESPECÍFICOS

### 4.1 AEC-Q200

Com a crescente utilização dos módulos eletrônicos veiculares, começaram a surgir demandas específicas para a qualificação dos componentes eletrônicos. Em 1993 funcionários das empresas Ford, General Motors e Chrysler compartilharam experiências sobre as dificuldades de qualificação dos componentes eletrônicos para aplicações automotivas e fundaram o AEC (*Automotive Electronics Council*) ou Conselho de Eletrônica Automotiva. Dessa forma, originalmente o AEC foi estabelecido pela Chrysler, Ford e GM com o propósito de estabelecer padrões para a qualificação de componentes e padrões para a qualidade dos sistemas. O AEC consiste de dois comitês, o Comitê de Sistemas da Qualidade e o Comitê Técnico de Componentes. Os comitês são compostos por representantes de empresas que fornecem sistemas para a indústria automotiva como, Autoliv, Continental, Delphi, Magna, TRW, Valeo e outras. (AUTOMOTIVE ELECTRONICS COUNCIL )

O Comitê Técnico de Componentes é o organismo responsável por estabelecer normas para componentes eletrônicos confiáveis e de qualidade. Os componentes eletrônicos que atendem as especificações estão aptos a serem utilizados pela indústria automotiva nas condições ambientais mais severas sem adicionais testes de qualificação. (AUTOMOTIVE ELECTRONICS COUNCIL ).

Com o objetivo de auxiliar fabricantes e compradores de componentes eletrônicos e fornecer um conjunto de normas e padrões aceitos internacionalmente para a qualificação dos componentes, o Comitê Técnico de Componentes criou a AEC-Q200: Teste de estresse para qualificação de componentes passivos. A AEC-Q200 tem como referência outras normas e procedimentos como:

- **MIL-STD** (*United States Military Standard by USA Department of Defense*) Padrões Militares Americanos utilizados pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos;
- **JIS** (*Japanese Industrial Standard by Japanese Standards Association*) Padrões Industriais Japoneses desenvolvidos pela Associação de Padrões Japoneses;
- **EIA** (*Engineering Standards and Publications*) Padrões de Engenharia e Publicações;

- **JEDEC** (*Solid State Technology Association*) Associação para Tecnologia de Estado Sólido;
- **J-STD** (*Joint Industry Standard*) Conjunto de Padrões Industriais;
- **UL** (*Underwriters Laboratories Inc.*) Organização dos Estados Unidos que faz a certificação de produtos;
- **ISO** (*International Organization for Standardization*) Organização Internacional para Padronização;
- **IEC** (*International Electrotechnical Commission*) Comissão Eletrotécnica Internacional;
- **iNEMI** (*International Electronics Manufacturing Initiative*) Iniciativa Internacional de fabricação de produtos eletrônicos.

As especificações da AEC-Q200 definem os requisitos mínimos de estresse para ensaios de qualificação dos dispositivos eletrônicos passivos. A faixa mínima de temperatura requerida para cada tipo de componente passivo é mostrada na Tabela 2.

**Tabela 2 - Faixa de temperatura para componentes passivos**

Grau	Temperatura		Tipo do componente	Exemplo de aplicação
	Mínima	Máxima		
0	-50 °C	+150 °C	Resistores cerâmicos planos e Capacitores cerâmicos X8R	Todos automotivos
1	-40 °C	+125 °C	Resistores, Indutores, Transformadores, Termistores, Circuitos Ressonantes, Cristais e Varistores	Sob o capô
2	-40 °C	+105 °C	Capacitores Eletrolíticos de Alumínio	Pontos quentes no compartimento de passageiros
3	-40 °C	+85 °C	Capacitores de Filme, Ferrites, Redes R-C, Capacitor Variável	Compartimento de passageiros
4	0 °C	+70 °C		Não automotivo

Fonte: (AUTOMOTIVE ELECTRONICS COUNCIL, 2010)

Para um componente passivo ser considerado qualificado de acordo com o Conselho de Eletrônica Automotiva, é necessário que todos os testes mínimos de

estresse sejam realizados de acordo com as especificações da AEC-Q200, obedecendo a critérios de aprovação.

Para cada tipo de teste existe a recomendação do número mínimo de peças e lotes que devem ser submetidos à aprovação. Para todas as amostras, devem ser feitas medições elétricas antes e depois de cada teste.

**Tabela 3 - Referências para Capacitores Eletrolíticos de Alumínio**

Tipo de Estresse	Referência	Requisitos Adicionais
Armazenamento em alta temperatura	MIL-STD-202 Método 108	1000 horas à temperatura nominal (por exemplo, 85°C, 105°C ou 125°C) sem tensão aplicada. Medição 24±4 horas após conclusão do teste.
Ciclagem térmica	JESD22 Método JA-104	1000 ciclos (-40°C para 105°C, 85°C ou 125°C, conforme temperatura nominal). Medição 24±4 horas após conclusão do teste. Tempo de permanência máximo de 30 minutos em cada extremo de temperatura. 1 minuto de tempo máximo de transição.
Calor úmido	MIL-STD-202 Método 103	1000 horas à temperatura de 85°C e 85% de umidade relativa. Medição 24±4 horas após conclusão do teste.
Vida operacional	MIL-STD-202 Método 108	1000 horas @105°C. Se 85°C ou 125°C a peça deve ser submetida a esta temperatura. Tensão nominal aplicada. Medição 24±4 horas após conclusão do teste.
Visual externo	MIL-STD-883 Método 2009	Inspeção da construção, marcação e acabamento. Teste elétrico não necessário.
Dimensão física	JESD22 Método JB-100	Verificação das dimensões físicas de acordo com a especificação do dispositivo. Especificação do usuário e do fabricante. Teste elétrico não necessário.
Robustez dos terminais	MIL-STD-202 Método 211	Teste da integridade dos terminais. Condições: A(454g), C(227g), E(1,45 kg-mm)
Resistência a solventes	MIL-STD-202 Método 215	Lavagem química com solventes, incluindo químicos aquosos.

Continua...

Conclusão...

Tipo de Estresse	Referência	Requisitos Adicionais
Choque mecânico	MIL-STD-202 Método 213	Figura 1 do método 213. Condição C
Vibração	MIL-STD-202 Método 204	5 G por 20 minutos 12 ciclos cada eixo. Utilizando placa de circuito impresso. Teste entre 10 – 2000 Hz.
Resistência ao calor da solda	MIL-STD-202 Método 210	Condição B sem pré-aquecimento das amostras. Solda onda simples. Procedimento 1 com solda de 1,5 mm dentro do corpo do dispositivo e 0,75mm para SMD.
Descarga eletrostática	AEC-Q200-002 ou ISSO/DIS 10605	- -
Soldabilidade	J-STD-002	Tanto para terminais longos quanto para SMD. Teste elétrico não necessário. Ampliação 50 x. Condições: Terminais longos: Método A @ 235°C, categoria 3. SMD: a) Método B, 4 horas @ 155°C calor seco @ 235°C. b) Método B @ 215°C categoria 3. c) Método D categoria 3 @ 260°C.
Caracterização elétrica	De acordo com especificação	Teste dos parâmetros por lote e tamanho de amostra requeridos, sumário com valores mínimos, médios, máximos e desvio padrão. Temperaturas mínimas e máximas de funcionamento.
Flamabilidade	UL-94	V-0 ou V-1 aceitáveis. Aplicados a componentes com resina.
Robustez dos terminais SMD	AEC-Q200-006	- -
Sobre tensão	JIS-C-5101-1	De acordo com a JIS-C-5101-1

Fonte: (AUTOMOTIVE ELECTRONICS COUNCIL, 2010)

## 4.2 REQUISITOS ESPECÍFICOS

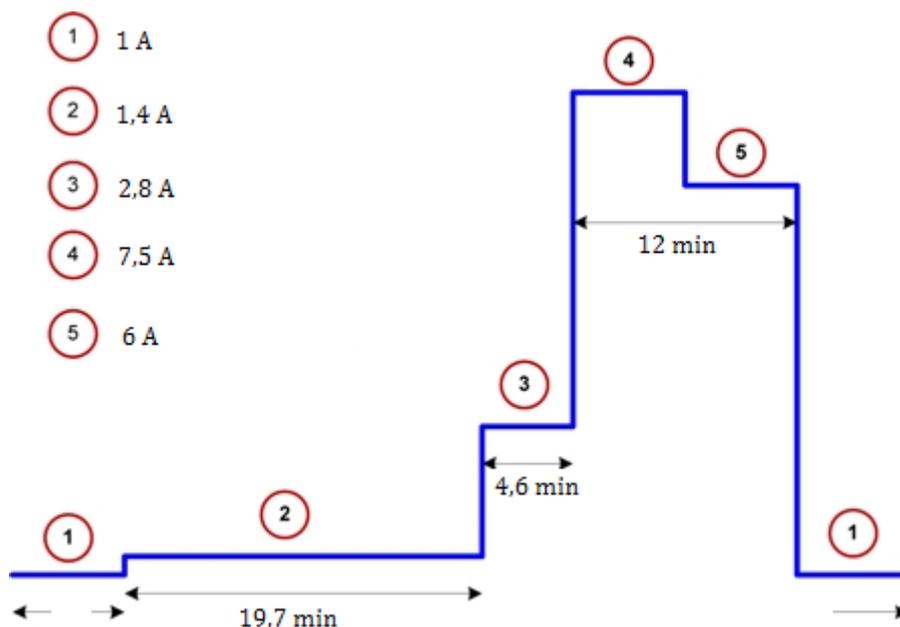
Embora exista uma norma específica para a qualificação de componentes eletrônicos passivos para aplicações automotivas, muitas vezes a norma não consegue atender aos requisitos de algumas aplicações mais críticas ou que necessitam de condições especiais de ensaio.

Como qualquer outro projeto eletrônico, os módulos eletrônicos veiculares possuem condições extremas de funcionamento e é de interesse dos fabricantes que todos os componentes utilizados possam atender a pior condição possível e com uma margem de segurança adequada. Com base nesta necessidade, o capacitor eletrolítico de alumínio precisa atender satisfatoriamente a pior condição de operação exigida pela aplicação a qual será destinado e também precisa atender adequadamente aos requisitos de projeto que estão sendo executado pelo fabricante.

Surgem então, os requisitos específicos, que são perfis de corrente de ondulação ou temperatura, e as vezes corrente e temperatura ao mesmo tempo, aos quais os capacitores eletrolíticos de alumínio devem ser submetidos e ao final dos testes, devem atender à alguns critérios de aprovação.

A Figura 9 mostra um exemplo hipotético de como poderia ser um perfil de corrente exigido por algum módulo eletrônico automotivo para o capacitor.

Figura 9 - Exemplo de perfil de corrente



Fonte: (<http://m.eet.com>, 2015)

## 5 MODELAGEM TÉRMICA

### 5.1 DEFINIÇÕES FÍSICAS

Para iniciar as definições importantes no estudo do comportamento térmico dos capacitores eletrolíticos de alumínio, o primeiro conceito importante a ser definido é o calor, que segundo a Física, “Calor ( $Q$ ) é a energia transferida de um sistema para o ambiente ou vice-versa em virtude de uma diferença de temperatura. O calor pode ser medido em Joules ( $J$ )...” (HALLIDAY; RESNICK, 2009, p. 205).

Ao se tratar da absorção de calor por sólidos e líquidos, a capacidade térmica é outro conceito importante e deve ser definido, de maneira que, “A capacidade térmica  $C$  de um objeto é a constante de proporcionalidade entre o calor  $Q$  recebido ou cedido por um objeto e a variação de temperatura  $\Delta T$  do objeto...” (HALLIDAY; RESNICK, 2009, p. 191). A capacidade térmica se relaciona com o calor conforme mostrado na Equação (2).

$$Q = C (T_f - T_i) = C \Delta T, \quad (2)$$

Onde,

$Q$  – Calor, em Joules [J];

$C$  – Capacidade térmica do objeto [J/ °C];

$T_f$  – Temperatura final do objeto [°C];

$T_i$  – Temperatura inicial do objeto [°C].

Como objetos construídos do mesmo material tem capacidades térmicas proporcionais a suas massas, “é conveniente definir uma “capacidade térmica por unidade de massa”, ou calor específico  $c$ , que se refere não a um objeto, mas a uma massa unitária do material de que é feito o objeto.” (HALLIDAY; RESNICK, 2009, p. 191). O calor específico  $c$  se relaciona com o calor da maneira apresentada na Equação (3).

$$Q = c m (T_f - T_i) = c m \Delta T, \quad (3)$$

Onde,

$Q$  – Calor, em Joules [J];

$c$  – Calor específico por unidade de massa [J/kg·°C];

$m$  – Massa do objeto [kg];

$T_f$  – Temperatura final do objeto [°C];

$T_i$  – Temperatura inicial do objeto [°C].

O calor específico do Alumínio à temperatura ambiente é de  $c = 900 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ , onde  $K$  é a temperatura em Kelvin. (HALLIDAY; RESNICK, 2009, p. 191), Tabela 18-3. Como é de interesse utilizar a temperatura em  $^{\circ}\text{C}$ , o calor específico do Alumínio será considerado como  $c = 900 \text{ J/kg} \cdot ^{\circ}\text{C}$ .

Além de estabelecer os conceitos de calor, capacidade térmica e calor específico, também é preciso definir de que maneira pode existir a transferência de calor. Existem três mecanismos de transferência de calor: condução, convecção e radiação. Para o estudo do capacitor eletrolítico de alumínio, a transferência considerada será a condução térmica, principalmente por envolver o Alumínio que é um metal condutor de calor.

Na energia transferida por condução, os elétrons e átomos vibram intensamente. As vibrações, e a energia associada, são transferidas através de colisões entre os átomos do metal. Dessa forma uma temperatura crescente se propaga de uma região em direção a outra.

Considerando uma placa de área  $A$  e espessura  $L$ , com as faces mantidas em temperaturas diferentes,  $Q$  é a energia transferida na forma de calor através da placa, da face quente para a face fria em um intervalo de tempo. A taxa de condução, ou seja, energia transferida por unidade de tempo é mostrada na Equação (4). (HALLIDAY; RESNICK, 2009, p. 200)

$$P_{cond} = \frac{Q}{t} = kA \frac{T_Q - T_F}{L} = q, \quad (4)$$

Onde,

$P_{cond}$  – Taxa de condução [J/s];

$Q$  – Calor, em Joules [J];

$t$  – Tempo, em segundos [s];

$k$  – Condutividade térmica [ $\text{W/m} \cdot ^{\circ}\text{C}$ ];

$A$  – Área de uma placa [ $\text{m}^2$ ];

$L$  – Espessura de uma placa [m];

$T_Q$  – Temperatura da fonte quente [ $^{\circ}\text{C}$ ];

$T_F$  – Temperatura da fonte fria [ $^{\circ}\text{C}$ ];

$q$  – Transferência de calor por unidade de tempo [W].

O Alumínio é considerado um bom condutor e sua condutividade térmica é  $k = 235 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ , mas o Cobre e a Prata são condutores melhores com valores de  $k \approx 400 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ . (HALLIDAY; RESNICK, 2009, p. 200), Tabela 18-6.

Com a definição de bons condutores e maus condutores de calor, surge o conceito de resistência térmica específica  $R$ , que foi introduzido na engenharia, mas que possui uma definição dada pela Física com base em uma placa de espessura  $L$ , definida conforme a Equação (5). (HALLIDAY; RESNICK, 2009, p. 200)

$$R = \frac{L}{k}, \quad (5)$$

Onde,

$R$  – Resistência térmica específica [ $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ ];

$L$  – Espessura de uma placa [m];

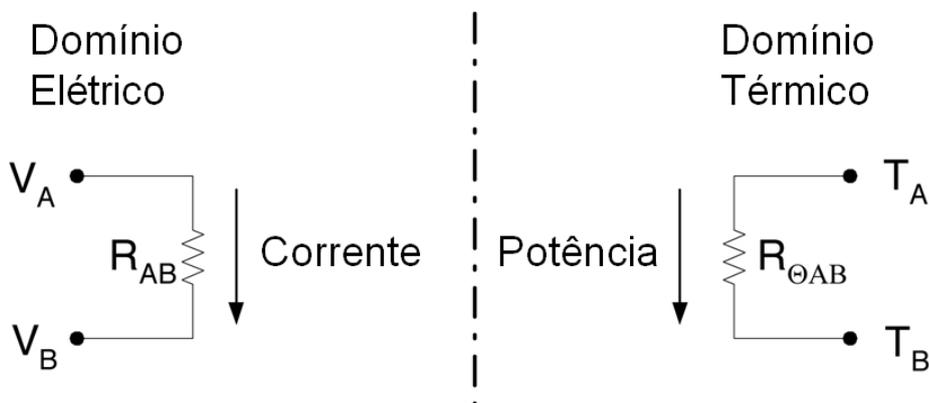
$k$  – Condutividade térmica [ $\text{W}/\text{m} \cdot ^\circ\text{C}$ ].

A resistência térmica específica possui unidade de [ $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ ] no SI – Sistema Internacional de Unidades, por estar relacionada a um material específico de condutividade térmica  $k$  e espessura  $L$  de uma placa deste material. Para não ocorrer confusão com a resistência térmica  $R_{\text{th}}$  que está relacionada com as diferenças de temperatura e potência elétrica, aqui a resistência térmica definida pela Física foi tratada como resistência térmica específica.

## 5.2 ANALOGIA ENTRE CIRCUITO TÉRMICO E ELÉTRICO

O comportamento transitório e em regime permanente da transferência de calor se assemelha ao comportamento transitório e em regime permanente de um circuito elétrico composto por uma fonte, um resistor e um capacitor. A Figura 10 mostra a analogia entre o domínio elétrico com o resistor, tensões e correntes e o domínio térmico com resistência térmica, temperaturas e potência.

**Figura 10 – Analogia da resistência no domínio elétrico e térmico**



Fonte: (FREESCALE SEMICONDUCTOR, INC., 2008)

A Tabela 4 mostra a relação das variáveis consideradas no domínio térmico e quais são as correspondentes variáveis no domínio elétrico e suas respectivas unidades de medida. Também a tabela faz a relação dos elementos de dissipação e armazenamento e suas respectivas unidades de medida.

**Tabela 4 - Relação entre domínio elétrico e térmico**

	<b>Domínio Térmico</b>	<b>Domínio Elétrico</b>
Variável de fluxo	Taxa de transferência de calor, $q$ [Watts]	Corrente, $i$ [Amperes]
Variável referência	Temperatura, $T$ [°C]	Tensão, $v$ [Volts]
Elemento de dissipação	Resistência térmica, $R_{th}$ [°C/Watt]	Resistência elétrica, $R_{el}$ [ohms]
Elemento de armazenamento	Capacitância térmica $C_{th}$ [J/°C]	Capacitância térmica, $C_{el}$ [Farads]

Fonte: (SWIFT; MOLINSKI; LEHN, 2001)

A Tabela 5 mostra a equivalência entre os componentes elétricos e quais são os parâmetros térmicos relacionados. Além dos parâmetros citados na Tabela 5, a tensão de nó é um parâmetro importante, pois está relacionada com a temperatura no ponto considerado.

**Tabela 5 - Equivalência de componentes elétricos**

Componente elétrico		Parâmetro térmico
Fonte de corrente	↔	Potência dissipada
Resistência elétrica	↔	Resistência térmica
Capacitância elétrica	↔	Capacitância térmica
Fonte de tensão fixa	↔	Temperatura ambiente

A potência dissipada  $P_D$  na parte interna do capacitor é representada por uma fonte de corrente na simulação elétrica. A fonte de corrente tem o valor nominal da potência dissipada. A Equação (6) mostra como é feito o cálculo da potência

dissipada pelo capacitor em função da corrente aplicada e do parâmetro elétrico RSE.

$$P_D = I^2 RSE, \quad (6)$$

Onde,

$P_D$  – Potência elétrica dissipada pelo capacitor [W];

$I$  – Valor real da corrente elétrica alternada aplicada no capacitor [A];

$RSE$  – Resistência série equivalente do capacitor, na temperatura e frequência de referência [ $\Omega$ ].

As resistências térmicas são representadas por resistores ôhmicos. A resistência total equivalente é essencialmente uma associação série de resistências para a temperatura ambiente. As resistências elétricas e térmicas tem o mesmo valor nominal, mas unidades de medida associadas a sua interpretação física. A Equação (7) mostra a soma dos valores das resistências para compor a resistência total equivalente.

$$R_{th\ TOTAL} = R_{thN} + R_{thA} = R_{thN-A} \quad (7)$$

Onde,

$R_{th\ TOTAL}$  – Resistência térmica total entre núcleo e ambiente [ $\Omega$ ];

$R_{thN}$  – Resistência térmica do núcleo [ $\Omega$ ];

$R_{thA}$  – Resistência térmica do ambiente [ $\Omega$ ].

A Lei de Ohm Elétrica é mostrada na Equação (8).

$$V = R I, \quad (8)$$

Onde,

$V$  – Tensão em Volts [V];

$R$  – Resistência em Ohms [ $\Omega$ ];

$I$  – Corrente em Amperes [A].

Como a corrente térmica tem a relação  $P_D = \frac{Q}{t}$ , analogamente, a Lei de Ohm Térmica é mostrada na Equação (9).

$$T_N - T_A = P_D (R_{thN} + R_{thA}), \quad (9)$$

Onde,

$(T_N - T_A)$  – Diferença de temperaturas [ $^{\circ}\text{C}$ ];

$P_D$  – Potência dissipada [W];

$(R_{thN} + R_{thA})$  – Resistência térmica série [ $^{\circ}\text{C/W}$ ].

A Lei de Ohm Térmica está de acordo com a equação de Fourier para a transferência de calor. (GROTE; ANTONSSON, 2008, p. 280)

A temperatura ambiente é representada por uma fonte de tensão fixa, de valor nominal  $T_A$ .

A constante de tempo térmica  $\tau_{th}$  é dada pela Equação (10). O valor de  $\tau_{th}$  corresponde ao tempo necessário para a temperatura chegar a 63% do valor final.

$$\tau_{th} = R_{th} C_{th} \quad (10)$$

A capacitância térmica é uma função do aumento de temperatura associado com uma dada quantidade de energia aplicada. A equação para capacitância térmica é mostrada na Equação (11).

$$C_{th} = q \frac{t}{\Delta T}, \quad (11)$$

Onde,

$C_{th}$  – Capacitância Térmica [J/°C];

$q$  – Transferência de calor por unidade de tempo [J/s]

$t$  – Tempo [s];

$\Delta T$  – Diferença entre temperatura final e inicial [°C].

Também, pela associação das Equações (2) e (3), a capacitância térmica pode ser dada em função da massa e calor específico do material, conforme apresentado na Equação (12).

$$Q = C \Delta T,$$

$$Q = c m \Delta T, \quad (12)$$

$$C_{th} = m c,$$

Onde,

$C_{th}$  – Capacitância Térmica [J/°C];

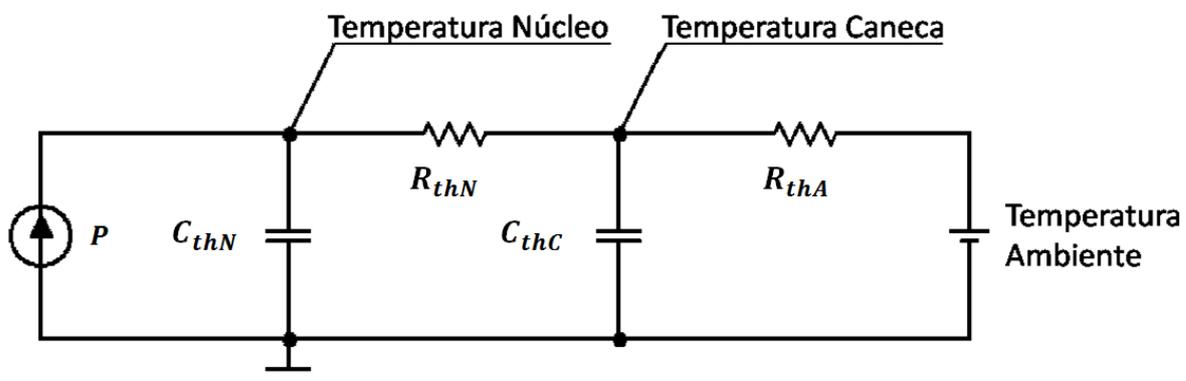
$c$  – Calor específico por unidade de massa [J/kg·°C];

$m$  – Massa do objeto [kg].

De posse de todos os parâmetros térmicos e elétricos relacionados com a analogia entre o circuito térmico e elétrico, é possível chegar ao circuito conforme representado na Figura 11, que pode ser simulado por um simulador de circuitos elétricos e com isso, os valores de tensão nos nós chamados de Temperatura

Núcleo e Temperatura Caneca, representam as respectivas temperaturas do núcleo a da caneca do capacitor eletrolítico de alumínio.

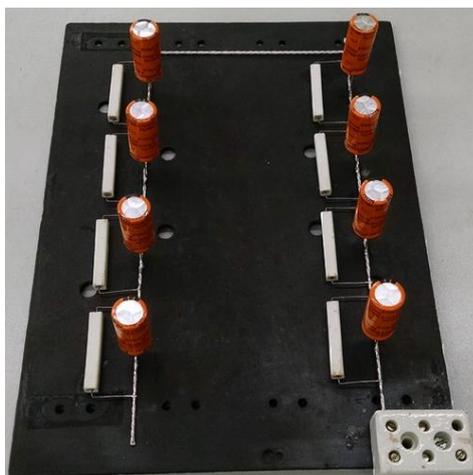
Figura 11 - Circuito equivalente elétrico



## 6 TESTES E SIMULAÇÕES

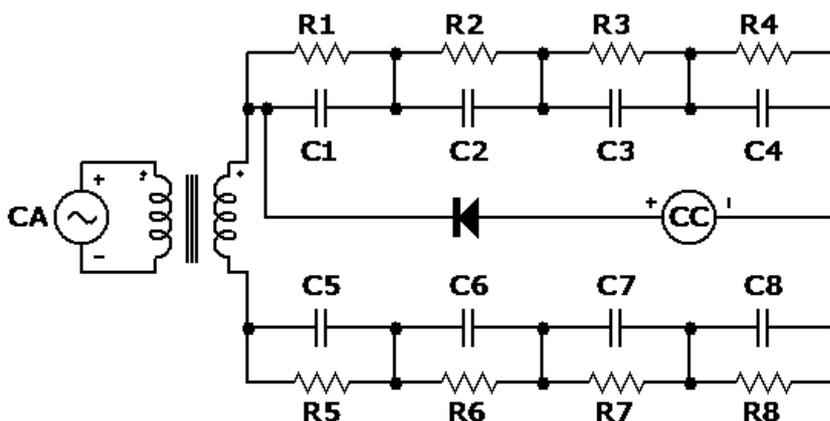
Para a realização das medições de temperatura, os capacitores foram montados em um circuito de teste, com a disposição dos componentes conforme mostra a Figura 12.

Figura 12 - Circuito montado para teste



A ligação do circuito é feita conforme o diagrama da Figura 13, onde os capacitores em teste são representados por C1, C2,..., C8. Cada capacitor possui um resistor em paralelo com o objetivo de equalizar a tensão de todos os capacitores. Os resistores possuem resistência elétrica muito maior do que a RSE dos capacitores e por isso não interferem na corrente de teste, que circula pelo ramo dos capacitores. A fonte de tensão contínua CC polariza diretamente os capacitores em um dos ramos do circuito e alimenta o outro ramo através da saída do transformador, que para corrente contínua representa apenas a resistência do fio do enrolamento. A fonte CC possui um diodo ligado em série para evitar que as oscilações de tensão retornem.

Figura 13 - Diagrama do circuito de teste

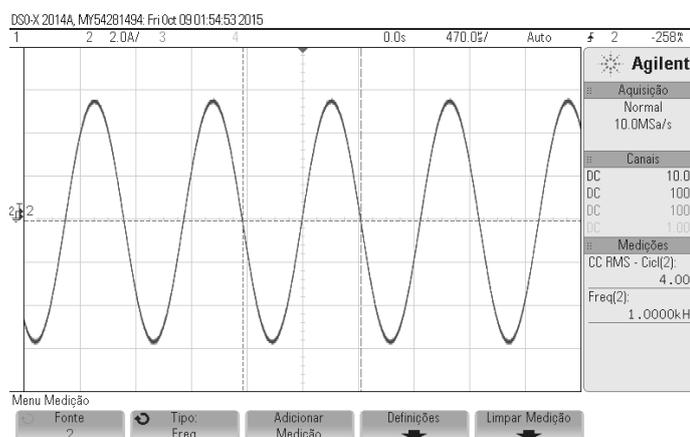


A corrente alternada que circula pelos capacitores é excitada através de um transformador, onde seu primário está conectado a uma fonte de corrente alternada CA e seu secundário está ligado entre os ramos positivos dos capacitores, fechando também o laço de polarização.

A fonte de tensão CC é ajustada para que todos os capacitores em série estejam polarizados com uma tensão próxima a tensão nominal. Para o caso de capacitores de tensão nominal de 25 V, a fonte CC é ajustada para aproximadamente 100 V.

A fonte de tensão CA possui a forma de onda senoidal, foi utilizada na frequência de 1 kHz e seu valor de tensão é ajustado conforme a corrente que se deseja alcançar no ramo dos capacitores. A Figura 14 mostra a forma de onda da corrente que circula pelos capacitores. A medição da corrente é feita através de um osciloscópio da marca Keysight, modelo DSO-X 2014A, utilizando uma ponteira da marca Tektronix, modelo A622, para medir corrente. O valor considerado para a corrente é o valor eficaz ou RMS (do inglês, *Root Mean Square*).

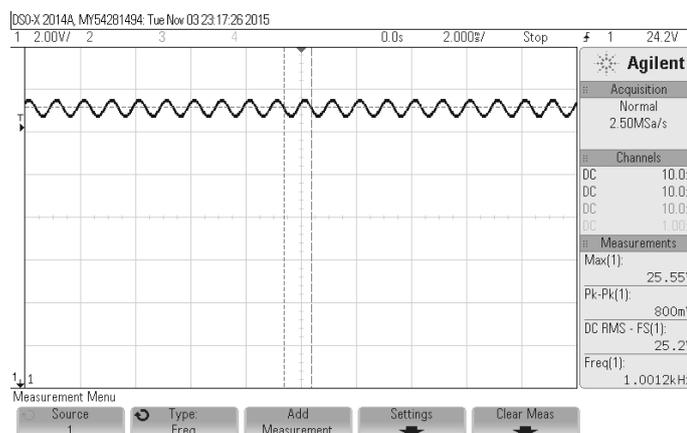
**Figura 14 - Forma de onda da corrente**



Dessa maneira, cada capacitor é polarizado com uma tensão contínua, onde sobre esta tensão existe uma ondulação de tensão na frequência de excitação da fonte CA. O valor da ondulação de tensão está relacionado com a corrente desejada e com a RSE do capacitor. A Figura 15 mostra a forma de onda da tensão sobre cada capacitor.

O circuito montado para o teste possui a configuração semelhante ao circuito utilizado por equipamentos comerciais como o Testador de Corrente de Ondulação 11801 (do inglês *Ripple Current Tester 11801*) da fabricante Chroma ATE Inc., porém o equipamento em questão não opera em frequência abaixo de 20 kHz.

**Figura 15 - Tensão sobre cada capacitor**



Foram escolhidos quatro capacitores de diferentes dimensões, com tipo de construção radial, para a realização dos ensaios. Os capacitores são mostrados na Figura 16. Um termopar tipo k foi inserido no núcleo de cada capacitor.

**Figura 16 - Capacitores com termopar no núcleo**



Outro termopar do tipo k foi colocado na caneca de alumínio do capacitor, conforme mostra a Figura 17. Para obter o contato direto do termopar com a caneca foi aberta uma fenda no isolante do capacitor.

**Figura 17 - Termopar colocado na caneca do capacitor**



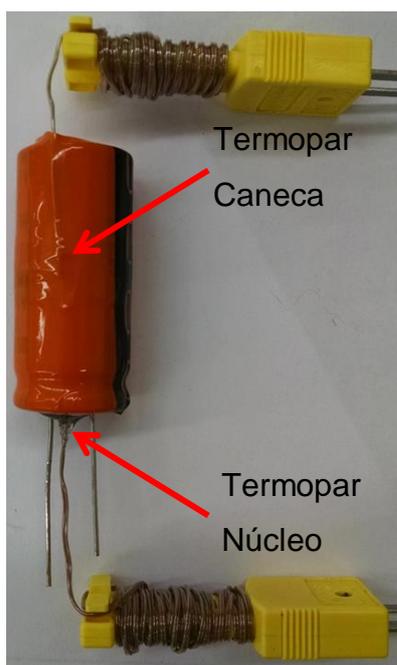
Para manter o termopar na posição desejada foi utilizado um segundo revestimento isolante no capacitor. O material isolante utilizado é termo retrátil e ao ser aquecido pressiona e mantém fixo o termopar contra a caneca do capacitor, como pode ser visto na Figura 18.

**Figura 18 - Capacitor com segundo isolante para fixar o termopar na caneca**



A Figura 19 mostra o capacitor com os dois termopares tipo k instalados. Os termopares do tipo k utilizados são da empresa Omega e seus limites de erro são de 2,2°C ou 0,75% da medida, o que tiver maior valor. Como o interesse das medidas é obter diferenças entre valores e sempre antes do início dos ensaios as temperaturas medidas estavam no mesmo nível, não foi realizado o estudo da incerteza da medida do termopar. A aquisição dos dados foi realizada a cada 30 segundos, com o registrador de temperatura da marca Omega, modelo RDXL4SD. A resolução máxima do registrador é de 0,1 °C e sua precisão é de  $\pm(0,4\% + 0,5^\circ\text{C})$ .

**Figura 19 - Capacitor com os dois termopares**



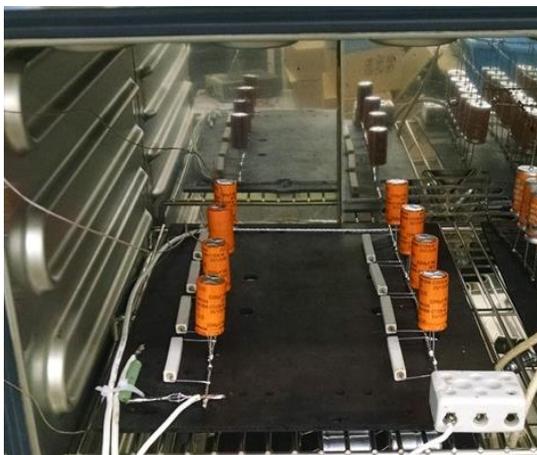
Cada ensaio foi realizado com oito capacitores idênticos, da mesma série, com mesma capacitância nominal e mesma tensão nominal. No circuito montado, em apenas um dos capacitores foram realizadas as medições de temperatura. A temperatura ambiente também foi medida com um termopar do tipo k instalado nas proximidades do capacitor avaliado. O capacitor de estudo instalado no circuito é mostrado na Figura 20. Os demais capacitores e resistores estão a uma distância que tendem a não influenciar no aquecimento do capacitor de interesse.

**Figura 20 - Capacitor de teste instalado no circuito**



Os testes foram realizados no interior de uma estufa, mas na maior parte do tempo a estufa permaneceu desligada, apenas servindo como um ambiente fechado sem circulação de ar. Um dos ensaios foi realizado na temperatura de 125°C, mas a circulação de ar da estufa, mesmo sendo limitada na menor velocidade possível, teve interferência no experimento. A Figura 21 mostra a placa de teste no interior da estufa.

**Figura 21 - Circuito de teste na estufa**



Os quatro diferentes capacitores testados são analisados nas seções 6.1, 6.2, 6.3 e 6.4. Em cada seção é mostrada a tabela de valores medidos, os cálculos dos parâmetros do modelo térmico, o circuito com os valores para simulação e o gráfico da simulação e valores medidos. Também é apresentado o gráfico do erro obtido entre a medição realizada e o modelo proposto.

Para cada ensaio foram registradas imagens utilizando o termovisor da marca Fluke modelo Ti10. As imagens obtidas com o termovisor não foram utilizadas com o objetivo de determinar a temperatura externa do capacitor, mas sim para ilustrar o aquecimento do capacitor em relação ao ambiente.

As medidas de RSE foram realizadas com uma ponte de medição da marca Agilent modelo 4284A. A variação da temperatura durante as medições foi feita na câmara climática da marca Vötsch modelo VTS7011-5. A Resistência Série Equivalente - RSE do capacitor varia com a temperatura. Foram realizadas algumas medições em temperatura, no entanto como existem diversas temperaturas medidas, para fins de cálculo, o valor da RSE foi determinado pelo ajuste da curva dos pontos medidos.

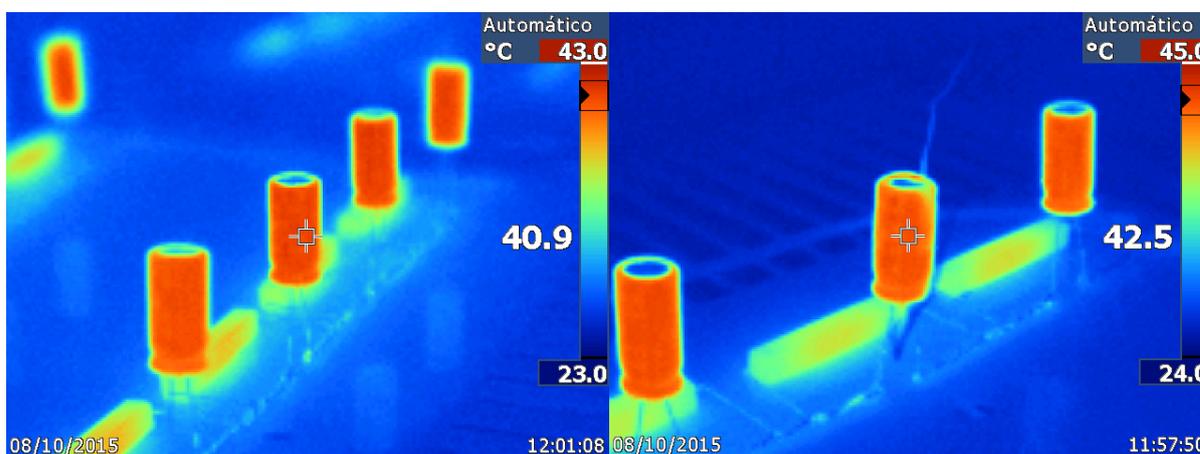
A massa da caneca de alumínio foi medida com uma balança analítica da marca Shimadzu modelo AUY220. Foram realizadas 100 medidas para cada tamanho de caneca e o valor utilizado nos cálculos corresponde a média das amostras medidas.

As simulações dos circuitos foram realizadas com o software Micro-Cap 10. Os gráficos das comparações entre valores medidos e simulados foram obtidos com o software MATLAB R2015a.

### 6.1 CAPACITOR DE DIMENSÃO $\phi = 12,5 \times L = 25 \text{ mm}$

O capacitor de dimensão  $12,5 \times 25 \text{ mm}$  é um capacitor que possui um diâmetro de  $12,5 \text{ mm}$  e um comprimento de  $25 \text{ mm}$ . A capacitância escolhida deste capacitor foi de  $680 \mu\text{F}$  e sua tensão nominal é de  $50 \text{ V}$ . O capacitor com os termopares foi ligado no circuito de teste juntamente com outros capacitores semelhantes. Durante o teste foram registradas temperaturas com um termovisor, conforme mostra a Figura 22.

Figura 22 - Imagem das temperaturas com termovisor ( $12,5 \times 25 \text{ mm}$ )



O teste foi realizado e os valores medidos são mostrados na Tabela 6. Esta tabela contempla apenas valores que foram obtidos com equipamentos de medição. A constante de tempo  $\tau_{th}$  é obtida a partir da resposta do sistema e o valor da  $RSE_{1kHz}$  para a temperatura específica é obtida da curva  $RSE \times Temp$ .

Tabela 6 - Valores medidos ( $12,5 \times 25 \text{ mm}$ )

Parâmetro	Valor	Unidade
$I_{1kHz}$ – corrente	2	A
$RSE_{1kHz}$ (23 °C)	44,9	$m\Omega$
$T_{N\ FINAL}$	37,7	°C
$T_{C\ FINAL}$	34,8	°C
$T_{A\ FINAL}$	25,8	°C
$T_{A\ INICIAL}$	24,8	°C
$m$ – massa da caneca	0,837	g

A partir dos valores da Tabela 6 podem ser obtidos os valores de  $P_D$ ,  $R_{th1}$ ,  $R_{th2}$  e  $C_{th2}$ . O valor de  $\tau_{th}$  é o único obtido a partir do comportamento temporal da temperatura no núcleo do capacitor.

Para  $P_D$ , o valor da  $RSE_{1kHz}$  foi obtido a partir do ajuste da curva que relaciona o valor da Resistência Série Equivalente em função da temperatura, neste caso  $RSE_{1kHz}(37,7\text{ °C}) = 40,7\text{ m}\Omega$ . O cálculo da  $P_D$  é mostrado na Equação (13).

$$P_D = I^2 RSE = (2)^2 0,0407 = 0,1628\text{ W} \quad (13)$$

A partir do valor da  $P_D$  é possível obter os valores das Resistências Térmicas. A resistência  $R_{th1}$  está relacionada com a diferença entre a temperatura de núcleo  $T_N$  e a temperatura de caneca  $T_C$ . O valor da  $R_{th1}$  é obtido na Equação (14).

$$R_{th1} = \frac{T_N - T_C}{P_D} = \frac{37,7 - 34,8}{0,1628} = 17,81 \frac{\text{°C}}{\text{W}}, \quad (14)$$

A resistência  $R_{th2}$  está relacionada com a diferença entre a temperatura de caneca  $T_C$  e a temperatura ambiente  $T_A$ . O valor da  $R_{th2}$  é obtido na Equação (15).

$$R_{th2} = \frac{T_C - T_A}{P_D} = \frac{34,8 - 25,8}{0,1628} = 55,28 \frac{\text{°C}}{\text{W}}, \quad (15)$$

A Resistência Térmica total  $R_{th}$  é a soma de  $R_{th1}$  com  $R_{th2}$  e também poderia ser obtida diretamente pela diferença entre a temperatura de núcleo  $T_N$  e a temperatura ambiente  $T_A$ . A Resistência Térmica total é calculada na Equação (16).

$$R_{th} = R_{th1} + R_{th2} = 73,09 \frac{\text{°C}}{\text{W}}, \quad (16)$$

A Capacitância Térmica total  $C_{th}$  é obtida a partir da constante de tempo  $\tau_{th}$  que está relacionada com a resposta da temperatura em função do tempo, neste caso  $\tau_{th} = 360\text{ s}$ . A Equação (17) determina a Capacitância Térmica total.

$$C_{th} = \frac{\tau_{th}}{R_{th}} = \frac{360}{73,09} = 4,925 \frac{\text{J}}{\text{°C}} \quad (17)$$

A capacitância  $C_{th2}$ , que é a Capacitância Térmica da caneca, é obtida em função da massa da caneca de alumínio  $m$  e do calor específico do Alumínio  $c$ . O cálculo da capacitância  $C_{th2}$  é mostrado na Equação (18).

$$C_{th2} = m c = 0,837 \cdot 0,9 = 0,7533 \frac{J}{^{\circ}C} \quad (18)$$

O valor de  $C_{th1}$  é obtido pela diferença entre a Capacitância Térmica total  $C_{th}$  e a Capacitância Térmica da caneca  $C_{th2}$ , como mostra a Equação (19).

$$C_{th1} = C_{th} - C_{th2} = 4,925 - 0,7533 = 4,17 \frac{J}{^{\circ}C} \quad (19)$$

Com todos os parâmetros obtidos, é possível fazer a simulação do circuito térmico proposto e comparar com o resultado prático obtido. O circuito, obtido a partir do modelo térmico, é mostrado na Figura 23.

Figura 23 - Circuito obtido a partir do modelo térmico (12,5 x 25 mm)

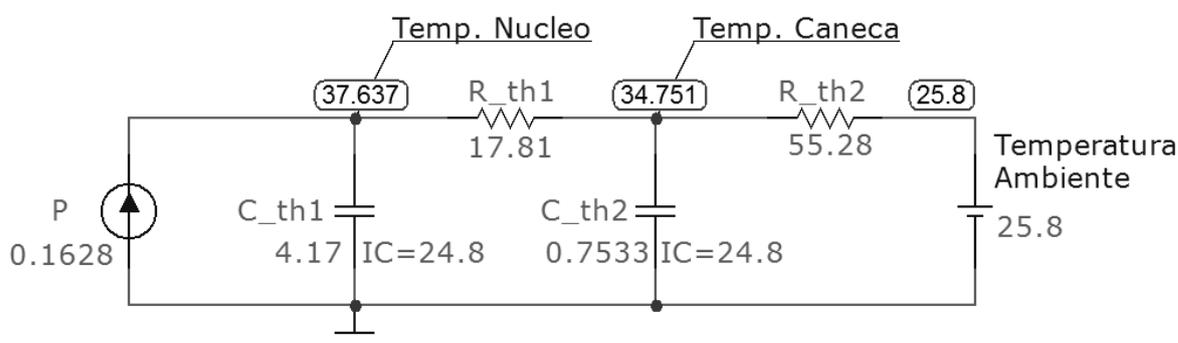
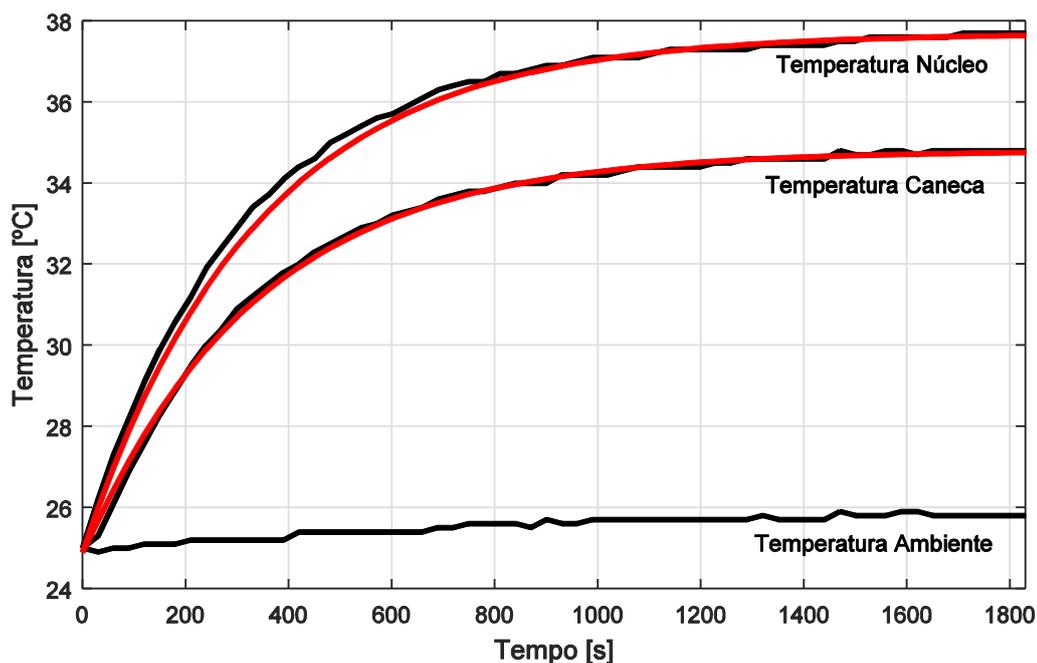


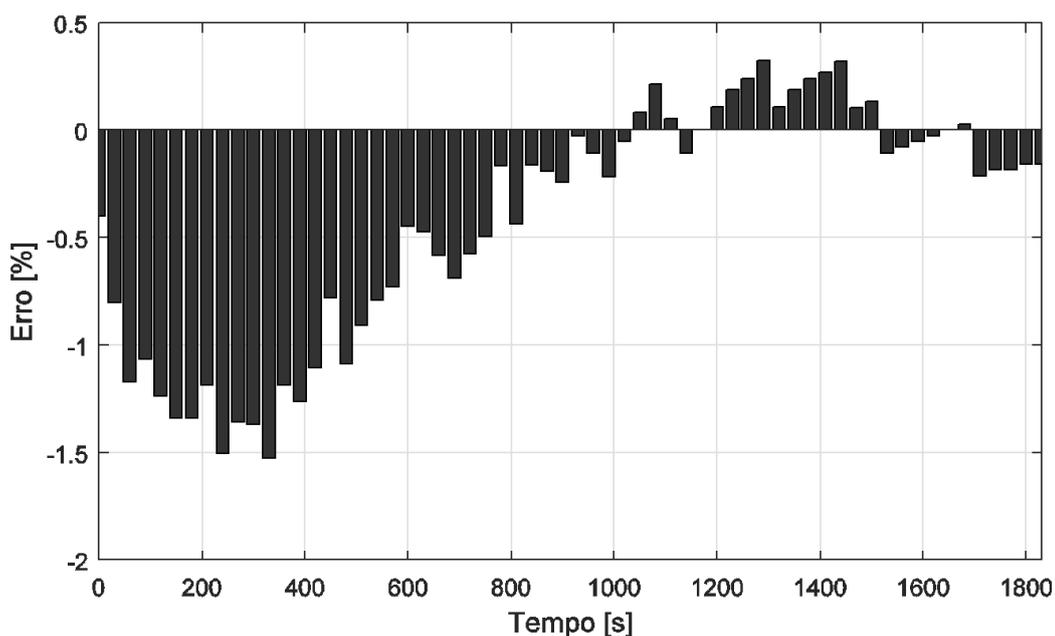
Figura 24 - Comparação entre as medidas e a simulação (12,5 x 25 mm)



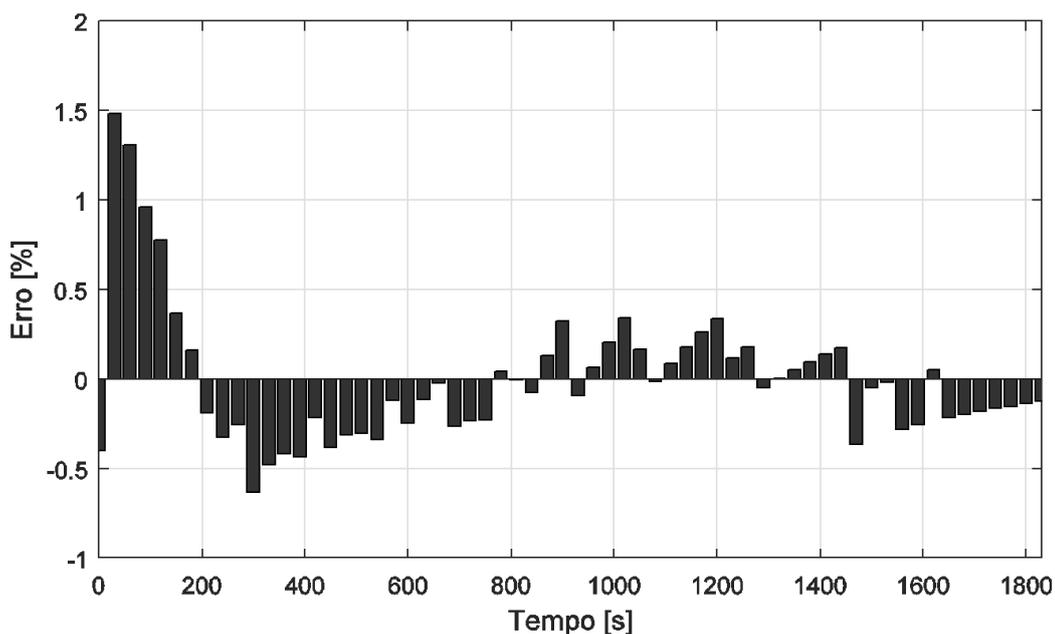
A Figura 24 mostra a comparação entre os valores medidos e a simulação. Em vermelho é mostrada a curva obtida pela resposta do circuito proposto e a curva em preto mostra os valores medidos de temperatura.

A Figura 25 e a Figura 26 mostram o gráfico do erro entre os valores simulados e os valores medidos no núcleo e na caneca do capacitor, respectivamente.

**Figura 25 - Erro da Temperatura de Núcleo (12,5 x 25 mm)**

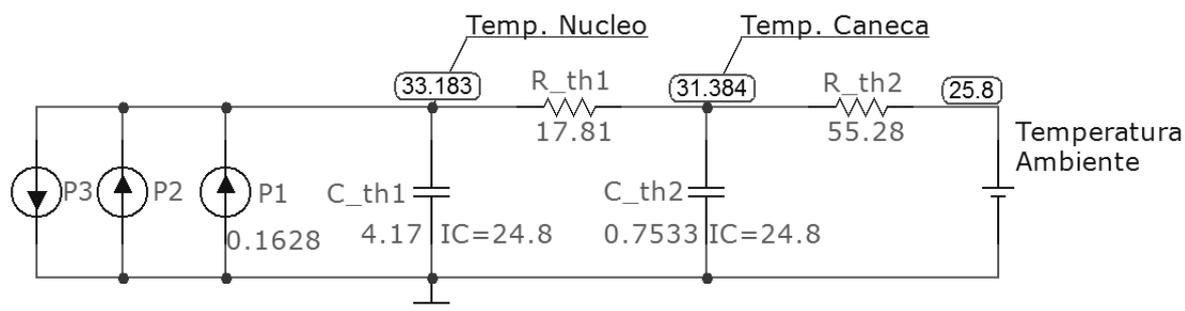


**Figura 26 - Erro na Temperatura de Caneca (12,5 x 25 mm)**



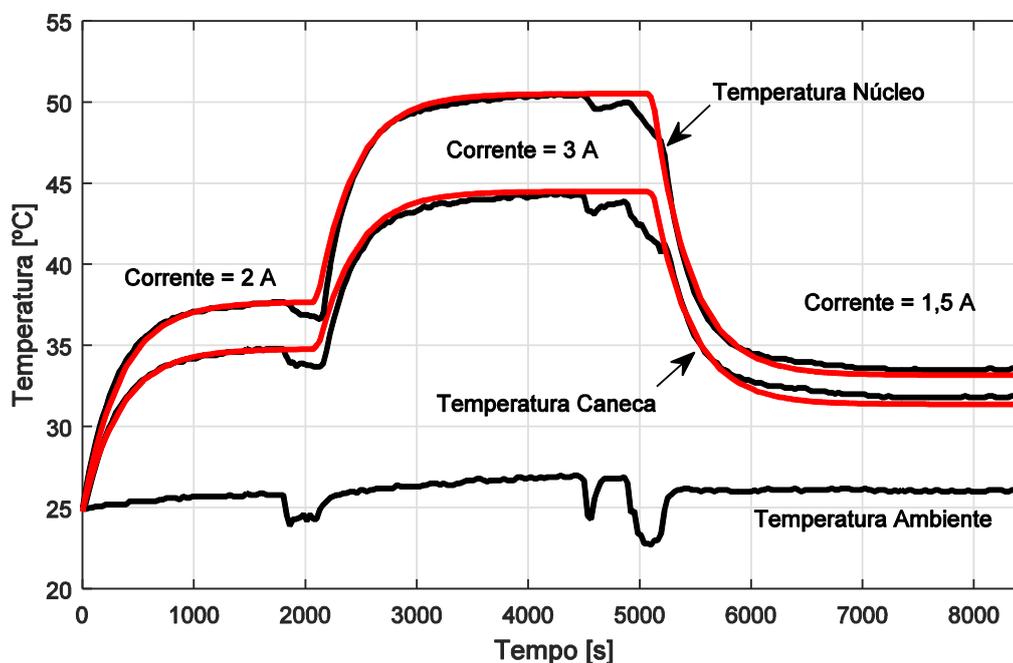
Após a caracterização inicial, o teste foi estendido para verificar o comportamento do modelo durante variações de corrente. A Figura 27 mostra o circuito adaptado para simular a condição real aplicada. Foram inseridas duas fontes de corrente. A fonte  $P_2$  faz a corrente simulada aumentar para 3 A e fonte  $P_3$  é acionada para que a corrente seja de 1,5 A.

**Figura 27 - Circuito obtido na simulação estendida (12,5 x 25 mm)**



A Figura 28 mostra a comparação entre os valores medidos e a simulação estendida. Em vermelho é mostrada a curva obtida pela resposta do circuito proposto e a curva em preto mostra os valores medidos de temperatura.

**Figura 28 - Comparação entre medidas e simulação estendida (12,5 x 25 mm)**

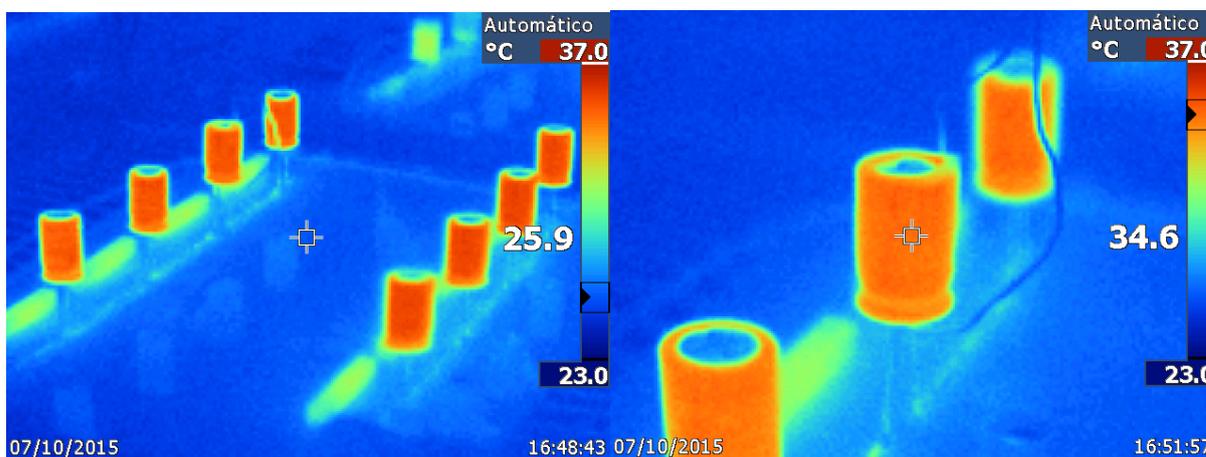


É possível observar na Figura 28 que ocorre um comportamento não esperado nas curvas medidas. Nos pontos onde as temperaturas caem, foram os momentos em que a estufa foi aberta para registrar temperaturas com o termovisor. Os gráficos de erro não foram analisados para este caso.

## 6.2 CAPACITOR DE DIMENSÃO $\phi = 16 \times L = 25 \text{ mm}$

O capacitor de dimensão  $16 \times 25 \text{ mm}$  é um capacitor que possui um diâmetro de  $16 \text{ mm}$  e um comprimento de  $25 \text{ mm}$ . A capacitância escolhida deste capacitor foi de  $1000 \mu\text{F}$  e sua tensão nominal é de  $35 \text{ V}$ . O capacitor com os termopares foi ligado no circuito de teste juntamente com outros capacitores semelhantes. Durante o teste foram registradas temperaturas com um termovisor, conforme mostra a Figura 29.

Figura 29 - Imagem das temperaturas com termovisor ( $16 \times 25 \text{ mm}$ )



O teste foi realizado e os valores medidos são mostrados na Tabela 7. Esta tabela contempla apenas valores que foram obtidos com equipamentos de medição. A constante de tempo  $\tau_{th}$  é obtida a partir da resposta do sistema e o valor da  $RSE_{1kHz}$  para a temperatura específica é obtida da curva  $RSE \times Temp$ .

Tabela 7 - Valores medidos ( $16 \times 25 \text{ mm}$ )

Parâmetro	Valor	Unidade
$I_{1kHz}$ – corrente	3	A
$RSE_{1kHz}$ (23 °C)	33,1	$m\Omega$
$T_{N \text{ FINAL}}$	42,4	°C
$T_{C \text{ FINAL}}$	37,3	°C
$T_{A \text{ FINAL}}$	26,8	°C
$T_{A \text{ INICIAL}}$	25,3	°C
$m$ – massa da caneca	1,22	g

A partir dos valores da Tabela 7 podem ser obtidos os valores de  $P_D$ ,  $R_{th1}$ ,  $R_{th2}$  e  $C_{th2}$ . O valor de  $\tau_{th}$  é o único obtido a partir do comportamento temporal da temperatura no núcleo do capacitor.

Para  $P_D$ , o valor da  $RSE_{1kHz}$  foi obtido a partir do ajuste da curva que relaciona o valor da Resistência Série Equivalente em função da temperatura, neste caso  $RSE_{1kHz}(42,4\text{ °C}) = 30,1\text{ m}\Omega$ . O cálculo da  $P_D$  é mostrado na Equação (20)

$$P_D = I^2 RSE = (3)^2 0,0301 = 0,2709\text{ W} \quad (20)$$

A partir do valor da  $P_D$  é possível obter os valores das Resistências Térmicas. A resistência  $R_{th1}$  está relacionada com a diferença entre a temperatura de núcleo  $T_N$  e a temperatura de caneca  $T_C$ . O valor da  $R_{th1}$  é obtido na Equação (21).

$$R_{th1} = \frac{T_N - T_C}{P_D} = \frac{42,4 - 37,3}{0,2709} = 18,83 \frac{\text{°C}}{\text{W}}, \quad (21)$$

A resistência  $R_{th2}$  está relacionada com a diferença entre a temperatura de caneca  $T_C$  e a temperatura ambiente  $T_A$ . O valor da  $R_{th2}$  é obtido na Equação (22).

$$R_{th2} = \frac{T_C - T_A}{P_D} = \frac{37,3 - 26,8}{0,2709} = 38,76 \frac{\text{°C}}{\text{W}}, \quad (22)$$

A Resistência Térmica total  $R_{th}$  é a soma de  $R_{th1}$  com  $R_{th2}$  e também poderia ser obtida diretamente pela diferença entre a temperatura de núcleo  $T_N$  e a temperatura ambiente  $T_A$ . A Resistência Térmica total é calculada na Equação (23).

$$R_{th} = R_{th1} + R_{th2} = 57,59 \frac{\text{°C}}{\text{W}}, \quad (23)$$

A Capacitância Térmica total  $C_{th}$  é obtida a partir da constante de tempo  $\tau_{th}$  que está relacionada com a resposta da temperatura em função do tempo, neste caso  $\tau_{th} = 390\text{ s}$ . A Equação (24) determina a Capacitância Térmica total.

$$C_{th} = \frac{\tau_{th}}{R_{th}} = \frac{390}{57,59} = 6,77 \frac{\text{J}}{\text{°C}} \quad (24)$$

A capacitância  $C_{th2}$ , que é a Capacitância Térmica da caneca, é obtida em função da massa da caneca de alumínio  $m$  e do calor específico do Alumínio  $c$ . O cálculo da capacitância  $C_{th2}$  é mostrado na Equação (25).

$$C_{th2} = m c = 1,22 \cdot 0,9 = 1,094 \frac{J}{^{\circ}C} \quad (25)$$

O valor de  $C_{th1}$  é obtido pela diferença entre a Capacitância Térmica total  $C_{th}$  e a Capacitância Térmica da caneca  $C_{th2}$ , como mostra a Equação (26).

$$C_{th1} = C_{th} - C_{th2} = 6,77 - 1,094 = 5,676 \frac{J}{^{\circ}C} \quad (26)$$

Com todos os parâmetros obtidos, é possível fazer a simulação do circuito térmico proposto e comparar com o resultado prático obtido. O circuito obtido a partir do modelo térmico é mostrado na Figura 30.

Figura 30 - Circuito obtido a partir do modelo térmico (16 x 25 mm)

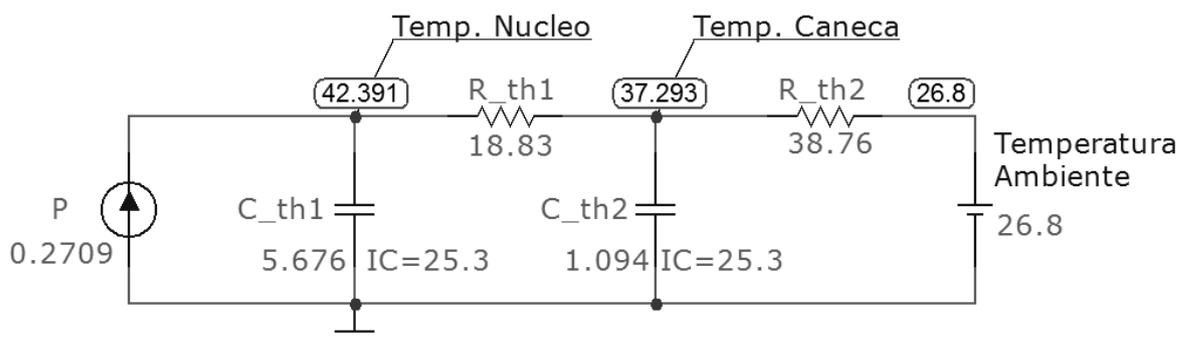
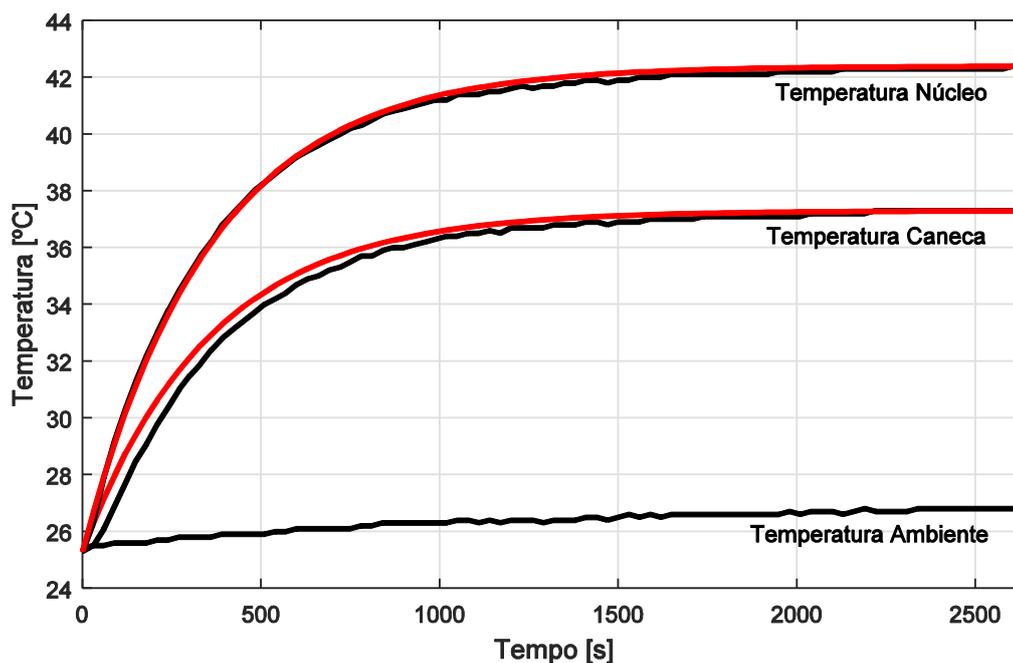


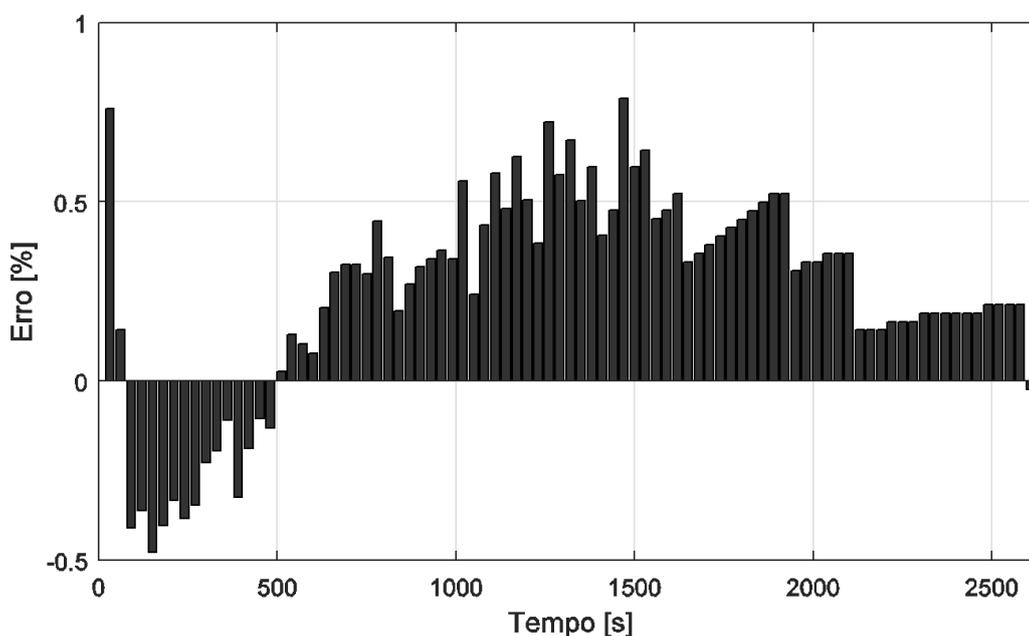
Figura 31 - Comparação entre as medidas e a simulação (16 x 25 mm)



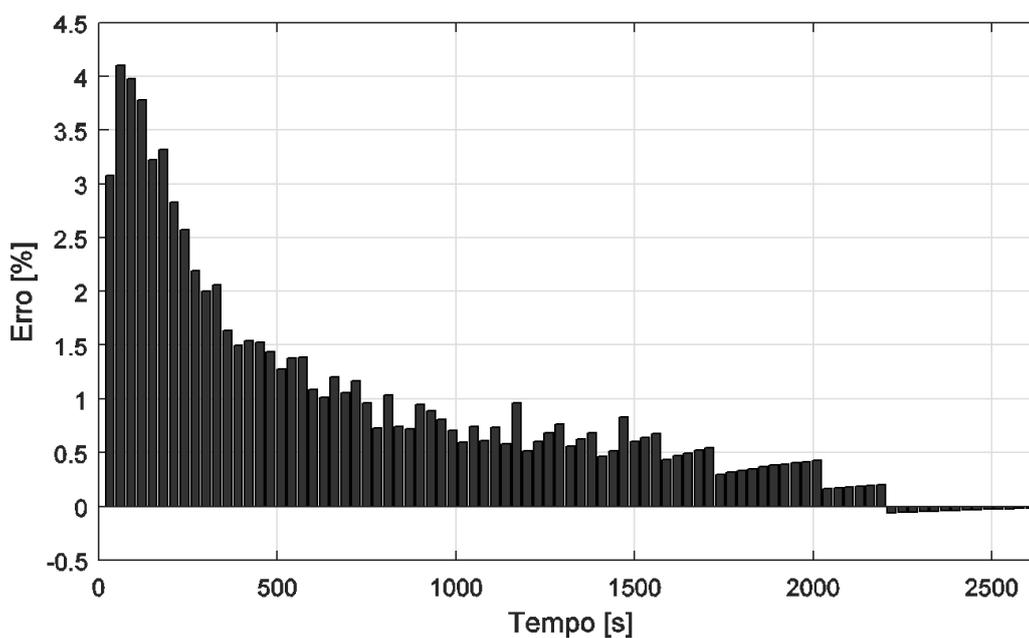
A Figura 31 mostra a comparação entre os valores medidos e a simulação. Em vermelho é mostrada a curva obtida pela resposta do circuito proposto e a curva em preto mostra os valores medidos de temperatura.

A Figura 32 e a Figura 33 mostram o gráfico do erro entre os valores simulados e os valores medidos no núcleo e na caneca do capacitor, respectivamente.

**Figura 32 - Erro da Temperatura de Núcleo (16 x 25 mm)**



**Figura 33 - Erro da Temperatura de Caneca (16 x 25 mm)**

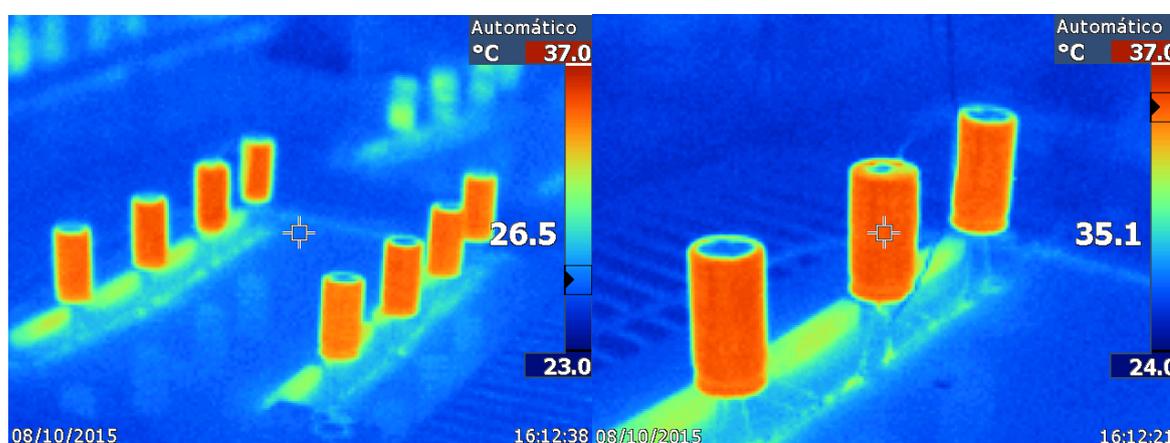


### 6.3 CAPACITOR DE DIMENSÃO $\phi = 18 \times L = 35 \text{ mm}$

#### 6.3.1 Ensaio em 25 °C

O capacitor de dimensão  $18 \times 35 \text{ mm}$  é um capacitor que possui um diâmetro de  $18 \text{ mm}$  e um comprimento de  $35 \text{ mm}$ . A capacitância escolhida deste capacitor foi de  $2200 \mu\text{F}$  e sua tensão nominal é de  $35 \text{ V}$ . O capacitor com os termopares foi ligado no circuito de teste juntamente com outros capacitores. Durante o teste foram registradas temperaturas com um termovisor, conforme mostra a Figura 34.

Figura 34 - Imagem das temperaturas com termovisor ( $18 \times 35 \text{ mm}$ )



O teste foi realizado e os valores medidos são mostrados na Tabela 8. Esta tabela contempla apenas valores que foram obtidos com equipamentos de medição. A constante de tempo  $\tau_{th}$  é obtida a partir da resposta do sistema e o valor da  $RSE_{1kHz}$  para a temperatura específica é obtida da curva  $RSE \times Temp$ .

Tabela 8 - Valores medidos ( $18 \times 35 \text{ mm}$ )

Parâmetro	Valor	Unidade
$I_{1kHz}$ – corrente	4	A
$RSE_{1kHz}$ (23 °C)	20,0	$m\Omega$
$T_{N\ FINAL}$	40,0	°C
$T_{C\ FINAL}$	35,5	°C
$T_{A\ FINAL}$	26,3	°C
$T_{A\ INICIAL}$	24,5	°C
$m$ – massa da caneca	2,14	g

A partir dos valores da Tabela 8 podem ser obtidos os valores de  $P_D$ ,  $R_{th1}$ ,  $R_{th2}$  e  $C_{th2}$ . O valor de  $\tau_{th}$  é o único obtido a partir do comportamento temporal da temperatura no núcleo do capacitor.

Para  $P_D$ , o valor da  $RSE_{1kHz}$  foi obtido a partir do ajuste da curva que relaciona o valor da Resistência Série Equivalente em função da temperatura, neste caso  $RSE_{1kHz}(40,0\text{ }^\circ\text{C}) = 19,3\text{ m}\Omega$ . O cálculo da  $P_D$  é mostrado na Equação (27)

$$P_D = I^2 RSE = (4)^2 0,0193 = 0,3088\text{ W} \quad (27)$$

A partir do valor da  $P_D$  é possível obter os valores das Resistências Térmicas. A resistência  $R_{th1}$  está relacionada com a diferença entre a temperatura de núcleo  $T_N$  e a temperatura de caneca  $T_C$ . O valor da  $R_{th1}$  é obtido na Equação (28).

$$R_{th1} = \frac{T_N - T_C}{P_D} = \frac{40,0 - 35,5}{0,3088} = 14,57 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}, \quad (28)$$

A resistência  $R_{th2}$  está relacionada com a diferença entre a temperatura de caneca  $T_C$  e a temperatura ambiente  $T_A$ . O valor da  $R_{th2}$  é obtido na Equação (29).

$$R_{th2} = \frac{T_C - T_A}{P_D} = \frac{35,5 - 26,3}{0,3088} = 29,79 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}, \quad (29)$$

A Resistência Térmica total  $R_{th}$  é a soma de  $R_{th1}$  com  $R_{th2}$  e também poderia ser obtida diretamente pela diferença entre a temperatura de núcleo  $T_N$  e a temperatura ambiente  $T_A$ . A Resistência Térmica total é calculada na Equação (30).

$$R_{th} = R_{th1} + R_{th2} = 44,36 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}, \quad (30)$$

A Capacitância Térmica total  $C_{th}$  é obtida a partir da constante de tempo  $\tau_{th}$  que está relacionada com a resposta da temperatura em função do tempo, neste caso  $\tau_{th} = 510\text{ s}$ . A Equação (31) determina a Capacitância Térmica total.

$$C_{th} = \frac{\tau_{th}}{R_{th}} = \frac{510}{44,36} = 11,50 \frac{\text{J}}{^\circ\text{C}} \quad (31)$$

A capacitância  $C_{th2}$ , que é a Capacitância Térmica da caneca, é obtida em função da massa da caneca de alumínio  $m$  e do calor específico do Alumínio  $c$ . O cálculo da capacitância  $C_{th2}$  é mostrado na Equação (32).

$$C_{th2} = m c = 2,14 \cdot 0,9 = 1,926 \frac{J}{^{\circ}C} \quad (32)$$

O valor de  $C_{th1}$  é obtido pela diferença entre a Capacitância Térmica total  $C_{th}$  e a Capacitância Térmica da caneca  $C_{th2}$ , como mostra a Equação (33).

$$C_{th1} = C_{th} - C_{th2} = 11,50 - 1,926 = 9,574 \frac{J}{^{\circ}C} \quad (33)$$

Com todos os parâmetros obtidos, é possível fazer a simulação do circuito térmico proposto e comparar com o resultado prático obtido. O circuito obtido a partir do modelo térmico é mostrado na Figura 35.

Figura 35 - Circuito obtido a partir do modelo térmico (18 x 35 mm)

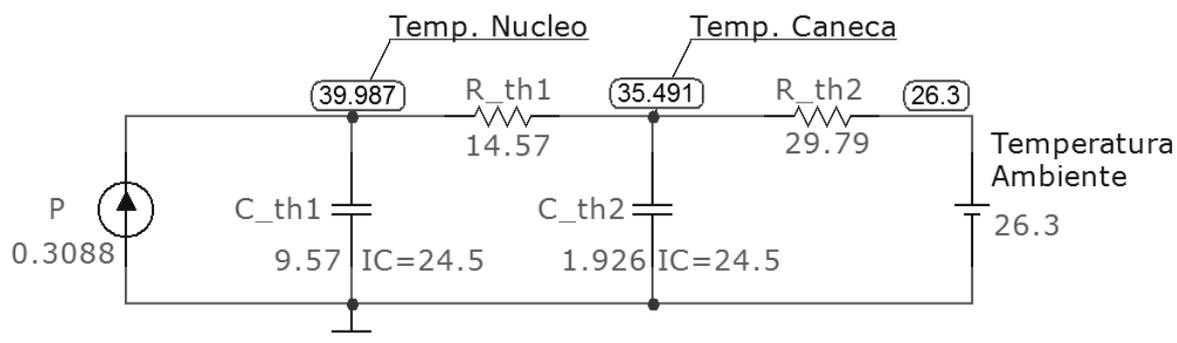
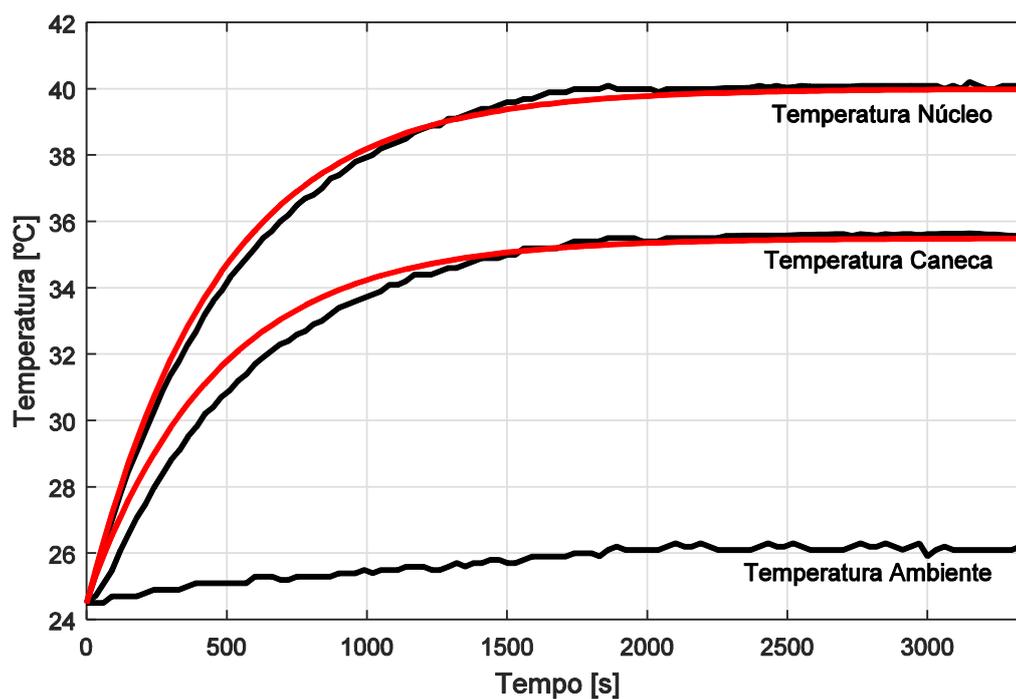


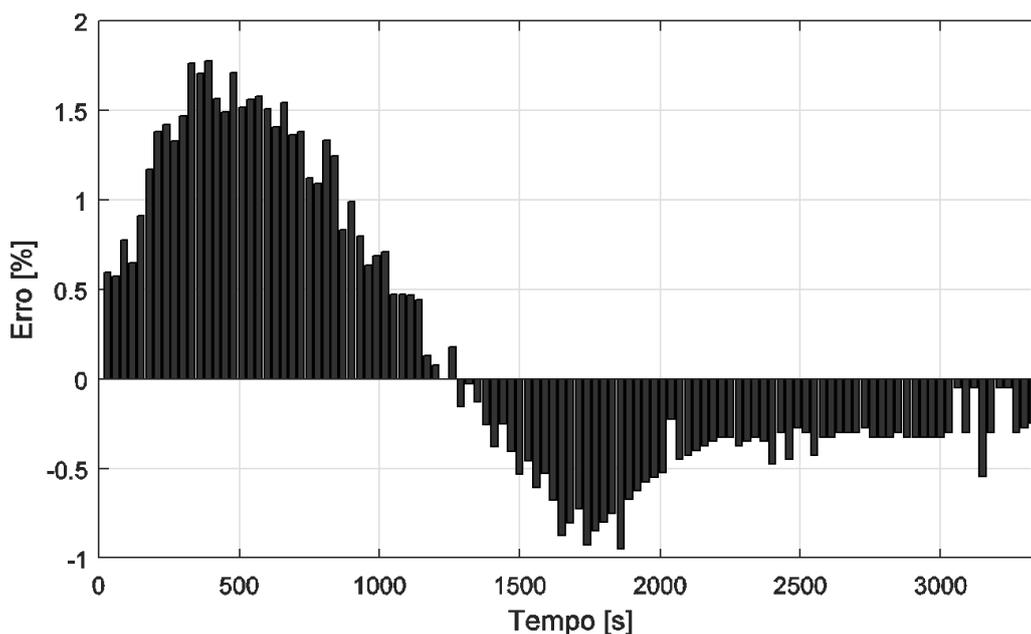
Figura 36 - Comparação entre as medidas e a simulação (18 x 35 mm)



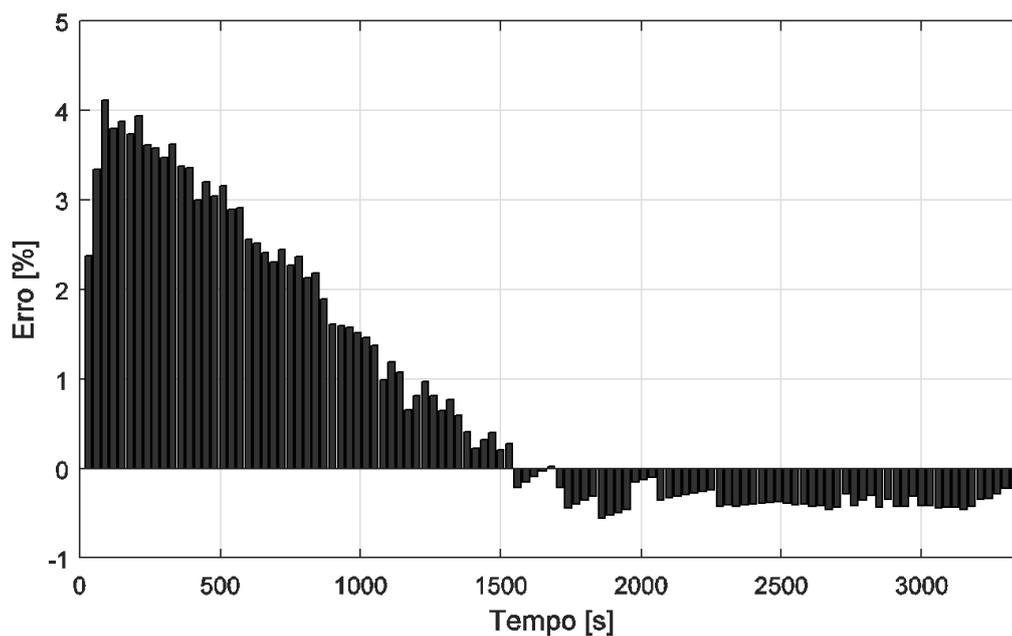
A Figura 36 mostra a comparação entre os valores medidos e a simulação. Em vermelho é mostrada a curva obtida pela resposta do circuito proposto e a curva em preto mostra os valores medidos de temperatura.

A Figura 37 e a Figura 38 mostram o gráfico do erro entre os valores simulados e os valores medidos no núcleo e na caneca do capacitor, respectivamente.

**Figura 37 - Erro da Temperatura de Núcleo (18 x 35 mm)**



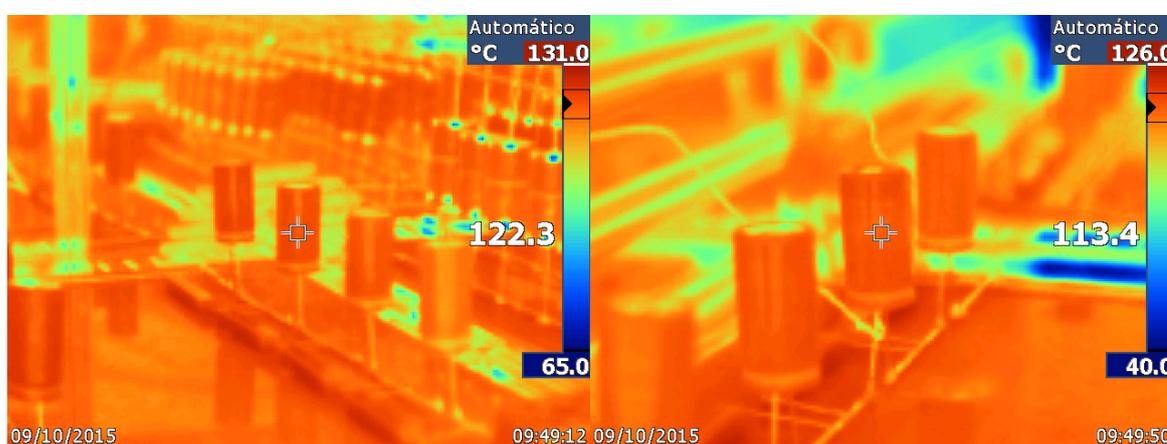
**Figura 38 - Erro da Temperatura de Caneca (18 x 35 mm)**



### 6.3.2 Ensaio em 125 °C

Para o capacitor da dimensão 18 x 35 mm também foi realizado um ensaio na temperatura de 125°C. O objetivo deste ensaio foi verificar se o modelo térmico obtido na temperatura ambiente em torno de 25°C seria mantido para temperaturas maiores. No caso do ensaio na temperatura de 125°C a estufa trabalhava com uma circulação de ar interna. Foi utilizada a menor velocidade possível para a circulação. Durante o teste foram registradas temperaturas com um termovisor, conforme mostra a Figura 39.

Figura 39 - Imagem das temperaturas com termovisor (18 x 35 mm)(125 °C)



O teste foi realizado e os valores medidos são mostrados na Tabela 9. Esta tabela contempla apenas valores que foram obtidos com equipamentos de medição.

Tabela 9 - Valores medidos (18 x 35 mm)(125 °C)

Parâmetro	Valor	Unidade
$I_{1kHz}$ – corrente	4	A
$RSE_{1kHz}$ (125 °C)	17,2	mΩ
$T_{N\ FINAL}$	136,2	°C
$T_{C\ FINAL}$	130,8	°C
$T_{A\ FINAL}$	127,2	°C
$T_{A\ INICIAL}$	126,3	°C
$m$ – massa da caneca	2,14	g

A partir dos valores da Tabela 9 podem ser obtidos os valores de  $P_D$ ,  $R_{th1}$ ,  $R_{th2}$  e  $C_{th2}$ . O valor de  $\tau_{th}$  é o único obtido a partir do comportamento temporal da temperatura no núcleo do capacitor.

Para  $P_D$ , o valor da  $RSE_{1kHz}$  foi obtido a partir do ajuste da curva que relaciona o valor da Resistência Série Equivalente em função da temperatura, neste caso  $RSE_{1kHz}(125\text{ °C}) = 17,2\text{ m}\Omega$ . O cálculo da  $P_D$  é mostrado na Equação (34)

$$P_D = I^2 RSE = (4)^2 0,0172 = 0,275\text{ W} \quad (34)$$

A partir do valor da  $P_D$  é possível obter os valores das Resistências Térmicas. A resistência  $R_{th1}$  está relacionada com a diferença entre a temperatura de núcleo  $T_N$  e a temperatura de caneca  $T_C$ . O valor da  $R_{th1}$  é obtido na Equação (35).

$$R_{th1} = \frac{T_N - T_C}{P_D} = \frac{136,2 - 130,8}{0,275} = 19,63 \frac{\text{°C}}{\text{W}}, \quad (35)$$

A resistência  $R_{th2}$  está relacionada com a diferença entre a temperatura de caneca  $T_C$  e a temperatura ambiente  $T_A$ . O valor da  $R_{th2}$  é obtido na Equação (36).

$$R_{th2} = \frac{T_C - T_A}{P_D} = \frac{130,8 - 127,2}{0,275} = 13,09 \frac{\text{°C}}{\text{W}}, \quad (36)$$

A Resistência Térmica total  $R_{th}$  é a soma de  $R_{th1}$  com  $R_{th2}$  e também poderia ser obtida diretamente pela diferença entre a temperatura de núcleo  $T_N$  e a temperatura ambiente  $T_A$ . A Resistência Térmica total é calculada na Equação (37).

$$R_{th} = R_{th1} + R_{th2} = 32,72 \frac{\text{°C}}{\text{W}}, \quad (37)$$

A Capacitância Térmica total  $C_{th}$  é obtida a partir da constante de tempo  $\tau_{th}$  que está relacionada com a resposta da temperatura em função do tempo, neste caso  $\tau_{th} = 360\text{s}$ . A Equação (38) determina a Capacitância Térmica total.

$$C_{th} = \frac{\tau_{th}}{R_{th}} = \frac{360}{32,72} = 11,00 \frac{\text{J}}{\text{°C}} \quad (38)$$

A capacitância  $C_{th2}$ , que é a Capacitância Térmica da caneca, é obtida em função da massa da caneca de alumínio  $m$  e do calor específico do Alumínio  $c$ . O cálculo da capacitância  $C_{th2}$  é mostrado na Equação (39).

$$C_{th2} = m c = 2,14 \cdot 0,955 = 2,044 \frac{J}{^{\circ}C} \quad (39)$$

O valor de  $C_{th1}$  é obtido pela diferença entre a Capacitância Térmica total  $C_{th}$  e a Capacitância Térmica da caneca  $C_{th2}$ , como mostra a Equação (40).

$$C_{th1} = C_{th} - C_{th2} = 11,00 - 2,044 = 8,95 \frac{J}{^{\circ}C} \quad (40)$$

Com todos os parâmetros obtidos, é possível fazer a simulação do circuito térmico proposto e comparar com o resultado prático obtido. O circuito obtido a partir do modelo térmico é mostrado na Figura 40.

Figura 40 - Circuito obtido a partir do modelo térmico (18 x 35 mm)(125 °C)

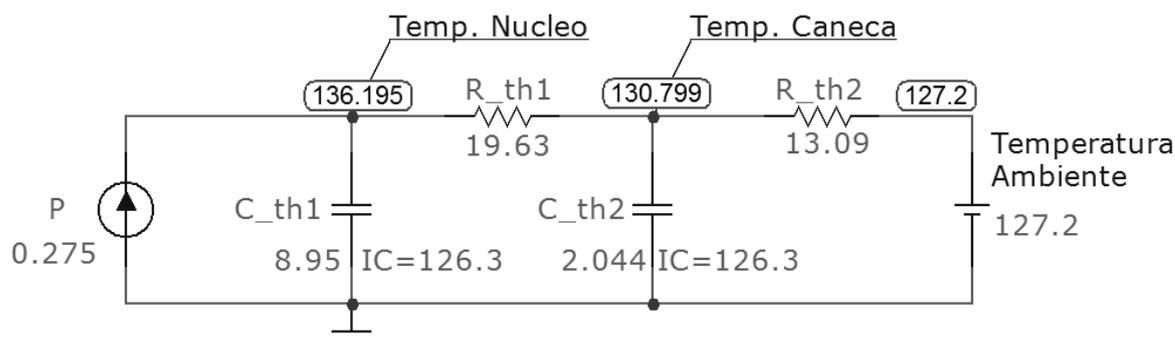
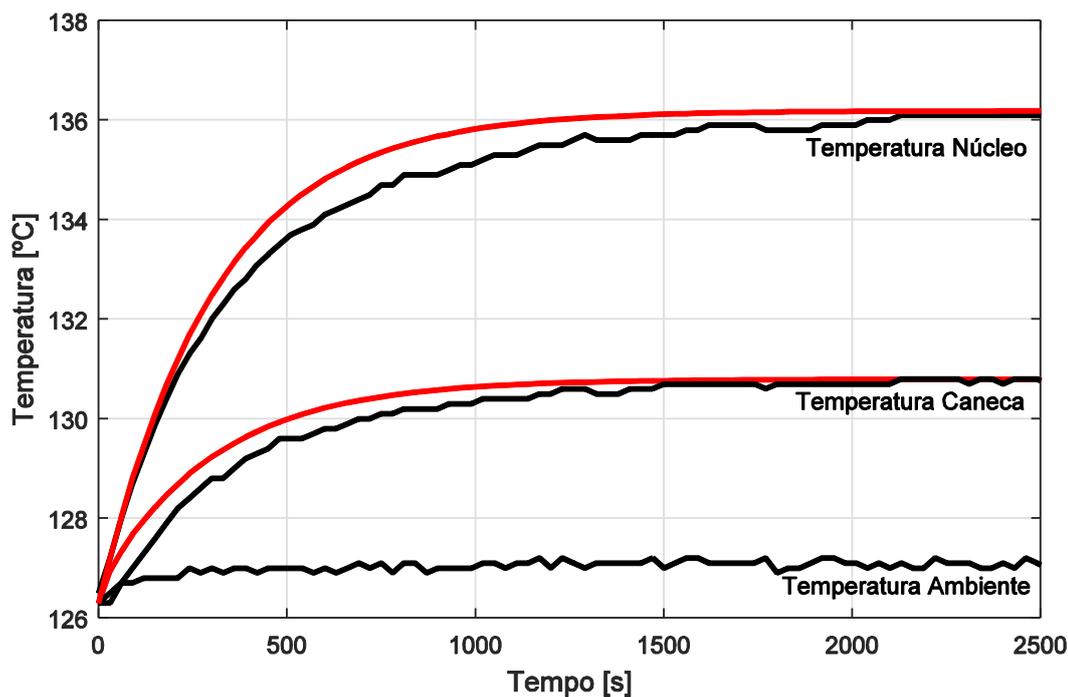


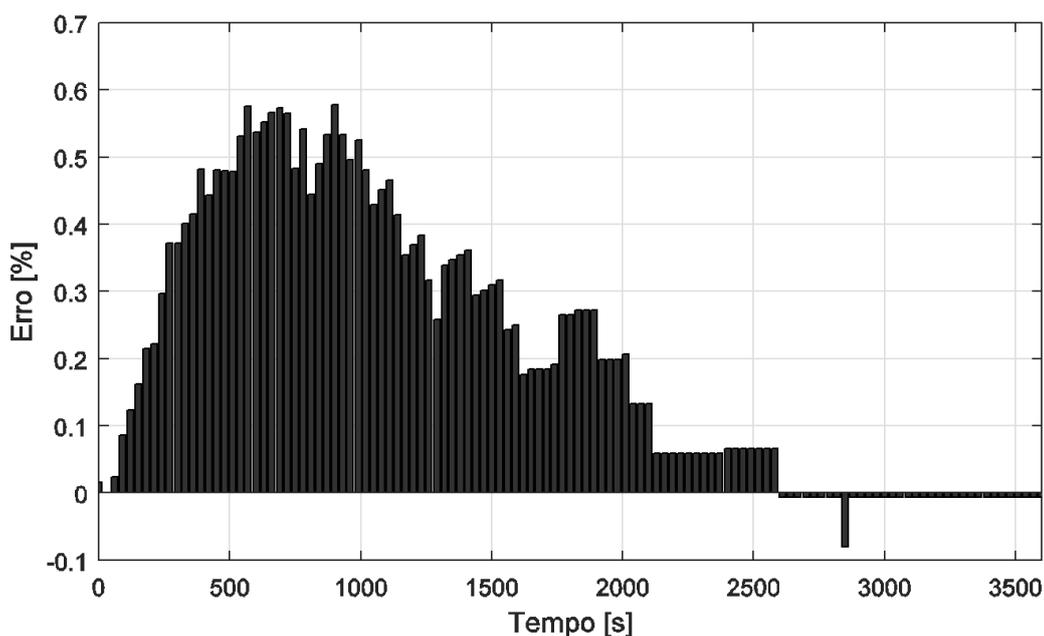
Figura 41 - Comparação entre as medidas e a simulação (18 x 35 mm)(125 °C)



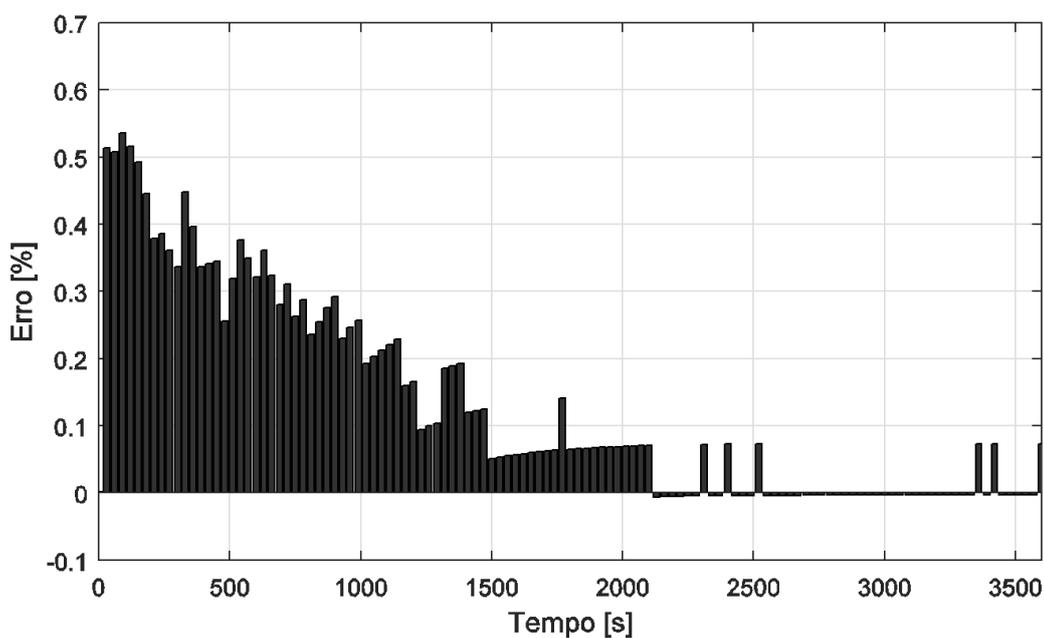
A Figura 41 mostra a comparação entre os valores medidos e a simulação. Em vermelho é mostrada a curva obtida pela resposta do circuito proposto e a curva em preto mostra os valores medidos de temperatura.

A Figura 42 e a Figura 43 mostram o gráfico do erro entre os valores simulados e os valores medidos no núcleo e na caneca do capacitor, respectivamente.

**Figura 42 - Erro da Temperatura do Núcleo (18 x 35 mm)(125 °C)**



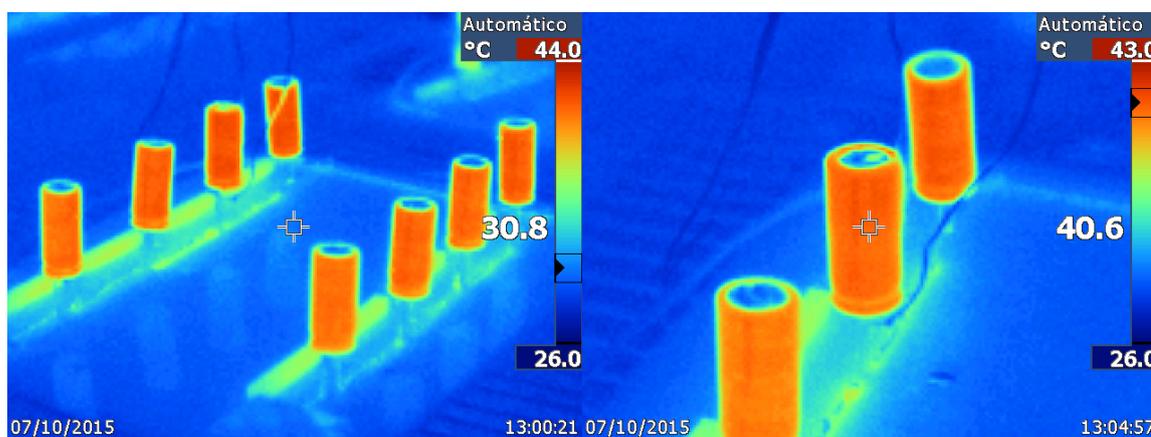
**Figura 43 - Erro da Temperatura de Caneca (18 x 35 mm)(125 °C)**



#### 6.4 CAPACITOR DE DIMENSÃO $\phi = 18 \times L = 40 \text{ mm}$

O capacitor de dimensão  $18 \times 40 \text{ mm}$  é um capacitor que possui um diâmetro de  $18 \text{ mm}$  e um comprimento de  $40 \text{ mm}$ . A capacitância escolhida deste capacitor foi de  $4700 \mu\text{F}$  e sua tensão nominal é de  $35 \text{ V}$ . O capacitor com os termopares foi ligado no circuito de teste juntamente com outros capacitores semelhantes. Durante o teste foram registradas temperaturas com um termovisor, conforme mostra a Figura 44.

Figura 44 - Imagem das temperaturas com termovisor ( $18 \times 40 \text{ mm}$ )



O teste foi realizado e os valores medidos são mostrados na Tabela 10. Esta tabela contempla apenas valores que foram obtidos com equipamentos de medição. A constante de tempo  $\tau_{th}$  é obtida a partir da resposta do sistema e o valor da  $RSE_{1kHz}$  para a temperatura específica é obtida da curva  $RSE \times Temp$ .

Tabela 10 - Valores medidos ( $18 \times 40 \text{ mm}$ )

Parâmetro	Valor	Unidade
$I_{1kHz}$ – corrente	4	A
$RSE_{1kHz}$ ( $23^\circ\text{C}$ )	14,5	$m\Omega$
$T_{N\ FINAL}$	36,0	$^\circ\text{C}$
$T_{C\ FINAL}$	33,1	$^\circ\text{C}$
$T_{A\ FINAL}$	25,9	$^\circ\text{C}$
$T_{A\ INICIAL}$	23,3	$^\circ\text{C}$
$m$ – massa da caneca	2,35	$g$

A partir dos valores da Tabela 10 podem ser obtidos os valores de  $P_D$ ,  $R_{th1}$ ,  $R_{th2}$  e  $C_{th2}$ . O valor de  $\tau_{th}$  é o único obtido a partir do comportamento temporal da temperatura no núcleo do capacitor.

Para  $P_D$ , o valor da  $RSE_{1kHz}$  foi obtido a partir do ajuste da curva que relaciona o valor da Resistência Série Equivalente em função da temperatura, neste caso  $RSE_{1kHz}(36,0\text{ }^\circ\text{C}) = 14,3\text{ m}\Omega$ . O cálculo da  $P_D$  é mostrado na Equação (41)

$$P_D = I^2 RSE = (4)^2 0,0143 = 0,2288\text{ W} \quad (41)$$

A partir do valor da  $P_D$  é possível obter os valores das Resistências Térmicas. A resistência  $R_{th1}$  está relacionada com a diferença entre a temperatura de núcleo  $T_N$  e a temperatura de caneca  $T_C$ . O valor da  $R_{th1}$  é obtido na Equação (42).

$$R_{th1} = \frac{T_N - T_C}{P_D} = \frac{36,0 - 33,1}{0,2288} = 12,67 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}, \quad (42)$$

A resistência  $R_{th2}$  está relacionada com a diferença entre a temperatura de caneca  $T_C$  e a temperatura ambiente  $T_A$ . O valor da  $R_{th2}$  é obtido na Equação (43).

$$R_{th2} = \frac{T_C - T_A}{P_D} = \frac{33,1 - 25,9}{0,2288} = 31,46 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}, \quad (43)$$

A Resistência Térmica total  $R_{th}$  é a soma de  $R_{th1}$  com  $R_{th2}$  e também poderia ser obtida diretamente pela diferença entre a temperatura de núcleo  $T_N$  e a temperatura ambiente  $T_A$ . A Resistência Térmica total é calculada na Equação (44).

$$R_{th} = R_{th1} + R_{th2} = 44,13 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}, \quad (44)$$

A Capacitância Térmica total  $C_{th}$  é obtida a partir da constante de tempo  $\tau_{th}$  que está relacionada com a resposta da temperatura em função do tempo, neste caso  $\tau_{th} = 840\text{ s}$ . A Equação (45) determina a Capacitância Térmica total.

$$C_{th} = \frac{\tau_{th}}{R_{th}} = \frac{870}{44,13} = 19,71 \frac{\text{J}}{^\circ\text{C}} \quad (45)$$

A capacitância  $C_{th2}$ , que é a Capacitância Térmica da caneca, é obtida em função da massa da caneca de alumínio  $m$  e do calor específico do Alumínio  $c$ . O cálculo da capacitância  $C_{th2}$  é mostrado na Equação (46).

$$C_{th2} = m c = 2,35 \cdot 0,9 = 2,115 \frac{J}{^{\circ}C} \quad (46)$$

O valor de  $C_{th1}$  é obtido pela diferença entre a Capacitância Térmica total  $C_{th}$  e a Capacitância Térmica da caneca  $C_{th2}$ , como mostra a Equação (47).

$$C_{th1} = C_{th} - C_{th2} = 19,71 - 2,115 = 17,599 \frac{J}{^{\circ}C} \quad (47)$$

Com todos os parâmetros obtidos, é possível fazer a simulação do circuito térmico proposto e comparar com o resultado prático obtido. O circuito obtido a partir do modelo térmico é mostrado na Figura 45.

Figura 45 - Circuito obtido a partir do modelo térmico (18 x 40 mm)

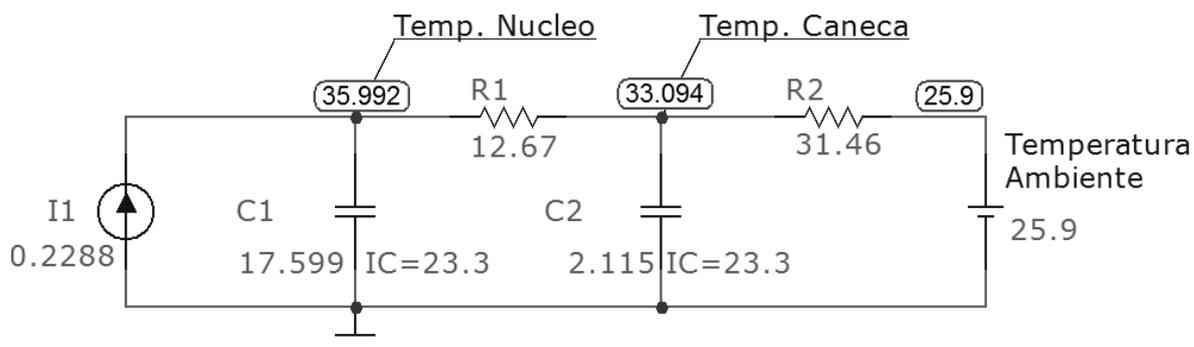
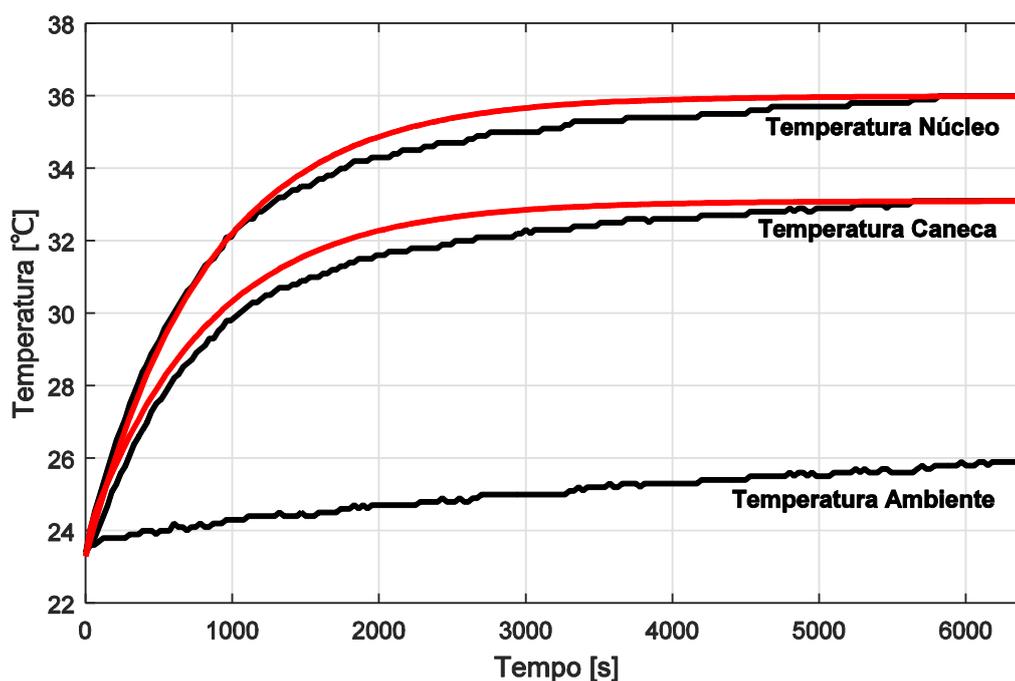


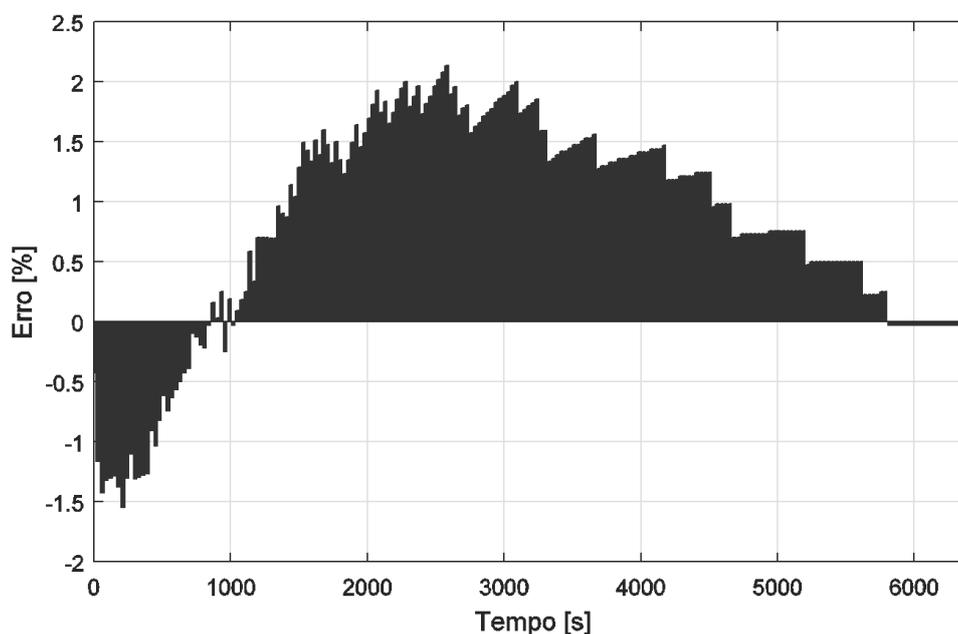
Figura 46 - Comparação entre as medidas e a simulação (18 x 40 mm)



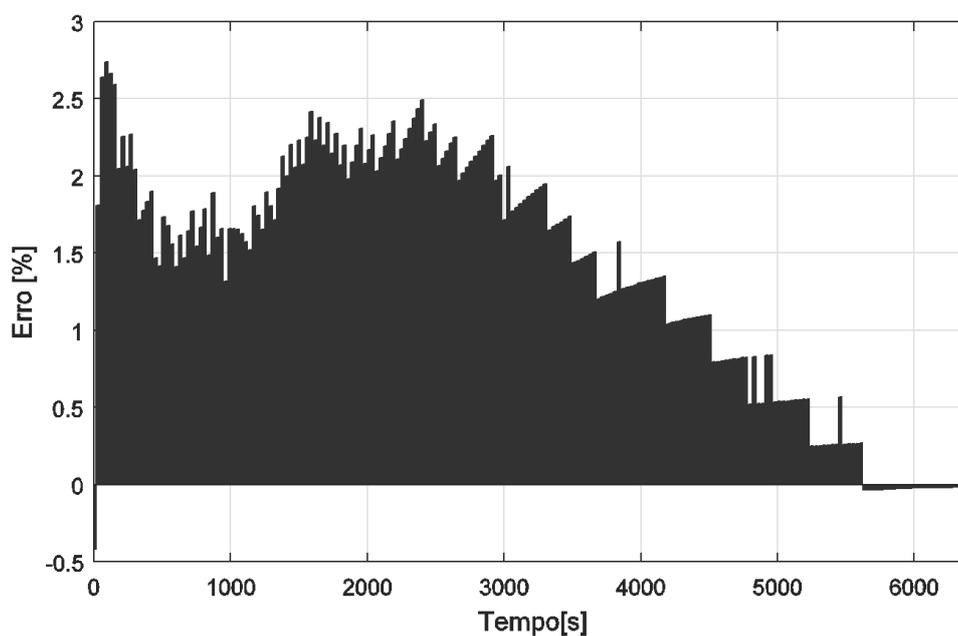
A Figura 46 mostra a comparação entre os valores medidos e a simulação. Em vermelho é mostrada a curva obtida pela resposta do circuito proposto e a curva em preto mostra os valores medidos de temperatura.

A Figura 47 e a Figura 48 mostram o gráfico do erro entre os valores simulados e os valores medidos no núcleo e na caneca do capacitor, respectivamente.

**Figura 47 - Erro da Temperatura do Núcleo (18 x 40 mm)**

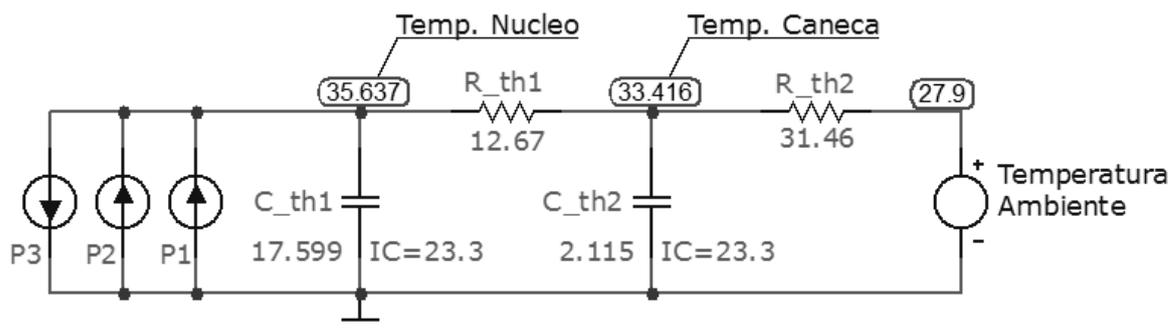


**Figura 48 - Erro da Temperatura da Caneca (18 x 40 mm)**



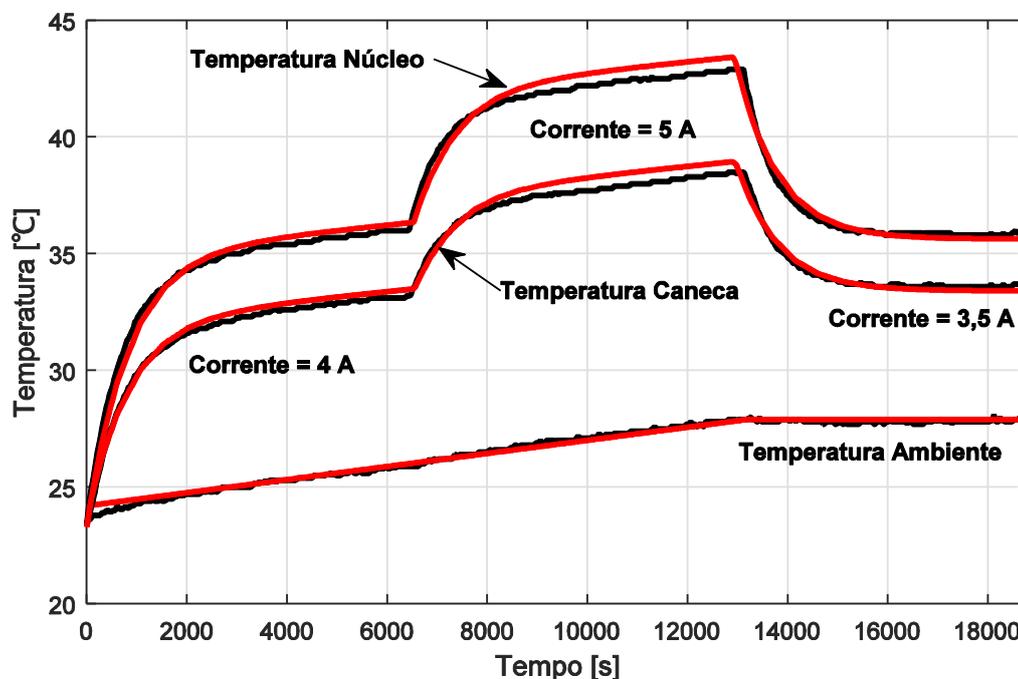
Após a caracterização inicial, o teste foi estendido para verificar o comportamento do modelo durante variações de corrente. A Figura 49 mostra o circuito adaptado para simular a condição real aplicada. Foram inseridas duas fontes de corrente. A fonte  $P_2$  faz a corrente simulada aumentar para 5 A e fonte  $P_3$  é acionada para que a corrente seja de 3,5 A.

Figura 49 - Circuito obtido na simulação estendida (18 x 40 mm)

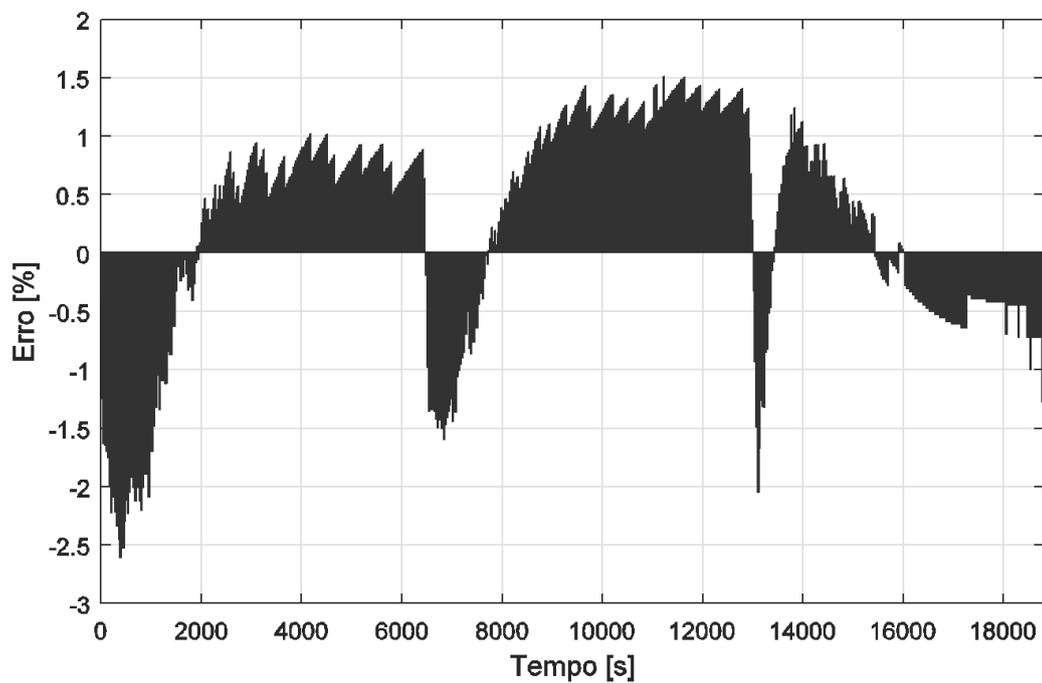
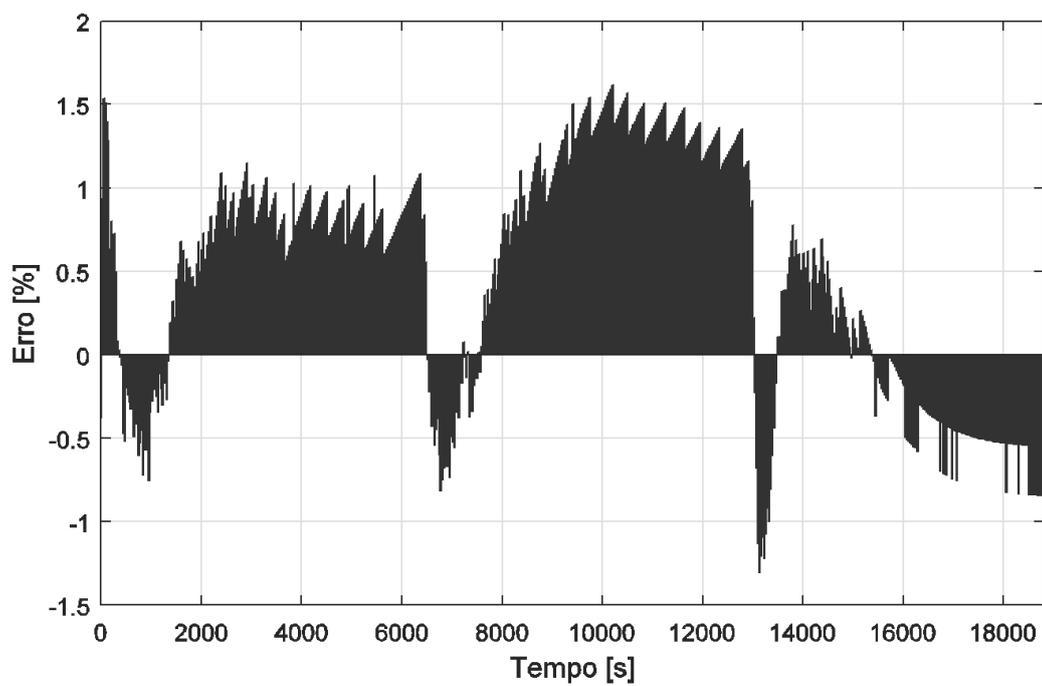


A Figura 50 mostra a comparação entre os valores medidos e a simulação estendida. Em vermelho é mostrada a curva obtida pela resposta do circuito proposto e a curva em preto mostra os valores medidos de temperatura.

Figura 50 - Comparação entre medidas e simulação estendida (18 x 40 mm)



A Figura 51 e a Figura 52 mostram o gráfico do erro entre os valores simulados e os valores medidos no núcleo e na caneca do capacitor, respectivamente.

**Figura 51 - Erro da Temperatura de Núcleo (18 x 40 mm)****Figura 52 - Erro da Temperatura de Caneca (18 x 40 mm)**

## 6.5 SÍNTESE DOS RESULTADOS

A partir do estudo realizado, foi possível obter a relação de parâmetros térmicos dos capacitores eletrolíticos de alumínio, conforme os valores mostrados na Tabela 11.

**Tabela 11 - Síntese dos parâmetros térmicos obtidos**

Dimensão Capacitor	$R_{th1} \left[ \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}} \right]$	$R_{th2} \left[ \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}} \right]$	$C_{th1} \left[ \frac{\text{J}}{^{\circ}\text{C}} \right]$	$C_{th2} \left[ \frac{\text{J}}{^{\circ}\text{C}} \right]$
12,5 x 25 mm	17,81	55,28	4,17	0,7533
16 x 25 mm	18,83	38,76	5,68	1,094
18 x 35 mm	14,57	29,79	9,57	1,926
18 x 40 mm	12,67	31,46	17,60	2,115

Os parâmetros térmicos estão relacionados às dimensões físicas dos capacitores. Capacitores maiores possuem menores valores de resistências térmicas, devido à área, o que representa uma maior facilidade para a troca de calor. Associada a maior facilidade para trocar de calor, também está uma maior capacidade de corrente de ondulação, visto que a potência dissipada  $P_D$  pode ser maior, resultando em um aquecimento menor no componente quando comparado com capacitores de dimensões menores. As capacitâncias térmicas também estão associadas à dimensão do capacitor, mais especificamente com a massa de alumínio que está na bobina interna e na caneca do capacitor. Quanto maior a capacitância térmica, tanto da caneca quanto do núcleo, maior será a inércia térmica associada, com isso o capacitor demora mais tempo para aquecer e para esfriar. Mais uma vez, os capacitores maiores tem vantagem porque podem ser submetidos a sucessivos pulsos de sobre corrente, por curtos períodos de tempo, sem que sua temperatura atinja um valor indesejado.

Na Tabela 11 pode ser observado que a resistência térmica  $R_{th1}$  da dimensão 16 x 25 mm foi maior do que o valor da resistência térmica  $R_{th1}$  da dimensão 12,5 x 25 mm. Isso acontece porque o comprimento da bobina interna do capacitor pode variar dependendo da capacitância nominal, família e outros fatores, sendo

assim, nem sempre a bobina está com o comprimento máximo e distância mínima entre bobina e caneca, o que tem influência no valor da resistência térmica.

A Tabela 12 mostra os valores dos parâmetros térmicos para um mesmo capacitor testado em diferentes temperaturas ambientes. As diferenças entre os valores de capacitância térmica se devem ao fato de que o calor específico do Alumínio tem um valor diferente para temperaturas mais altas. Já os valores de resistência térmica são influenciados pela existência de uma circulação de ar, mesmo que mínima possível, no interior da estufa. Outro fator que pode influenciar é porque na temperatura de 125 °C a condutividade térmica do elemento interno, composto por papéis, folhas de alumínio e eletrólito sofre uma variação no comportamento da condução térmica em relação a temperatura ambiente. Sendo assim, para grandes variações de temperatura, no caso, 100 °C, o modelo térmico não apresenta um comportamento linear, precisando ter seu estudo realizado dentro da faixa de temperaturas de interesse.

**Tabela 12 – Parâmetros 18 x 35 mm em diferentes temperaturas**

Dimensão 18 x 35 mm	$R_{th1} \left[ \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}} \right]$	$R_{th2} \left[ \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}} \right]$	$C_{th1} \left[ \frac{\text{J}}{^{\circ}\text{C}} \right]$	$C_{th2} \left[ \frac{\text{J}}{^{\circ}\text{C}} \right]$
25 °C	14,57	29,79	9,57	1,926
125 °C	19,63	13,09	8,95	2,044

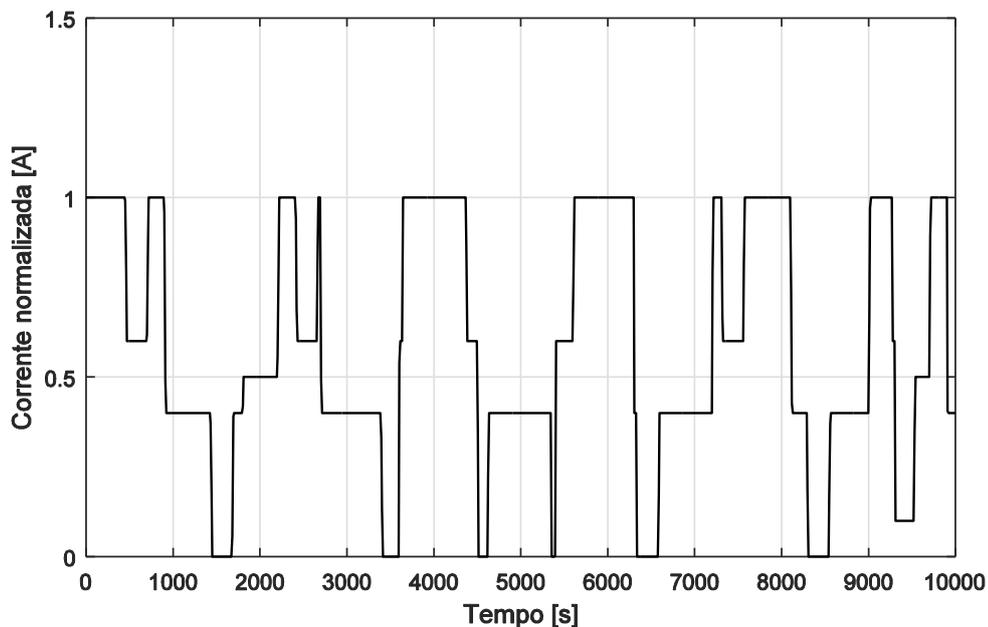
O novo modelo encontrado a partir dos valores da Tabela 12, na temperatura de 125 °C, também se comportou da forma esperada, apresentando erros relativos máximos de 0,6 %.

A partir dos resultados obtidos, é possível verificar que o modelo proposto fornece valores aceitáveis para variações de temperatura em torno de 30 °C em relação à temperatura ambiente do capacitor, isso não é um problema porque a temperatura ambiente é um parâmetro fornecido, sendo assim, o modelo pode ser obtido com referência nesta temperatura, ou em mais temperaturas de interesse.

Quando é estabelecido um modelo para o capacitor de estudo, dentro da faixa de temperatura de interesse, é possível aplicar na fonte de corrente o perfil desejado e verificar o comportamento da temperatura no interior e na caneca do capacitor.

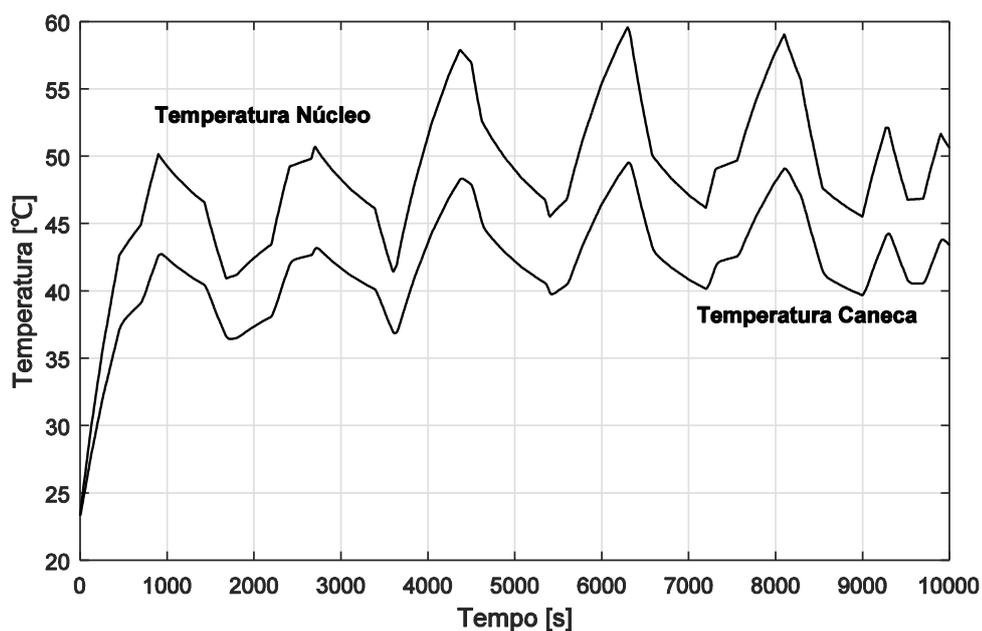
A Figura 53 mostra um perfil de corrente arbitrário que poderia representar o comportamento desejado da corrente para um módulo eletrônico automotivo. A corrente foi normalizada para o valor máximo de 5 A.

**Figura 53 - Perfil de corrente arbitrário**



Na Figura 54 é possível analisar se o capacitor vai operar acima da temperatura máxima permitida ou até mesmo verificar qual a expectativa de vida útil com base na temperatura de operação.

**Figura 54 - Comportamento da temperatura**



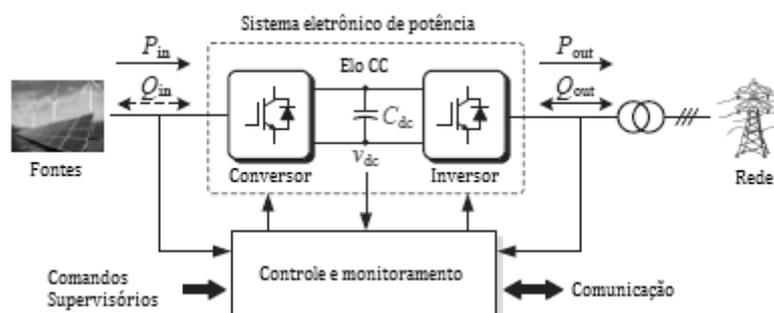
## 7 OUTRAS APLICAÇÕES PARA UTILIZAÇÃO DO MODELO TÉRMICO

Apesar de todo o estudo realizado ter sido focado nas necessidades da indústria automotiva, o comportamento térmico do capacitor pode ser ampliado para diversas aplicações ou sempre que o seu aquecimento, devido à corrente aplicada, for um motivo de preocupação para o correto funcionamento do restante do circuito.

Um exemplo de como o comportamento térmico de capacitores é um assunto atual e de considerável preocupação para o bom funcionamento dos circuitos está no artigo de 2015, chamado de Modelagem Térmica Instantânea do Capacitor no Elo de Corrente Contínua em Sistemas Fotovoltaicos (do inglês, *Instantaneous Thermal Modeling of the DC-Link Capacitor in Photovoltaic Systems*), que foi apresentado na Conferência de Eletrônica de Potência Aplicada do IEEE (APEC-2015).

De acordo com o artigo, os capacitores têm sido considerados como um dos pontos fracos em sistemas fotovoltaicos conectados à rede, e com isso, esforços tem sido feitos para se obter capacitores confiáveis e que possam ser utilizados em elos de corrente nas aplicações de energia fotovoltaica. O ponto quente dos capacitores é um dos motivos de falha e a modelagem térmica instantânea pode conduzir a uma melhor abordagem diante dos perfis exigidos durante a aplicação dos sistemas fotovoltaicos. A Figura 55 mostra um diagrama de como é o sistema fotovoltaico conectado à rede, na figura o capacitor de estudo é o  $C_{dc}$ . (YANG *et al.*, 2015)

**Figura 55 - Sistema de energia fotovoltaica**



**Fonte: (YANG *et al.*, 2015)**

Outra aplicação para o modelo térmico seria em reatores de lâmpadas LED. As lâmpadas LED surgiram no mercado com promessa de vida útil que pode chegar até 50 mil horas, mas o capacitor pode não suportar todo este tempo se operado em temperaturas elevada. O capacitor pode se tornar o ponto fraco e limitar a vida útil.

## 8 CONCLUSÃO

O estudo realizado estabeleceu uma correta interpretação do comportamento da temperatura de operação dos capacitores eletrolíticos de alumínio, tanto para a temperatura externa da caneca, quanto para a temperatura interna do núcleo. A partir dos dados obtidos, é possível fazer a análise do comportamento da temperatura ao longo do tempo, de acordo com o perfil de corrente de ondulação aplicado. Dessa maneira, a simulação da temperatura do capacitor ao longo do tempo pode fornecer as informações necessárias para a escolha do capacitor adequado ao projeto, determinação da temperatura máxima de operação e expectativa de vida útil.

Nos testes realizados, ocorreram alguns desvios entre os valores medidos e os valores simulados. Os maiores erros encontrados, foram devido ao modelo proposto não considerar o atraso entre o aquecimento do núcleo e da caneca. Este atraso também está relacionado com a massa do capacitor, pois quanto maior a massa, maior a dimensão do capacitor, e com isso, maior o tempo para que o calor seja transferido do núcleo para a caneca. Para estes pontos de atraso, os erros entre valores medidos e simulados foram de no máximo 4 %. Na comparação entre os valores simulados e medidos em regime permanente, os erros obtidos foram menores do que 0,5 %. Os erros considerados levaram em conta apenas uma medição. Para uma melhor definição de erro, deveriam ser consideradas mais medições para com isso garantir a variabilidade do experimento.

Pela análise dos erros, é possível concluir que os parâmetros de resistência térmica, que são obtidos a partir dos valores em regime permanente, são mais fáceis de serem calculados e apresentam erros menores. Já os parâmetros de capacitância térmica, que estão relacionados ao comportamento temporal da temperatura, são valores mais difíceis de serem calculados e apresentam erros maiores. Além disso, a capacitância térmica é determinada a partir da constante de tempo  $\tau_{th}$ , um valor obtido a partir da curva de subida da temperatura, que pode apresentar maior incerteza associada, devido ao tempo de amostragem e dinâmica do sistema.

Foi observado que para grandes variações de temperatura ambiente, o modelo térmico do capacitor sofre alterações, o que demonstra a não linearidade do comportamento térmico. Mas esta não linearidade, não representa grandes prejuízos

porque a *ESR* dos capacitores é na ordem de alguns  $m\Omega$ , sendo assim, a potência dissipada total não tende a crescer muito com a corrente aplicada, mesmo para altas correntes de ondulação, ou seja, para um capacitor aumentar 30 °C em relação à temperatura ambiente, é necessária uma corrente bastante alta, muitas vezes não suportada pela especificação técnica do componente.

Dessa forma, o estudo forneceu dados para avaliar o comportamento da temperatura dos capacitores quando um perfil de corrente é aplicado. Conforme foi discutido, a análise do perfil de corrente de uma aplicação é de extrema importância, pois os resultados mostram se as condições de operação do capacitor superarão a temperatura máxima especificada no intervalo de tempo considerado. Com isso, é possível escolher um componente que melhor se adapta à aplicação e que mesmo na pior condição de operação, tenha um resultado satisfatório.

O estudo do comportamento térmico dos capacitores pode ser estendido, em trabalhos futuros, para capacitores de outras dimensões disponíveis no mercado. Uma abordagem que poderia ampliar o conhecimento relacionado ao comportamento térmico dos capacitores, seria a realização de experimentos com capacitores de diferentes construções, tais como: construção axial, arranque de motor, capacitores do tipo *snap-in* e outros.

Para um projeto de pesquisa mais avançado, o estudo do comportamento térmico poderia abordar diferentes núcleos de capacitores, porque dependendo da capacitância nominal, tensão e série, a massa do núcleo pode variar, assim como o espaçamento entre núcleo e caneca interna, o que terá como resultado a variação dos parâmetros térmicos do capacitor.

A partir dos dados obtidos também é possível realizar estudos para melhorias na transferência de calor dos capacitores, ou seja, para a redução dos valores de resistência térmica, e com isso, uma melhor dissipação do calor gerado internamente, aumentando também a capacidade de corrente de ondulação.

## REFERÊNCIAS

RIBBENS, W. B. **Understanding Automotive Electronics**. 6. ed. Boston: Newnes, 2002. 480 p. Capítulo 1.

POGGETTO, G. D. **Critérios para seleção da arquitetura elétrica veicular em mercados emergentes**, São Paulo, 21 jul 2009. 195.

CORTEZ, D. F. et al. IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS. **DC–DC Converter for Dual-Voltage Automotive Systems Based on Bidirectional Hybrid Switched-Capacitor Architectures**, 62, May 2015. 9.

CVEL - CLEMSON VEHICULAR ELECTRONICS LABORATORY. **www.cvel.clemson.edu**. Disponível em: <<http://www.cvel.clemson.edu/auto/systems/images/auto-systems04.png>>. Acesso em: 8 Agosto 2015.

EPCOS AG 2014. **Aluminum Electrolytic Capacitors**, dez. 2014. Disponível em: <<http://en.tdk.eu/tdk-en/529362/products/product-catalog/aluminum-electrolytic-capacitors>>. Acesso em: 15 ago. 2015.

BOSCH, R. **Manual de Tecnologia Automotiva**. 25. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2005.

AUTOMOTIVE ELECTRONICS COUNCIL. **Automotive Electronics Council**. Disponível em: <<http://www.aecouncil.com/>>. Acesso em: 12 set. 2015.

AUTOMOTIVE ELECTRONICS COUNCIL. **AEC - Q200 Stress Test Qualification For Passive Components**. [S.l.]: Automotive Electronics Council, v. REV D, 2010. 133 p. Disponível em: <[http://www.aecouncil.com/Documents/AEC\\_Q200\\_Rev\\_D\\_Base\\_Document.pdf](http://www.aecouncil.com/Documents/AEC_Q200_Rev_D_Base_Document.pdf)>. Acesso em: 20 set. 2015.

HTTP://M.EET.COM. **http: //m.eet.com**, 2015. Disponível em: <<http://m.eet.com/media/1072630/cypressFigure1Updated.jpg>>. Acesso em: 5 set. 2015.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R. **Fundamentos de Física**. Tradução de Ronaldo Sérgio de Biasi. 8ª. ed. Rio de Janeiro: LTC, v. 2, 2009.

FREESCALE SEMICONDUCTOR, INC. **Thermal Analysis of Semiconductor Systems**, 2008. 24. Disponível em: <[http://cache.freescale.com/files/analog/doc/white\\_paper/BasicThermalWP.pdf](http://cache.freescale.com/files/analog/doc/white_paper/BasicThermalWP.pdf)>. Acesso em: 27 set. 2015.

SWIFT, ; MOLINSKI, S.; LEHN, W. A **Fundamental Approach to Transformer Thermal Modeling—Part I: Theory and Equivalent Circuit**. IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, 16, abr. 2001.

GROTE, K.-H.; ANTONSSON, E. K. **Springer Handbook of Mechanical Engineering**. Heidelberg: Springer , v. 1, 2008.

YANG, et al. **Instantaneous thermal modeling of the DC-link capacitor in PhotoVoltaic systems**. Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Aalborg, 15-19 Mar 2015. 2733-2739.