

DEIVID FARIA DE SOUZA

**ESTUDO COMPARATIVO DE MÉTODOS
PARA MEDAÇÃO DA IMPEDÂNCIA TÉRMICA
DE MÓDULOS IGBT APLICADOS A ENSAIOS
DE CONFIABILIDADE**

Joinville

2025

DEIVID FARIA DE SOUZA

**ESTUDO COMPARATIVO DE MÉTODOS PARA
MEDIÇÃO DA IMPEDÂNCIA TÉRMICA DE MÓDULOS
IGBT APLICADOS A ENSAIOS DE CONFIABILIDADE**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE SISTEMAS
ELETRÔNICOS

Orientador: Prof. Diego Santos Greff, Dr

Joinville

2025

DEIVID FARIA DE SOUZA

**ESTUDO COMPARATIVO DE MÉTODOS PARA MEDAÇÃO DA IMPEDÂNCIA
TÉRMICA DE MÓDULOS IGBT APLICADOS A ENSAIOS DE CONFIABILIDADE/
DEIVID FARIA DE SOUZA. – Joinville, 2025-**

39p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof. Diego Santos Greff, Dr

**Dissertação (Mestrado) – UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE SISTEMAS ELETRÔ-
NICOS, 2025.**

- 1. Engenharia de Sistemas Eletrônicos. 2. Caracterização de Impedância Térmica.**
- 3. Confiabilidade de Módulos IGBT. I. Santos Greff, Diego. II. Universidade Federal de Santa Catarina. III. Título.**

DEIVID FARIA DE SOUZA

**ESTUDO COMPARATIVO DE MÉTODOS PARA
MEDIÇÃO DA IMPEDÂNCIA TÉRMICA DE MÓDULOS
IGBT APLICADOS A ENSAIOS DE CONFIABILIDADE**

O presente trabalho em nível de Mestrado foi avaliado e aprovado, em 18 de dezembro de 2024, pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Diego Santos Greff, Dr
Orientador

Sergio Vidal Garcia Oliveira
UDESC

Allan Fagner Cupertino
UFJF

Joinville
2025

Este trabalho é dedicado aos meus queridos pais.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, por me agraciar com paz, saúde, serenidade e determinação ao longo desta jornada.

Aos meus pais, pelo apoio e incentivo incondicional em todas as etapas da minha trajetória.

Ao meu orientador, professor Dr. Diego Santos Greff, pela paciência, esclarecer minhas dúvidas ao longo deste estudo, e por constantemente me desafiar.

À WEG, por incentivar seus colaboradores a se desenvolverem profissionalmente.

Ao Itamar Fernandes Soares, pelas inúmeras discussões e sugestões durante a execução da pesquisa.

Ao Odilgei Hess Gonçalves, pelas valiosas contribuições, sugestões e discussões realizadas durante a execução dos experimentos.

Aos amigos Tiago Lemes da Silva, Odair da Rosa, Márcio Denilson Bouldann, Leandro Fisch e Mateus Abreu de Andrade, pelo apoio constante ao longo desta jornada do mestrado.

A todos que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a concepção desta dissertação.

À Roberta, pela revisão do texto.

“Estejam vigilantes, mantenham-se firmes na fé, sejam homens de coragem, sejam fortes.”

(1 Coríntios 16:13)

RESUMO

Esta dissertação investiga métodos para medir a impedância térmica em módulos IGBT, com foco na análise de confiabilidade, identificação de falhas e desempenho térmico. São discutidos os principais modos de falha, os tipos de encapsulamento e a relevância dos ensaios de vida acelerada na avaliação de módulos IGBT. Simulações baseadas na variação dos parâmetros do modelo de Foster foram realizadas para representar a degradação do encapsulamento, avaliando seus impactos na temperatura virtual de junção, na impedância térmica e na função estrutural cumulativa. Os resultados ajudam a identificar áreas críticas de potencial falha. No âmbito experimental, foram realizadas medições da temperatura virtual de junção e comparações entre os métodos estático e dinâmico para a determinação da impedância térmica, ambos apresentando resultados consistentes. O estudo enfatiza a necessidade de considerar a não linearidade da condutância térmica em função da temperatura, fundamental para análises precisas. Adicionalmente, são comparados dois métodos de medição da impedância térmica entre a junção e o case em módulos de potência sem baseplate: o método estático, que monitora a curva de resfriamento após a aplicação de um pulso prolongado de potência, e o método dinâmico, baseado na aplicação sucessiva de pulsos de potência de diferentes larguras.

Palavras-chave: Caracterização de Impedância Térmica; Confiabilidade de Módulos IGBT; Medição de Temperatura Virtual de Junção; Análise de Função Estrutural Cumulativa; Método de Medição Estático; Método de Medição Dinâmico.

ABSTRACT

This dissertation investigates methods for measuring thermal impedance in IGBT modules, focusing on reliability analysis, fault identification, and thermal performance. The main failure modes, encapsulation types, and the relevance of accelerated lifetime testing for IGBT modules are discussed. Simulations based on variations in Foster model parameters were conducted to represent encapsulation degradation, assessing its impacts on virtual junction temperature, thermal impedance, and cumulative structural function. The results contribute to identifying critical areas of potential failure. On the experimental side, virtual junction temperature measurements were carried out, along with comparisons between static and dynamic methods for determining thermal impedance, both yielding consistent results. The study highlights the importance of accounting for the nonlinearity of thermal conductance as a function of temperature, which is essential for accurate analyses. Additionally, two methods for measuring thermal impedance between the junction and the case in baseplate-less power modules are compared: the static method, which monitors the cooling curve after applying a prolonged power pulse, and the dynamic method, based on successive power pulses of varying widths.

Keywords: Thermal Impedance Characterization; Reliability of IGBT Modules; Virtual Junction Temperature Measurement; Cumulative Structure Function Analysis; Static Measurement Method; Dynamic Measurement Method.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Distribuição de vida útil típica de conversores eletrônicos.	26
Figura 2 – Registro de falha em componentes.	27
Figura 3 – Diagrama de Causa Efeito com os principais modos de falha em campo do IGBT.	29
Figura 4 – Mapa de aplicações do IGBT.	32
Figura 5 – Evolução do encapsulamento ao longo das gerações do IGBT.	33
Figura 6 – Perdas por comutação.	34
Figura 7 – Estrutura do encapsulamento.	35
Figura 8 – Condutividade térmica em função da temperatura.	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Materiais que compõem o encapsulamento. 35

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
HVDC	High Voltage Direct Current
CTE	Coefficient of Thermal Expansion
DBC	Direct Bonded Copper
FDP	Função Densidade de Probabilidade
FDA	Função de Distribuição Acumulada
FEC	Função Estrutural Cumulativa
DUT	Device under test
TSEP	Temperature sensitive electrical parameters
NTC	Coeficiente de Temperatura Negativo
PTC	Coeficiente de Temperatura Positivo

LISTA DE SÍMBOLOS

P_T	Perdas Totais
E_{on}	Energia dissipada ao ligar o IGBT
E_{off}	Energia dissipada ao desligar o IGBT
P_{ch}	Perdas por comutação
P_{cond}	Perdas por condução
T_{vjmax}	Temperatura Virtual de Junção Máxima
Δl	Variação do comprimento
l_0	Comprimento inicial
ΔT	Variação de Temperatura
β	Fator de forma
α	Fator de escala
λ	Taxa de falha
FA	Fator de Aceleração
T_{op}	Tempo de Operação
T_{ac}	Tempo de ensaio acelerado
N_f	Número de ciclos até a falha
k_1	Constante de ajuste da curva
k_2	Constante de ajuste da curva
E_a	Energia de ativação
k_b	Constante de Boltazmann
C	Contante de proporcionalidade
T_{jm}	Temperatura Média de Junção
t_{on}	Tempo de acionamento do interruptor

D	Diâmetro do fio
I	Corrente por fio
V	Tensão sobre o interruptor
R_{th}	Resistência térmica
λ_{th}	Condutividade térmica
A	Área
d	Espessura
C_{th}	Capacitância térmica
c	Capacidade térmica do material
ρ	Densidade do material
T_{vj}	Temperatura Virtual de Junção
T_c	Temperatura de Case
T_h	Temperatura do Dissipador
I_C	Corrente de Coletor
Z_{thJC}	Impedância Térmica entre Junção e o Case
Z_{thJH}	Impedância Térmica entre Junção e o Dissipador
Z_{th}	Impedância Térmica
τ_{th}	Constante térmica
$R(\tau)$	Espectro de constante de tempo
$R_{th\Sigma}$	Resistência térmica acumulada
$C_{th\Sigma}$	Capacitância térmica acumulada
V_{cesat}	Tensão entre coletor e emissor no estado de condução
$\alpha_{calibração}$	Coeficiente de calibração mV/°C
T_{vj0}	Temperatura Virtual de Junção inicial
t_d	Tempo de atraso

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	25
1.1	CONFIABILIDADE EM CONVERSORES ELETRÔNICOS	26
1.2	INTERRUPTOR DE POTÊNCIA	28
1.3	OBJETIVOS	28
1.3.1	Objetivo Geral	28
1.3.2	Objetivos Específicos	29
1.4	PUBLICAÇÕES RESULTANTES	29
1.5	ESTRUTURA DO DOCUMENTO	30
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	31
2.1	O MÓDULO IGBT	31
2.1.1	Características Dinâmicas de Comutação do IGBT	32
2.1.2	Características do Encapsulamento	33
2.1.2.1	Impacto da Temperatura na Condutividade Térmica dos Materiais	36
2.2	MODOS DE FALHA EM IGBT	36
	REFERÊNCIAS	39

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, as transformações nas matrizes energéticas globais e nos sistemas de transporte têm ganhado destaque, com ênfase na redução das emissões de dióxido de carbono, um desafio crítico para a mitigação das mudanças climáticas. Uma das estratégias mais eficazes para alcançar essa meta é a transição para fontes de energia renováveis, como a solar, eólica, e a promoção da mobilidade elétrica. A introdução de veículos elétricos, incluindo automóveis e caminhões, tornou possível devido aos avanços significativos nas tecnologias das baterias e nas soluções de carregamento eficientes ([PEYGHAMI; PALENSKY; BLAABJERG, 2020](#)).

No epicentro dessa transformação tecnológica encontra-se a eletrônica de potência, uma área que, desde os anos 1980, passou de aplicações focadas no controle de velocidade de máquinas elétricas para um papel central na geração de energia e na eletrificação dos transportes. A eletrônica de potência moderna é essencial para garantir a eficiência e a sustentabilidade das novas tecnologias, otimizando o controle da distribuição de energia e melhorando a performance dos sistemas elétricos, como conversores de energia e sistemas de tração elétrica.

Entre os componentes mais críticos desses sistemas, destacam-se os interruptores de potência, que desempenham um papel vital no controle do fluxo de energia. Dentre os dispositivos semicondutores utilizados, encontram-se o diodo, tiristor, Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistors (MOSFET) e Insulated Gate Bipolar Transistors (IGBT). Embora os diodos operem de forma passiva, outros dispositivos como os IGBTs exigem sinais externos para sua comutação, sendo fundamentais na modulação e conversão de energia elétrica. A performance e confiabilidade desses componentes, em especial os IGBTs, são importantes para o funcionamento eficiente dos conversores de potência e a gestão do fluxo energético em sistemas de eletrônica de potência.

As falhas em interruptores de potência podem causar a interrupção do funcionamento dos conversores de energia, com implicações diretas na operação de sistemas elétricos, como veículos elétricos e usinas de geração renovável. Em sistemas sem redundância, isso pode resultar em paradas imprevistas, perdas em eficiência e impactos financeiros. Assim, a análise de falhas e a previsão de sua vida útil são aspectos indispensáveis no campo da Confiabilidade em Eletrônica de Potência, uma disciplina interdisciplinar que envolve engenheiros, estatísticos e cientistas de materiais.

A compreensão dos mecanismos de falha, que incluem degradação por estresse térmico e elétrico, e a implementação de modelos preditivos são fundamentais para melhorar a robustez dos dispositivos e garantir a longevidade dos sistemas. Através do monitoramento

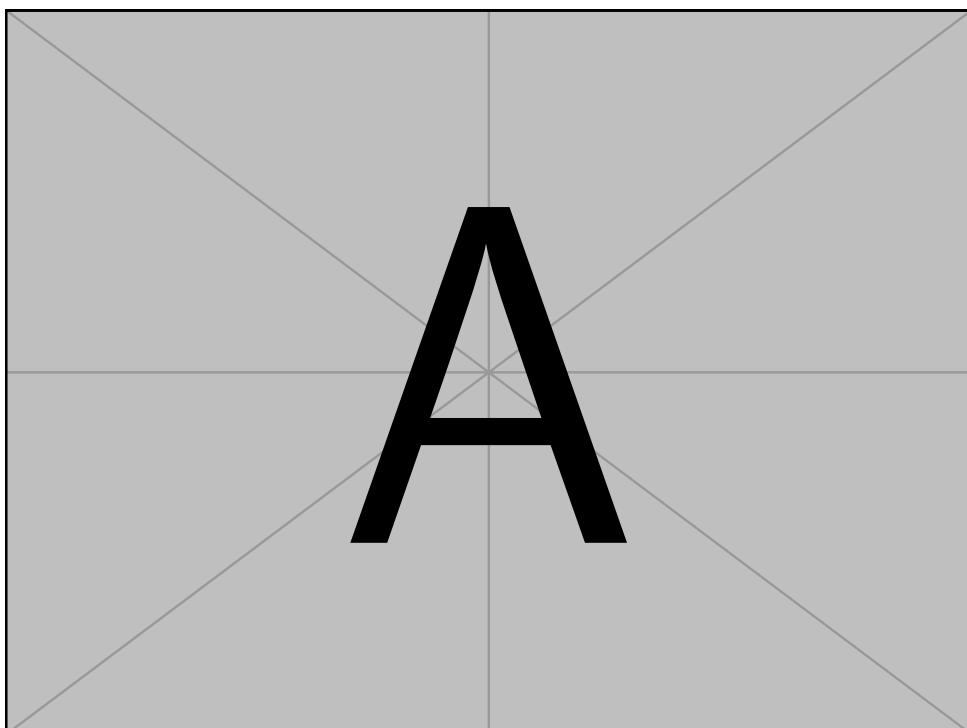
constante e da utilização de técnicas como a manutenção preditiva, é possível reduzir a ocorrência de falhas catastróficas e, consequentemente, aumentar a disponibilidade e a eficiência dos sistemas baseados em eletrônica de potência.

1.1 CONFIABILIDADE EM CONVERSORES ELETRÔNICOS

A densidade de potência e a eficiência têm sido determinantes na evolução da eletrônica de potência nas últimas décadas. Esses avanços foram impulsionados pelo desenvolvimento de novas tecnologias de semicondutores de potência, pela inovação nas topologias de circuitos e pelos aprimoramentos nos métodos de controle.

As aplicações dos conversores eletrônicos evoluíram significativamente, tornando-se mais críticas e complexas. Elas abrangem desde a geração, transmissão e distribuição de energia até o consumidor final. Nos últimos anos, setores como a indústria automotiva e aeroespacial têm direcionado os projetos de eletrônica de potência para um novo patamar, com foco direcionado à confiabilidade. Uma pesquisa conduzida pela ECPE, envolvendo mais de 81 projetistas da União Europeia, revelou que a vida útil típica dos conversores eletrônicos varia entre 10 e 20 anos. A Figura 1 exibe que a meta predominante para a vida útil dos produtos está entre 5 a 20 anos.

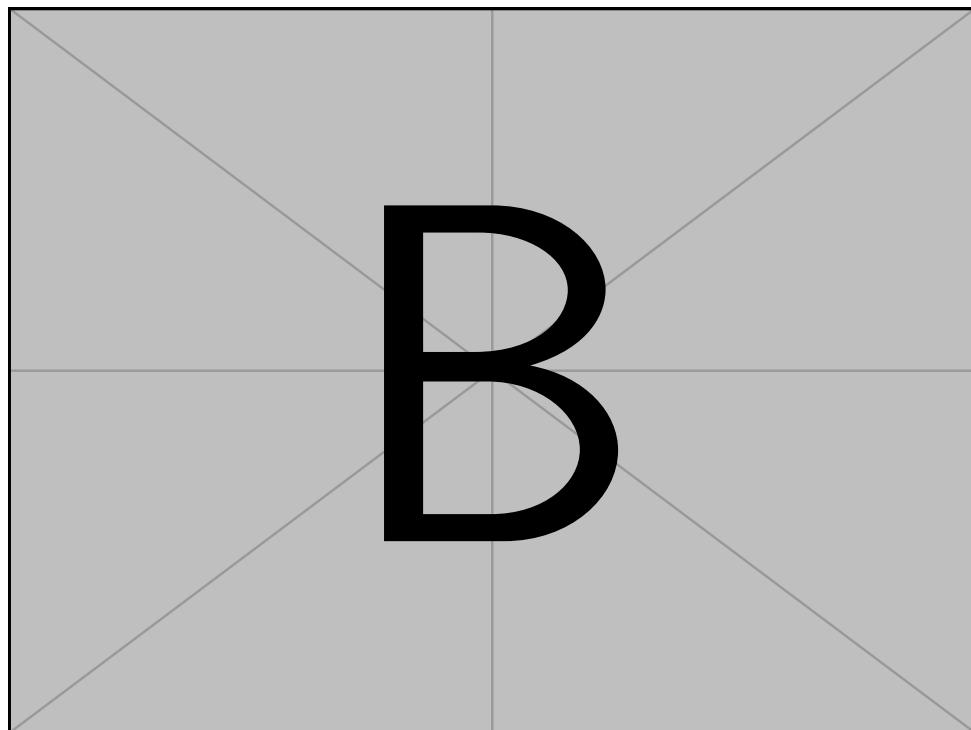
Figura 1 – Distribuição de vida útil típica de conversores eletrônicos.



Fonte: Adaptado de (FALCK et al., 2018)

Entre os componentes que compõem os sistemas de potência, estudos dos registro de falhas indicam que os interruptores de potência e os capacitores estão entre os elementos mais suscetíveis a falhas conforme apresentado na Figura 2. Devido à ampla gama de aplicações, os conversores eletrônicos estão expostos a diferentes tipos de estresse, como altas temperaturas de operação, ciclos térmicos, poeira, vibrações, interferência eletromagnética e radiação. Esses fatores aumentam a complexidade do projeto e a importância de se considerar a confiabilidade desde o início do desenvolvimento.

Figura 2 – Registro de falha em componentes.



Fonte: Adaptado de (FALCK et al., 2018)

A confiabilidade é um fator crítico de desempenho que deve ser levado em conta em todas as fases do ciclo de vida de um conversor de potência: do projeto à manufatura e à operação em campo. As pesquisas sobre confiabilidade em conversores eletrônicos, conduzidas tanto pela indústria quanto pela academia, dividem-se em duas áreas principais. A primeira envolve métodos de monitoramento dos dispositivos, com o objetivo de prever falhas e acompanhar o processo de degradação dos componentes. A segunda se concentra em técnicas de tolerância a falhas, permitindo que o sistema continue operando, mesmo após a falha de algum componente, por meio de mecanismos de redundância.

1.2 INTERRUPTOR DE POTÊNCIA

O IGBT combina as características do MOSFET e do Transistor Bipolar, permitindo sua operação em dezenas de quilohertz e com gate isolado, propriedades herdadas do MOSFET. Adicionalmente, o IGBT apresenta a capacidade de condução característica do Transistor Bipolar, destacando-se por sua baixa resistência de condução entre o emissor e o coletor, o que resulta em uma condução de corrente eficiente. Essa integração de propriedades confere ao IGBT alta eficiência na comutação de potência.

Entretanto, o projeto, a manufatura e as condições de operação dos IGBTs podem originar modos de falha que comprometem tanto o desempenho quanto a vida útil desses dispositivos. A vida útil dos módulos IGBT abrange várias etapas críticas, desde a qualificação inicial no fabricante, passando pelo transporte e integração ao sistema, até o comissionamento final. Durante esse percurso, choques mecânicos, térmicos e manuseio inadequado podem comprometer sua confiabilidade e resultar em falhas precoces.

Em operação, esses módulos enfrentam estresses variados, como sobretensão e sobrecorrente, além de degradação gradual sob carga sustentada, o que pode antecipar o fim de sua vida útil. Para lidar com esses desafios, fabricantes de conversores e módulos IGBT adotam uma abordagem de projeto orientada à confiabilidade, integrando dados de falhas de campo e previsões operacionais no desenvolvimento. Testes de vida acelerada são então realizados para simular o desgaste e avaliar a confiabilidade de longo prazo desses dispositivos.

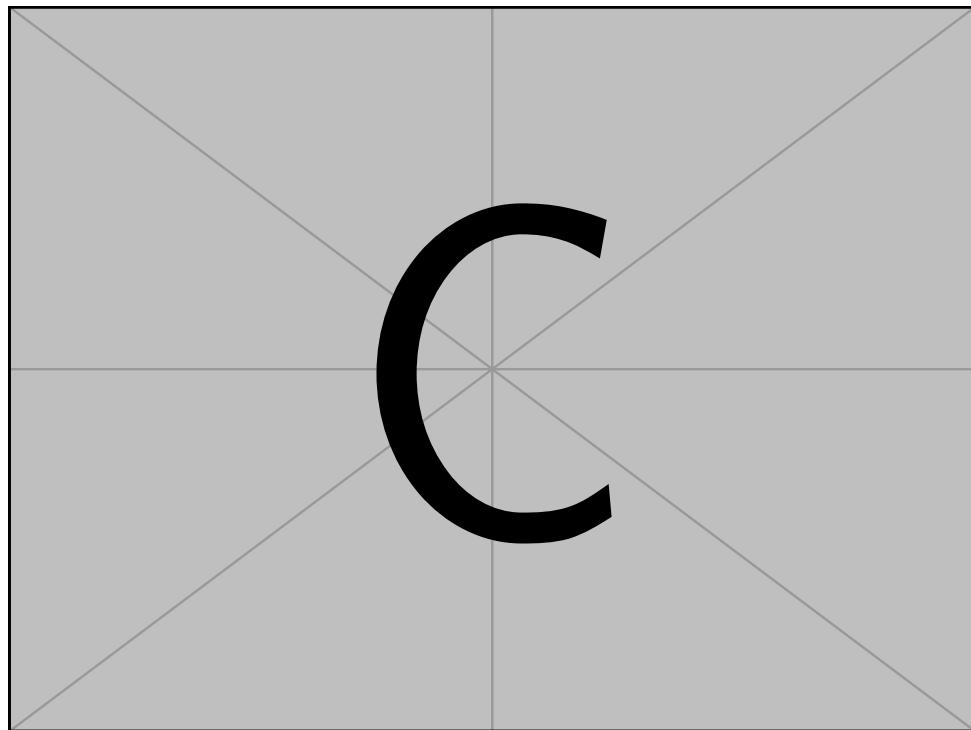
Modos de falha em IGBTs são um ponto crítico de estudo, especialmente em aplicações de alta potência e em ambientes de operação que exigem alta confiabilidade, como sistemas de recarga de veículos elétricos e infraestrutura industrial. Entender esses modos de falha é essencial para melhorar a durabilidade e a segurança de sistemas que utilizam esses componentes. A Figura 3 exibe o diagrama de causa e efeitos com os principais modos de falha encontrados no campo de IGBT.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta dissertação é comparar métodos de medição da impedância térmica em módulos IGBT sem baseplate. A determinação dessa grandeza é fundamental em ensaios de vida útil de módulos e em simulações térmicas, permitindo a avaliação da confiabilidade do componente e fornecer dados experimentais para a realização de simulações mais precisas.

Figura 3 – Diagrama de Causa Efeito com os principais modos de falha em campo do IGBT.



Fonte: Adaptado de (ABUELNAGA; NARIMANI; BAHMAN, 2021)

1.3.2 Objetivos Específicos

- Realizar um estudo do estado da arte sobre a confiabilidade de módulos IGBT.
- Executar simulações termoelétrica de módulos IGBT com as informações disponibilizadas pelo fabricante.
- Estudar métodos de medição da temperatura de junção e de impedância térmica do IGBT.
- Definir um procedimento de medição da temperatura de junção.
- Comparar métodos de medição de impedância térmica.

1.4 PUBLICAÇÕES RESULTANTES

Os resultados parciais obtidos durante o desenvolvimento deste trabalho foram publicados em formato de artigo no XVII Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência. A versão completa foi submetida e aceita pela Revista Eletrônica de Potência da SOBRAEP.

1.5 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

O presente trabalho é dividido em seis capítulos. No Capítulo 2, são discutidas as perdas em módulos IGBT, formas de encapsulamento, principais modos de falha, conceitos de confiabilidade e modelos de vida útil. No Capítulo 3, aborda-se a teoria de caracterização eletrotérmica, apresentando o conceito de Função Estrutural e os resultados das simulações. No Capítulo 4, é descrita a metodologia experimental, incluindo as abordagens, ferramentas e parâmetros utilizados para a realização dos experimentos. No Capítulo 5, são apresentados os resultados experimentais. Por fim, no Capítulo 6, são feitas as considerações finais, que resumem os principais achados deste estudo e sugerem possíveis trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta a base teórica necessária para a compreensão dos conceitos e teorias mais relevantes para a fundamentação da comparação dos métodos de medição da impedância térmica. A Seção 2.1 inicia com a descrição do módulo IGBT, suas características de comutação e tipos de encapsulamento. Em seguida, na Seção 2.2, são discutidos os principais modos de falha no módulo, resultantes do desgaste causado por estresses termomecânicos. Na sequência, a Seção 2.3 aborda os conceitos de confiabilidade, distribuição de Weibull e ensaios de vida acelerada. Por fim, a seção 2.4 apresenta uma breve descrição dos modelos de previsão de vida útil para módulos IGBT.

2.1 O MÓDULO IGBT

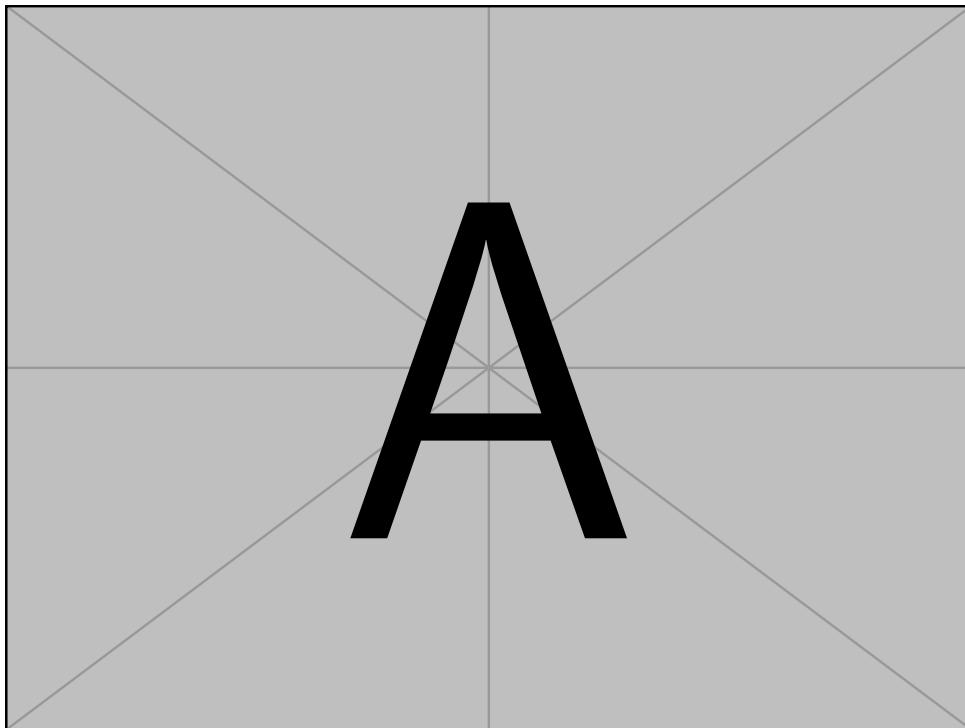
O IGBT possui um amplo espectro de aplicações, que abrange os setores de consumo, industrial, iluminação, transporte e geração de energia renovável. Suas características elétricas atrativas, simplicidade de controle, facilidade de fabricação e flexibilidade na velocidade de comutação contribuíram para um crescente interesse global. A Figura 4 apresenta as principais aplicações do IGBT, que variam desde reatores de lâmpadas, eletrodomésticos com motores, veículos elétricos, aplicações industriais que envolvem o controle de máquinas elétricas, até complexos sistemas de transmissão de energia e redes inteligentes.

A primeira versão desenvolvida do IGBT foi na década de 1980, atualmente se encontra em sua 7^a geração. O dispositivo alcançou ganhos significativos em densidade de potência e temperatura máxima de operação, principalmente devido às melhorias no encapsulamento. A Figura 5 ilustra a redução do tamanho do encapsulamento ao longo das gerações, mantendo os mesmos níveis de corrente e tensão operacionais. Essas inovações, além de reduzir o tamanho do componente, contribuem para a diminuição de custos, o que garante a competitividade do dispositivo ao longo dos anos.

A evolução do IGBT também pode ser observada nas temperaturas máximas de junção especificadas. Inicialmente, a temperatura máxima de T_{vj} era de 125°C. Atualmente, a temperatura padrão para IGBTs em módulos convencionais é de 150°C, enquanto que o IGBT discreto pode chegar a operar com temperaturas de até 175°C. O aumento da temperatura de operação máxima possibilitou a redução significativa no tamanho dos chips para uma mesma corrente nominal, graças ao aumento de T_{vj} .

A capacidade de operar em temperaturas de junção mais elevadas, aliada ao aprimoramento dos sistemas de dissipação térmica no encapsulamento, aumenta a densidade

Figura 4 – Mapa de aplicações do IGBT.



Fonte: Adaptado de (BALIGA, 2015)

de potência e contribui diretamente para a redução do tamanho do dispositivo e a sua eficiência.

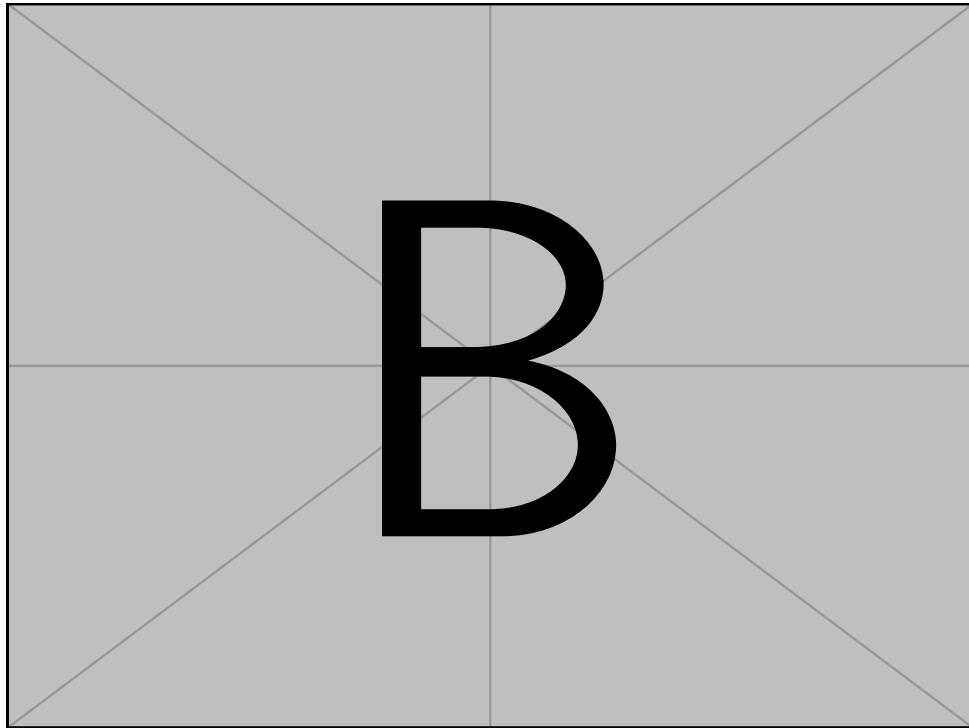
Atualmente, o IGBT de última geração pode operar com tensões de até 6,5 kV, isso o torna ideal em aplicações de alta potência, como tração elétrica, redes de transmissão High Voltage Direct Current (HVDC) e grandes sistemas industriais. Essa capacidade de lidar com altas tensões é um dos principais fatores que fazem do IGBT uma solução popular em sistemas de potência exigentes.

2.1.1 Características Dinâmicas de Comutação do IGBT

Os elementos parasitas que surgem das junções dos materiais semicondutores tipo N e tipo P que compõem o IGBT e influenciam significativamente o comportamento desse dispositivo. Durante a comutação, ocorrem atrasos, que causam uma sobreposição temporária entre a tensão e a corrente, como mostrado na Figura 6, o que resulta em dissipação de potência conhecida como perdas por comutação.

As perdas por condução ocorrem após o período de comutação devido às não idealidades do dispositivo, estas resultam em dissipação de potência ao longo do seu funcionamento. Essas perdas somadas às perdas por comutação, causam o aquecimento do semicondutor, elevando a T_{vj} . Os fabricantes especificam, em seus datasheets, o valor de

Figura 5 – Evolução do encapsulamento ao longo das gerações do IGBT.



Fonte: (IWAMURO; LASKA, 2017)

Temperatura Virtual de Junção Máxima (T_{vjmax}). Caso essa temperatura seja excedida o dispositivo pode sofrer danos permanentes que podem levar a sua falha prematura. As perdas totais são calculadas segundo a Equação 2.1:

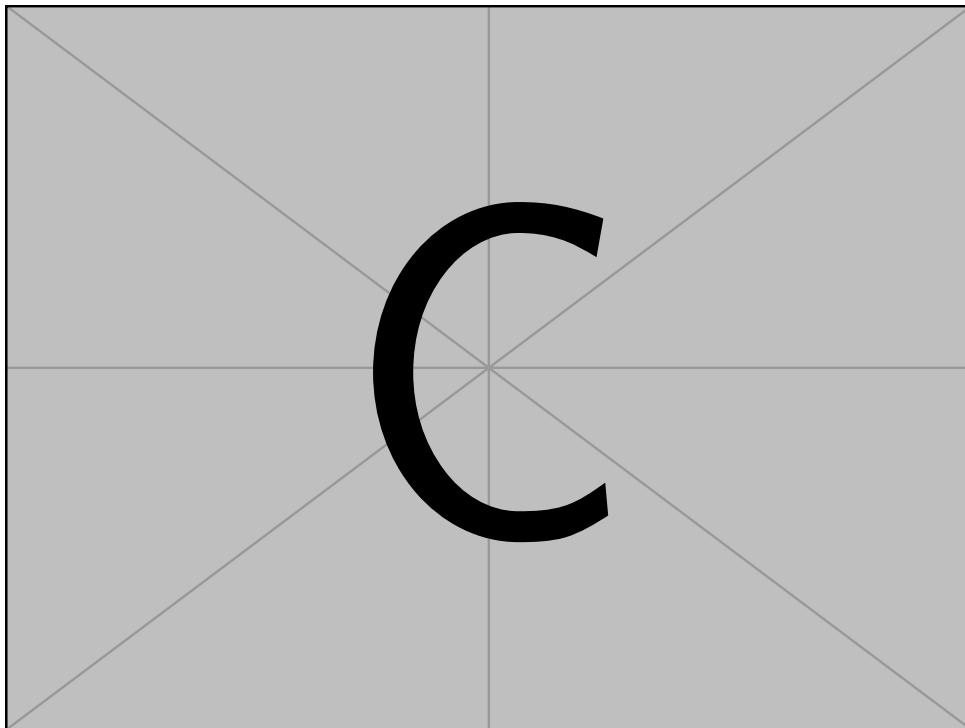
$$P_T = V_{cesat}I_C + (E_{on} + E_{off})f_{ch} \quad (2.1)$$

2.1.2 Características do Encapsulamento

O IGBT dissipa potência tanto durante a comutação quanto em condução, ao longo do tempo isso faz com que o semicondutor aqueça. Caso essa potência não seja adequadamente dissipada, o chip pode alcançar sua T_{vjmax} , o que pode danificar o dispositivo. A função do encapsulamento, além de fornecer proteção mecânica para o semicondutor, é criar um caminho para que o fluxo de calor gerado no chip seja transferido para o dissipador e, posteriormente, para o ambiente. Dessa forma, o encapsulamento deve ser construído com materiais que garantam a condução térmica e o isolamento elétrico do módulo.

O encapsulamento é construído com diversos materiais que possuem características térmicas e elétricas distintas. Existem dois tipos de encapsulamento utilizados em módulos de potência: com baseplate e sem base plate. O segundo é frequentemente escolhido

Figura 6 – Perdas por comutação.



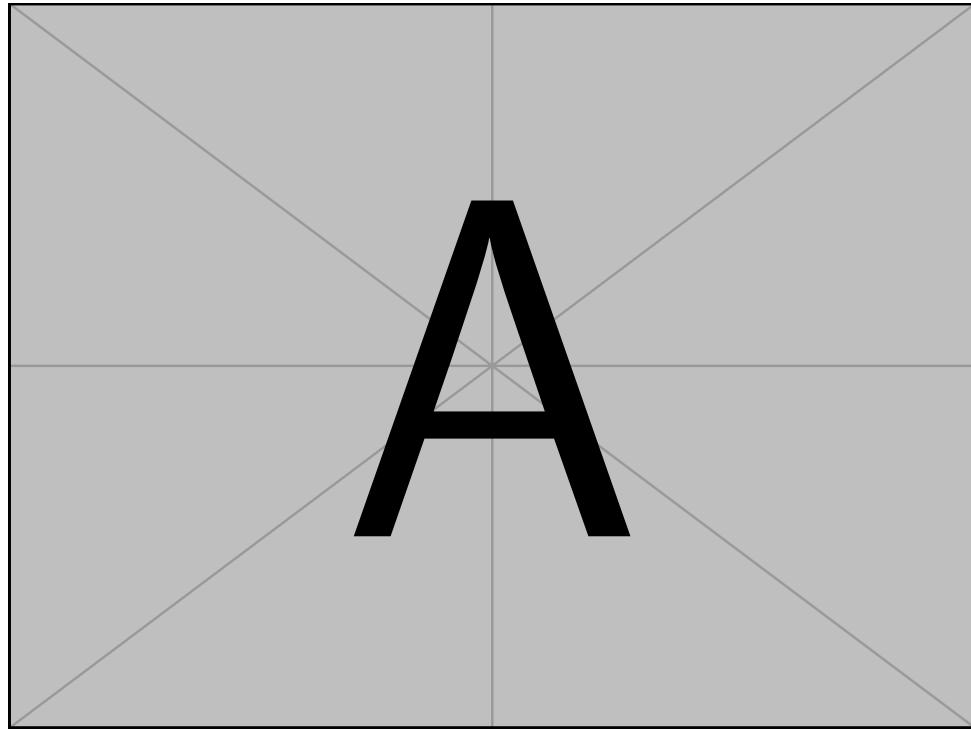
Fonte: (SCHEUERMANN; SCHMIDT, 2013)

para reduzir custos, pois elimina a necessidade de uma camada adicional de cobre espesso no módulo. A Figura 7 exibe um corte transversal do módulo, onde é possível ver as suas respectivas camadas. À direita, observa-se o encapsulamento sem baseplate, enquanto, à esquerda, é exibido o encapsulamento com baseplate.

As características de comutação do IGBT geram ciclos térmicos, caracterizados por períodos de aquecimento seguidos de resfriamento do módulo. Esses processos provocam a dilatação dos materiais que compõem o encapsulamento. Como esses materiais possuem Coefficient of Thermal Expansion (CTE) diferentes, ocorrem dilatações distintas, gerando estresse mecânico entre as camadas. A Tabela 1 contém os valores de condutância térmica, coeficiente de dilatação e capacidade dos principais materiais utilizados na construção do módulo.

Conforme observado na coluna CTE da Tabela 1, há uma variação significativa na ordem de grandeza do coeficiente entre diferentes materiais. Por exemplo, a relação entre o silício e o cobre apresenta uma variação relativa de aproximadamente 4,26. Isso significa que, enquanto o silício sofre uma variação de uma unidade de comprimento devido à temperatura, o cobre se expande 4,26 vezes mais. Essa diferença no comportamento térmico dos materiais gera desgaste. A Equação 2.2 descreve o cálculo de CTE.

Figura 7 – Estrutura do encapsulamento.



Fonte: Adaptado de (HARDER, 2021).

Tabela 1 – Materiais que compõem o encapsulamento.

Material	Condutividade Térmica [W/m*K]	Capacidade Térmica [kJ/(m³*K)]	CTE [10⁻⁶/K]
Silício	148	1650	4,1
Cobre	394	3400	17,5
Alumínio	230	2480	22,5
Prata	407	2450	19
Molibdênio	145	2575	5
Soldas	~70	1670	15-30
Al_2O_3 - DBC	24	3025	8,3
AlN DBC, AlN-AMB	180	24350	5,7
AlSiC(75% SiC)	180	22230	7

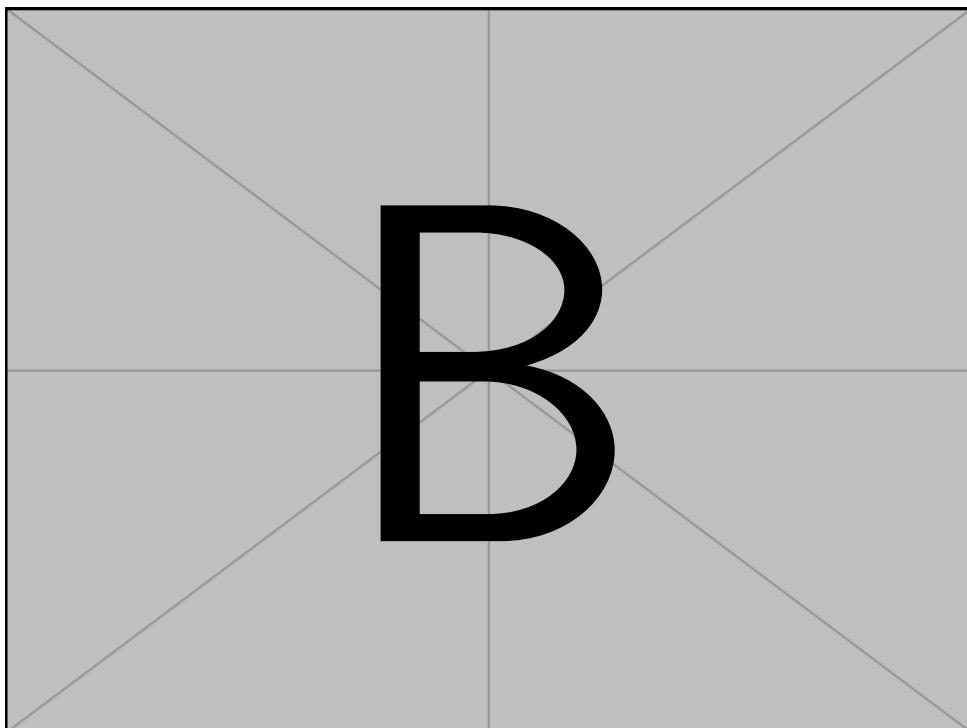
Fonte: Adaptado de (WINTRICH ULRICH NICOLAI, 2015)

$$CTE = \frac{\Delta l}{l_0 \Delta T} \quad (2.2)$$

2.1.2.1 Impacto da Temperatura na Condutividade Térmica dos Materiais

As variações de temperatura nos módulos IGBT podem alcançar ΔT superiores a 100 K, isso influência diretamente os parâmetros, anteriormente considerados constantes, como a condutividade térmica dos materiais. Essa ordem de magnitude de variação provoca uma redução significativa na condutividade térmica, dificultando a dissipação eficiente de calor do semicondutor para o dissipador. Os efeitos não lineares, tornam-se particularmente evidentes, quando os resultados experimentais são comparados às simulações, que frequentemente não consideram essas não linearidades. A Figura 8 ilustra a dependência da condutividade térmica do silício e da alumina em função da temperatura. É possível verificar que ocorre uma diminuição na condutividade térmica com o aumento da temperatura.

Figura 8 – Condutividade térmica em função da temperatura.



Fonte: (CALLISTER, 2020)

2.2 MODOS DE FALHA EM IGBT

Existem diversos fatores de estresse que podem levar um módulo de potência à falha, muitas vezes, como resultado da interação de múltiplos elementos. Dentre os modos de falha comumente observados em IGBT, destacam-se os estressores termo-mecânicos.

O encapsulamento do IGBT é feito com uma variedade de materiais que possuem propriedades mecânicas, elétricas e térmicas distintas. Durante a operação, o módulo sofre estresse térmico, o que pode levar a falhas.

REFERÊNCIAS

PEYGHAMI, S.; PALENSKY, P.; BLAABJERG, F. Modern power electronics for future energy systems. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2020. Citado na página [25](#).