

Universidade de Brasília - UnB  
Faculdade UnB Gama - FGA  
Engenharia Eletrônica

## **Análise de diferentes modelos de varistores sob condição de surto elétrico**

Autor: Natanaele do Nascimento Balica  
Orientador: Prof. Dr. Sandro Augusto Pavlik Haddad

Brasília, DF  
2022



Natanaele do Nascimento Balica

**Análise de diferentes modelos de varistores sob condição  
de surto elétrico**

Monografia submetida ao curso de graduação em (Engenharia Eletrônica) da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em (Engenharia Eletrônica).

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA

Orientador: Prof. Dr. Sandro Augusto Pavlik Haddad

Brasília, DF

2022

---

Natanaele do Nascimento Balica

Análise de diferentes modelos de varistores sob condição de surto elétrico/  
Natanaele do Nascimento Balica. – Brasília, DF, 2022-  
54 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Sandro Augusto Pavlik Haddad

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília - UnB  
Faculdade UnB Gama - FGA , 2022.

1. Surtos. 2. Dispositivo. I. Prof. Dr. Sandro Augusto Pavlik Haddad. II.  
Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. Análise de diferentes  
modelos de varistores sob condição de surto elétrico

CDU 02:141:005.6

---

Natanaele do Nascimento Balica

## **Análise de diferentes modelos de varistores sob condição de surto elétrico**

Monografia submetida ao curso de graduação em (Engenharia Eletrônica) da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em (Engenharia Eletrônica).

Trabalho aprovado. Brasília, DF, 11 de maio de 2022:

---

**Prof. Dr. Sandro Augusto Pavlik  
Haddad**  
Orientador

---

**Prof. Dr. Alex Reis**  
Convidado 1

---

**Prof. Dra. Loana Nunes Velasco**  
Convidado 2

Brasília, DF  
2022

# Agradecimentos

*Agradeço a minha meu família, meus pais, minhas primas e meus tios por todo o apoio, compreensão e ajuda durante todos esses anos que moldaram a pessoa que sou hoje.*

*Agradeço aos meus amigos Ana Paula, Jéssica, Jade, Luana, Pamela, Lucas e Júnior que me ensinaram a importância da amizade e o quanto essa relação é fortalecedora.*

*Agradeço a minha amiga e companheira de curso Camilla por toda a paciência, confiança e apoio durante os anos mais difíceis na minha jornada universitária.*

*Agradeço a todos os membros da equipe de competição EDRA pelos conhecimentos que me passaram, pela oportunidade e também por acreditarem em mim.*

*Agradeço ao Professor Sandro pela oportunidade de participar deste projeto, todo o suporte durante o processo de desenvolvimento, seus conselhos e paciência durante todos esses meses.*

# Resumo

Em função do seu papel de extrema importância na proteção de equipamentos eletrônicos de potência contra transientes, os varistores compostos de óxido metálico tornam-se componentes de grande relevância no sistema elétrico. Apesar da influencia negativa da temperatura no desempenho dos MOVs se mostrar significativa, não há grande abordagem nos estudos já realizados. Então, o presente trabalho trata da modelagem da onda de surto e também de distintos varistores inseridos em um projeto de Dispositivo de Proteção Contra Surtos Automatizado. O objetivo é analisar e testar o varistor com diferentes modelos térmicos para identificar seu comportamento sob condições de surto. A implementação das simulações dos modelos da onda de surto e do varistor são realizadas no *software LTspice*, onde se investiga as diferenças de suas características em modelos térmicos. Por fim, são mostrados os resultados das diferentes ondas obtidas, fornecendo uma validação inicial ao projeto proposto.

**Palavras-chaves:** surto. varistor. modelagem.

# Abstract

Due to their extremely important role in protecting power electronic equipment against transients, varistors composed of metal oxide become very important components in the electrical system. Although the negative influence of temperature on the performance of MOVs is shown to be significant, there is no great approach in the studies already carried out. So, the present work deals with the modeling of the surge wave and also of different varistors inserted in an Automated Surge Protection Device project. The objective is to analyze and test the varistor with different thermal models to identify its behavior under surge conditions. The implementation of the simulations of the surge wave and varistor models are carried out in the *LTspice* software, where the differences in their characteristics in thermal models are investigated. Finally, the results of the different waves obtained are shown, providing an initial validation to the proposed project.

**Key-words:** surge. varistor. modeling.

# Lista de ilustrações

Figura 1 – Comportamento da onda com um distúrbio de tensão. Fonte:(PHOENIX CONTACT, 2014). . . . .	18
Figura 2 – Representação das ondas de $8/20\mu\text{s}$ e $10/350\mu\text{s}$ . Fonte: (LEGENDRE, 2018). . . . .	18
Figura 3 – Funcionamento básico de um DPS. Fonte: (PAULINO et al., 2016). . .	19
Figura 4 – Micrografia típica da estrutura do varistor . . . . .	20
Figura 5 – Características V-I típicas de um MOV . . . . .	22
Figura 6 – Característica da Potência Consumida versus Temperatura de um varistor	23
Figura 7 – Micrografia típica da estrutura do varistor . . . . .	25
Figura 8 – Características V-I típicas de um MOV . . . . .	26
Figura 9 – Onda de Tensão (NBR IEC 61000-4-5, 2014). . . . .	30
Figura 10 – Onda de Corrente (NBR IEC 61000-4-5, 2014). . . . .	31
Figura 11 – Circuito para gerar a onda da corrente de surto. . . . .	31
Figura 12 – Circuito para Modelagem Térmica. . . . .	32
Figura 13 – Condutividade térmica do óxido de zinco. . . . .	33
Figura 14 – Capacidade térmica do óxido de Zinco. . . . .	33
Figura 15 – Constante de tempo do térmica do oxido de zinco. . . . .	34
Figura 16 – Circuito equivalente (KULARATNA, 2018). . . . .	34
Figura 17 – Casos simplificados sob vazamento e condução (KULARATNA, 2018). .	35
Figura 18 – Varistor TDK modelo S14K275. . . . .	35
Figura 19 – Modelo <i>spice</i> do Varistor . . . . .	36
Figura 20 – Curva característica V/I com banda de tolerância . . . . .	36
Figura 21 – Circuito equivalente do modelo PSpice . . . . .	37
Figura 22 – Simulação da Onda de Tensão. . . . .	38
Figura 23 – Simulação da Onda de Corrente. . . . .	39
Figura 24 – Circuito onda de surto com varistor ideal. . . . .	39
Figura 25 – Ondas de tensão do circuito onda de surto com varistor ideal. . . . .	40
Figura 26 – Ondas de corrente do circuito onda de surto com varistor ideal. . . . .	40
Figura 27 – Circuito onda de surto e varistor S14K275. . . . .	41
Figura 28 – Ondas de tensão do circuito onda de surto com varistor TDK. . . . .	41
Figura 29 – Ondas de corrente do circuito onda de surto com varistor TDK. . . . .	42
Figura 30 – Circuito para Modelagem da Condutividade Térmica. . . . .	42
Figura 31 – Circuito para modelagem da capacidade térmica. . . . .	43
Figura 32 – Condutividade Térmica. . . . .	43
Figura 33 – Capacidade Térmica. . . . .	44
Figura 34 – Circuito onda de surto e modelo térmico do varistor. . . . .	44



Figura 35 – Saídas para simulação da onda de surto com o modelo térmico. . . . .	45
Figura 36 – Resultados experimentais do relatório de hardware da Clamper. . . . .	46
Figura 37 – Ondas de corrente do circuito onda de surto com o modelo térmico do varistor. . . . .	46
Figura 38 – Circuito modelo das características V-I. . . . .	47
Figura 39 – Onda das características V-I. . . . .	47

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Relação entre os picos de tensão e corrente das ondas. Adaptado de: (NBR IEC 61000-4-5, 2014). . . . .	31
--	----

# Lista de abreviaturas e siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AC	Alternating Current
ARM	Advanced RISC Machine
CMRR	Common Mode Rejection Ratio
DC	Direct current
DPS	Dispositivo de Proteção Contra Surtos
FINATEC	Fundação de Empreendimentos Científicos e Tecnológicos
FUB	Fundação Universidade de Brasília
IEC	International Electrotechnical Commission
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IoT	Internet of Things
kA	Quiloampere
kV	Quilovolt
LoRa	Long Range
MOV	Metal Oxide Varistor
NBR	Norma Técnica brasileira
NTC	Negative Temperature Coefficient
PTC	Positive Temperature Coefficient
TC	Transformador de Corrente
VDR	Voltage Dependent Resistor

# Lista de símbolos

A	Ampére
$\Omega$	Ohm
V	Volt
F	Farad
s	Segundos
$\mu$	Micro
K	Kelvin
k	Quilo
J	Joule
W	Watts
$\Delta$	Diferença
$\approx$	Aproximadamente

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
1.0.1	Objetivo Geral	15
1.0.2	Objetivos Específicos	15
1.0.3	Estrutura do Trabalho	15
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>17</b>
<b>2.1</b>	<b>Surto</b>	<b>17</b>
2.1.1	Dispositivo de Proteção Contra Surtos	19
<b>2.2</b>	<b>Varistores</b>	<b>20</b>
2.2.1	Varistores de Óxido Metálico	20
2.2.2	Fatores de degradação dos Varistores	22
2.2.2.1	Temperatura de Operação	22
2.2.2.2	Energia de Surto	23
2.2.3	Condutividade Térmica	23
2.2.4	Capacidade Térmica	24
<b>2.3</b>	<b>Sensores</b>	<b>26</b>
2.3.1	Sensores de Temperatura	27
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>28</b>
3.0.1	Etapa 1 - Revisão Bibliográfica	28
3.0.2	Etapa 2 - Pesquisa e Análise dos modelos	28
3.0.3	Etapa 3 - Elaboração das Modelagens	28
3.0.4	Etapa 4 - Análise das Simulações e resultados	29
3.0.5	Etapa 5 - Conclusão	29
<b>4</b>	<b>DESENVOLVIMENTO</b>	<b>30</b>
<b>4.1</b>	<b>Modelagens</b>	<b>30</b>
4.1.1	Modelagem da Onda de surto	30
4.1.2	Modelagem Térmica do Varistor	32
4.1.3	Modelagem das características V-I do Varistor	34
4.1.4	Modelo Varistor TDK - S14K275	35
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>38</b>
<b>5.1</b>	<b>Simulações</b>	<b>38</b>
5.1.1	Onda de Surto	38
5.1.2	Onda de Surto e Varistor Ideal	39

5.1.3	Onda de Surto e Modelo Varistor TDK - S14K275 . . . . .	41
5.1.4	Modelo Térmico do Varistor . . . . .	42
5.1.5	Onda de Surto e Modelo Térmico . . . . .	44
5.1.6	Modelo das Características V-I . . . . .	47
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO . . . . .</b>	<b>49</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>50</b>
	<b>APÊNDICES</b>	<b>52</b>
	<b>APÊNDICE A – PRIMEIRO APÊNDICE . . . . .</b>	<b>53</b>

# 1 Introdução

Os dispositivos elétricos estão sujeitos, diariamente, a oscilações de energia, essas oscilações podem vir a danificar o aparelho, conforme a sua intensidade e período no qual tais sobretensões são experimentadas. O "Surto Elétrico" é um termo que descreve a cerca da sobretensão transitória em determinada linha de energia com duração de alguns microssegundos. Essa sobretensão é responsável pela degradação e danos imediatos ao equipamento. Quando possuem uma amplitude relativamente baixa e são aplicadas de forma repetida, reduzem o tempo médio dos aparelhos antes da falha (SAMARAS KOSTAS SANDBERG, 2007). Assim, é preciso uma forma de proteção contra tais surtos elétricos que podem vir a danificar, queimar ou reduzir a vida útil de bens eletrônicos e eletrodomésticos. Bem como, a análise e acompanhamento desses protetores para a identificação das condições físicas do produto submetido a tais surtos ao longo do tempo.

Os Dispositivos de Proteção Contra Surtos ou DPSs são dispositivos construídos para desviar as correntes de surto e detectar sobretensões. Sua principal função é proteger equipamentos eletroeletrônicos dos picos de tensão presentes na rede elétrica ou mesmo cabos de TV, além disso, atuam também nas máquinas que funcionam com energia elétrica de picos de alta tensão. Deste modo, esse aparelho é essencial em ambientes que possuem muitos equipamentos trabalhando, como nas indústrias, escritórios, comércios e até mesmo nas residências. O funcionamento do DPS ocorre a partir da interação entre seus componentes internos, sendo o varistor aquele que apresenta um papel fundamental para que tal equipamento de proteção funcione.

O varistor é um resistor que tem a sua resistência dependente da tensão elétrica, ou seja, uma tensão maior causa uma menor oposição à passagem de corrente elétrica e uma tensão menor resulta em uma resistência maior. Dentro do DPS, quando ocorre um surto na rede elétrica, que tenha uma tensão extremamente alta, a resistência do varistor tende a zero e, dessa forma, oferece um caminho com uma pequena oposição a passagem da corrente elétrica e assim escoar a energia pelo sistema de aterramento.

Em sua essência, o desenvolvimento deste trabalho aborda diferentes modelagens dos varistores de óxido de zinco (ZnO), uma vez que, não se encontrou uma representação precisa de seu modelo que identifique a degradação e conseqüentemente estime seu tempo de vida útil. Geralmente este componente é substituído ao chegar no fim de sua vida, no entanto o processo pelo qual passou e seu comportamento nesse período não é analisado.

Este trabalho está inserido no Projeto "Projeto de desenvolvimento tecnológico de um novo firmware e hardware e sua integração com plataforma de software para automatização de dispositivos de proteção contra surtos (DPS) em aplicações IoT", no qual

é uma cooperação entre a Fundação Universidade de Brasília (FUB), Fundação de Empreendimentos Científicos e Tecnológicos (FINATEC) e CLAMPER Indústria e Comércio Ltda. Tal pesquisa está desenvolvendo produtos que complementam os dispositivos de proteção contra surtos, incorporando neles componentes para sensoriamento e comunicação para conseguir fazer uma gestão remota desses equipamentos. Desse modo, o projeto engloba os conceitos de Dispositivos de Proteção Contra Surtos, Sensores e os Circuitos de Condicionamento de Sinais.

### 1.0.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é apresentar a influência da temperatura no desempenho do MOV sob condições de surto elétrico. Deseja-se analisar e simular o comportamento de diferentes modelos de varistores para obtenção de dados que mostrem seu funcionamento fora do seu limite de temperatura de operação, o que pode resultar em diminuição do desempenho ou até mesmo em falha.

### 1.0.2 Objetivos Específicos

- Analisar o comportamento do surto elétrico e modelar seu circuito baseando-se na norma técnica da onda de surto.
- Pesquisar as características e modelos de varistores para análise de suas propriedades.
- Modelar diferentes tipos de MOV de forma que consiga-se simular e analisar seu comportamento conforme suas características.
- Analisar a modelagem térmica do MOV que opera sob um surto de corrente.
- Simular circuitos de condicionamento de sinal ligados ao comportamento térmico e surto elétrico.

### 1.0.3 Estrutura do Trabalho

Esta pesquisa é composta por quatro capítulos seguidos das referências bibliográficas. Logo abaixo são apresentados breves resumos dos capítulos contidos neste trabalho.

**Capítulo 2:** Neste capítulo é abordada a revisão bibliográfica, onde são apresentados os principais conceitos necessários para a compreensão do desenvolvimento da pesquisa. Aborda a definição dos surtos elétricos, DPSs e varistores, além disso, conceitua alguns sensores e circuitos de condicionamento utilizados no Projeto que deu início a este trabalho.



**Capítulo 3:** A metodologia do trabalho é tratada neste capítulo, no qual aborda toda a execução da pesquisa. O capítulo três mostra também todas as etapas em detalhes desde a revisão bibliográfica, até os experimentos e seus resultados e discussões.

**Capítulo 4:** No capítulo quatro, apresenta-se o desenvolvimento realizado, com os circuitos, suas modelagens e análises, bem como a base teórica de onde foram retirados. Primeiro é abordada a onda de surto, analisando sua onda de corrente, onda de tensão e apresentando o seu respectivo circuito elétrico. Em seguida algumas modelagens térmicas do varistor são apresentadas e seus respectivos circuitos. Por fim, são apresentados alguns circuitos de condicionamento que estão ligados a medição das propriedades térmicas do MOV e da corrente em regimes de surto.

**Capítulo 5:** No capítulo cinco, são mostrados os resultados dos circuitos construídos no desenvolvimento e análise das suas respostas. Desse modo, são discutidas as simulações das modelagens contruídas no *LTSpice* e apresentados e seus resultados esperados.

**Capítulo 6:** No capítulo seis, expõe-se a conclusão do trabalho diante das pesquisas, modelagens e análises realizadas.

## 2 Referencial Teórico

Para a realização desse trabalho torna-se necessário um levantamento teórico sobre conceitos, componentes, circuitos e métodos que podem ser utilizados. O conhecimento prévio sobre os conceitos teóricos auxiliam no entendimento do comportamento de cada etapa do trabalho e podem ser úteis para identificar possíveis divergências.

### 2.1 Surto

O surto elétrico é uma perturbação na rede elétrica que pode ser originado por inúmeros motivos, desde pequenas oscilações de energia até raios que possuem elevada sobretensão. Um campo eletromagnético é irradiado por toda uma região quando uma descarga atmosférica atinge algum ponto, como uma área industrial ou uma rede de distribuição, ocasionando uma rápida elevação no valor da tensão, caso haja proximidade com a rede de energia ou instalação elétrica. Isso pode resultar em danos irreversíveis a equipamentos que não tenham proteção (KUNKEL, 2016). Dentro das possibilidades dos surtos elétricos estão as quedas de tensão ou quedas de energia, que são caracterizadas por uma perda total de energia elétrica em determinada área, de modo que no momento em que a rede é religada tem-se um possível surto. Outras formas de distúrbios são a interferência eletromagnética, interferência de radiofrequência e os picos de energia.

No Brasil, as descargas atmosféricas provocam aproximadamente 40% dos desligamentos na distribuição e 70% na transmissão de energia elétrica. E ainda, de acordo com o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), o Brasil é um dos países com maior número de raios no mundo (INPE, 2019). Em consequência, há uma expressiva quantidade de distúrbios na rede que são capazes de causar problemas impactantes no sistema, caso não existam medidas de proteção adequadas. Assim, para a minimização desses surtos, as técnicas de aterramento como o Dispositivo de Proteção Contra Surtos são adotadas cada vez mais.

Os equipamentos elétricos e eletrônicos possuem um valor de tensão nominal que indicam sua capacidade de suportar um surto de tensão, dessa forma, conforme pode ser observado na figura 1, quando o valor dessa tensão nominal é ultrapassado acontece a degradação do aparelho.

A padronização permite avaliar os riscos e efeitos dos distúrbios de alta frequência nos equipamentos, bem como estimar as magnitudes físicas. Com o intuito de fazer a comparação dos sistemas de proteção contra surtos e identificar os parâmetros dos DPSs para distintas aplicações, definiu-se um padrão para os impulsos. Desse modo, são separadas

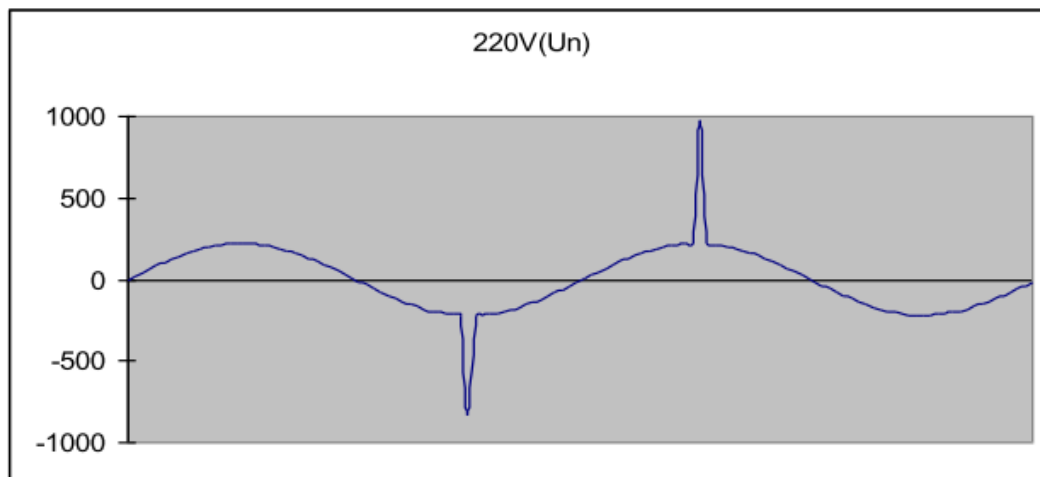


Figura 1 – Comportamento da onda com um distúrbio de tensão. Fonte: (PHOENIX CONTACT, 2014).

duas formas de onda uma para representar as descargas atmosféricas e outra os fenômenos de sobretensão. A primeira simula a descarga direta ( $10/350\mu\text{s}$ ) e a segunda a descarga indireta ( $8/20\mu\text{s}$ ). O esquema dessas ondas padronizadas, podem ser observados na figura 2.

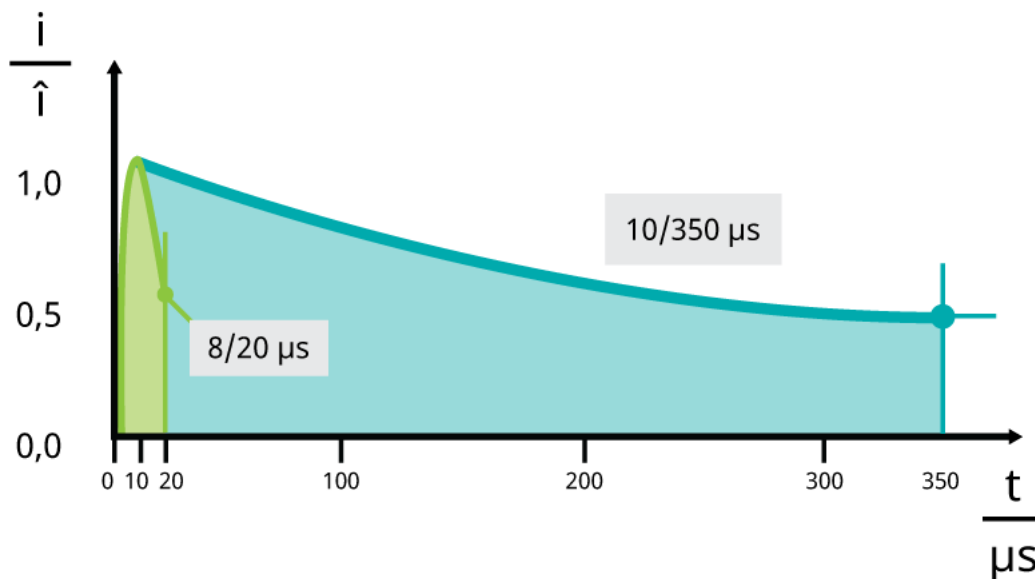


Figura 2 – Representação das ondas de  $8/20\mu\text{s}$  e  $10/350\mu\text{s}$ . Fonte: (LEGENDRE, 2018).

Os dispositivos protetores de surtos com formas de onda de elevada energia como  $10/350\mu\text{s}$ , geralmente são usados em lugares com maior probabilidade de receber as descargas atmosféricas. Já para dispositivos com características aproximadas da onda de curta duração  $8/20\mu\text{s}$  protegem a instalação de transientes de tensão que dissipam pouca energia, logo são aplicados em locais com pouca possibilidade de descarga direta.

### 2.1.1 Dispositivo de Proteção Contra Surtos

O DPS é um dispositivo projetado para desviar as ondas de corrente para o terra e limitar as sobretensões advindas das descargas atmosféricas em redes de energia. No momento de um surto, tal componente funciona como um interruptor, no qual um de seus terminais está ligado ao terra. Ou seja, a energia em excesso é desviada para o terra quando este interruptor é fechado com a presença de um surto (KUNKEL, 2016). A norma NBR 5419/2015 separa o DPS em dois tipos: comutador de tensão e limitador de tensão. O primeiro apresenta em condições normais uma impedância elevada, no entanto ao ocorrer o surto de tensão há uma rápida mudança nesta impedância que vai para um valor baixo. No segundo caso, em condições normais, o DPS possui alta impedância que é reduzida conforme o aumento da corrente e tensão de surto (ABNT NBR 5419-4, 2015).

O princípio de funcionamento do DPS é mostrado na figura 3, no qual se conecta uma chave, que é comandada pelo valor da tensão nos seus terminais, em paralelo ao equipamento que requer proteção. Tal chave permanece aberta se a tensão encontra-se abaixo de um determinado limite, todavia, a chave fecha automaticamente quando a tensão alcança o limite. O DPS está atuando no valor  $U_P$  que é especificado para fechar a chave, onde ele deve ser inferior ao valor  $U_W$  que o equipamento é capaz de suportar (PAULINO et al., 2016). Assim, esse dispositivo de proteção se comporta como um circuito aberto em função do alto valor de sua resistência, sob condições normais. Já quando acontece um surto com alta tensão ele torna-se quase um curto-circuito, uma vez que a condutância do material aumenta muito.

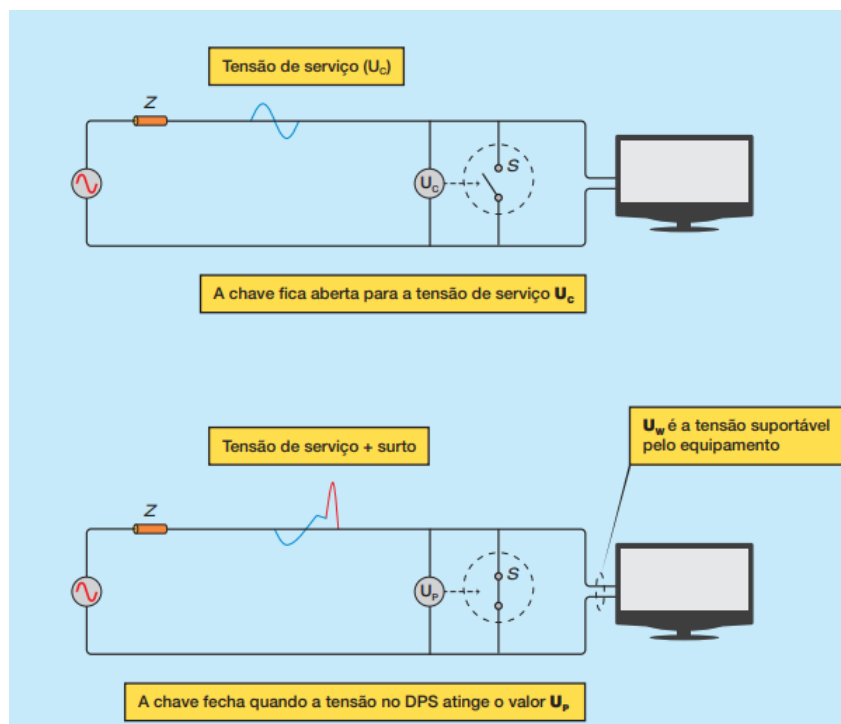


Figura 3 – Funcionamento básico de um DPS. Fonte: (PAULINO et al., 2016).

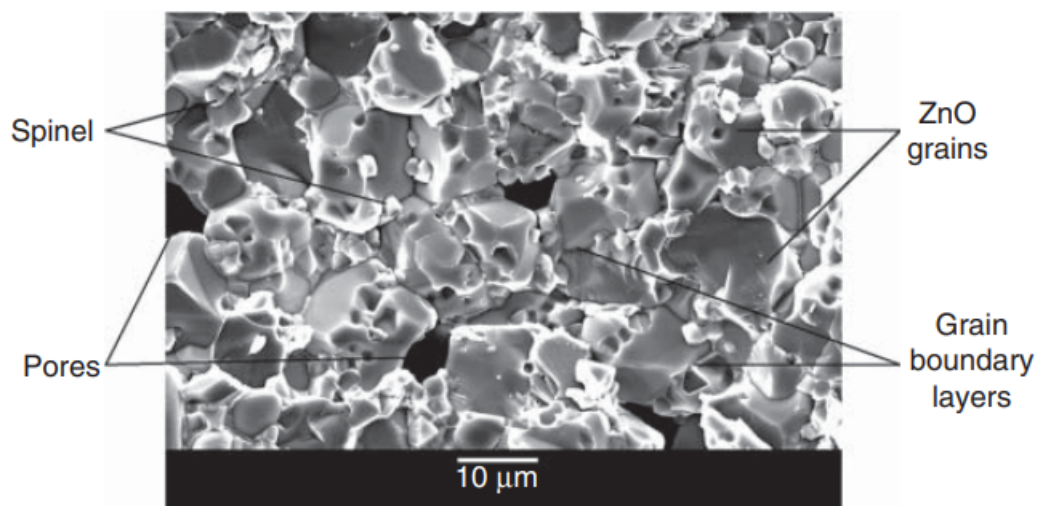
## 2.2 Varistores

O varistor é o componente que permite o funcionamento do DPS. Este mecanismo consegue variar a resistência de acordo com a tensão nos seus terminais. Dessa forma, conforme a tensão aumenta, sua resistência diminui, e ele passa a atuar como uma passagem alternativa ao aterramento da instalação. Isso é devido a corrente elétrica que sempre passa por onde a resistência mostra-se menor. Logo, para evitar a sobrecarga no circuito que se quer proteger, o varistor faz a distribuição do excesso de carga no momento do surto.

### 2.2.1 Varistores de Óxido Metálico

O varistor é um componente eletrônico "semelhante ao diodo" que possui uma característica de tensão não linear. No seu funcionamento, os varistores são equivalentes a um diodo Zener *back-to-back* e geralmente são usados em paralelo com os circuitos para protegê-los contra tensões transitórias excessivas (Jinliang He, 2019). Esses dispositivos são compostos de um material cerâmico com características elétricas não lineares, constituídos essencialmente de óxido de zinco (ZnO). Segundo (SARGENT; DUNLOP; DARVENIZA, 1992), em função de sua natureza policristalina e ao grande número de barreiras intergranulares, esses dispositivos detêm alta capacidade de absorção de energia.

Figura 4 – Micrografia típica da estrutura do varistor



Fonte: (Jinliang He, 2019)

A tensão aplicada age na fronteira entre cada grão e o seu vizinho os permitindo controlar a corrente que fluirá em duas direções. A formação dos grãos de óxido de zinco resultam em uma equivalência elétrica a uma rede de pares de diodos *back-to-back*.

Um varistor conduz uma corrente substancialmente elevada, tornando-se extremamente condutor, ao se exceder a voltagem (tensão de ruptura). Já em condições normais, esse dispositivo passa apenas uma pequena corrente de fuga, mantendo-se em seu estado de alta resistência.

Para ser considerado bom, o varistor após um pico deve retornar às suas propriedades primárias, tanto na microestrutura quanto características elétricas, sem que seja destruído. Sua confiabilidade operacional é significativamente influenciada por sua capacidade de suportar a sobretensão, todavia, a degradação experimentada por esse componente é causada por quaisquer picos excessivos que ultrapassem sua classificação durante determinada operação (MARDIRA KARL PRIMARDI SAHA, 2001). Logo, os varistores sofrem uma deterioração após certa quantidade de atuações, não voltando às suas características iniciais quando a tensão nos terminais volta ao normal. Além do mais, o tempo de vida deles está diretamente ligado às suas propriedades térmicas de operação, elétricas e microestruturais.

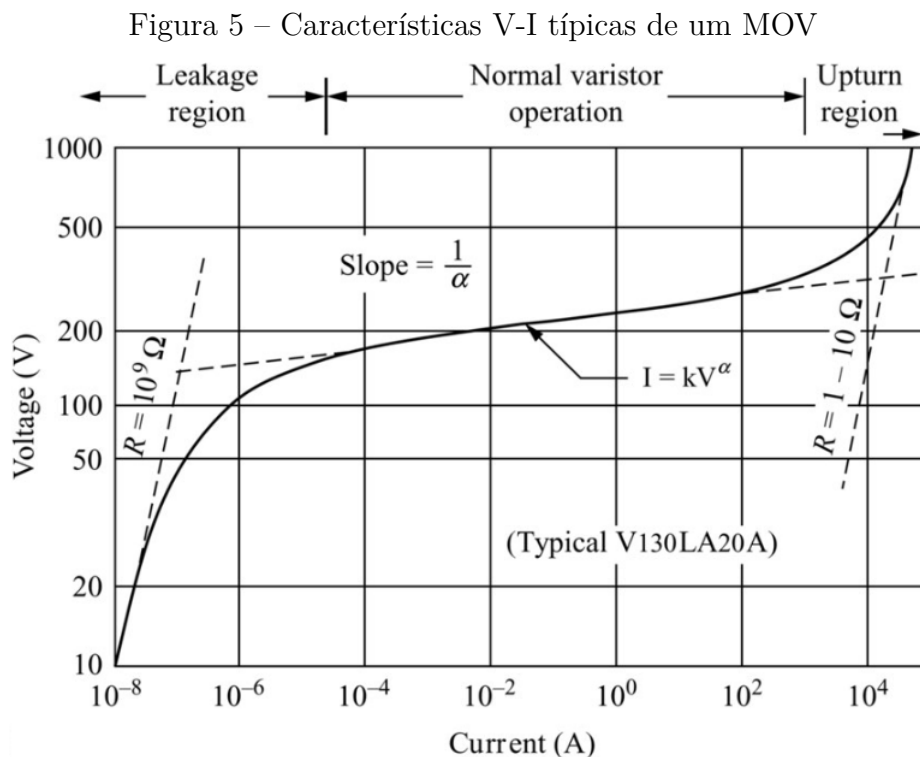
A falta de controle térmico, bem como todo o processo de degradação são consequências irreversíveis. Depois de degradado por uma operação a longo prazo ou um experimento de alta tensão, não é possível recuperar os valores à temperatura ambiente da corrente resistiva agravada e da perda de tensão (Jinliang He, 2019).

Para (Jinliang He, 2019) as características de corrente-tensão (V-I) dos varistores, acima da tensão de ruptura, são altamente não ôhmicas. Assim, tais características são expressas na figura abaixo de forma logaritmica.

Na 8 são ilustradas três regiões em formato log-log, na qual o varistor opera com uma ampla faixa de corrente. Na primeira região ou *Leakage region*, onde há baixa corrente a curva V-I apresenta uma relação ôhmica linear, mostrando uma corrente de fuga com dependência significativa da temperatura. Com isso, o MOV está com um valor de resistência extremamente alta, próximo de  $1G\Omega$  ou superior. Na segunda região ou *Normal varistor operation*, onde há uma corrente média a propriedade não ôhmica se sobressai e quase não há ligação com a temperatura, além disso o MOV absorve grande parte da energia transitória. Na terceira região ou *Upturn region*, no qual a corrente é alta, o varistor torna-se novamente ôhmico. Na região de operação normal do varistor, as características da tensão elétricas são geralmente descritas pela equação:

$$I = KV^\alpha \quad (2.1)$$

Onde K e  $\alpha$  são constantes. Além disso, os MOVs são caracterizados pela magnitude dos valores de  $\alpha$ . Nas regiões de baixas correntes e altas correntes não há grande influência da temperatura.



Fonte: (KULARATNA, 2018)

## 2.2.2 Fatores de degradação dos Varistores

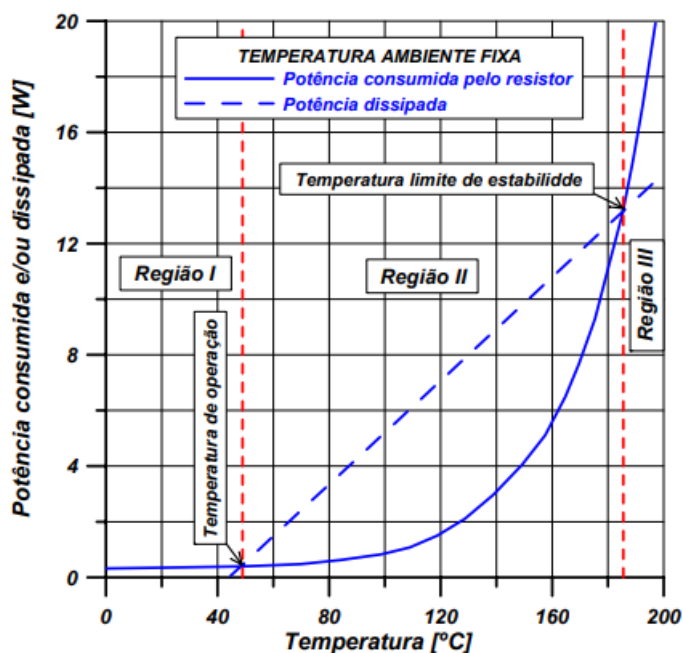
O varistor protege um circuito ao "fixar" sua tensão a deixando em um valor seguro e dissipa a energia. Conforme (SARGENT; DUNLOP; DARVENIZA, 1992) os MOVs tem suas características de corrente-tensão em modo de falha ao se aplicar uma tensão contínua CA ou CC, ou devido a transitórios que tenham energias maiores que a classificação do varistor. Isso resulta em um aumento da corrente de fuga. Logo, a degradação desses componentes e consequentemente do funcionamento dos dispositivos de proteção contra surtos está associada a inúmeros fatores que alteram suas condições normais de operação.

### 2.2.2.1 Temperatura de Operação

Em componentes eletrônicos, nesse caso os varistores, a sua temperatura de funcionamento precisa ser menor que o valor nominal, visto que ao ultrapassa-lo o dispositivo é degradado. Em função da característica semicondutora do varistor acontece um aumento em sua corrente de fuga e da potência consumida ao se elevar a temperatura. Isso resulta em um fenômeno cíclico que tem tendência à instabilidade (SALLES, 2011).

É apresentado na figura 6 a dissipação e o consumo de potência conforme se eleva a temperatura, a uma tensão fixa. O gráfico está dividido em três regiões diferentes que são demarcadas pelo cruzamento da curva de potência dissipada e a potência consumida pelos resistores. As regiões I, II e III são respectivamente capacidade da geração de calor,

Figura 6 – Característica da Potência Consumida versus Temperatura de um varistor



Fonte: (SALLES, 2011)

capacidade da dissipação de calor e onde ocorre a avalanche térmica.

### 2.2.2.2 Energia de Surto

Um outro fator que ganha relevância, declarado nos catálogos de fabricantes, é a energia que o varistor absorve durante o surto e sua capacidade de absorção dela. Geralmente este parâmetro está associado a um impulso de corrente com amplitude e formas de onda definidas. Todavia, não existe uma indicação quantitativa na redução do tempo de vida do varistor, apesar da influência da energia de surto na degradação desse componente. Logo, necessita-se de um método para relacionar a energia absorvida pelo DPS e sua vida útil.

### 2.2.3 Condutividade Térmica

A capacidade intrínseca de um material para conduzir calor ou eletricidade é denominada condutividade térmica. Essa propriedade é denotada por 'k' ou ' $\lambda$ '. Conforme (BERGMAN ADRIENNE S. LAVINE, 2011), os processos de condução de calor são quantificados através de equações de taxa baseadas na lei de condução térmica de Fourier. Ela afirma que a taxa de tempo no qual o calor é transferido por um material é proporcional ao gradiente negativo da temperatura e a área através da qual o calor flui. A seguinte equação representa a forma diferencial dessa lei:

$$q = -k\Delta T \quad (2.2)$$



onde,

$q$  é o vetor da densidade de fluxo de calor local [ $W.m^{-2}$ ]

$k$  é a condutividade do material [ $W.m^{-1}.K^{-1}$ ]

$\Delta T$  é o gradiente de temperatura [ $K.m^{-1}$ ]

Cada material possui sua própria capacidade de transferir calor independentemente do seu estado. Em grande parte dos sólidos e líquidos a condutividade térmica varia com a temperatura. Sua fórmula é dada abaixo:

$$K = \frac{QL}{A\Delta T} \quad (2.3)$$

Onde,

- $K$  é a condutividade térmica [ $W.m^{-1}.K^{-1}$ ];
- $Q$  é a quantidade de calor transferida através do material [ $J.s$ ] ou [ $Watts$ ];
- $L$  é a distância entre os dois planos isotérmicos;
- $A$  é a área da superfície [ $m^2$ ];
- $\Delta T$  é a diferença de temperatura [ $Kelvin$ ];

#### 2.2.4 Capacidade Térmica

A capacidade térmica indica a quantidade de calor que um dado material pode reter, de acordo com (ZHANG, 2011), tal propriedade é responsável por absorver calor quando se aquece o material e libera calor quando este é resfriado. É definida pela seguinte fórmula:

$$C = \frac{Q}{m(T_2 - T_1)} \quad (2.4)$$

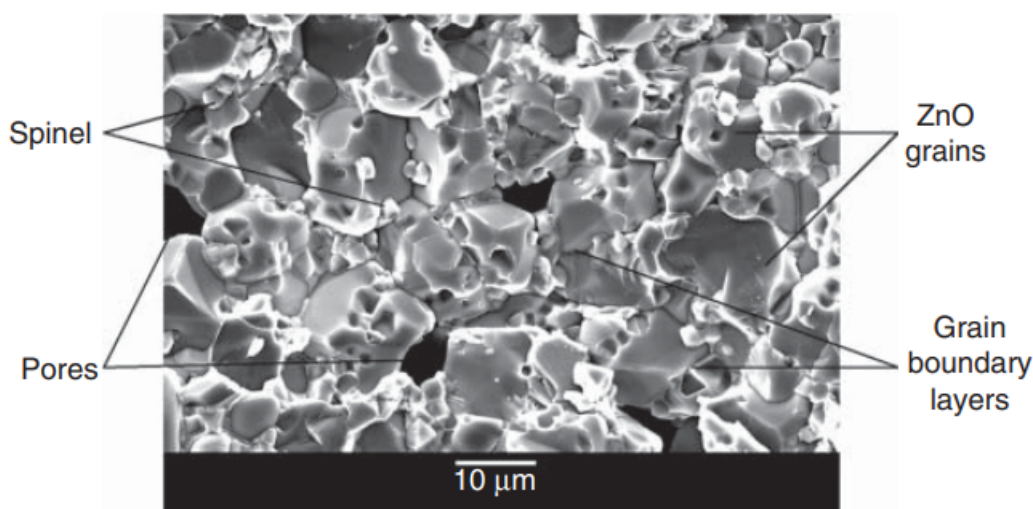
onde,

- $Q$  é o calor absorvido ou liberado por um material [ $J$ ];
- $m$  é a massa de um material [ $g$ ];
- $C$  é o calor específico de um material [ $J/(g.K)$ ];
- $(T_2 \sim T_1)$  é a diferença de temperatura antes e depois do aquecimento ou resfriamento [ $K$ ].

Dessa forma, a capacidade térmica de um material traduz-se na quantidade de calor necessária para que sua temperatura varie de forma unitária.

Os varistores são dispositivos compostos de material cerâmico com características elétricas não lineares, são compostos essencialmente de óxido de zinco (ZnO). Segundo (SARGENT; DUNLOP; DARVENIZA, 1992), em função de sua natureza policristalina e ao grande número de barreiras intergranulares, esses dispositivos detêm alta capacidade de absorção de energia.

Figura 7 – Micrografia típica da estrutura do varistor

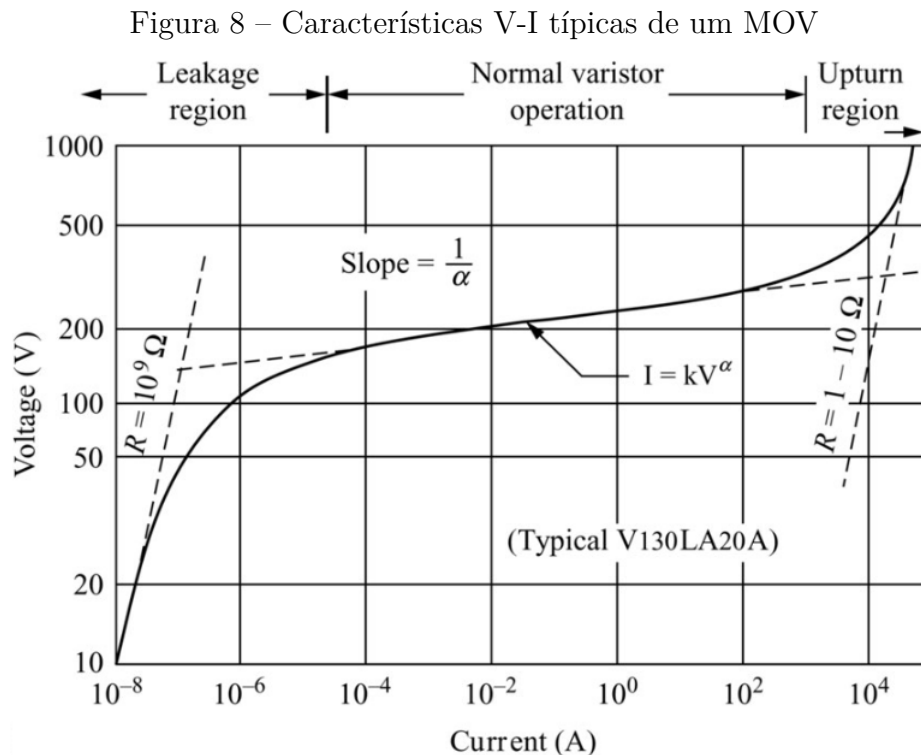


Fonte: (Jinliang He, 2019)

A tensão aplicada age na fronteira entre cada grão e o seu vizinho os permitindo controlar a corrente que fluirá em duas direções. A formação dos grãos de óxido de zinco resultam em uma equivalência elétrica a uma rede de pares de diodos *back-to-back*. Um varistor conduz uma corrente substancialmente elevada, tornando-se extremamente condutor, ao se exceder a voltagem (tensão de ruptura). Já em condições normais, esse dispositivo passa apenas uma pequena corrente de fuga, mantendo-se em seu estado de alta resistência.

Para (Jinliang He, 2019) as características de corrente-tensão (V-I) dos varistores, acima da tensão de ruptura, são altamente não ôhmicas. Assim, tais características são expressas na figura abaixo de forma logaritmica.

Na 8 são ilustradas três regiões em formato log-log, na qual o varistor opera com uma ampla faixa de corrente. Na primeira região ou *Leakage region*, onde há baixa corrente a curva V-I apresenta uma relação ôhmica linear, mostrando uma corrente de fuga com dependência significativa da temperatura. Com isso, o MOV está com um valor de resistência extremamente alta, próximo de  $1G\Omega$  ou superior. Na segunda região ou *Normal varistor operation*, onde há uma corrente média a propriedade não ohmica se sobressai e



Fonte: (KULARATNA, 2018)

quase não há ligação com a temperatura, além disso o MOV absorve grande parte da energia transitória. Na terceira região ou *Upturn region*, no qual a corrente é alta, o varistor torna-se novamente ôhmico. Na região de operação normal do varistor, as características da tensão elétricas são geralmente descritas pela equação:

$$I = KV^\alpha \quad (2.5)$$

Onde K e  $\alpha$  são constantes. Além disso, os MOVs são caracterizados pela magnitude dos valores de  $\alpha$ . Nas regiões de baixas correntes e altas correntes não há grande influencia da temperatura.

## 2.3 Sensores

Para a elaboração de um dispositivo inteligente de proteção contra surtos é necessário o acompanhamento de algumas grandezas físicas, como temperatura, tensão e corrente, por isso, é essencial a utilização de sensores. Os sensores são componentes que respondem à um estímulo físico ou químico, transformando-o em outra grandeza física. Para a eletrônica, as saídas dos sensores são dadas em tensão, corrente ou resistência.

### 2.3.1 Sensores de Temperatura

Os sensores de temperatura são componentes eletrônicos que realizam a aferição da temperatura e convertem os dados da entrada, na forma analógica, em dados eletrônicos, de modo que, registre ou monitore as mudanças térmicas ocorridas. Esses dispositivos conseguem ainda fazer, de uma maneira rápida e precisa, as leituras digitais de temperatura que permitem aos computadores e controladores monitorar com precisão e controlar os sistemas de forma autônoma. Assim, essas ferramentas são as responsáveis por aferir a temperatura ambiente e a temperatura de operação do varistor.

## 3 Metodologia

O estudo proposto consiste em analisar e modelar a onda de surto, os diferentes tipos de varistores e suas propriedades. Além disso, observar a influência térmica que ocorre nos MOVs no momento do surto elétrico. Esta sessão apresenta a metodologia definida na construção do trabalho a ser realizado, mostrando em forma de blocos as etapas do processo para se obter maiores detalhes. As etapas do trabalho estão divididas em: revisão bibliográfica, Pesquisa e Análise dos modelos, Elaboração das Modelagens, Análise das Simulações e resultados e Conclusão. Foi definido um fluxo de projeto que consiste na observação do sistema de um modo mais global e a partir de cada bloco atingir os subgrupos necessários para a devida aplicação. Essa metodologia é definida como Top-Down.

### 3.0.1 Etapa 1 - Revisão Bibliográfica

Nesta sessão, todos os conceitos relevantes a cerca do tema são apresentados, com a revisão bibliográfica abordando os principais conceitos envolvendo a automação dos Dispositivos de Proteção contra Surtos e seu componente interno: o varistor. Além do mais conceitos de relevantes sobre a análise térmica desse componente foram estudados. Tais definições serão necessárias para o entendimento das modelagens, simulações e seus respectivos resultados, tornando-se uma etapa crucial para o entendimento do trabalho.

### 3.0.2 Etapa 2 - Pesquisa e Análise dos modelos

Esta etapa consiste na escolha dos principais modelos a serem simulados. Para isso foi levada em consideração toda a pesquisa bibliográfica realizada na etapa 1. Foram realizados estudos de distintos modelos elétricos e térmicos do varistor, suas propriedades e seu funcionamento. Desse modo, as modelagens foram desenvolvidas de forma fluida, com especificações concretas.

### 3.0.3 Etapa 3 - Elaboração das Modelagens

Nesta etapa os modelos são desenvolvidos no software *LTspice* utilizando as características típicas da onda de surto, tanto da onda de tensão, quanto da onda de corrente com base na norma técnica de testes de surto elétrico. Além disso, as modelagens do varistor foram realizadas considerando sua capacidade térmica, condutividade e características V-I. Nas simulações foram adicionados dados dos datasheets de fabricantes e parâmetros de livros técnicos.

### 3.0.4 Etapa 4 - Análise das Simulações e resultados

Com esta etapa, conseguiu-se observar o comportamento dos circuitos construídos em cada modelo. Então, baseando-se em estudos da literatura, propriedades da onda de surto e do varistor compreendeu-se o funcionamento de um surto elétrico, como acontece a proteção dos dispositivos a influência dos picos de energia em MOVs distintos e consequente mudança térmica.

### 3.0.5 Etapa 5 - Conclusão

Por fim, na etapa cinco é analisado todo o desenvolvimento e resultados obtidos. Assim, este bloco finaliza o trabalho proposto abordando todas as simulações realizadas e discutindo a influência desses fatores térmicos no varistor após obtidas todas as suas modelagens.

## 4 Desenvolvimento

Esta sessão irá apresentar o desenvolvimento do trabalho, abordando condutividade térmica e capacidade térmica do óxido de zinco (componente principal do MOV) em função da temperatura e os modelos usados para a construção da simulação da onda de surto e dos varistores. A finalidade é analisar o comportamento dos circuitos que representam varistores em cenários de surtos.

### 4.1 Modelagens

Para observar o comportamento do varistor sob alta voltagem transiente, foram propostos modelos de sistemas elétricos. Primeiro, modelou-se a onda de surto a qual o MOV seria exposto, de acordo com a norma IEC 61000-4-5, em seguida foram construídos os circuitos que apresentam sua capacidade térmica, condutividade térmica, suas características V-I e ainda, usou-se um modelo da TDK.

#### 4.1.1 Modelagem da Onda de surto

A norma IEC 61000-4-5, norma que regulamenta os testes de imunidade a surtos, define uma onda combinada que consiste em duas formas de onda, que são mostradas nas figuras 9 e 10: a forma de onda de corrente  $8\mu\text{s}/20\mu\text{s}$ , com tempo de frente de  $8\mu\text{s} \pm 20\%$  e tempo de cauda de  $20\mu\text{s} \pm 20\%$ , e a forma de onda de tensão  $1,2\mu\text{s}/50\mu\text{s}$ , com tempo de frente de  $1,2\mu\text{s} \pm 30\%$ . Essas formas de onda são determinadas por seus tempos de subida e duração de meia amplitude.

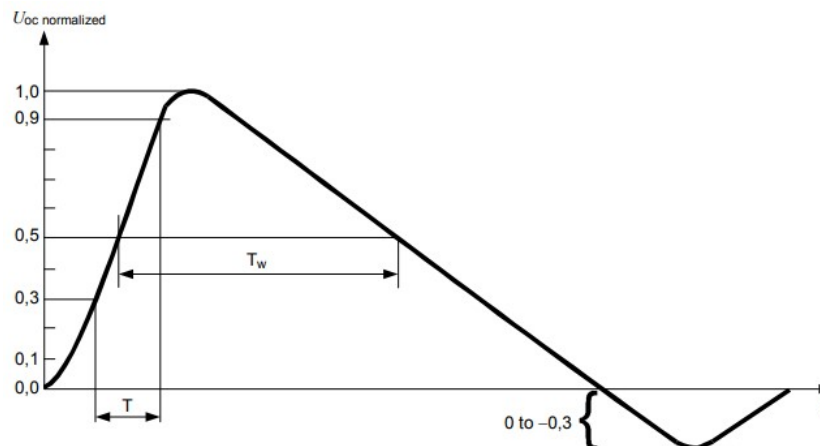


Figura 9 – Onda de Tensão (NBR IEC 61000-4-5, 2014).

Na figura 9 são apresentados os parâmetros da onda de tensão, onde  $T_w$  corresponde ao tempo de duração da onda na duração de meia amplitude e  $T_r$  corresponde ao tempo da diferença entre os limites (*thresholds*). Analogamente, temos os parâmetros da onda de corrente na figura 10, com  $T_w$  e  $T_r$ .

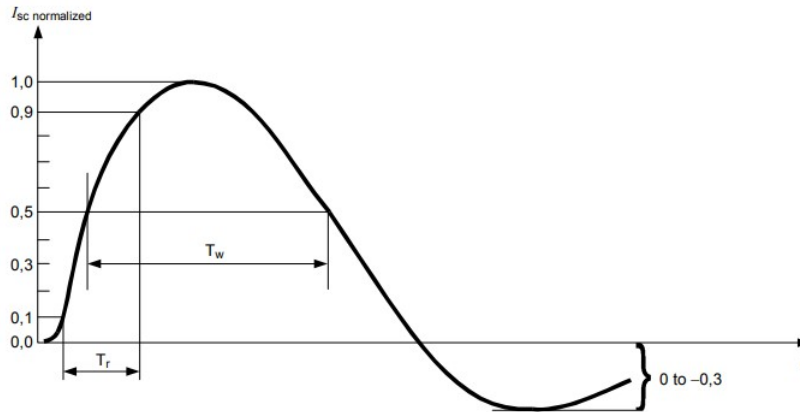


Figura 10 – Onda de Corrente (NBR IEC 61000-4-5, 2014).

A relação entre a tensão de pico de circuito aberto e a corrente de pico de curto-circuito é mostrada na tabela 1.

Tabela 1 – Relação entre os picos de tensão e corrente das ondas. Adaptado de: (NBR IEC 61000-4-5, 2014).

Tensão de pico de circuito aberto	Corrente de pico de curto-circuito
0,5kV	0,25kA
1,0kV	0,5kA
2,0kV	1,0kA
4,0kV	2,0kA

Para obter as formas de onda foi utilizado o modelo de circuito da norma IEC 61000-4-5 (NBR IEC 61000-4-5, 2014), esse modelo é mostrado na figura 11, as alterações feitas no circuito, como o incremento da fonte  $V_2$  foram feitas para simular o circuito no *LTspice*.

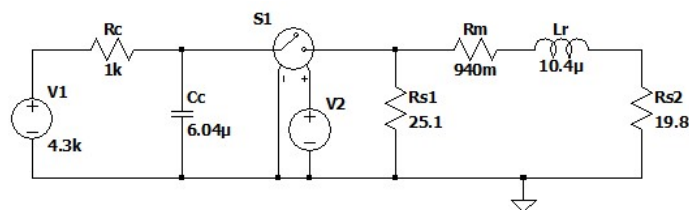


Figura 11 – Circuito para gerar a onda da corrente de surto.

Onde,  $V_1$  é a fonte de alta tensão,  $R_c$  é o resistor de carregamento,  $C_c$  é o capacitor de armazenamento,  $R_{S1,2}$  são os resistores de modelagem de duração de impulso,  $R_m$  é o



resistor de impedância e  $L_r$  é o indutor de modelagem do tempo de subida. Os valores dos parâmetros do circuito não são fornecidos no padrão porque os fabricantes são livres para selecionar o gerador mais adequado ao projeto, contanto que atenda aos requisitos da norma. Os valores dos componentes foram escolhidos de acordo com o artigo "*Simulation of Surge Pulse Generator and Applications in Automotive Immunity Testing*" (SILAGHI et al., 2020).

Princípio de funcionamento do circuito: é aplicada uma tensão elevada na entrada do circuito, enquanto o circuito é alimentado e a chave está aberta, o circuito gera uma tensão no capacitor. Quando o capacitor está carregado é gerado um pulso, esse pulso é responsável por mudar o estado da chave para fechada, com a chave fechada o capacitor fica ligado no terra nas duas extremidades, criando um curto circuito. O indutor é usado no circuito para integrar a onda de tensão gerada pelo capacitor e pelo fonte de pulso.

#### 4.1.2 Modelagem Térmica do Varistor

Sabendo que um dos fatores de degradação do varistor é a temperatura, a primeira modelagem consiste em analisar o acúmulo de calor nos varistores. O comportamento do varistor pode ser modelado usando um circuito elétrico. O circuito utilizado é mostrado na figura 12. Onde a temperatura corresponde a volts, a potência corresponde à corrente,  $R_1$  é a resistência térmica e  $C_1$  é a capacitância térmica.

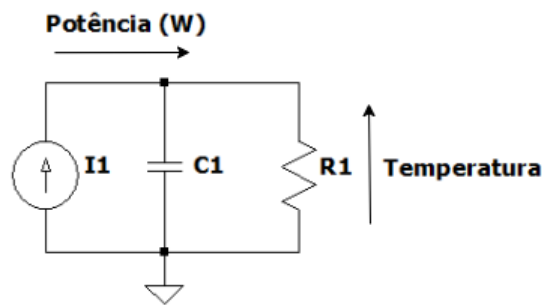


Figura 12 – Circuito para Modelagem Térmica.

Para o óxido de zinco, um componente dos MOVs, tanto a condutividade térmica quanto a capacidade térmica são funções da temperatura e descrevem o comportamento do material. Para a simulação, esperam-se gráficos semelhantes aos das figuras 13 e 14 baseados no estudo de (MARTIN, 2017), que apresenta condutividade e capacidade térmica do óxido de zinco em função da temperatura.

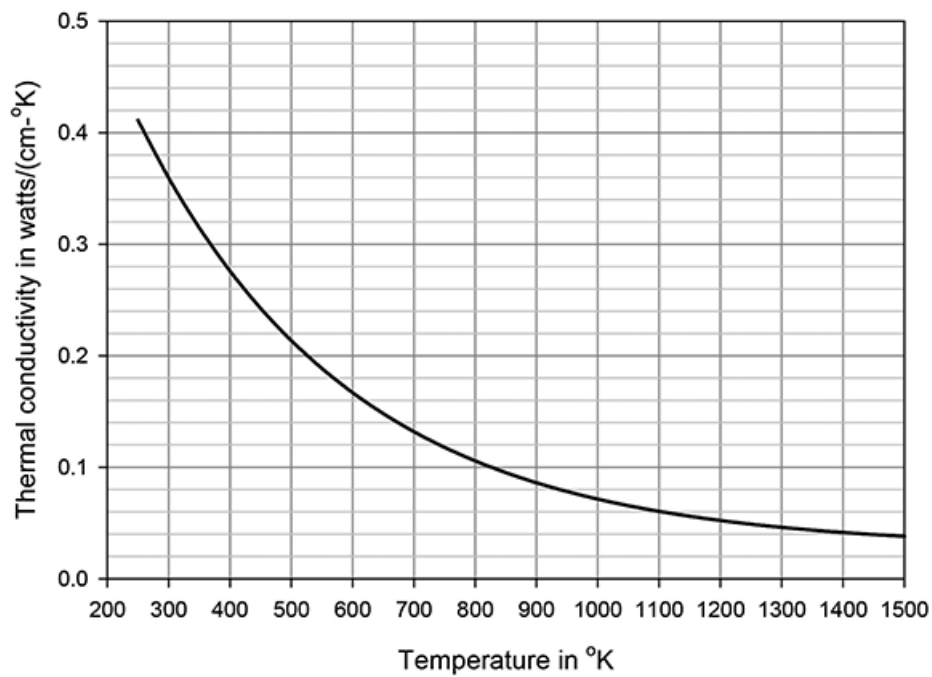


Figura 13 – Condutividade térmica do óxido de zinco.

(MARTIN, 2017)

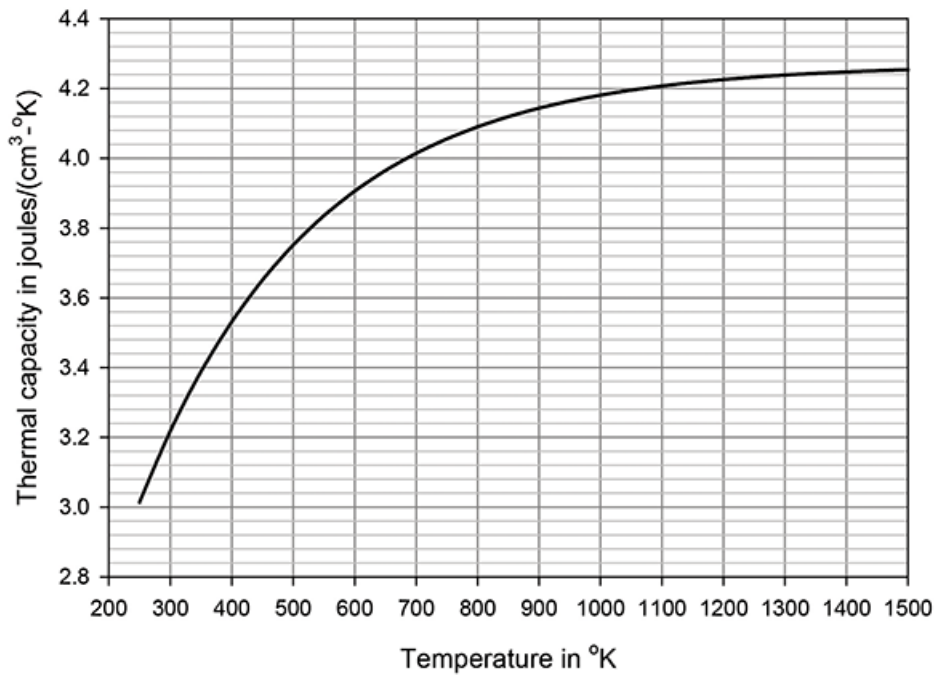


Figura 14 – Capacidade térmica do óxido de Zinco.

(MARTIN, 2017)

Uma vez que as características anteriores são dependentes da temperatura, figura 15, a constante de tempo térmica também será em função da temperatura.

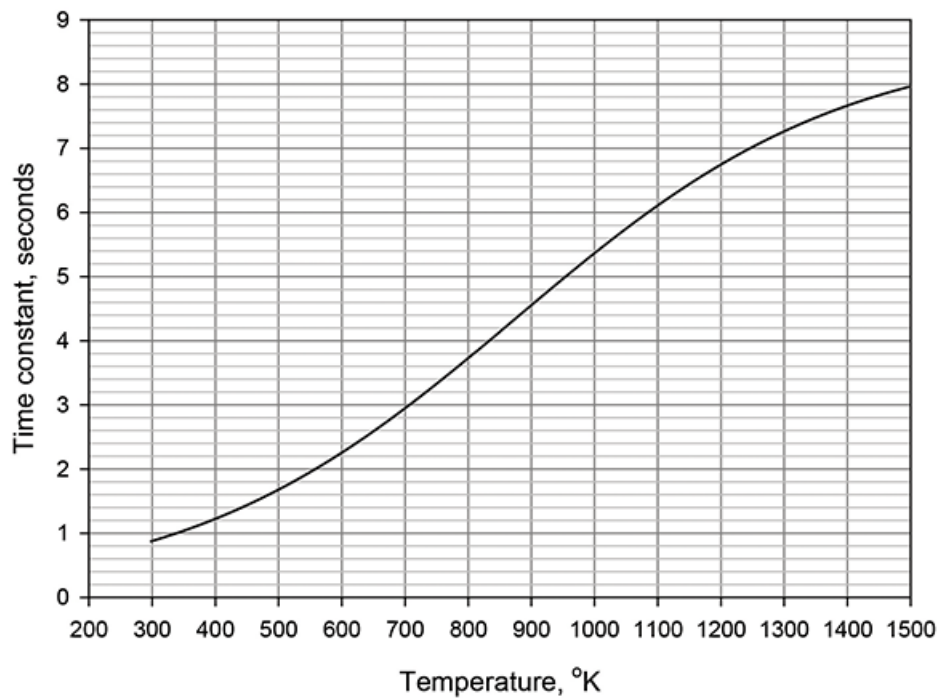


Figura 15 – Constante de tempo do térmica do óxido de zinco.

(MARTIN, 2017)

### 4.1.3 Modelagem das características V-I do Varistor

Na segunda modelagem é apresentado um modelo elétrico, para relacionar as três regiões de operação do varistor. Como observa-se na figura 16, inicialmente o MOV está em um modo de resistência bem elevada, com isso o circuito é praticamente aberto e conseqüentemente a resistência não Linear  $R_X$  pode ser ignorada, já que o valor de  $R_{OFF}$  que se encontra em paralelo é dominante.

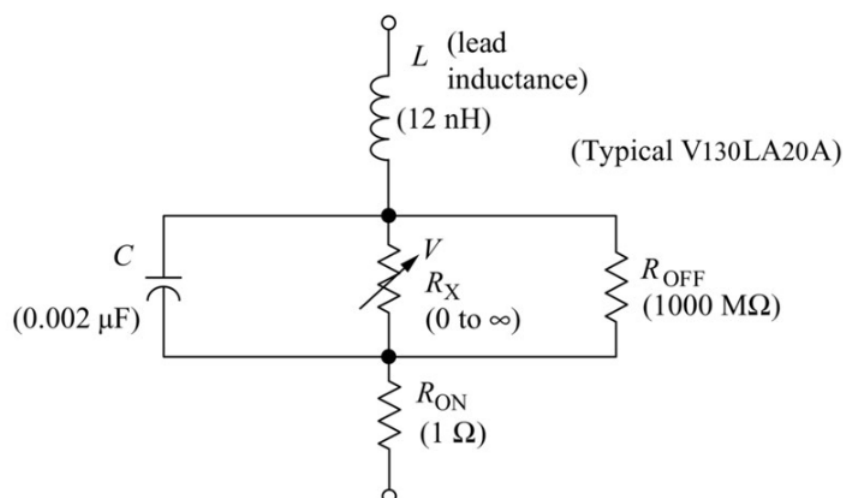


Figura 16 – Circuito equivalente (KULARATNA, 2018).

Na figura 17, observa-se o circuito que equivale à região de baixas correntes ou *leakage region*, mostrada graficamente na figura 8. O valor de  $R_{OFF}$  é dependente da temperatura, todavia continua em uma faixa de 10 a 1000M $\Omega$ . Além disso, também depende da frequência de forma inversamente proporcional.

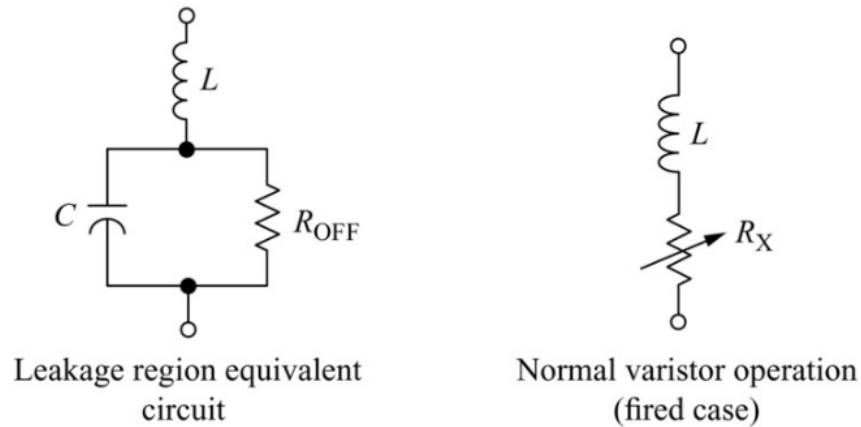


Figura 17 – Casos simplificados sob vazamento e condução (KULARATNA, 2018).

No modo de condução do varistor ou *Normal varistor operation*,  $R_X$  possui um valor muito menor que  $R_{OFF}$ , devido a absorção de grande parte da energia transitória. Seu circuito equivalente é apresentado na figura 17. Já nas correntes mais altas, ou *Upturn Region* a resistência não linear aproxima-se de um curto circuito, pois está em um modo de baixa resistência. Essa região é representada pelo  $R_{ON}$  a que é a *Bulk Resistance* ou resistência em massa dos grãos de óxido de zinco. Ela é linear e ocorre entre 50A e 50000A, geralmente depende do tamanho do varistor.

#### 4.1.4 Modelo Varistor TDK - S14K275

Uma outra análise do MOV e suas características foi realizada com o varistor S14K275 mostrado na figura 18 da empresa TDK Electronics.

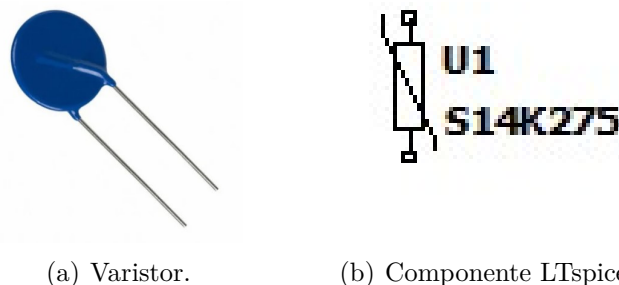


Figura 18 – Varistor TDK modelo S14K275.

O modelo *PSpice* disponibilizado no site da empresa (ELECTRONICS, 2021) encontra-se na figura 19. Nele, são mostrados os valores usados. Os parâmetros B1, B2, B3 e B4 são únicos em cada tipo de varistor, de modo que sua curva característica é descrita por eles. Sua tolerância de banda da curva V-I é definida por TOL que possui valores de +10 a -10, onde o primeiro assegura o maior nível de proteção possível para uma determinada corrente de surto e o segundo a corrente mais alta possível (fuga) para uma determinada tensão.

```
*
* Type model for S14K275 :
* -----
.SUBCKT S14K275 1 2 PARAMS: TOL=0
X1 1 2 SIOV PARAMS: T={1+TOL/100} C=440pF L=12.0nH B1=2.7340192 B2=0.0301397 B3=-0.0005143 B4=0.0046033
.ENDS
*
```

Figura 19 – Modelo *spice* do Varistor

Na figura 20 as características da curva V-I são mostradas graficamente.

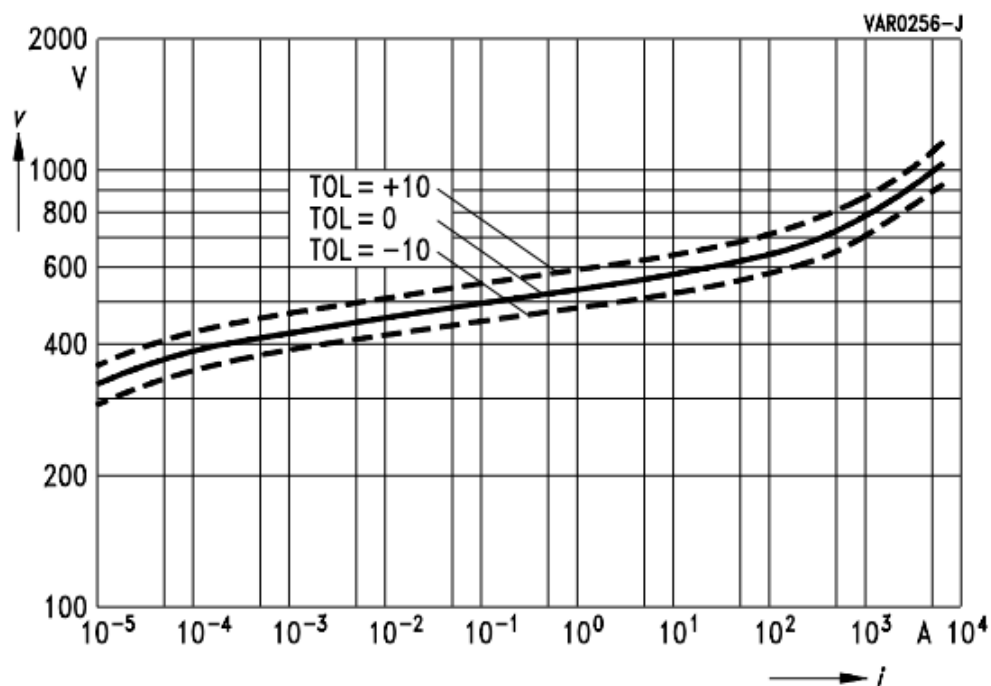


Figura 20 – Curva característica V/I com banda de tolerância

(TDK-ELECTRONICS, )

O modelo equivalente de circuito elétrico pode ser observado na figura 21, nele o varistor é representado por sua curva característica V/I ( $V = f(I)$ ), uma capacitância paralela ( $C_P$ ) e uma indutância em série ( $L_S$ ). Nesse modelo, a curva característica é implementada por uma fonte de tensão controlada  $V = f(I)$ . Além disso, uma resistência em série  $R_S = 100\mu\Omega$  foi inserida para evitar o estado de que as fontes ideais fossem conectadas em paralelo ou modelo de varistor fosse conectado diretamente a uma fonte.

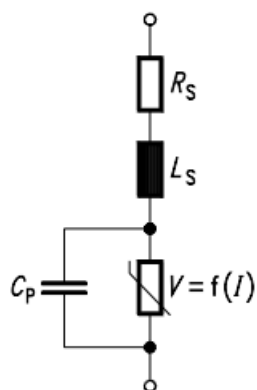


Figura 21 – Circuito equivalente do modelo PSpice  
(TDK-ELECTRONICS, )

## 5 Resultados e Discussões

Este capítulo irá apresentar os resultados das modelagens apresentadas através dos gráficos obtidos nas simulações realizadas. Além disso, também apresentará uma discussão acerca dos resultados e análises.

### 5.1 Simulações

As simulações das modelagens apresentadas foram realizadas no software *LTspice*, software de simulação *SPICE* de alto desempenho, da empresa *Analog Device*.

#### 5.1.1 Onda de Surto

Primeiramente, o circuito da figura 11 foi simulado com uma carga alta na saída ( $R_{S2}=19,8 \Omega$ ) para observar o pico de tensão. A forma de onda mostrada na figura 22 respeita o padrão máximo de amplitude de 4 kV, a duração está dentro de  $50 \mu s$  e o tempo de frente está dentro de  $1,2 \mu s$ .

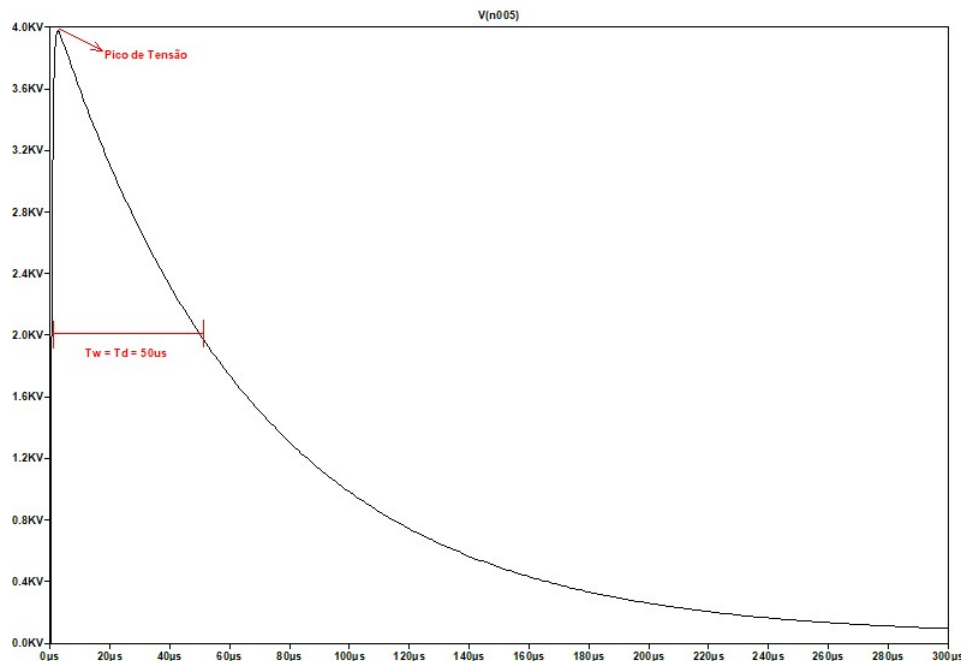


Figura 22 – Simulação da Onda de Tensão.

Para observar o pico de corrente, o circuito foi simulado com uma carga baixa na saída ( $R_{S2}=0,1\Omega$ ), gerando um curto circuito. O resultado é mostrado na figura 23. De acordo com o gráfico, o tempo de frente é  $8\mu s$  e o tempo de cauda é  $20\mu s$ , portanto, a forma de onda do impulso de corrente está de acordo com a norma IEC 61000-4-5.

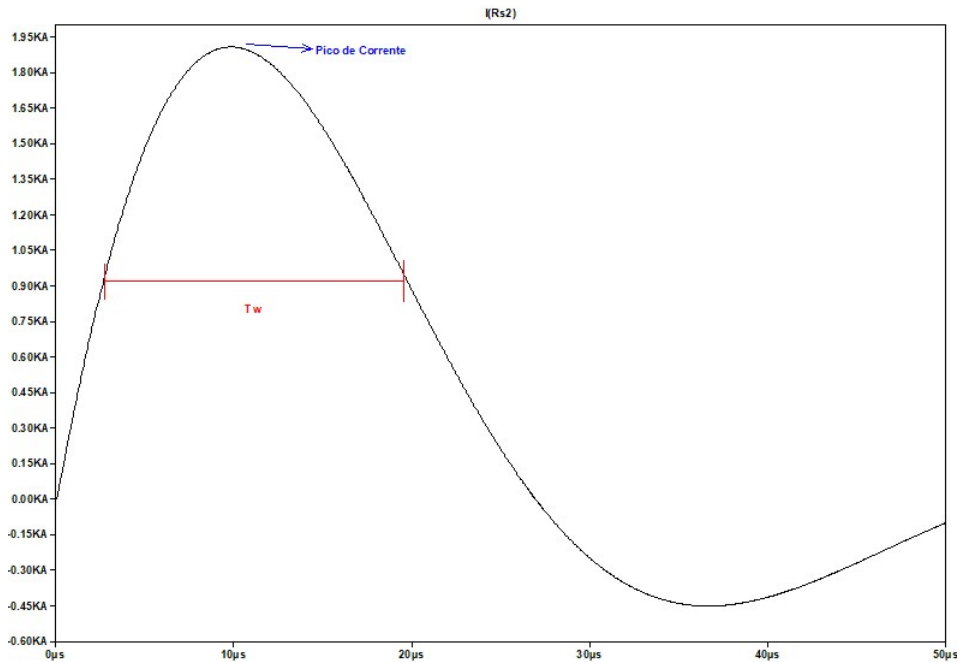


Figura 23 – Simulação da Onda de Corrente.

### 5.1.2 Onda de Surto e Varistor Ideal

Na figura 24, é mostrado o circuito onde se aplica um surto de 4.3kV e usa-se um varistor ideal para apresentar o funcionamento básico desse dispositivo. O componente ideal do varistor no *LTspice* é um resistor controlado por tensão, ou seja, para a sua utilização torna-se necessária a utilização de uma fonte de tensão. Para a simulação usou-se uma fonte de pulso, semelhante à onda de surto.

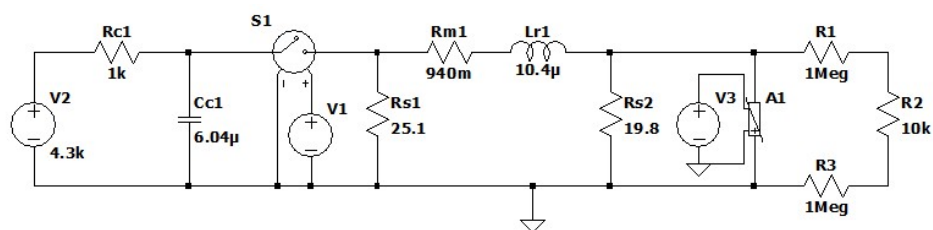


Figura 24 – Circuito onda de surto com varistor ideal.

Nas figuras 25 e 26, são apresentados as saídas das ondas de tensão e de corrente simuladas. Analisaram-se as mudanças descritas nas ondas de surto e depois do varistor. Como pode ser observado na figura 25 ao ser exposto a um transiente de alta tensão o varistor começa a conduzir e prende a tensão transiente ao um nível seguro, pois sua tensão de ruptura foi excedida. Conforme o manual do *LTspice* a tensão de ruptura será definida pela tensão aplicada em seus terminais de controle. É aplicada uma tensão de surto de 1.35kV e no varistor essa tensão é atenuada para 680V mantendo-o em um nível adequado. Com a tensão muito alta, o MOV está conduzindo muita corrente para eliminar



a tensão extra, e assim diminuindo o valor da resistência do MOV para um valor muito baixo, fazendo com que pareça um curto. Portanto, a corrente vai de 1.75kA para 0A, como observado na figura 26.

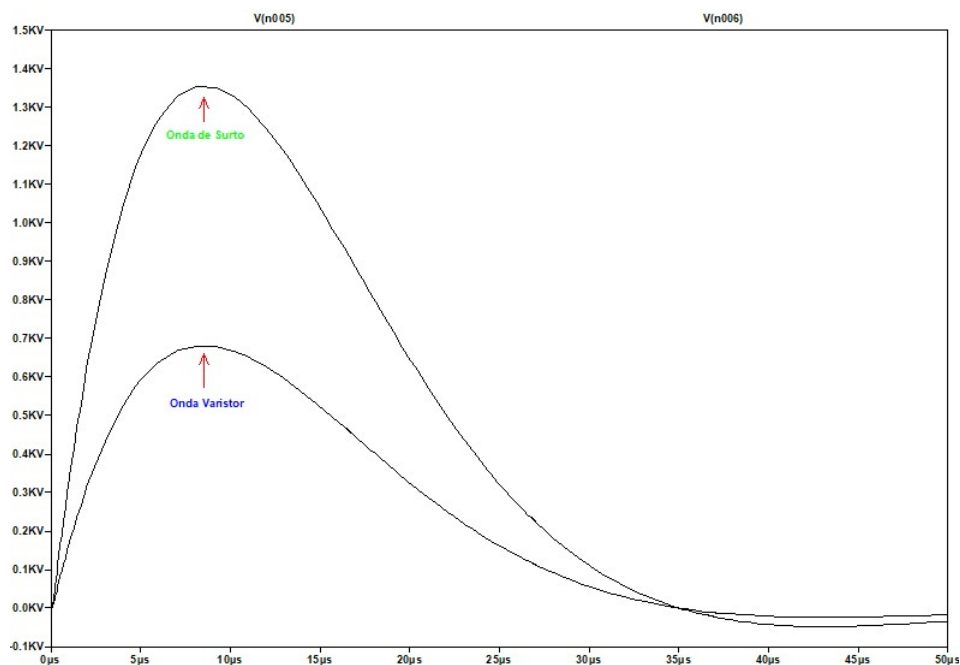


Figura 25 – Ondas de tensão do circuito onda de surto com varistor ideal.

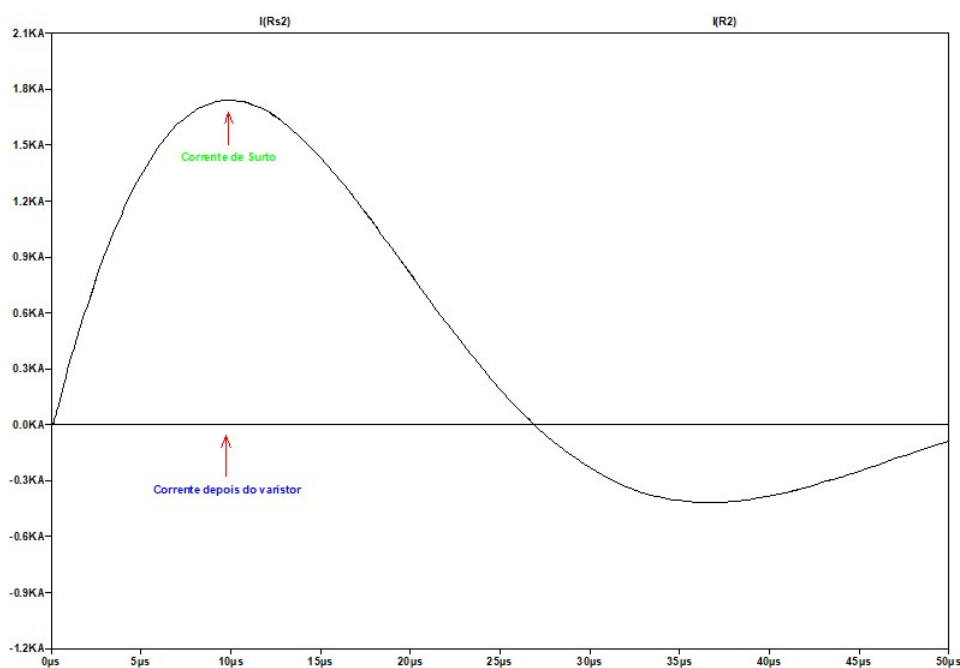


Figura 26 – Ondas de corrente do circuito onda de surto com varistor ideal.

### 5.1.3 Onda de Surto e Modelo Varistor TDK - S14K275

Nesta simulação foram analisados os resultados da simulação da onda de surto com o modelo S14k275 da TDK. A figura 27 mostra o circuito utilizado. Os resistores ao final do circuito foram usados para pegar as ondas de corrente e tensão depois do varistor.

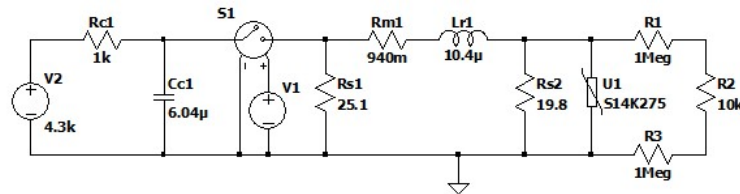


Figura 27 – Circuito onda de surto e varistor S14K275.

As figuras 28 e 29 exibem, respectivamente, os resultados de saída das ondas de tensão e corrente. Em termos de supressão de sobretensão, a forma de onda de tensão contém oscilações superpostas, que são causadas pela interação do gerador de tensão de surto, varistor e condutores conectados.

Os resultados são muito semelhantes aos do modelo com o varistor ideal. No entanto, a presença do capacitor no modelo do circuito da TDK suaviza as bordas de tensão de surto íngremes e, conseqüentemente, melhora o nível de proteção, diminuindo a tensão.

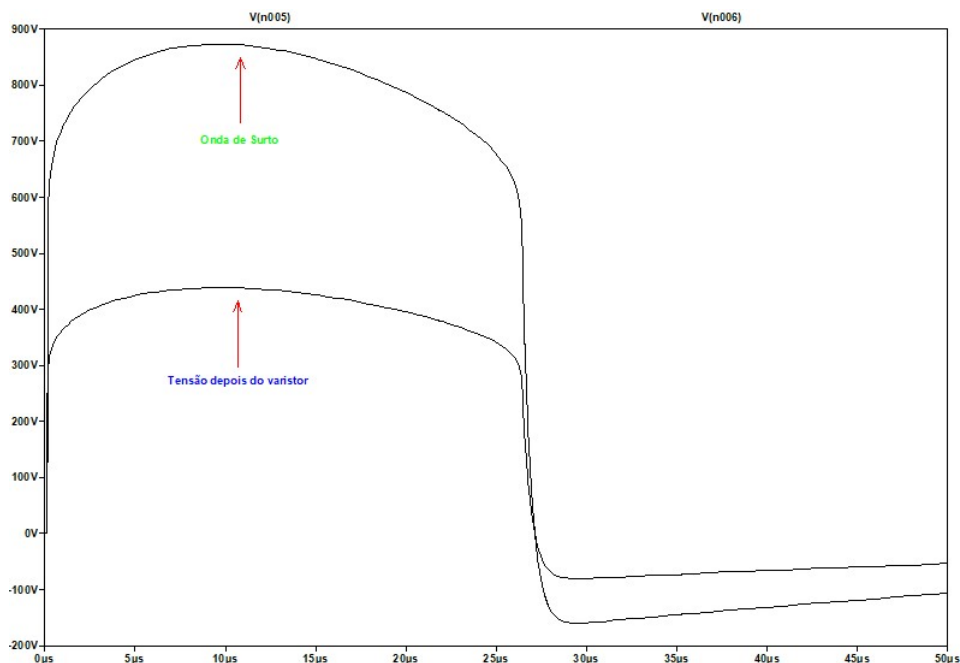


Figura 28 – Ondas de tensão do circuito onda de surto com varistor TDK.

A corrente trabalha de forma semelhante à corrente do circuito de surto com varistor ideal, isso acontece porque, normalmente, o varistor, quando submetido a um surto, desvia todo o impulso de corrente para o terra de proteção e limita a tensão no

equipamento a determinado nível de proteção de tensão. Portanto, a tensão vai de  $\approx 880V$  à  $\approx 440V$ , conforme a figura 28, e a corrente vai de 1.95kA para 0A, como observado na figura 29.

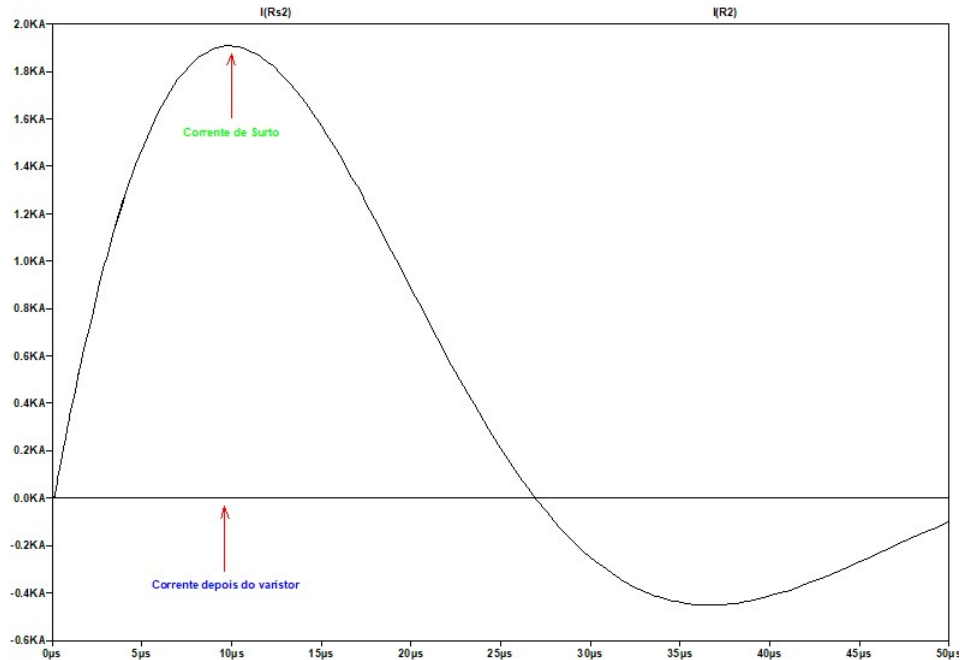


Figura 29 – Ondas de corrente do circuito onda de surto com varistor TDK.

### 5.1.4 Modelo Térmico do Varistor

O modelo térmico do varistor apresenta duas propriedades do Óxido de Zinco, a condutividade térmica e a capacidade térmica. Essas propriedades foram modeladas e simuladas para obter as curvas semelhantes às do estudo de (MARTIN, 2017). Primeiramente, a condutividade térmica foi modelada com o circuito da figura 30. Nesse circuito, o resistor  $R_2$  é um componente que varia com o inverso do valor da temperatura e o capacitor foi definido como um valor fixo. Os valores da temperatura foram modelados como uma faixa de valores de 1 k à 1500 K porque o software usado não realiza a simulação da temperatura real.

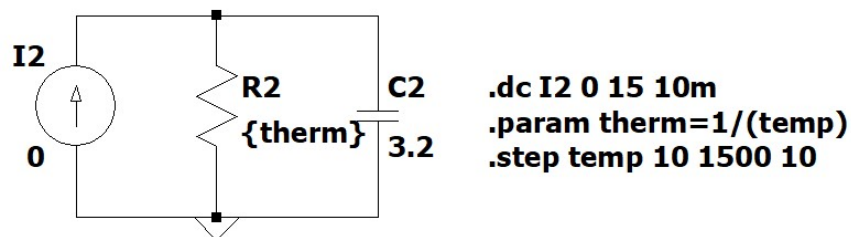


Figura 30 – Circuito para Modelagem da Condutividade Térmica.

Já para a capacidade térmica, como o objetivo é modelar a capacidade, usou-se o resistor com um valor fixo e um capacitor como um componente que varia com o log da temperatura. O equacionamento com a função *log* foi escolhido para modelar a onda, de forma que ela se aproxime da onda da figura 15. A capacidade térmica foi modelada com o circuito da figura 31.

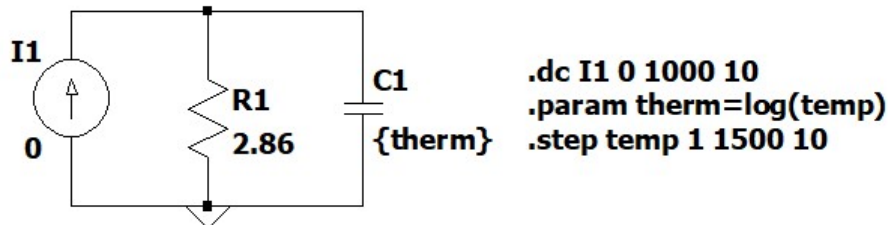


Figura 31 – Circuito para modelagem da capacidade térmica.

Os resultados encontrados são apresentados nos gráficos das figuras 32 e 33. A partir do gráfico da figura 32 observa-se que para baixas temperaturas, o varistor possui uma maior condutividade, mas com o aumento da temperatura essa diferença diminui chegando a ser praticamente igual para temperaturas acima de 500 K. Esses resultados mostram que o material é um bom condutor nas temperaturas baixas.

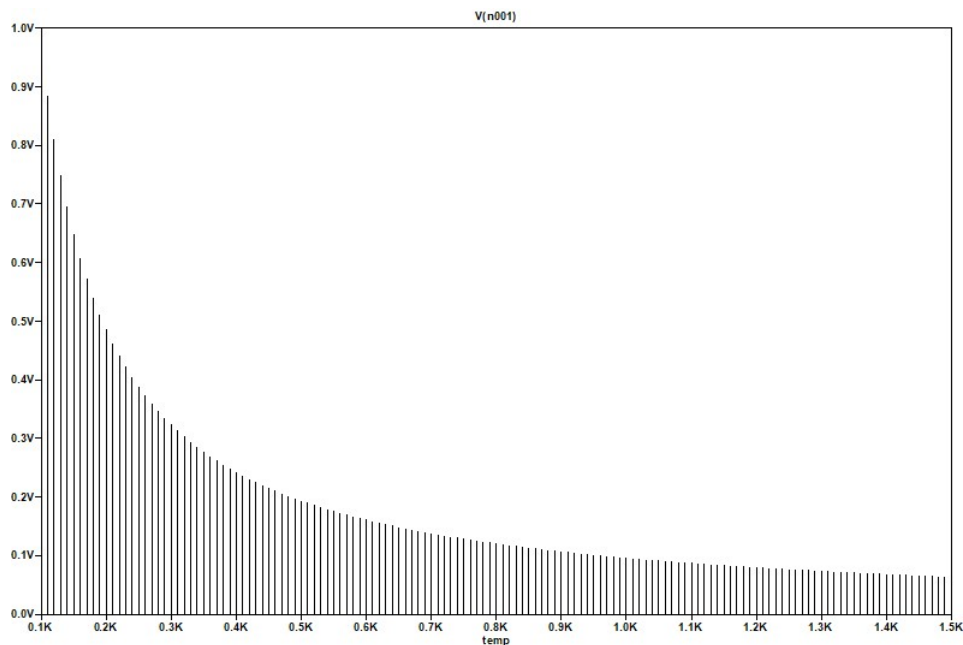


Figura 32 – Condutividade Térmica.

Já para a capacidade térmica, observa-se que com o aumento da temperatura, acontece também o aumento da quantidade de calor que o material pode reter, também pode ser observado que quanto maior é a temperatura, menor é a diferença entre os valores da capacidade.

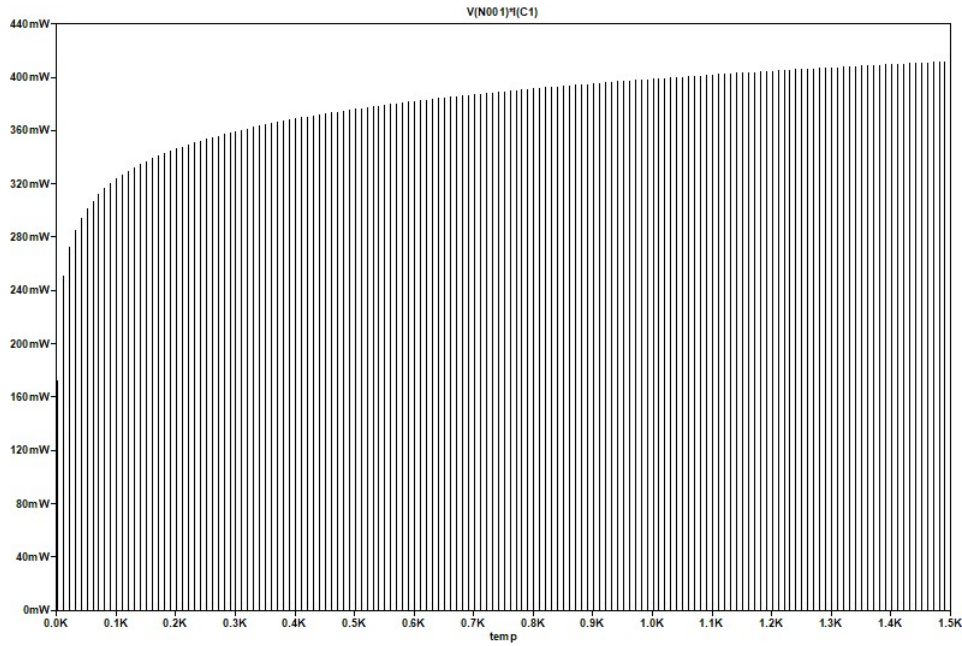


Figura 33 – Capacidade Térmica.

### 5.1.5 Onda de Surto e Modelo Térmico

Nesta seção foi feita a combinação do circuito de onda de surto com o modelo térmico do varistor apresentado. O circuito montado é apresentado na figura 34.

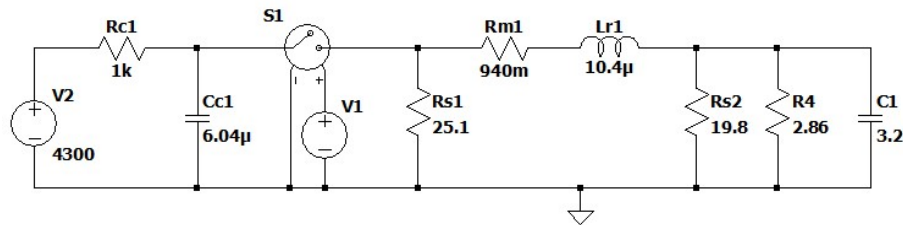
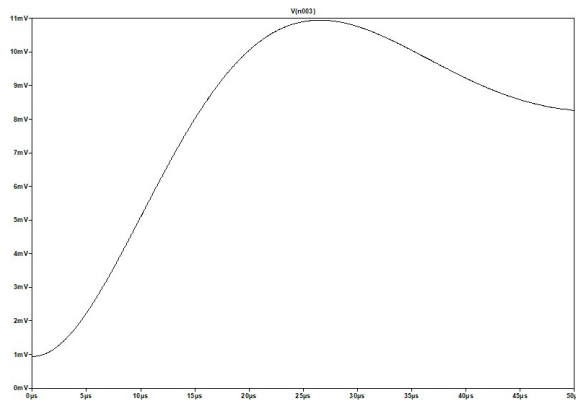


Figura 34 – Circuito onda de surto e modelo térmico do varistor.

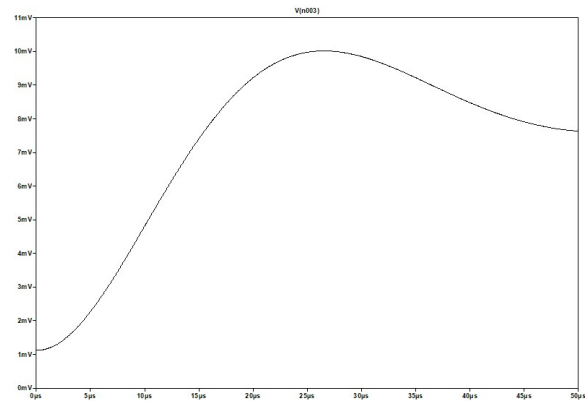
De acordo com (MORKOC; OZGUR, 2009) o óxido de zinco apresenta propriedades térmicas que variam fortemente com a temperatura. Diante de um surto o núcleo de ZnO dentro do corpo do varistor alcança uma temperatura extremamente alta, todavia na superfície do dispositivo essa temperatura é bem menor. Isso ocorre em razão da propagação de calor e a distribuição do surto ao longo do volume do varistor que ocorrem de forma lenta. Desse modo, foi feito o modelo térmico do varistor, no qual a resistência térmica e capacitância térmica foram determinadas para incluir da maneira certa a dependência da temperatura. Usando-se os valores do gráfico de condutividade, foi possível encontrar a resistência térmica de  $2.86 [K/W]$ , já que ela é seu inverso. E a capacidade térmica de  $3.2 J/cm^3K$ , ambos os valores considerando a temperatura ambiente.

Os gráficos resultantes são apresentados nas figuras 35(a), 35(b), 35(c) e 35(d). Para fazer essa simulação foram usados os resultados dos gráficos das figuras 32 e 33 para

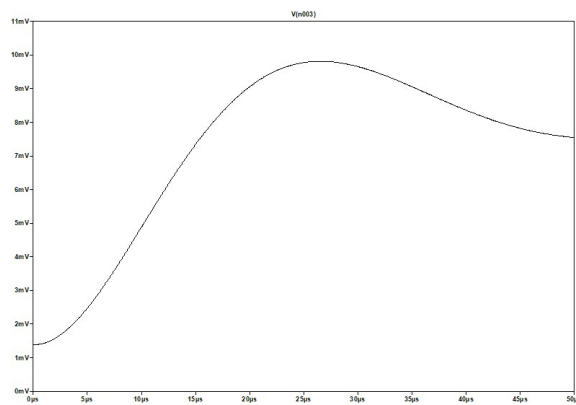
as temperaturas de 300 K, 400 K, 500 K e 600 K. Observou-se que existe uma relação entre a temperatura e a tensão, quando a temperatura aumenta, a tensão diminui, essa diminuição na tensão justifica-se pela constante de tempo do circuito do modelo térmico, uma vez que trata-se de um circuito RC.



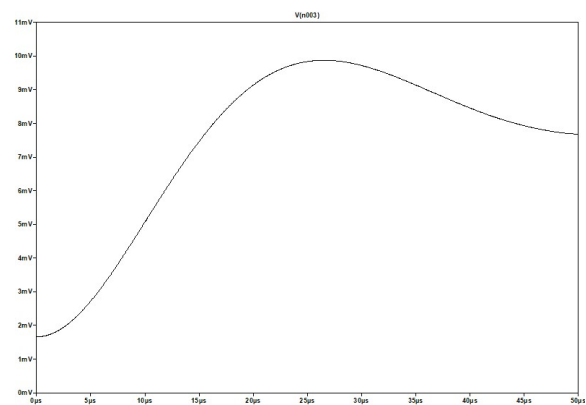
(a) Temperatura: 300 K, R4: 2.86 e C1: 3.2



(b) Temperatura: 400 K, R4: 3.57 e C1: 3.6



(c) Temperatura: 500 K, R4: 4.8 e C1: 3.7



(d) Temperatura: 600 K, R4: 5.5 e C1: 3.9

Figura 35 – Saídas para simulação da onda de surto com o modelo térmico.

A figura 36, mostra um experimento realizado pela Clamper, onde foi medida a temperatura no DPS VCL Slim 275 V, que possui uma corrente nominal de 10 kA e corrente máxima de 20 kA, submetido a 05 surtos de 10 kA com uma onda do tipo 8/20  $\mu$ s em intervalos de 1 minuto entre surto. Nela, pôde-se observar que ao aplicar um surto constante, o degrau da temperatura mudou com o tempo, diminuindo o seu valor. Isso aconteceu por dois motivos: o primeiro em razão da condutividade térmica e a capacidade térmica que mudam com a temperatura e o segundo devido ao degrau que fica menor por causa do aumento da quantidade de surto.

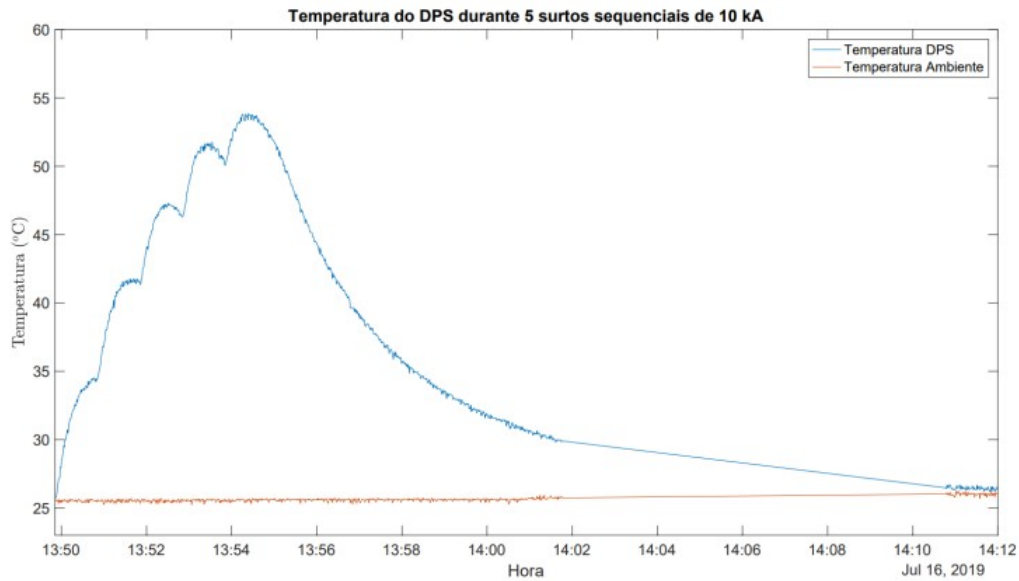


Figura 36 – Resultados experimentais do relatório de hardware da Clamper.

(CLAMPER, 2019)

O objetivo era fazer a simulação e obter um gráfico semelhante ao do experimento da Clamper, entretanto, o *LTspice* não permite fazer esse tipo de simulação e o *Cadence* apresentou algumas instabilidades durante o semestre, impossibilitando a sua utilização. Apesar dos contratemplos, fazendo uma relação entre a tensão e a temperatura do eixo Y dos gráficos das figuras 35 e 36, observou-se que os resultados apresentam o mesmo comportamento. Além disso, a onda de corrente também apresentou o resultado esperado, com a corrente desviada para o terra, conforme mostrado na figura 37.

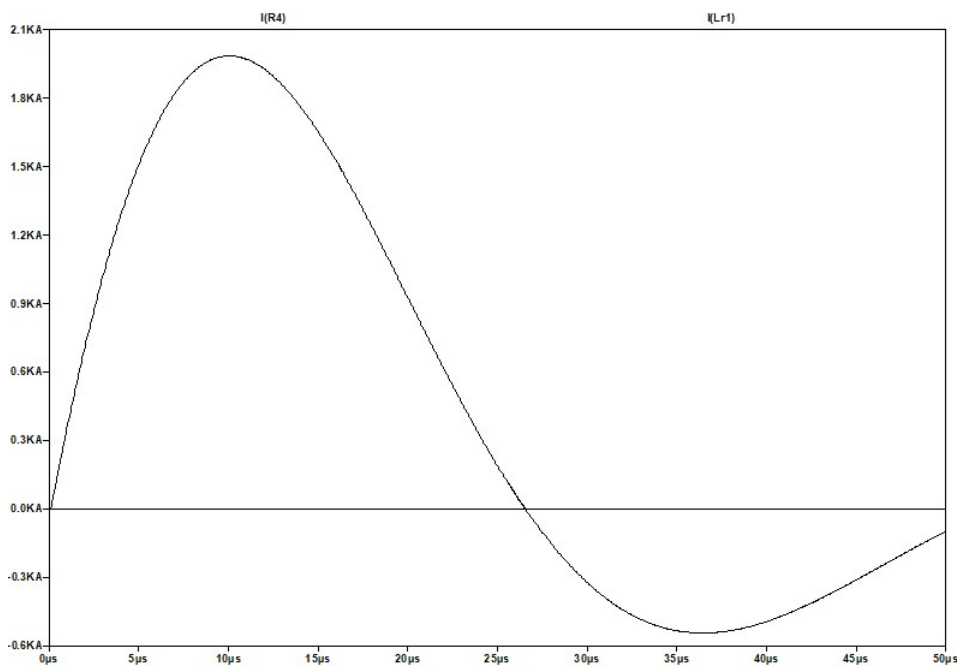


Figura 37 – Ondas de corrente do circuito onda de surto com o modelo térmico do varistor.

### 5.1.6 Modelo das Características V-I

A última simulação feita foi em relação à modelagem das características térmicas do varistor. O circuito usado é mostrado na figura 38.

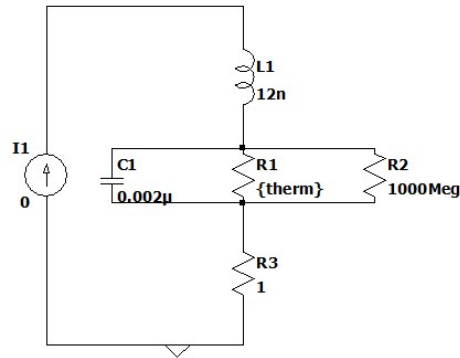


Figura 38 – Circuito modelo das características V-I.

No modelo das características V-I, o indutor  $L_1$  é usado para representar os cabos e interferências do circuito. O tempo de resposta do varistor de cerâmica real está na região de picossegundos. Por esta razão, as tentativas devem ser feitas para alcançar uma montagem com a menor indutância possível, ou seja, cabos mais curtos. O resistor  $R_3$  é a resistência mínima de  $L_1$  quando estiver ocorrendo um surto, sem o surto a resistência passa a ser o  $R_2$  com uma impedância de  $1000M\Omega$ . O resistor  $R_1$  foi modelado como um resistor variável, seu valor varia com o  $\sinh(R)$  e  $R$  varia de  $1\Omega$  à  $1k\Omega$  com um passo de  $100\Omega$ . A figura 39 apresenta o resultado.

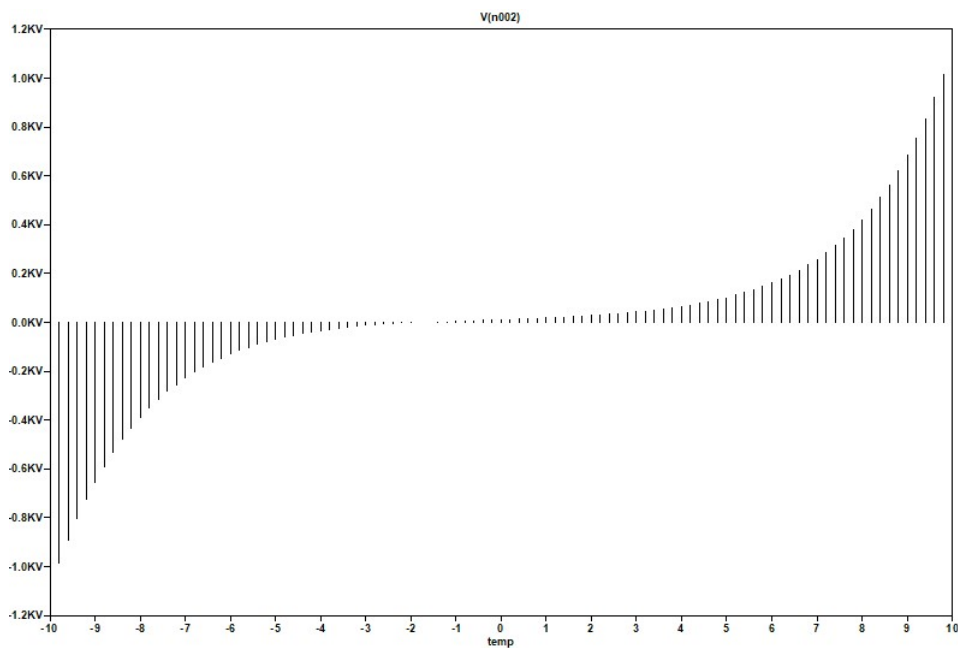


Figura 39 – Onda das características V-I.



Quando acontece um surto ou um transitório rápido, a capacitância funciona como um curto-circuito e a indutância como um circuito aberto. O comportamento é ao contrário porque  $L = sL$  e  $C = 1/sC$ , ou seja, para o indutor, nas baixas frequências temos uma impedância baixa e para o capacitor, nas baixas frequências temos uma impedância infinita.

Na figura 39, observa-se um comportamento semelhante ao da 8 que mostra a curva característica V-I típica do MOV. Na simulação, consegue-se identificar as três regiões de operação e sua tensão que marca a transição do modo linear para o não linear. Inicialmente, o MOV encontra-se em um modo de resistência extremamente alta, em seguida no modo de condução o varistor está absorvendo grande quantidade de energia, por fim a resistência não linear está em modo de baixa resistência aproximando-se do curto-circuito. O modelo elétrico básico para o varistor que relaciona as regiões correspondeu ao esperado, uma vez que ambas as curvas tem características bem próximas.

## 6 Conclusão

Neste trabalho, realizou-se um procedimento de modelagem da onda de surto e do varistor de óxido metálico para investigar influência da temperatura no comportamento do MOV em condições de surto elétrico. Além do mais, uma breve análise dos circuitos condicionadores que atuam diretamente com os sensores de temperatura do varistor e sua corrente de surto. Inicialmente são apresentadas as modelagens construídas no software *LTSpice*, tanto da onda de surto, quanto do varistor com suas principais especificações e requisitos de aplicações. Em seguida, foram analisadas e discutidas as variações da onda de surto em distintos modelos de varistores demonstrando seus efeitos de tensão e corrente, nivelando sua proteção conforme cada modelo. Utilizou-se um modelo ideal, um modelo pronto da fabricante TDK e um modelo RC com valores de propriedades do óxido de zinco que influenciam diretamente no comportamento térmico do varistor.

Desse modo, foram apresentadas as características de condutividade térmica e capacidade térmica que possuem uma atuação direta no modo como o varistor se comporta fora da sua temperatura de operação. Com isso, foram utilizados os dados dos gráficos para a simulação da modelagem térmica do varistor. Foram comparados os gráficos obtidos da modelagem térmica com um experimento real realizado pela clumper e chegou-se a conclusão de que os resultados de simulação se assemelham aos experimentais. Assim, o degraú da temperatura diminui de acordo com o aquecimento e resfriamento do MOV que é interpretado como sua auto-recuperação.

Os resultados das simulações estão de acordo com medidas experimentais já realizadas em estudos sobre análise térmica dos varistores so condições de surto elétrico, assim como apresentado nas referências do trabalho. Todavia, mais testes de validação são necessários com um software mais robusto para dar mais exatidão no procedimento da modelagem eletrotérmica e dar maior confiabilidade ao MOV analisado.

# Referências

- ABNT NBR 5419-4. *Proteção contra descargas atmosféricas Parte 4: Sistemas elétricos e eletrônicos internos na estrutura*. Rio de Janeiro, Brasil, 2015. 99 p. Citado na página 19.
- BERGMAN ADRIENNE S. LAVINE, F. P. T. L. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. [S.l.]: JOHN WILEY SONS, 2011. v. 7. 1048 p. Citado na página 23.
- CLAMPER. *Automatização de Dispositivos de Proteção contra Surtos (DPS)*. Distrito Federal, 2019. Citado na página 46.
- ELECTRONICS, T. *Model libraries for monolithic and multilayer varistors*. 2021. Disponível em: <<https://www.tdk-electronics.tdk.com/en/180486/design-support/design-tools/varistors/model-libraries-for-monolithic-and-multilayer-varistors>>. Citado na página 36.
- INPE. Sistema elétrico. In: . [S.l.: s.n.], 2019. Disponível em: <<http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/infor/relampagos.e.efeitos/sistema.eletrico.php>>. Citado na página 17.
- INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. *IEC 61000-4-5: Part 4-5: Testing and measurement techniques – surge immunity test*. [S.l.], 2014. Citado 4 vezes nas páginas 7, 9, 30 e 31.
- Jinliang He. *Metal Oxide Varistors From Microstructure Macro-Characteristics*. [S.l.]: Wiley-VCH Verlag, 2019. v. 1. 484 p. Citado 3 vezes nas páginas 20, 21 e 25.
- KULARATNA, N. *Design of transient protection systems : including supercapacitor based design approaches for surge protectors*. [S.l.]: Elsevier, 2018. v. 1. 282 p. Citado 5 vezes nas páginas 7, 22, 26, 34 e 35.
- KUNKEL, L. R. *Proteção de Instalações Elétricas e Equipamentos no Ambiente Industrial, Contra Descargas Atmosféricas, Através de DPS*. 118 f. Monografia (TCC) — Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 19.
- LEGENDRE, D. Como integrar dispositivos de proteção contra surtos? In: . [S.l.: s.n.], 2018. Disponível em: <<https://blog.phoenixcontact.com/marketing-br/como-integrar-dispositivos-de-protecao-contra-surtos/>>. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 18.
- MARDIRA KARL PRIMARDI SAHA, T. K. S. R. A. The effects of electrical degradation on the microstructure of metal oxide varistor. *Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference*, v. 1, 2001. Citado na página 21.
- MARTIN, A. *Effect of multi-burst lightning flashes on surge protective devices using MOVs*. 2017. Disponível em: <<https://incompliancemag.com/article/effect-of-multi-burst-lightning-flashes-on-surge-protective-devices-using-movs/>>. Citado 4 vezes nas páginas 32, 33, 34 e 42.

MORKOC, H.; OZGUR Ümit. *Zinc Oxide: Fundamentals materials and device technology*. [S.l.: s.n.], 2009. v. 1. 488 p. Citado na página 44.

PAULINO, J. O. S. et al. *Proteção de equipamentos elétricos e eletrônicos contra surtos elétricos em instalações*. [S.l.]: Clamper, 2016. v. 1. 258 p. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 19.

PHOENIX CONTACT. *Apresentação sobre: Proteções contra descargas atmosféricas, sobretensões, surtos, transientes em Baixa Tensão*. Curitiba, 2014. 143 p. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 18.

SALLES, C. de. *Modo de Envelhecimento Frente a Impulsos de Curta Duração – Impulsos Atmosféricos em Resistores não Lineares a Óxido Metálico*. 148 f. Dissertação (Mestrado) — UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ, Itajubá - MG, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 23.

SAMARAS KOSTAS SANDBERG, C. S. C. J. K. A. Electrical surge-protection devices for industrial facilities - a tutorial review. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 43, 2007. Citado na página 14.

SARGENT, R.; DUNLOP, G.; DARVENIZA, M. Effects of multiple impulse currents on the microstructure and electrical properties of metal-oxide varistors. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, v. 27, n. 3, p. 586–592, 1992. Citado 3 vezes nas páginas 20, 22 e 25.

SILAGHI, A.-M. et al. Simulation of surge pulse generator and applications in automotive immunity testing. In: *2020 International Conference on Development and Application Systems (DAS)*. [S.l.: s.n.], 2020. p. 117–120. Citado na página 32.

TDK-ELECTRONICS. Siov metal oxide varistors. In: . [S.l.: s.n.]. Disponível em: [://www.tdk-electronics.tdk.com/download/531308/8cd06030e8ddf20bd381c1e8917f0e9c/siov-applications.pdf](http://www.tdk-electronics.tdk.com/download/531308/8cd06030e8ddf20bd381c1e8917f0e9c/siov-applications.pdf). Citado 2 vezes nas páginas 36 e 37.

ZHANG, H. *Building Materials in Civil Engineering*. [S.l.]: Woodhead, 2011. v. 1. iii p. Citado na página 24.

## Apêndices

# APÊNDICE A – Primeiro Apêndice

