



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

Condicionamento de Sinais para Dispositivos Inteligentes de Proteção Contra Surtos

Autor: Camilla Alves de Oliveira
Orientador: Prof. Dr. Sandro Augusto Pavlik Haddad

Brasília, DF
2022



Camilla Alves de Oliveira

Condicionamento de Sinais para Dispositivos Inteligentes de Proteção Contra Surtos

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

Camilla Alves de Oliveira

Condicionamento de Sinais para Dispositivos Inteligentes de Proteção Contra Surtos/ Camilla Alves de Oliveira. – Brasília, DF, 2022-
64 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. Condicionamento de Sinais para Dispositivos Inteligentes de Proteção Contra Surtos

CDU 02:141:005.6

Camilla Alves de Oliveira

Condicionamento de Sinais para Dispositivos Inteligentes de Proteção Contra Surtos

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, primeiramente, à Deus e à minha família por todo o incentivo, apoio, compreensão, paciência e por terem me proporcionado estrutura para gerir meus sentimentos e ações.

Agradeço à minha amiga e companheira de curso Natanaele por todo o ensinamento, pela confiança, pelo apoio e, sobretudo, pela amizade que se fortaleceu. Agradeço também a todos os colegas de curso, em especial, ao Richard, por todo o entusiasmo.

Agradeço pela oportunidade de ter sido membra da equipe de competição UnBaja, por todo o conhecimento teórico e prático obtido nas competições, pelas experiências e pelas amizades.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Sandro, pela oportunidade de participar do projeto com a empresa Clamper e por todo o suporte e paciência durante o processo de desenvolvimento do presente trabalho.

Por fim, agradeço a todo o corpo docente da Universidade de Brasília, funcionários e servidores, que fizeram parte da minha jornada, me proporcionando aprendizado, crescimento pessoal e profissional.

Resumo

O presente trabalho é um estudo das características dos varistores e do condicionamento de sinais dos circuitos de aquisição de dados e de alimentação dos Dispositivos Inteligentes de Proteção Contra Surtos. O objetivo é identificar os fatores responsáveis pelos erros na aquisição de dados, de forma que, sejam propostas topologias que possibilitem que os dados sejam preparados para o estágio de processamento. Além disso, deseja-se analisar e simular o comportamento dos circuitos propostos em cenários de surtos e interferências. É usada uma metodologia Top-Down, onde a partir de uma visão geral do sistema, obtém-se uma fragmentação do mesmo para compreensão de todos os seus subsistemas. Os circuitos de condicionamento relacionados aos sensores são simulados no *LTspice* para observar as tensões de entrada e os limites de tensão desejados na saída do condicionamento.

Palavras-chaves: condicionamento. DPS. topologia. simulação.

Abstract

The work presents a study of the characteristics of the varistors and the signal conditioning of the acquisition circuits of a power supply device for Smart Surge Protection Devices. The objective is to identify the factors responsible for the data acquisition, so that, in topologies, the data are prepared for stage errors. Furthermore, it is desired to analyze and simulate the behavior of the proposed circuits in surge and interference scenarios. A Top-Down methodology is used, from an overview of the system, a fragmentation of the same is obtained to understand all its subsystems. The conditioning circuits related to the sensors are simulated in *LTspice* to observe the input capacity and the desired limits on the conditioning output.

Key-words: conditioning. DPS. topology. simulation.

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. Fonte: (Jinliang He, 2019).	20
Figura 5 – Características V-I típicas de um MOV. Fonte: (KULARATNA, 2018).	21
Figura 6 – Característica da Potência Consumida versus Temperatura de um varistor. Fonte: (SALLES, 2011).	23
Figura 7 – Divisor de tensão.	25
Figura 8 – Transformador de Corrente. Fonte: (GUERRA, 2007).	26
Figura 9 – Diagrama de Blocos para o sistema de medição.	27
Figura 10 – Amplificador Operacional.	28
Figura 11 – Diagrama de blocos do fluxo de trabalho.	30
Figura 12 – Onda de Tensão. Fonte: (NBR IEC 61000-4-5, 2014).	33
Figura 13 – Onda de Corrente. Fonte: (NBR IEC 61000-4-5, 2014).	34
Figura 14 – Circuito para gerar a onda da corrente de surto.	34
Figura 15 – Circuito para Modelagem Térmica.	35
Figura 16 – Condutividade térmica do óxido de zinco. Fonte: (MARTIN, 2017) . . .	36
Figura 17 – Capacidade térmica do óxido de Zinco.	36
Figura 18 – Constante de tempo do térmica do oxido de zinco.	37
Figura 19 – Circuito equivalente. Fonte: (KULARATNA, 2018).	37
Figura 20 – Casos simplificados sob fuga e condução. Fonte: (KULARATNA, 2018).	38
Figura 21 – Varistor TDK modelo S14K275.	38
Figura 22 – Modelo <i>spice</i> do Varistor	39
Figura 23 – Curva característica V/I com banda de tolerância	39
Figura 24 – Circuito equivalente do modelo PSpice	40
Figura 25 – Topologia básica para medição de sinais elétricos.	40
Figura 26 – Filtro anti-aliasing.	41
Figura 27 – Circuito de proteção.	42
Figura 28 – Circuito de condicionamento para a tensão.	42
Figura 29 – Circuito de condicionamento para a corrente de fuga.	43
Figura 30 – Simulação da Onda de Tensão.	44
Figura 31 – Simulação da Onda de Corrente.	45
Figura 32 – Circuito onda de surto com varistor ideal.	45
Figura 33 – Ondas de tensão do circuito onda de surto com varistor ideal.	46

Figura 34 – Ondas de corrente do circuito onda de surto com varistor ideal.	46
Figura 35 – Circuito onda de surto e varistor S14K275.	47
Figura 36 – Ondas de tensão do circuito onda de surto com varistor TDK.	47
Figura 37 – Ondas de corrente do circuito onda de surto com varistor TDK.	48
Figura 38 – Circuito para Modelagem da Condutividade Térmica.	48
Figura 39 – Circuito para modelagem da capacidade térmica.	49
Figura 40 – Condutividade Térmica.	49
Figura 41 – Capacidade Térmica.	50
Figura 42 – Circuito onda de surto e modelo térmico do varistor.	50
Figura 43 – Saídas para simulação da onda de surto com o modelo térmico.	51
Figura 44 – Resultados experimentais do relatório de hardware da Clamper. Fonte: (CLAMPER, 2019)	52
Figura 45 – Ondas de corrente do circuito onda de surto com o modelo térmico do varistor.	52
Figura 46 – Circuito modelo das características V-I.	53
Figura 47 – Onda das características V-I.	53
Figura 48 – Saída simulada do circuito de condicionamento de tensão para $220 V_{RMS}$	55
Figura 49 – Onda de tensão de surto e onda depois do varistor.	55
Figura 50 – Saída simulada do circuito de condicionamento de tensão para um surto.	56
Figura 51 – Saída simulada do circuito de condicionamento de corrente de fuga.	57
Figura 52 – Saída simulada do circuito de condicionamento de corrente de fuga.	57
Figura 53 – Circuito de condicionamento de tensão.	63
Figura 54 – Circuito de condicionamento de corrente de fuga.	64

Lista de tabelas

Tabela 1 – Relação entre os picos de tensão e corrente das ondas. Adaptado de: (NBR IEC 61000-4-5, 2014).	34
--	----

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
Ω	Ohm
V	Volt
F	Farad
s	Segundos
μ	Micro
K	Kelvin
k	Quilo
J	Joule
W	Watts
Δ	Diferença
\approx	Aproximadamente

Sumário

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivo Geral	15
1.2	Objetivos Específicos	15
1.3	Estrutura do Trabalho	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1	Surto	17
2.1.1	Dispositivo de Proteção Contra Surtos	19
2.2	Varistores	20
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
2.3	Sensores	25
2.3.1	Sensores de Tensão	25
2.3.1.1	Divisor de Tensão	25
2.3.2	Sensores de Corrente	26
2.3.2.1	Transformador de corrente	26
2.4	Condicionadores de Sinais	27
2.4.1	Amplificador Operacional	27
2.4.1.1	Ganho de Tensão	28
2.4.1.2	Slew Rate	28
2.4.1.3	CMRR - Common Mode Rejection Ratio	28
2.4.2	Teorema da Amostragem	29
2.4.3	Filtros Anti-Aliasing	29
3	METODOLOGIA	30
3.1	Metodologia Top-Down	30
3.2	Etapa 1 - Revisão Bibliográfica	31
3.3	Etapa 2 - Sinais e Adequação	31
3.4	Etapa 3 - Modelagem e Topologias	31
3.5	Etapa 4 - Simulações	31
3.6	Etapa 5 - Análise e Discussão dos Resultados	32

4	DESENVOLVIMENTO	33
4.1	Modelagens	33
4.1.1	Modelagem da Onda de surto	33
4.1.2	Modelagem Térmica do Varistor	35
4.1.3	Modelagem das características V-I do Varistor	37
4.1.4	Modelo Varistor TDK - S14K275	38
4.2	Topologia do sistema	40
4.3	Topologia dos circuitos condicionadores	41
4.3.1	Tensão	42
4.3.2	Correntes de Fuga	43
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
5.1	Simulações	44
5.1.1	Onda de Surto	44
5.1.2	Onda de Surto e Varistor Ideal	45
5.1.3	Onda de Surto e Modelo Varistor TDK - S14K275	47
5.1.4	Modelo Térmico do Varistor	48
5.1.5	Onda de Surto e Modelo Térmico	50
5.1.6	Modelo das Características V-I	53
5.1.7	Sensor de Tensão	54
5.1.7.1	Regime Permanente - 220 V_{RMS}	54
5.1.7.2	Regime de Surto	55
5.1.8	Sensor de Corrente	56
6	CONCLUSÃO	58
	REFERÊNCIAS	59
	APÊNDICES	62
	APÊNDICE A – PRIMEIRO APÊNDICE	63

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.

Visto a importância dos varistores nos DPSs, percebe-se que grandezas, como tensão, corrente e temperatura influenciam no tempo de vida útil destes dispositivos e precisam ser acompanhadas. Por esse motivo, torna-se necessária a utilização de soluções inteligentes. Para a elaboração de um dispositivo inteligente de proteção contra surtos é necessária a utilização de sensores e ou transdutores para o monitoramento dessas grandezas e aquisição de dados, e de um microcontrolador para o processamento dos dados. Uma vez que, o monitoramento envolve a utilização de sensores, esses dispositivos requerem circuitos condicionadores de sinais para adequar o sinal lido às necessidades do

microcontrolador. Além disso, no projeto há a leitura de grandezas elevadas de tensões e correntes, em vista disso, deve-se atenuar os níveis elétricos e filtrar ruídos indesejáveis para possibilitar a leitura dos dados pelo microcontrolador. Em sua essência, o desenvolvimento deste trabalho aborda o estudo dos circuitos condicionadores de sinais.

Este trabalho está inserido no Projeto “Projeto de desenvolvimento tecnológico de um novo firmware e hardware e sua integração com plataforma de software para automação 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, Modelagens e os Circuitos de Condicionamento de Sinais.

1.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é o estudo dos circuitos de condicionamento usados nos Dispositivos de Proteção Contra Surtos, inseridos no contexto de automatização, identificando os fatores responsáveis pelos erros na aquisição de dados, de forma que, sejam propostas topologias que possibilitem que os dados sejam preparados para o estágio de processamento. Deseja-se analisar e simular o comportamento das topologias propostas em cenários de surtos e interferências.

1.2 Objetivos Específicos

- Estudar o comportamento do surto e modelar um circuito que atenda às especificações das normas;
- Pesquisar os modelos de varistores existentes, modelar e observar as características;
- Estudar e projetar os circuitos de condicionamento de sinal levando em consideração a amplitude real dos sinais de entrada;
- Simular os circuitos de condicionamento de sinal associados aos sensores empregados no projeto, observando as tensões de entrada e os limites de tensão desejados na saída do condicionamento;
- Dimensionar topologias de proteção contra sobretensões e ruídos provenientes da rede elétrica.

1.3 Estrutura do Trabalho

Visando o alcance dos objetivos propostos, o presente documento está dividido em cinco capítulos.

Capítulo 1: neste capítulo, é apresentada uma breve introdução sobre o tema, a motivação, o objetivo geral, os objetivos específicos e a estrutura do trabalho.

Capítulo 2: aborda o referencial teórico com uma revisão bibliográfica sobre os conceitos necessários para a realização do trabalho. Aborda a definição dos surtos elétricos, DPSs e varistores. Além disso, conceitua os sensores e os circuitos de condicionamento utilizados no Projeto.

Capítulo 3: apresentada a metodologia e a topologia utilizada no trabalho. O capítulo três mostra todas as etapas em detalhes desde a revisão bibliográfica, até as simulações e seus resultados.

Capítulo 4: esse capítulo discorre o desenvolvimento do trabalho, apresentando as configurações dos circuitos utilizados.

Capítulo 5: neste módulo, serão apresentados os resultados esperados e alcançados, assim como, as simulações no simulador *LTSpice*.

Por fim, o **capítulo 6**, refere-se à conclusão do trabalho e sugestões para futuras melhorias.

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.

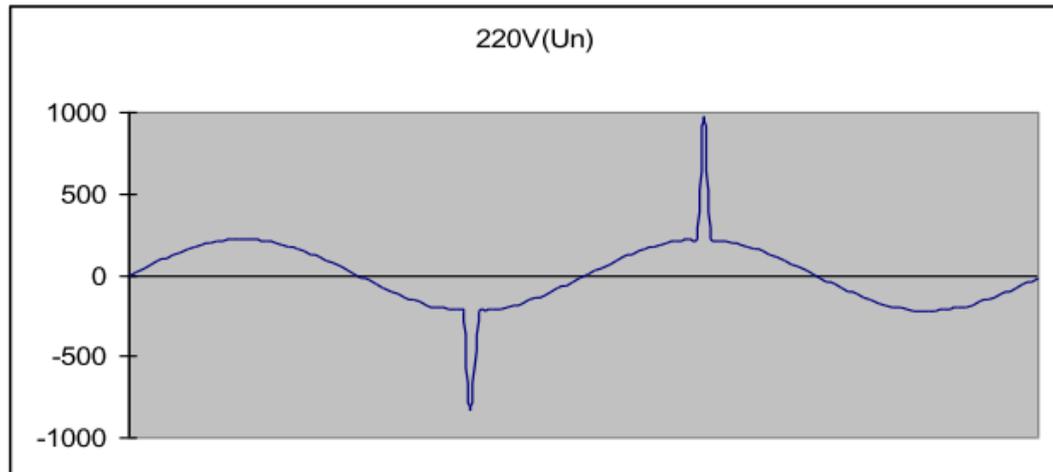


Figura 1 – Comportamento da onda com um distúrbio de tensão. Fonte: (PHOENIX CONTACT, 2014).

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 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.

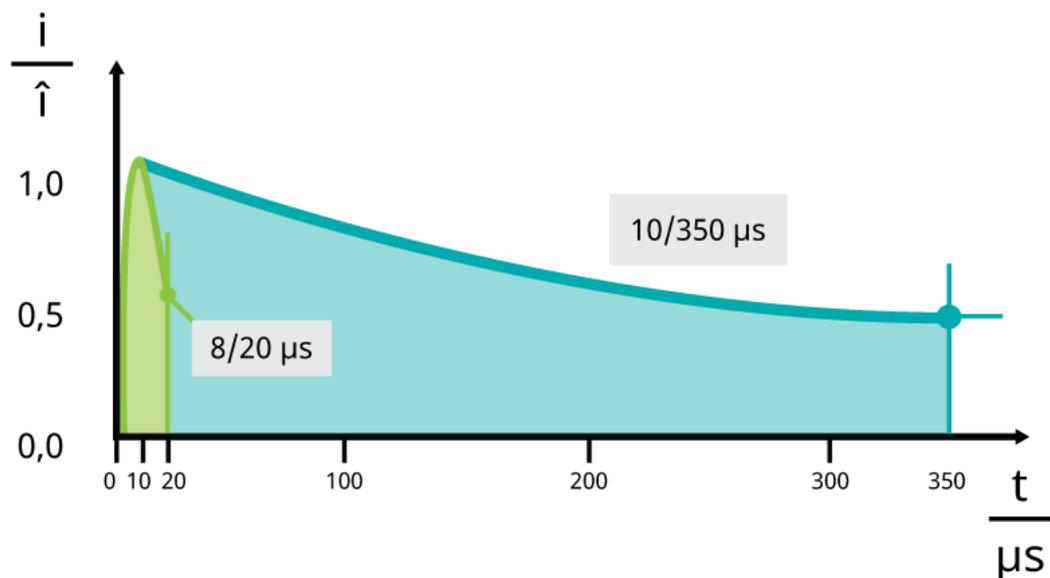


Figura 2 – Representação das ondas de $8/20\mu\text{s}$ e $10/350\mu\text{s}$. Fonte: (LEGENDRE, 2018).

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 des-

cargas 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).

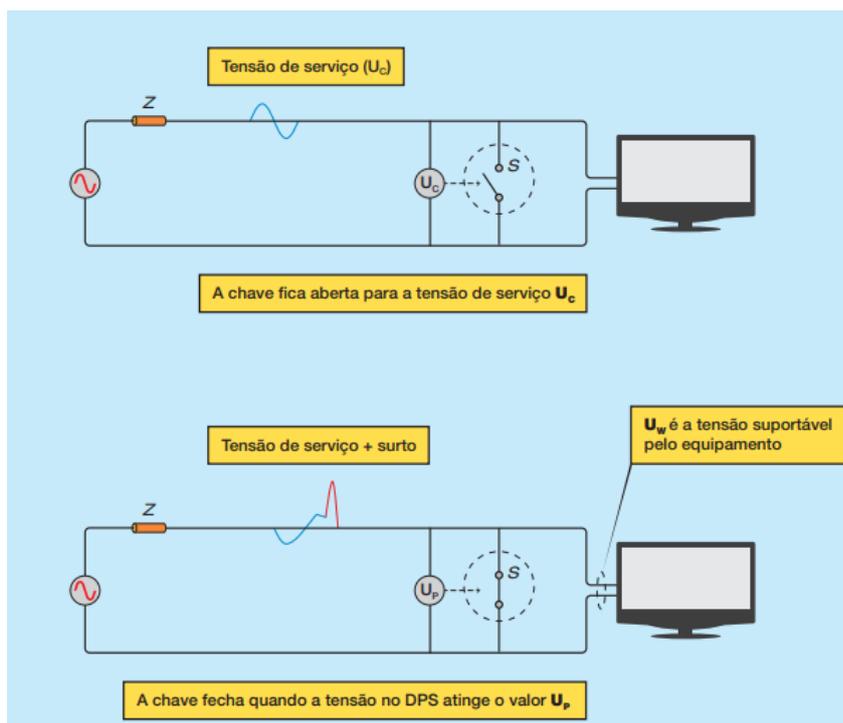


Figura 3 – Funcionamento básico de um DPS. Fonte: (PAULINO et al., 2016).

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.

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 à 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. A micrografia típica da estrutura do varistor é mostrada na figura 4.

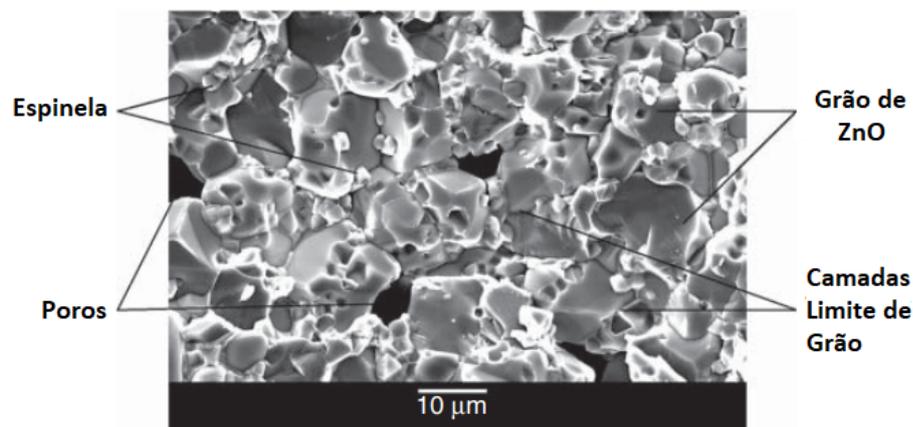


Figura 4 – Micrografia típica da estrutura do varistor. Fonte: (Jinliang He, 2019).

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 dependentes da tensão. Assim, tais características são expressas na figura abaixo.

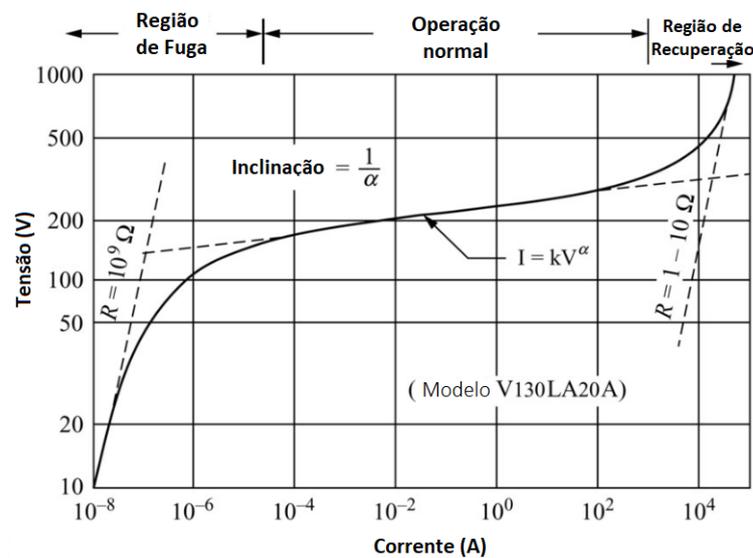


Figura 5 – Características V-I típicas de um MOV. Fonte: (KULARATNA, 2018).

Na figura 5, são ilustradas três regiões 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 α são constantes. Além disso, os MOVs são caracterizados pela magnitude dos valores de α . Nas regiões de baixas correntes e altas correntes não há grande influencia da temperatura.

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

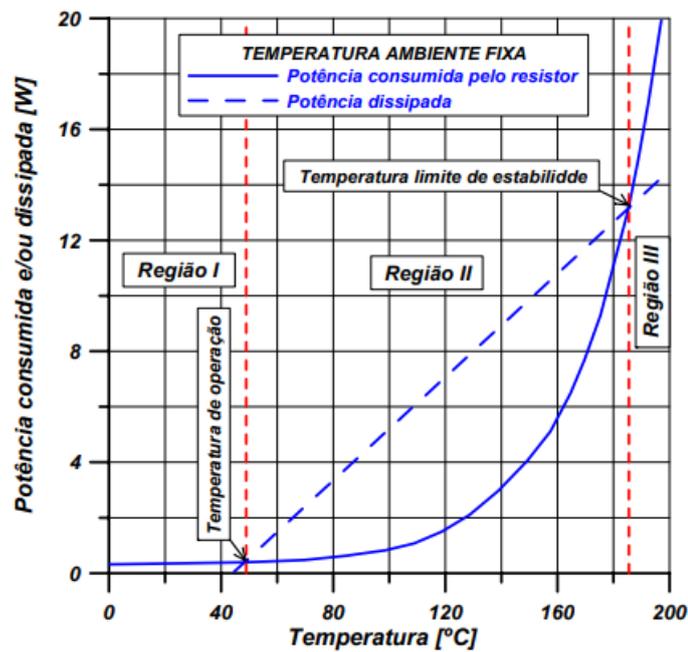


Figura 6 – Característica da Potência Consumida versus Temperatura de um varistor.
Fonte: (SALLES, 2011).

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 ' λ '. 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 [$W.m^{-1}.K^{-1}$]

ΔT 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];
- ΔT 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.

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 Tensão

O mecanismo utilizado para a medição da tensão aplicada ao DPS se baseia em um divisor resistivo ou divisor de tensão, o qual está associado a circuitos de filtragem analógica (filtros *anti-aliasing*). Os componentes físicos utilizados estão configurados, de forma que, viabilize a medição de tensão em regime permanente e em regime transitório, considerando as faixas dinâmicas do conversor analógico-digital do microcontrolador.

2.3.1.1 Divisor de Tensão

Um circuito divisor de tensão compõe-se de resistores associados em série, dimensionados para se obter uma dada fração da tensão fornecida pela fonte de tensão aos terminais de um dos resistores, sabendo que a tensão aos terminais de cada um dos resistores é diretamente proporcional à sua resistência elétrica.

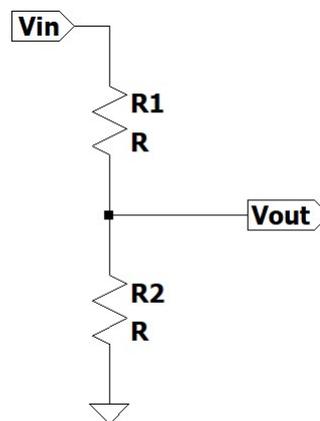


Figura 7 – Divisor de tensão.

A figura 7 mostra a configuração mínima de um divisor de tensão. A tensão em um resistor ligado em série a outros resistores e a uma fonte de tensão é igual à razão entre a resistência do resistor e a resistência total (DORF; SVODOBA, 2012). A tensão de saída V_{out} é dada pela equação 2.5:

$$V_{out} = \frac{R1}{R1 + R2} V_{in} \quad (2.5)$$

O circuito divisor de tensão é empregado quando a tensão de entrada é superior ao valor da tensão desejada.

2.3.2 Sensores de Corrente

No DPS são observadas duas correntes: a corrente de fuga e a corrente de surto. Neste trabalho será analisada a corrente de fuga. A corrente de fuga é um fluxo de cargas indesejado que pode causar muitos danos, desde choques elétricos até acidentes graves, por esse motivo, faz-se necessária a utilização de dispositivos para medição e acompanhamento dessa corrente. O mecanismo utilizado para a medição da corrente de fuga do DPS se baseia em um sensor do tipo “transformador de corrente”, o qual foi desenvolvido de forma específica para este projeto, uma vez que não foram identificadas soluções comerciais compatíveis com os requisitos do projeto, e é explicado nos subtópicos seguintes.

2.3.2.1 Transformador de corrente

O Transformador de Corrente (TC) é um equipamento de transformação desenvolvido para produzir uma corrente alternada no enrolamento secundário proporcional à corrente medida no enrolamento primário. O primário de um TC, é constituído de poucas espiras (às vezes até mesmo de uma única espira) feitas de condutor de cobre de grande seção, e é conectado em série com o circuito cuja corrente será medida, já o secundário é conectado aos instrumentos de medição de corrente (OLIVEIRA, 2001). A figura 8 ilustra um TC.

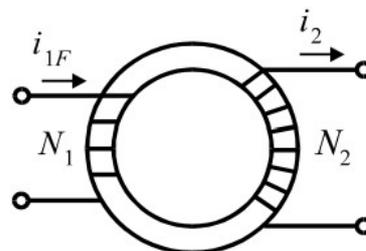


Figura 8 – Transformador de Corrente. Fonte: (GUERRA, 2007).

O TC ideal possui a relação amperes-espira do primário exatamente igual à magnitude da relação amperes-espira do secundário, porém, eles estão em fases opostas. Sabendo que as excitações dos dois enrolamentos são iguais, tem-se que:

$$N_1 I_{1f} = N_2 I_2 \quad (2.6)$$

onde:

N_1 = número de espiras no primário;

I_1 = Corrente no primário;

N_2 = número de espiras no secundário;

I_2 = Corrente no secundário;

Dessa forma, a função do TC é reduzir uma corrente medida na alta tensão a um valor menor, possibilitando que seja feita a medição e o monitoramento da corrente elétrica.

2.4 Condicionadores de Sinais

Muitas aplicações de aquisição de dados envolvem a utilização de sensores e ou transdutores. Esses dispositivos requerem um condicionamento do sinal para adequar o sinal lido às necessidades do microcontrolador que interpretará os dados. Entre suas várias etapas estão: amplificação, filtragem, isolamento, multiplexação, linearização e excitação.

Os condicionadores de sinais são circuitos eletrônicos que manipulam tensões ou correntes, de uma forma que essas grandezas sejam preparadas para o estágio de processamento. A figura 9 apresenta o digrama de blocos simplificado de um sistema de medição.



Figura 9 – Diagrama de Blocos para o sistema de medição.

No projeto há a leitura de grandezas elevadas de tensões e correntes, em vista disso, deve-se atenuar os níveis elétricos e filtrar ruídos indesejáveis para possibilitar a leitura dos dados pelo microcontrolador. Nos subtópicos a seguir são descritos os componentes usados nos condicionadores e suas características principais.

2.4.1 Amplificador Operacional

O amplificador operacional é um circuito integrado que tem a função de amplificar na saída a diferença dos sinais nos terminais de entrada, essa amplificação é dada pelo ganho de malha aberta do amplificador operacional que for utilizado (SEDRA; SMITH, 2015).

Esse circuito possui duas entradas, inversora e não inversora, e uma saída, além disso, os modelos comerciais podem conter mais duas entradas de alimentação. A figura 10 mostra o símbolo representativo do amplificador em circuitos.

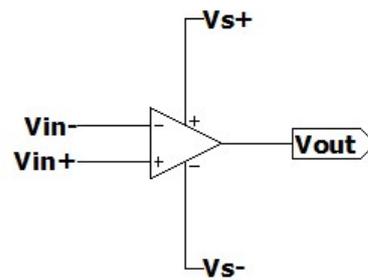


Figura 10 – Amplificador Operacional.

Um amplificador operacional é capaz de adicionar sinais, amplificar um sinal, integrá-lo ou diferenciá-lo. Os amplificadores operacionais são populares em projetos de circuitos práticos, pois são versáteis, baratos e fáceis de usar (ALEXANDER; SADIKU, 2013).

Os circuitos que utilizam amplificadores, utilizam também elementos passivos - resistores, capacitores - em sua configuração. Esses elementos são responsáveis pela realimentação negativa, pelo ajuste de ganho do amplificador e pela sua configuração.

2.4.1.1 Ganho de Tensão

O ganho de tensão de um amplificador é o fator pelo qual a tensão de entrada é multiplicada para gerar a saída. O ganho de tensão é dado pela equação 2.7.

$$A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad (2.7)$$

2.4.1.2 Slew Rate

O dispositivo de proteção contra surtos deve ser capaz de identificar surtos elevados, por esse motivo, é importante uma resposta rápida. O Slew Rate é a velocidade de resposta de um amplificador quando ocorre uma variação de tensão na entrada (SEDRA; SMITH, 2015). Esse fenômeno é utilizado para que não haja distorções do sinal, identificando a frequência máxima que pode ser aplicada ao amplificador. Essa taxa de variação é dada pela equação 2.8.

$$SR = \frac{\Delta V_o}{\Delta t} \frac{V}{\mu s} \quad (2.8)$$

2.4.1.3 CMRR - Common Mode Rejection Ratio

Um amplificador operacional ideal deveria ter a saída nula quando dois sinais iguais fossem aplicados em suas entradas, uma vez que, a saída é a diferença das entradas multiplicada por um ganho, entretanto, em aplicações reais, um pequeno sinal aparece

na saída. A Relação de Rejeição em Modo Comum (CMRR - Common Mode Rejection Ratio) é a capacidade do amplificador operacional de rejeitar esses sinais equivalentes na entrada (SEDRA; SMITH, 2015), fazendo com que a saída seja nula. Essa relação é importante para que não haja flutuações na entrada do amplificador.

2.4.2 Teorema da Amostragem

O Teorema da Amostragem enuncia que, se um sinal for limitado em banda, ou seja, se sua transformada de Fourier for nula fora de um intervalo finito de frequências, e se as amostras forem tomadas suficientemente próximas em relação à frequência mais alta presente no sinal (OPPENHEIM; WILLSKY, 2010), essas amostras representam o sinal e este pode ser reconstruído. Para que não ocorra a sobreposição do espectro, a frequência de amostragem deve ser o dobro da maior frequência do sinal a ser amostrado.

2.4.3 Filtros Anti-Aliasing

O Filtro Anti-Aliasing é utilizado para evitar o efeito de *Aliasing* em uma amostragem, esse efeito acontece quando ocorre a sobreposição do espectro, ou seja, quando o sinal possui frequências superiores à metade da frequência de amostragem, desobedecendo o Teorema de Nyquist ou Teorema da Amostragem e impossibilitando a recuperação do sinal original.

Para garantir que não haja erros na reconstrução do sinal amostrado, um filtro passa-baixa pode ser aplicado antes da aquisição de dados, com uma frequência de corte igual a metade da frequência de amostragem, esta aplicação do filtro passa-baixa é denominada filtro anti-aliasing.

3 Metodologia

Esse capítulo apresenta a metodologia definida na construção do trabalho, mostrando em forma de blocos as etapas do trabalho. As etapas estão divididas em: revisão bibliográfica, sinais e adequações, modelagens e topologias, simulações e análise e discussão dos resultados. Com isso, 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.

3.1 Metodologia Top-Down

Na figura 11, é apresentado o diagrama de blocos do fluxo de trabalho. Cada etapa do fluxo de trabalho define sua função geral e é utilizada como referência pelos sub blocos presentes, o que minimiza o risco de possíveis erros de definição nos blocos de baixo nível, facilitando as alterações e correções no projeto.

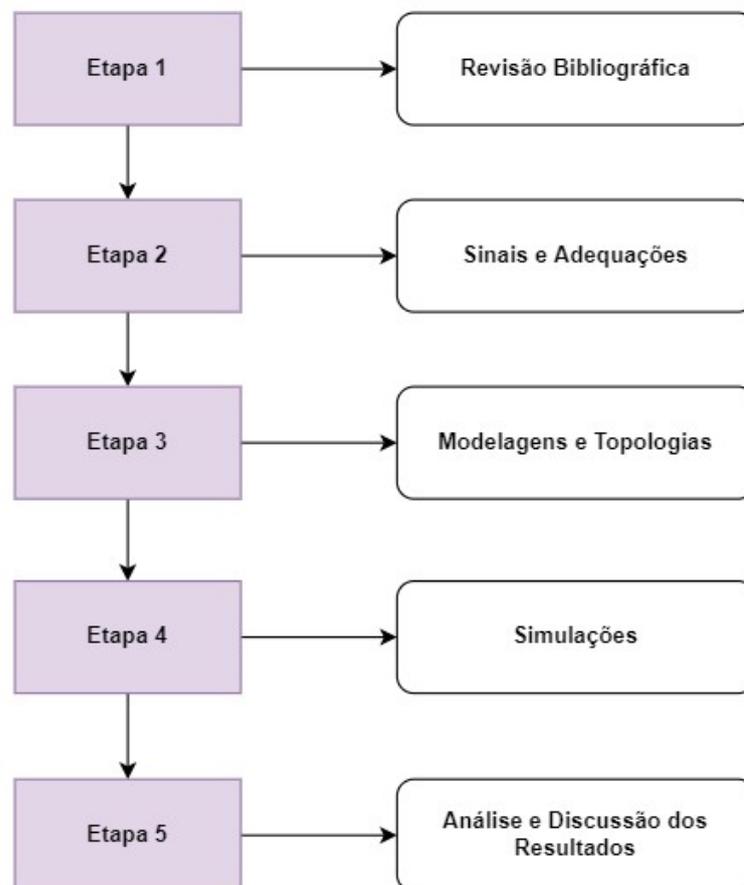


Figura 11 – Diagrama de blocos do fluxo de trabalho.

3.2 Etapa 1 - Revisão Bibliográfica

Nesta etapa, todas as definições relevantes ao tema são apresentadas. Através de uma revisão bibliográfica, são abordados os principais conceitos envolvendo os Dispositivos Inteligentes de Proteção contra Surtos e seu componente principal (varistor), os sensores e seus circuitos de condicionamento. As definições dos conceitos utilizados serão necessárias para o entendimento do tema, dos experimentos e para a análise e simulação dos circuitos condicionadores, tornando esta etapa uma das mais importantes de todo o trabalho.

3.3 Etapa 2 - Sinais e Adequação

Os sinais de interesse que serão analisados são definidos e especificados nesta etapa. Para isso, foi levado em consideração as especificações do projeto e o levantamento bibliográfico realizado na Etapa 1. O sistema de adequação da grandeza, é realizado por um sensor e é através dele que haverá a tradução das grandezas físicas, sendo essas tensão, corrente ou temperatura, em um nível elétrico proporcional às mesmas, possibilitando a leitura e o tratamento do sinal pelos circuitos de condicionamento e, posteriormente, pelos conversores analógico-digital do microcontrolador responsável pelo processamento.

3.4 Etapa 3 - Modelagem e Topologias

Etapa responsável por definir as modelagens que serão utilizadas e as topologias dos circuitos de condicionamento para cada sensor. A topologia do projeto é um mapa de rede que indica segmentos e é única para cada projeto. Com isso, é necessário condicionar os valores de ganho, configurar o amplificador operacional, estabelecer as frequências de corte de filtros e definir os circuitos de proteção. É importante, também, ressaltar que os amplificadores operacionais serão responsáveis pelo condicionamento do sinal em cada estágio do projeto. Os estágios de tratamento de sinais são: tradução ou adequação das grandezas, proteção, filtragem de ruídos e amplificação de tensão.

3.5 Etapa 4 - Simulações

Nesta etapa, as modelagens e as topologias dos circuitos de condicionamento, definidas na etapa 3, são simuladas no software *LTspice*. Para este trabalho, são utilizados componentes com características ideais para os diodos e para os amplificadores, já para os varistores e circuito da onda de surto, serão utilizados os componentes com as características reais. Para os componentes passivos, os valores foram definidos em conjunto com a equipe no Projeto “Automatização de Dispositivos de Proteção contra Surto (DPS)”, o qual é objeto de acordo de cooperação celebrado entre Fundação Universidade de Brasília

(FUB), Fundação de Empreendimentos Científicos e Tecnológicos (FINATEC) e Clamper Indústria e Comércio Ltda. Para a simulação dos sensores foram aplicados estímulos na entrada, de forma que, esses representem o comportamento dos sinais dos sensores.

3.6 Etapa 5 - Análise e Discussão dos Resultados

Por fim, na etapa cinco, é executada uma análise e discussão dos resultados obtidos. Desse modo, este bloco finaliza o trabalho proposto, realizando uma análise dos resultados obtidos e dos resultados esperados e, por conseguinte, discussão da influência dos resultados na aquisição de dados e na degradação dos Dispositivos Inteligentes de Proteção Contra Surtos. Além disso, são indicadas possíveis mudanças para a continuação do trabalho.

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, dos varistores e dos circuitos condicionadores. A finalidade é analisar o comportamento dos circuitos que representam os 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 12 e 13: 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.

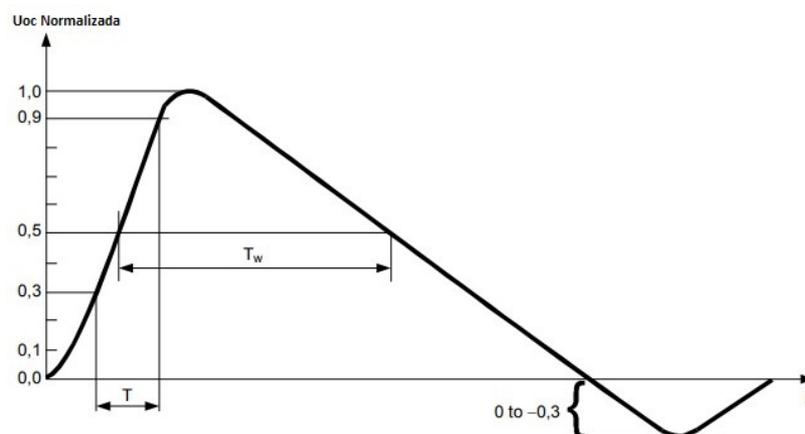


Figura 12 – Onda de Tensão. Fonte: (NBR IEC 61000-4-5, 2014).

Na figura 12 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 corresponde ao

tempo da diferença entre os limites (*thresholds*). Analogamente, temos os parâmetros da onda de corrente na figura 13, com T_w e T_r .

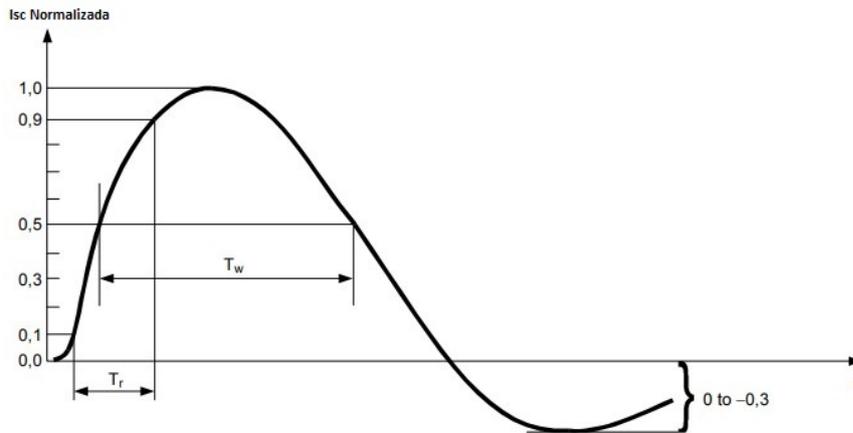


Figura 13 – Onda de Corrente. Fonte: (NBR IEC 61000-4-5, 2014).

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 14, as alterações feitas no circuito, como o incremento da fonte V_2 foram feitas para simular o circuito no *LTspice*.

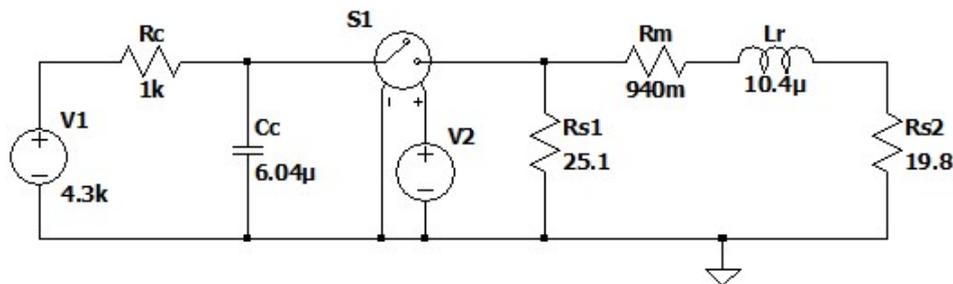


Figura 14 – Circuito para gerar a onda da corrente de surto.

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 15. Onde a temperatura corresponde a volts, a potência corresponde à corrente, R_1 é a resistência térmica e C_1 é a capacitância térmica.

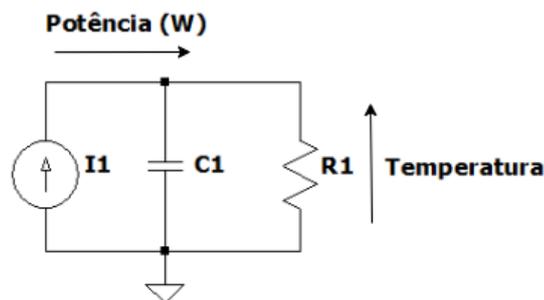


Figura 15 – Circuito para Modelagem Térmica.

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 16 e 17 baseados no estudo de (MARTIN, 2017), que apresenta condutividade e capacidade térmica do óxido de zinco em função da temperatura.

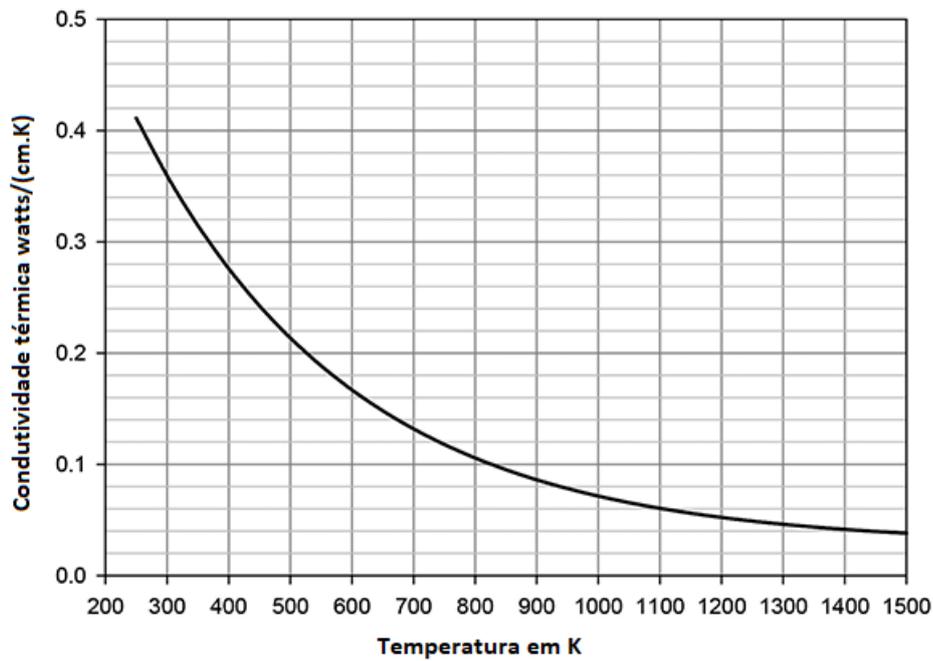


Figura 16 – Condutividade térmica do óxido de zinco. Fonte: (MARTIN, 2017)

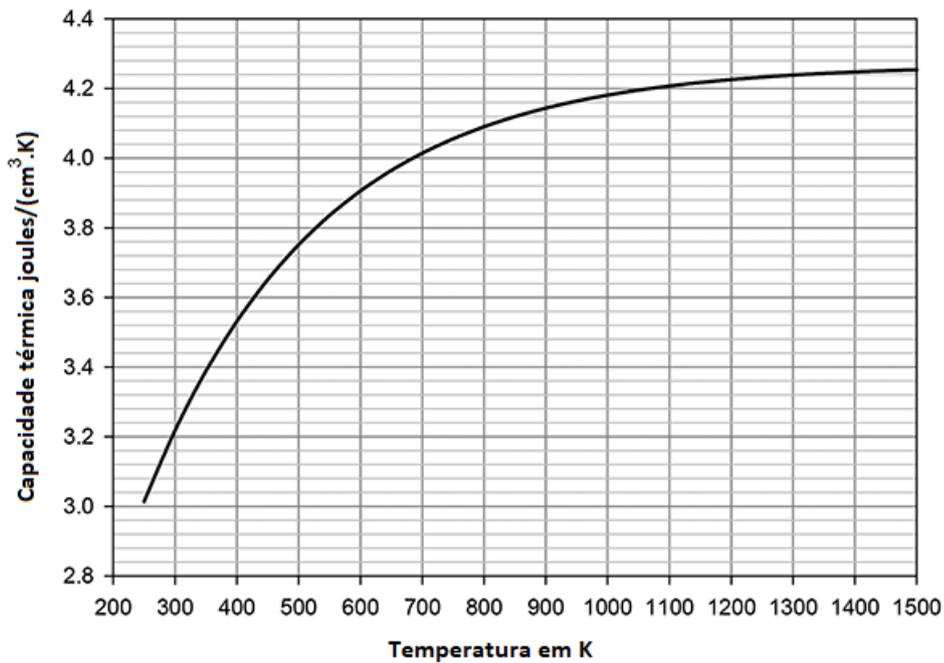


Figura 17 – Capacidade térmica do óxido de Zinco.

(MARTIN, 2017)

Uma vez que as características anteriores são dependentes da temperatura, figura 18, a constante de tempo térmica também será em função da temperatura.

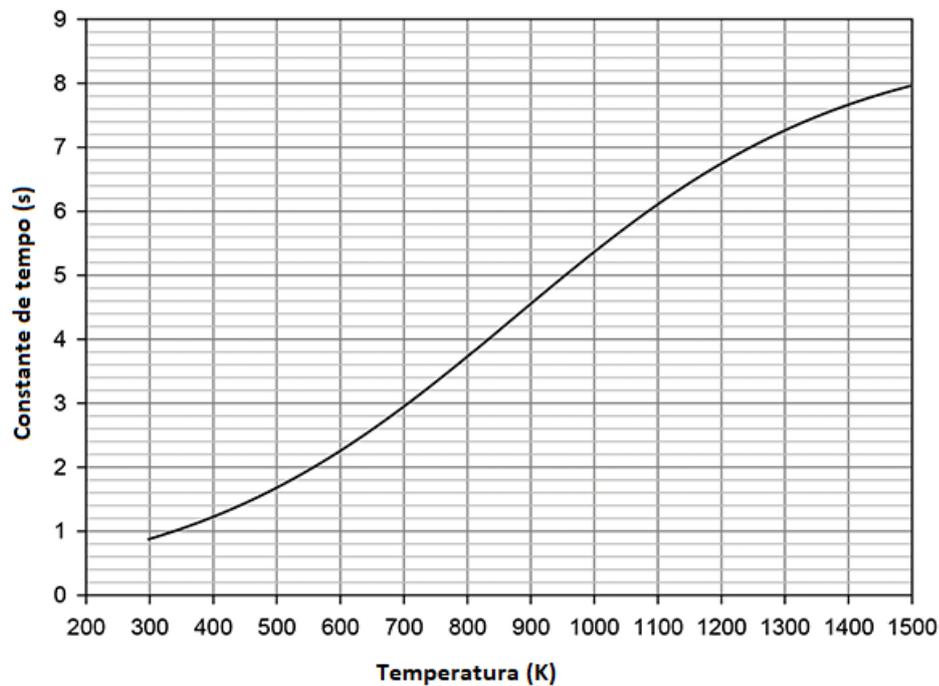


Figura 18 – Constante de tempo do térmica do óxido de zinco.

(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 19, 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.

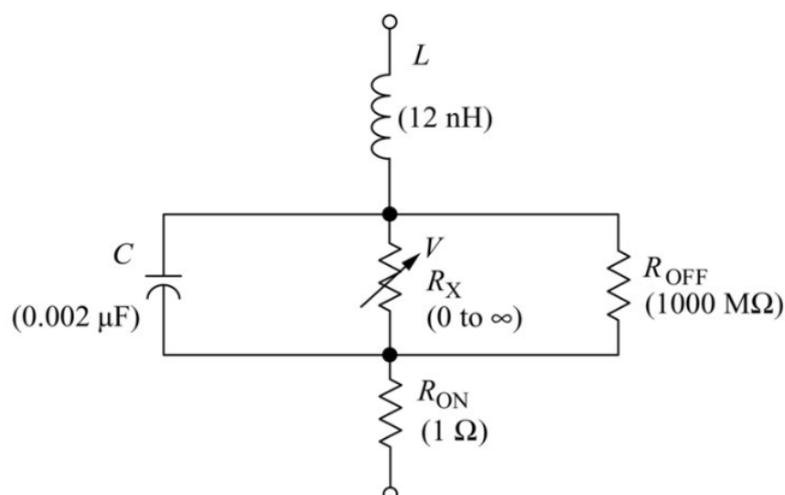


Figura 19 – Circuito equivalente. Fonte: (KULARATNA, 2018).

Na figura 20, observa-se o circuito que equivale à região de baixas correntes ou *leakage region*, mostrada graficamente na figura 5. O valor de R_{OFF} é dependente da temperatura, todavia continua em uma faixa de 10 a 1000M Ω . Além disso, também depende da frequência de forma inversamente proporcional.

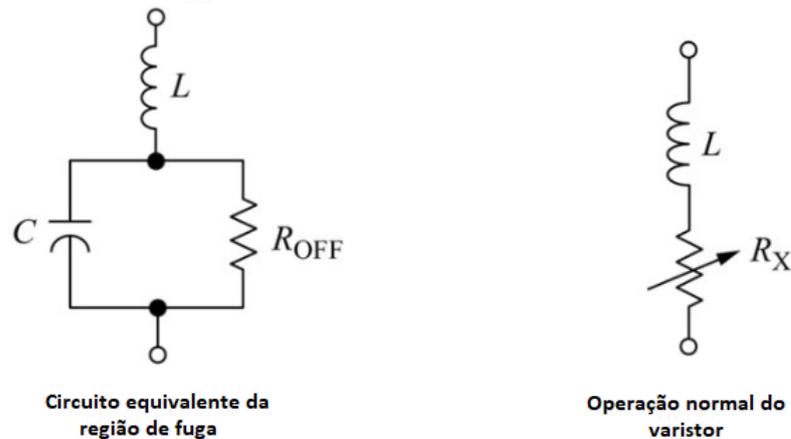
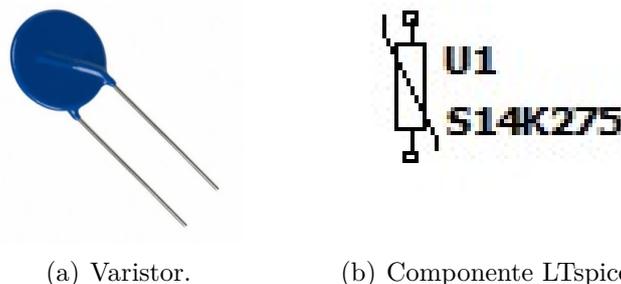


Figura 20 – Casos simplificados sob fuga e condução. Fonte: (KULARATNA, 2018).

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 20. 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 21 da empresa TDK Electronics.



(a) Varistor.

(b) Componente LTspice.

Figura 21 – Varistor TDK modelo S14K275.

O modelo *PSpice* disponibilizado no site da empresa (ELECTRONICS, 2021) encontra-se na figura 22. 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 22 – Modelo *spice* do Varistor

Na figura 23 as características da curva V-I são mostradas graficamente.

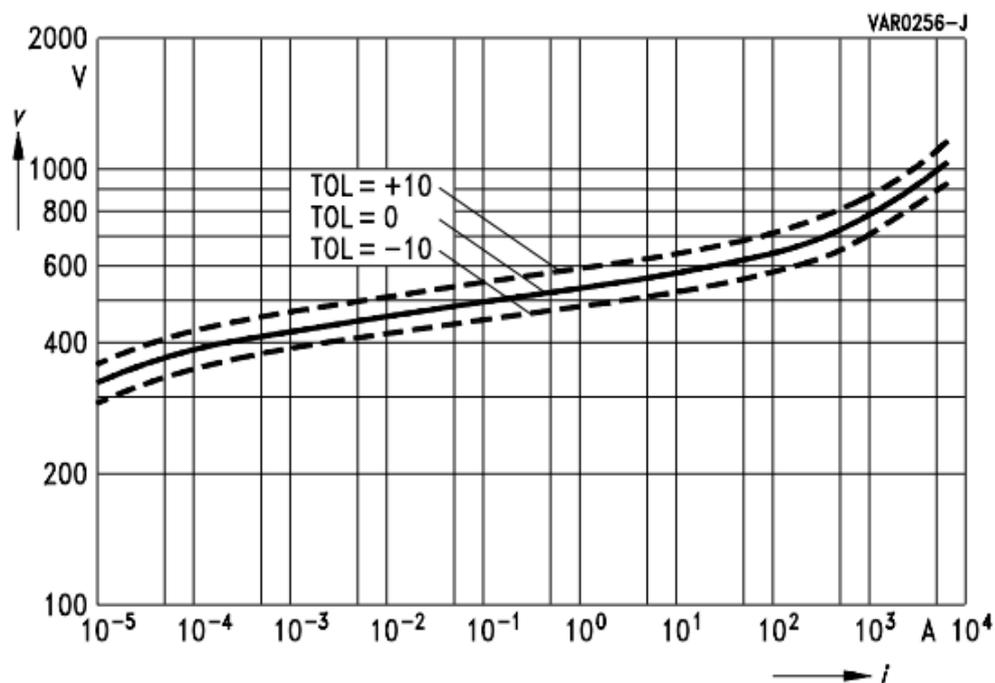


Figura 23 – Curva característica V/I com banda de tolerância

(TDK-ELECTRONICS,)

O modelo equivalente de circuito elétrico pode ser observado na figura 24, 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.

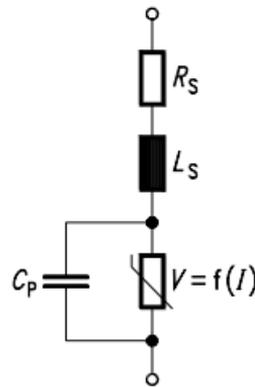


Figura 24 – Circuito equivalente do modelo PSpice
(TDK-ELECTRONICS,)

4.2 Topologia do sistema

Os sinais de interesse do trabalho são as tensões e as correntes fluindo pelas cargas dos circuitos, por isso, torna-se necessária a utilização de instrumentos de medição. A topologia básica de medição está apresentada na figura 25.

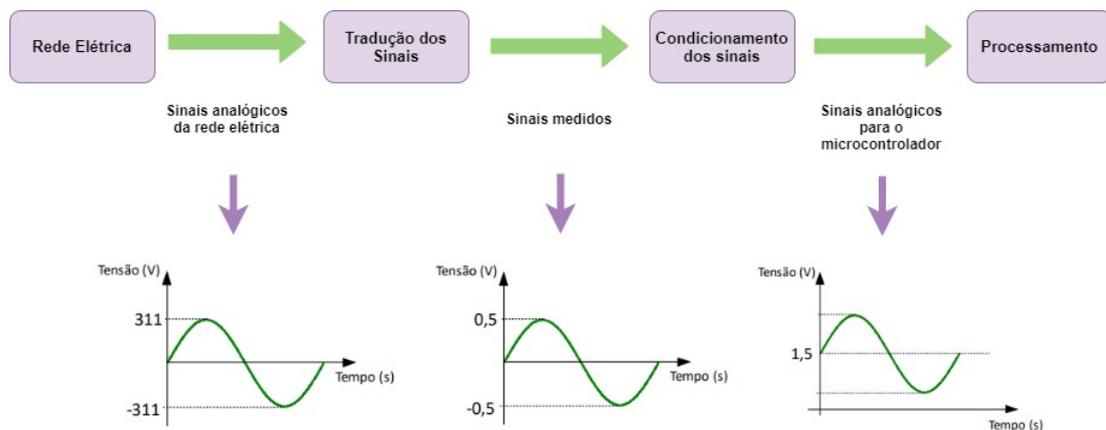


Figura 25 – Topologia básica para medição de sinais elétricos.

Os sinais analógicos recebidos pela rede elétrica serão traduzidos pelos sensores e, posteriormente, condicionados para a etapa de processamento. Nesse contexto, o sistema de aquisição e condicionamento de sinais é constituído pelos seguintes componentes:

- Sensores de tensão e corrente;
- Filtros anti-aliasing; e
- Circuitos de condicionamento do sinal, tais como reguladores de tensão, filtragem de ruídos e amplificação de tensão.

Para que o projeto receba a quantidade de carga e tensão especificadas no projeto, faz-se necessário que os estágios de condicionamento adequem os sinais recebidos e que sejam legíveis, devido à entrada de picos de tensão e carga que possam ocorrer. A etapa de condicionamento no projeto servirá como estágios em que filtros bloqueiam a entrada de sinais prejudiciais à integridade dos componentes do sistema.

4.3 Topologia dos circuitos condicionadores

As leituras utilizadas pela etapa de processamento serão advindas dos amplificadores operacionais. Diante disso, os amplificadores serão responsáveis pela diferença entre os sinais, bem como a amplificação dos mesmos, tirando proveito das características da Rejeição de Modo Comum - CMRR, com a finalidade de rejeitar ruídos de modo comum e que possam afetar a leitura dos sinais.

Os sinais mensurados podem assumir valores negativos e positivos, por isso, foi definida uma tensão de referência para gerar um *Offset* positivo nas medições. O *Offset* é gerado a partir de um circuito gerador de referência com V_{BIAS} de 1,6V, o que corresponde a metade da tensão de referência do microcontrolador (3.3V). A saída desse amplificador da diferença com *Offset* é mostrada na equação 4.1.

$$V_{out} = \frac{R2}{R1}(V_{inA} - V_{inB}) + V_{offset} \quad (4.1)$$

Na saída do amplificador é adicionado um estágio utilizando filtro passa-baixa. Seguindo o critério de Nyquist, o conversor A/D do microcontrolador define a frequência de corte do filtro passa baixa com a finalidade de impedir o efeito *aliasing*, esse filtro compõe a topologia de filtro anti-aliasing e é mostrado na figura 26.

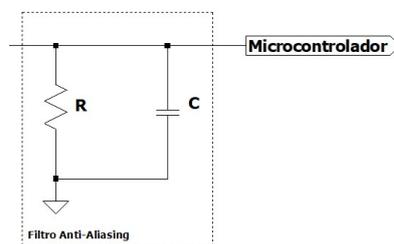


Figura 26 – Filtro anti-aliasing.

Os circuitos de proteção objetivam interromper sinais prejudiciais a integridade dos elementos. Esses circuitos são compostos de diodos e são responsáveis por limitar a tensão dos pontos a tensão do microcontrolador. O circuito é mostrado na figura 27

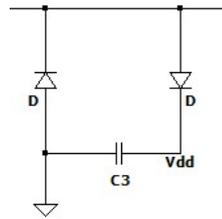


Figura 27 – Circuito de proteção.

4.3.1 Tensão

Na figura 28, observa-se o circuito de condicionamento do sensor de tensão, o circuito está baseado em um divisor resistivo de tensão em conjunto a filtros de proteção, filtros *anti-aliasing* e amplificador diferencial.

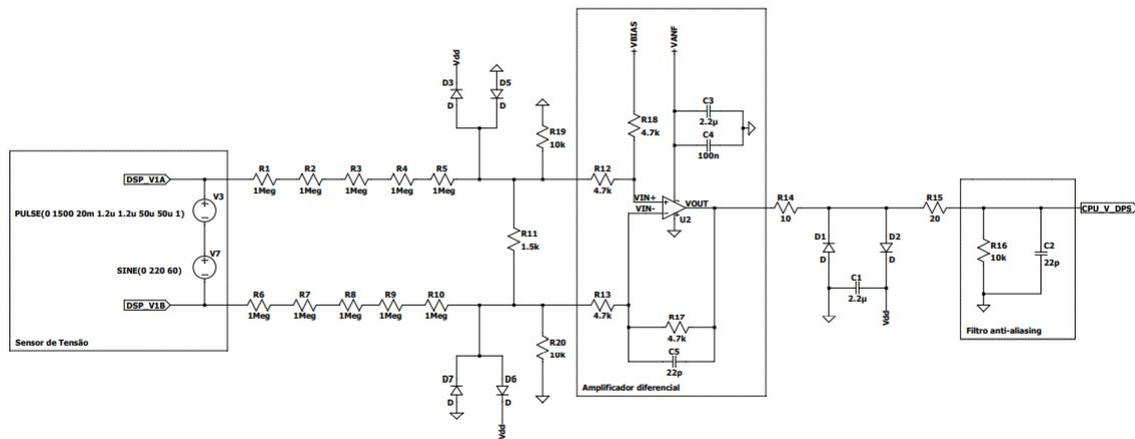


Figura 28 – Circuito de condicionamento para a tensão.

Os resistores R_{19} e R_{20} são utilizados para evitar flutuações, ou perda de referência nas entradas do amplificador, para isso é feito um casamento de impedâncias. Os diodos servem para grampear a tensão em 3.3V.

O estágio de amplificação é composto pelo amplificador diferencial com ganho 1, ou seja, a etapa de atenuação do divisor de tensão e o ganho do estágio de amplificação geram uma variação de tensão entre 0V e 3,3V considerando o *Offset* aplicado. A saída do primeiro estágio é calculada através da equação 4.1.

O DPS deve ser capaz de operar em regimes permanentes com amplitudes de -179.6V a +179.6V ($127 V_{RMS}$ e $359.2 V_{pp}$) e amplitudes de -311V a +311V ($220 V_{RMS}$ e $622 V_{pp}$) com frequência de 60 Hz e em cenários de surtos.

4.3.2 Correntes de Fuga

Além da tensão, também foi observada a influência da corrente de fuga. As correntes em regime permanente do DPS são muito pequenas, estimadas de 0,2mA a 1mA, entretanto, em cenários de surtos, essas correntes são elevadas, estimadas de 1 kA a 20 kA, e podem causar sobretensão no circuito. Na figura 29, observa-se o circuito de condicionamento do sensor de corrente de fuga. Para simular o comportamento do transformador de corrente será utilizada uma fonte de corrente em regime permanente.

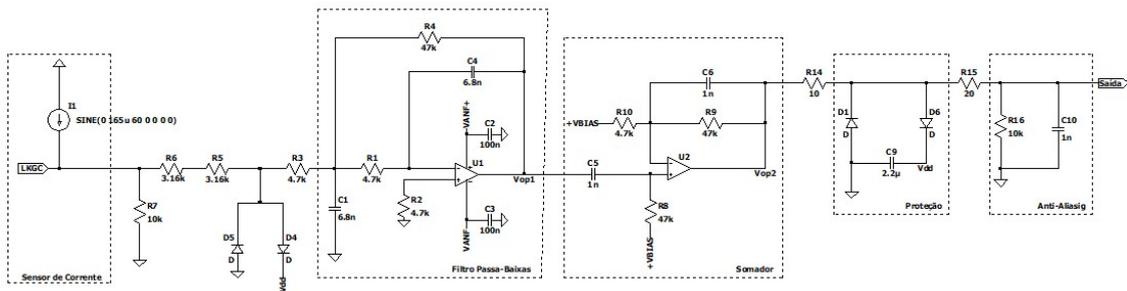


Figura 29 – Circuito de condicionamento para a corrente de fuga.

A corrente usada na fonte é dada pela relação da equação 2.6 e pelos requisitos do projeto: $N_1 = 5$ espiras no enrolamento primário; $N_2 = 150$ espiras no enrolamento secundário; e $I_1 =$ faixa de 0,2 mA a 1 mA;

Logo, temos que a corrente I_2 é dada pela equação 4.2:

$$I_2 = \frac{I_1 N_1}{N_2} = \frac{5mA}{150} = 33,33\mu A \quad (4.2)$$

Na entrada do circuito é feita a adequação do sinal recebido pela fonte através de divisores de tensão. O primeiro estágio de amplificação consiste em um filtro passa-baixas. Os sinais mensurados pelo primeiro estágio podem assumir valores negativos e positivos

Por isso, no segundo estágio, foi definida uma tensão de referência para gerar um *Offset* positivo nas medições. O *Offset* é gerado a partir de um circuito gerador de referência com VBIAS de 2,5V. Os demais blocos do circuito são referentes as filtragens e proteções para o microcontrolador.

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 14 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 30 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 $1,2 \mu s$.

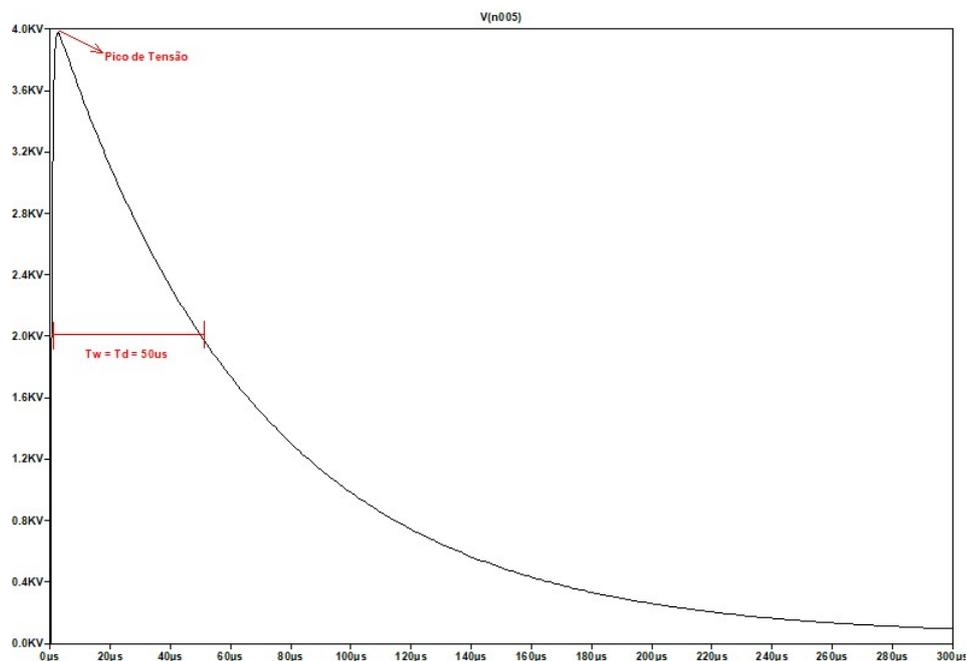


Figura 30 – Simulação da Onda de Tensão.

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 31. 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.

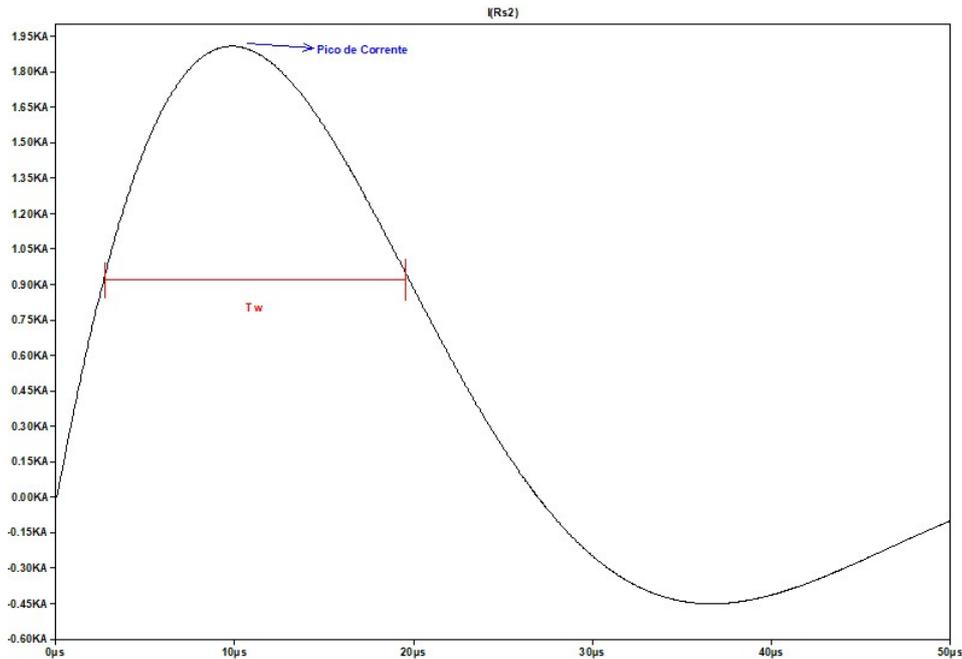


Figura 31 – Simulação da Onda de Corrente.

5.1.2 Onda de Surto e Varistor Ideal

Na figura 32, 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.

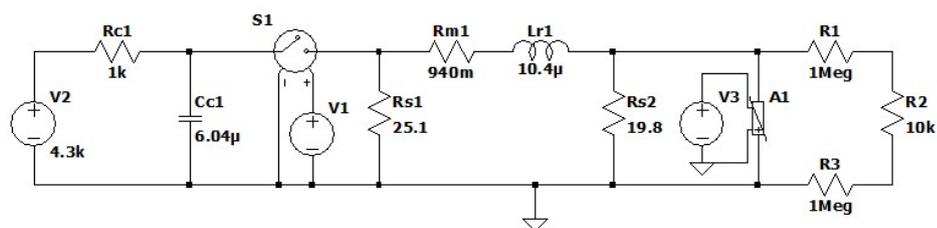


Figura 32 – Circuito onda de surto com varistor ideal.

Nas figuras 33 e 34, 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 33 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 34.

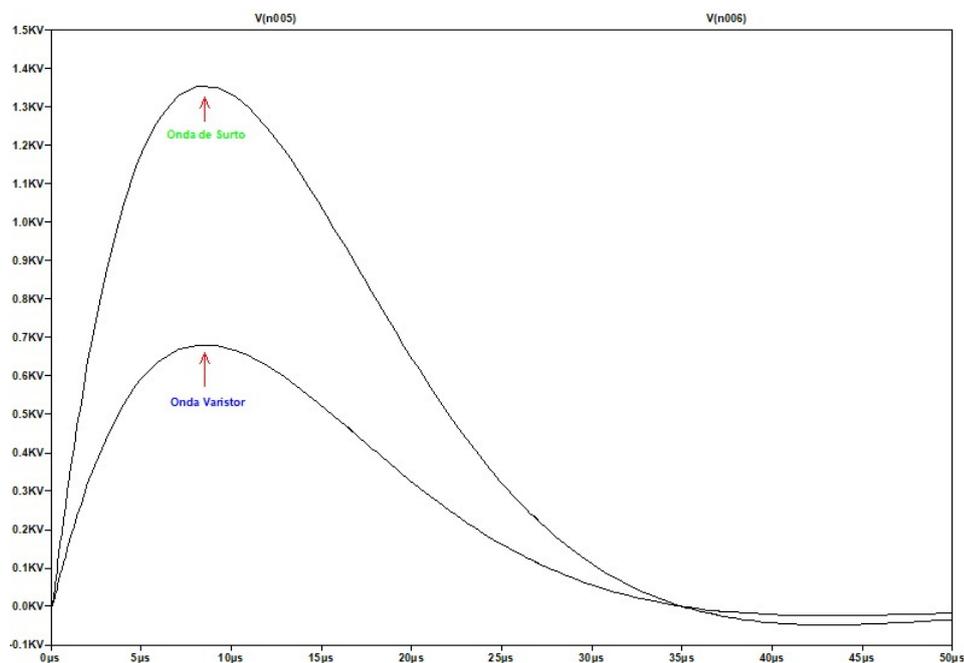


Figura 33 – Ondas de tensão do circuito onda de surto com varistor ideal.

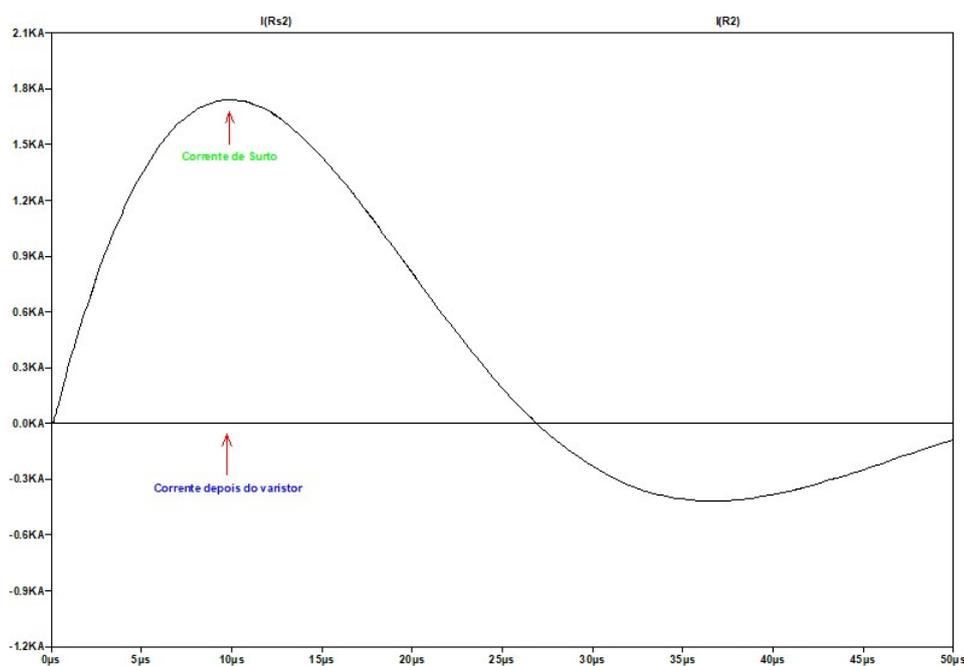


Figura 34 – Ondas de corrente do circuito onda de surto com varistor ideal.

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 35 mostra o circuito utilizado. Os resistores ao final do circuito foram usados para pegar as ondas de corrente e tensão depois do varistor.

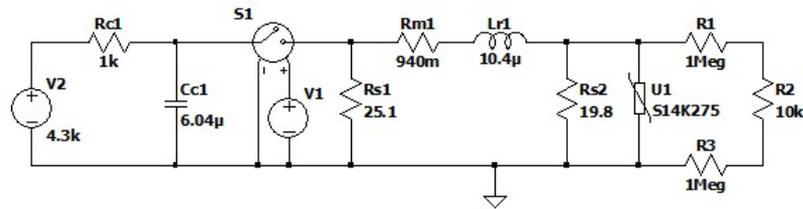


Figura 35 – Circuito onda de surto e varistor S14K275.

As figuras 36 e 37 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.

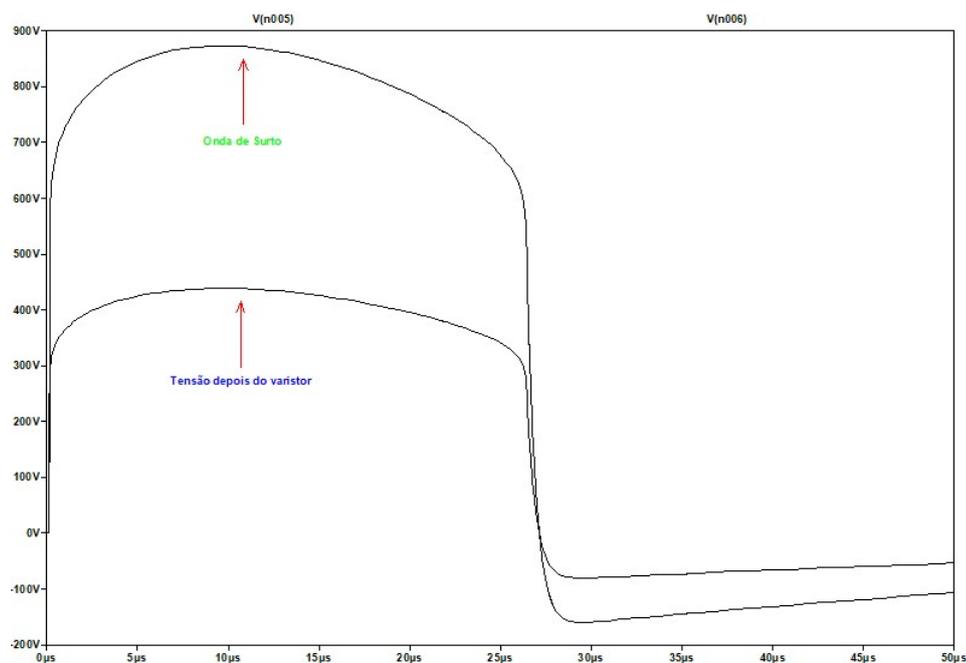


Figura 36 – Ondas de tensão do circuito onda de surto com varistor TDK.

A corrente trabalha de forma semelhante à corrente do circuito de surto com varistor ideal, isso acontece porque, normalmente, o varistor, quando submetido à 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 36, e a corrente vai de 1.95kA para 0A, como observado na figura 37.

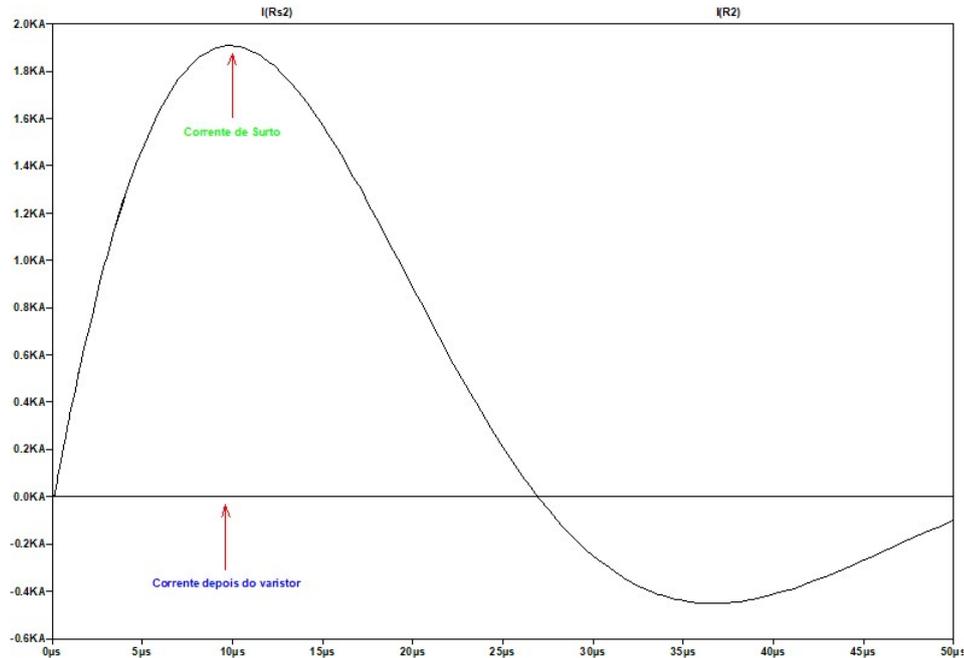


Figura 37 – Ondas de corrente do circuito onda de surto com varistor TDK.

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 38. 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.

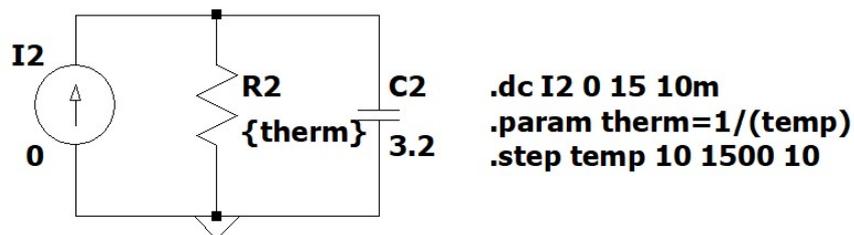


Figura 38 – Circuito para Modelagem da Condutividade Térmica.

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 18. A capacidade térmica foi modelada com o circuito da figura 39.

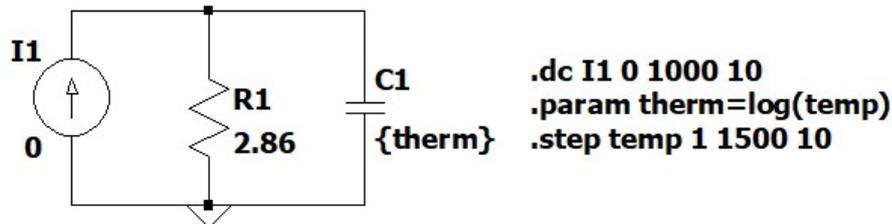


Figura 39 – Circuito para modelagem da capacidade térmica.

Os resultados encontrados são apresentados nos gráficos das figuras 40 e 41. A partir do gráfico da figura 40 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.

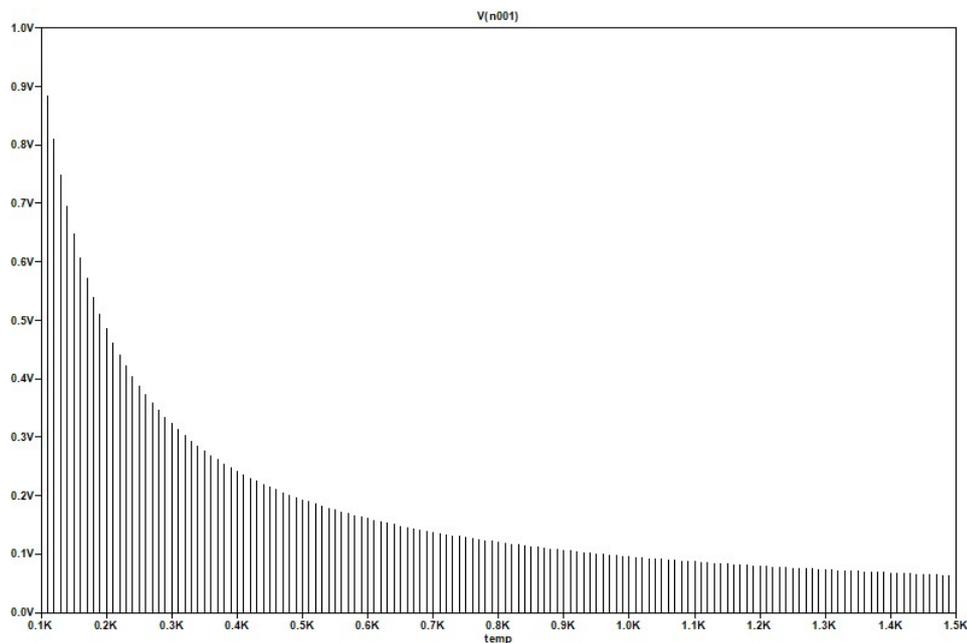


Figura 40 – Condutividade Térmica.

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.

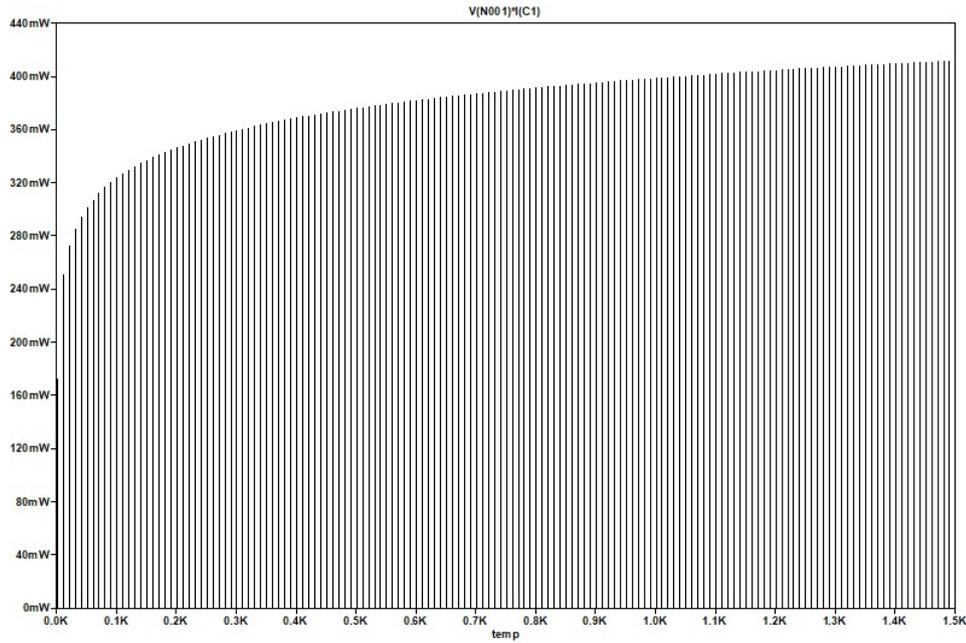


Figura 41 – Capacidade Térmica.

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 42.

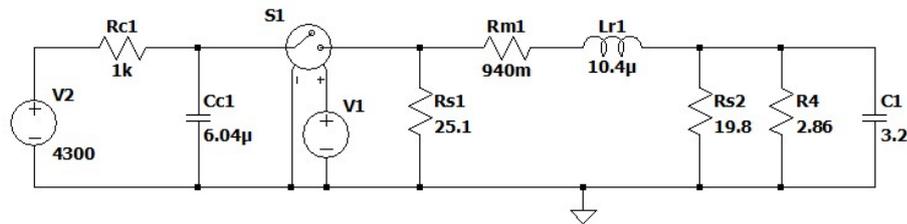


Figura 42 – Circuito onda de surto e modelo térmico do varistor.

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 43(a), 43(b), 43(c) e 43(d). Para fazer essa simulação foram usados os resultados dos gráficos das figuras 40 e 41 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.

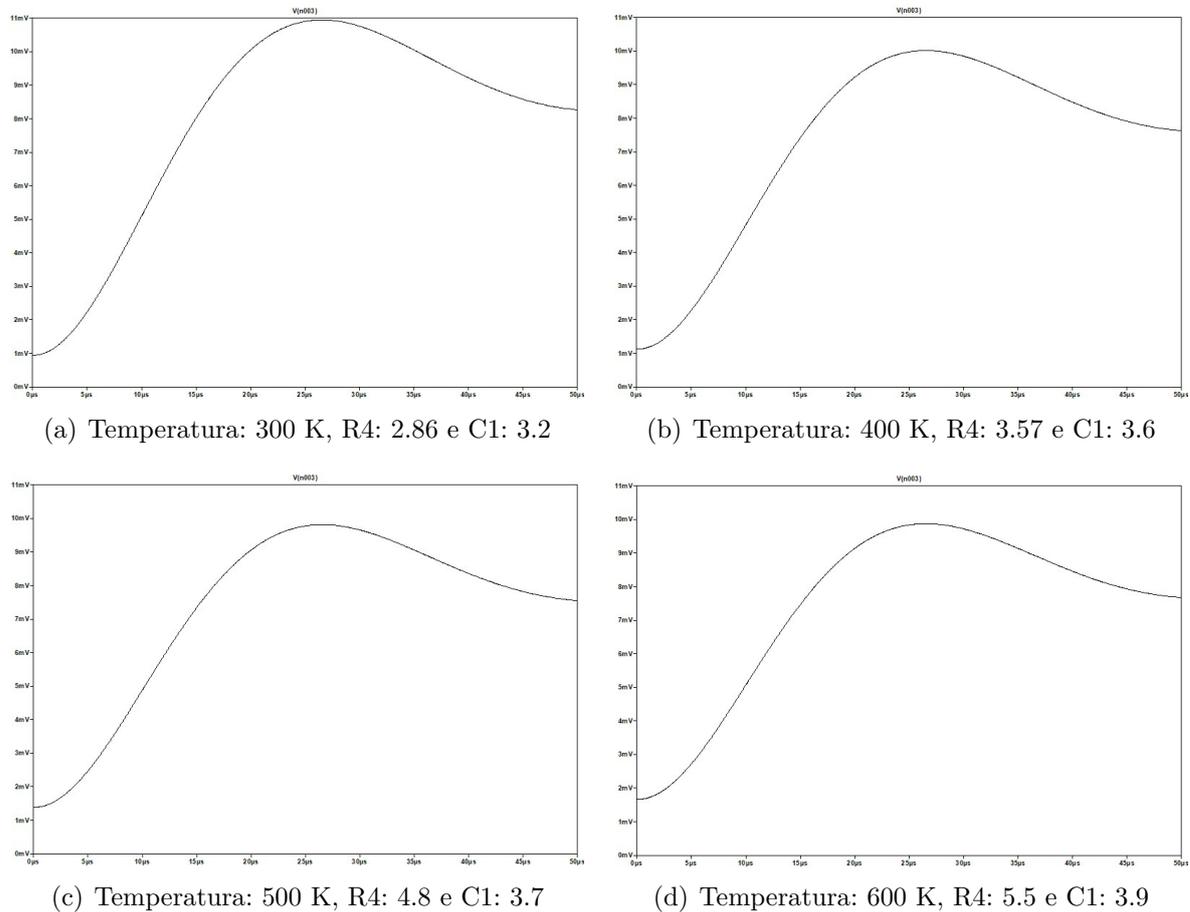


Figura 43 – Saídas para simulação da onda de surto com o modelo térmico.

A figura 44, 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 μ 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. O degrau da temperatura diminui de acordo com o aquecimento e resfriamento do MOV que é interpretado como sua auto recuperação.

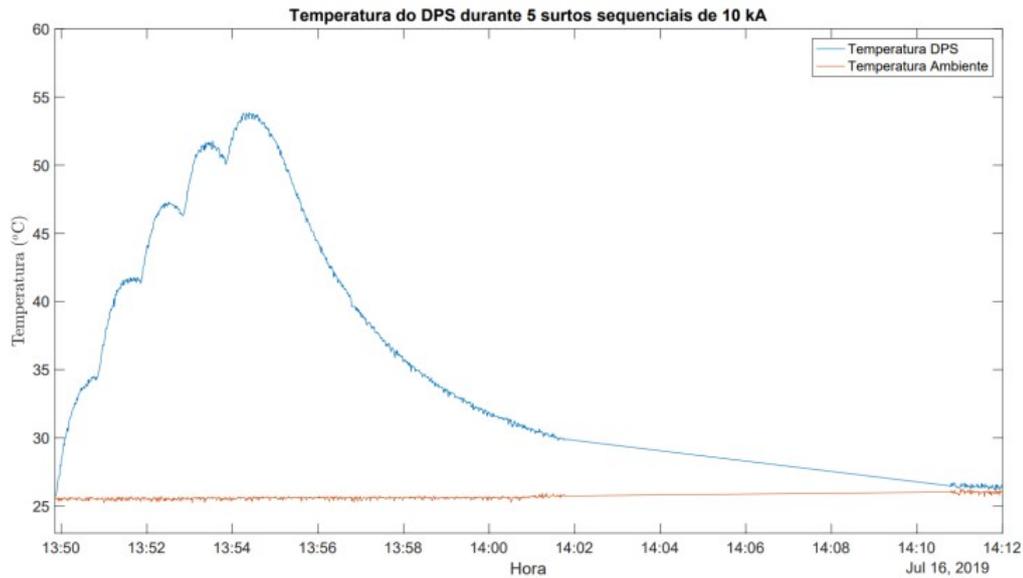


Figura 44 – Resultados experimentais do relatório de hardware da Clamper. Fonte: (CLAMPER, 2019)

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 43 e 44, 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 45.

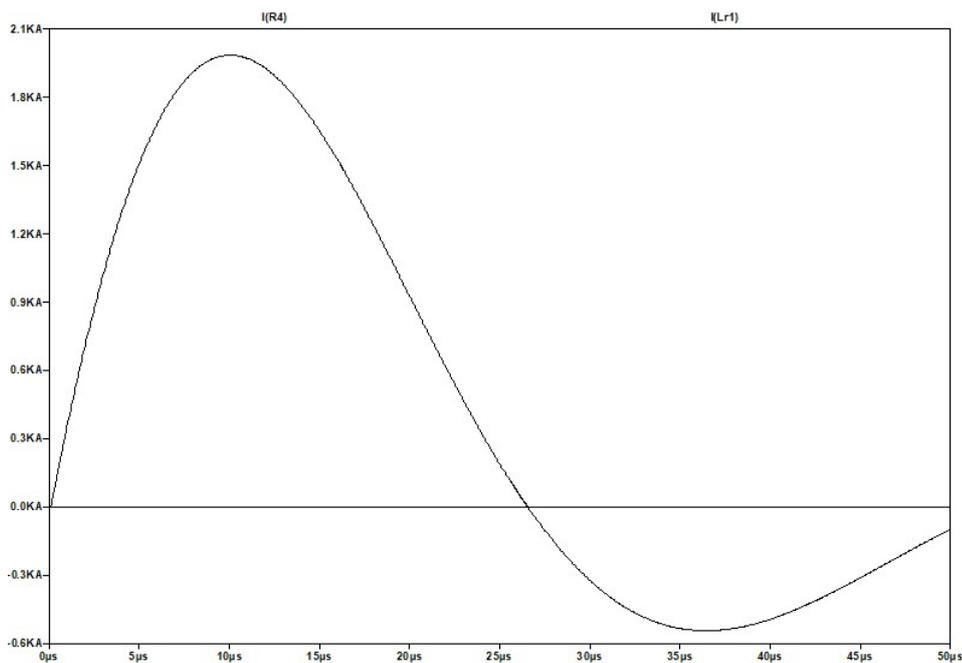


Figura 45 – Ondas de corrente do circuito onda de surto com o modelo térmico do varistor.

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 46.

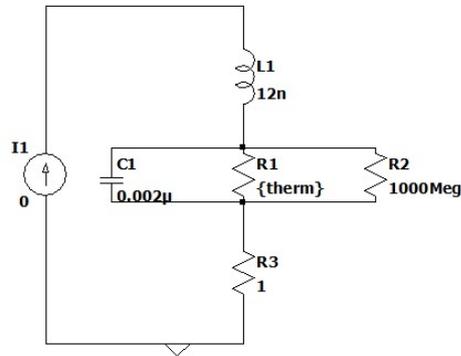


Figura 46 – Circuito modelo das características V-I.

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 1Ω à $1k\Omega$ com um passo de 100Ω . A figura 47 apresenta o resultado.

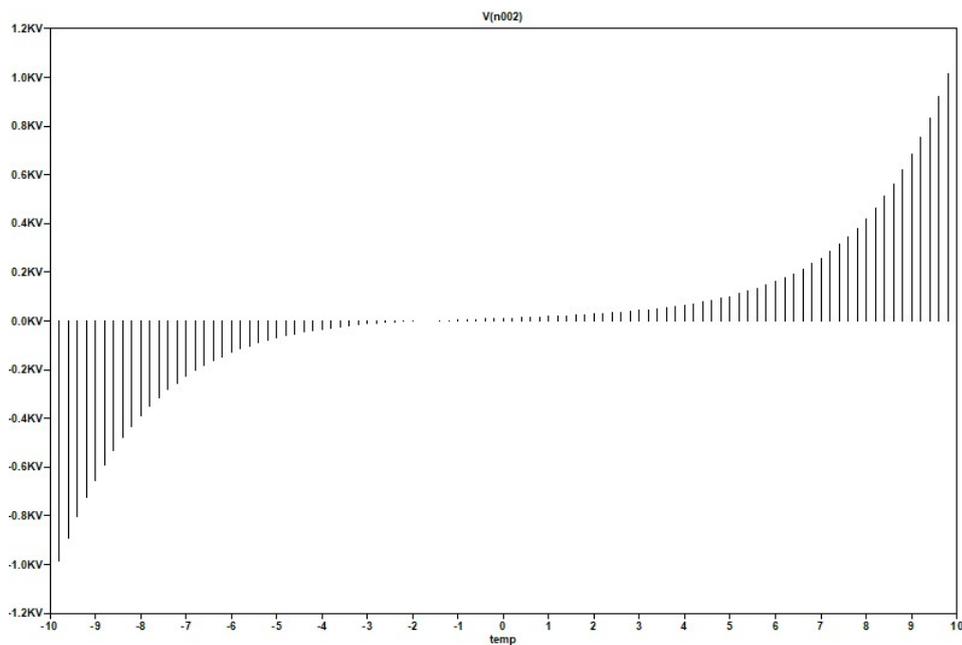


Figura 47 – Onda das características V-I.

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 47, observa-se um comportamento semelhante ao da 5 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.

5.1.7 Sensor de Tensão

Depois de modelar o surto, entender as características do varistor e modelar o seu comportamento ideal, real e térmico, simulou-se o circuito do sensor de tensão. A análise desse circuito foi dividida em dois cenários: o de regime permanente e o de regime de surto.

5.1.7.1 Regime Permanente - 220 V_{RMS}

Considerando os limites de tensão definidos no desenvolvimento, podemos calcular a tensão no resistor central do circuito do sensor de tensão apresentado na figura 28, de acordo com a equação 2.5, essa equação é usada porque na entrada do circuito é feita a adequação do sinal recebido pela fonte através de divisores de tensão.

$$V_{out} = \frac{1.5k\Omega}{10M\Omega + 1.5k\Omega} 311V = 46.64mV \quad (5.1)$$

A saída do primeiro estágio é calculada através da equação 4.1 e é mostrada na figura 48, substituindo as tensões e os ganhos, temos:

$$V_{estágio1} = 1 * 46.64mV + 1.6V \approx 1.65V \quad (5.2)$$

Observa-se que os valores encontrados estão dentro dos valores esperados, iniciando com o $V_{BIAS} \approx 1.61V$ e chegando à $\approx 1.65V$ no pico.

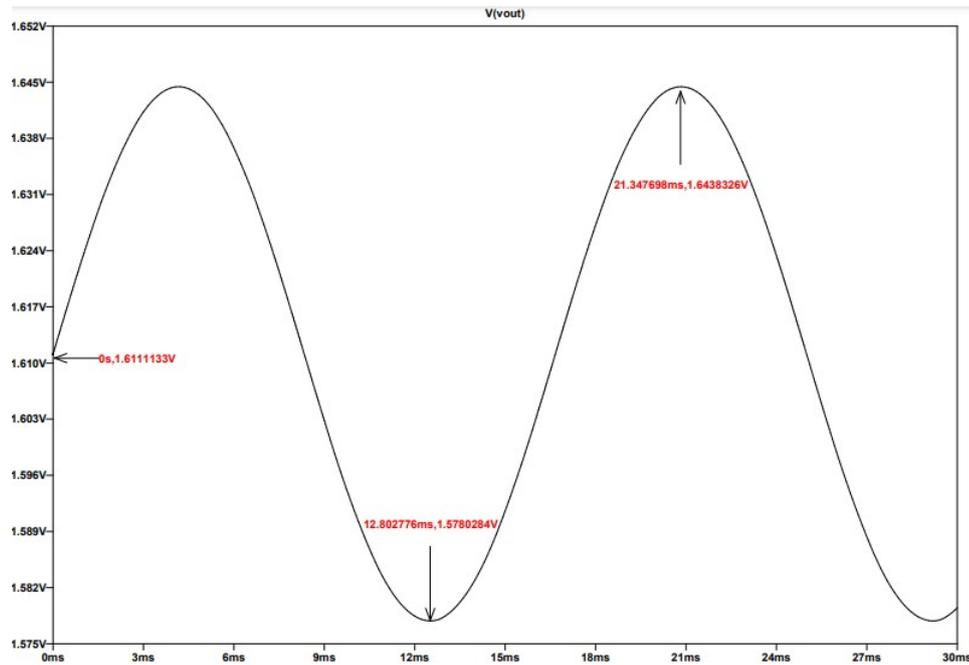


Figura 48 – Saída simulada do circuito de condicionamento de tensão para 220 V_{RMS} .

5.1.7.2 Regime de Surto

Para simular o comportamento do surto utilizou-se a modelagem da onda de surto, a modelagem do varistor da TDK e o circuito de condicionamento de tensão. A modelagem utilizando o varistor S14K275 da TDK foi escolhida porque no projeto é usado esse varistor. As ondas apresentadas na figura 49 são referentes às ondas de surto e de tensão depois do varistor.

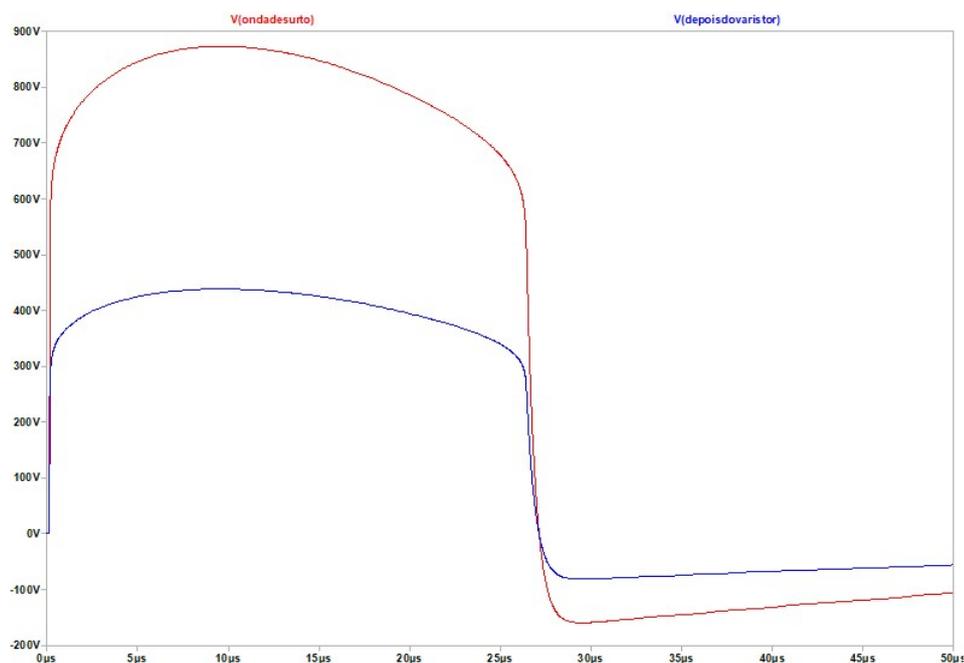


Figura 49 – Onda de tensão de surto e onda depois do varistor.

Nota-se que o comportamento das ondas é semelhante ao comportamento explicado nos resultados da simulação da figura 36. A tensão no resistor central é dada de acordo com a equação 2.5:

$$V_{out} = \frac{1.5k\Omega}{10M\Omega + 1.5k\Omega} 4300V \approx 0,65V \quad (5.3)$$

A saída do primeiro estágio é calculada através da equação 4.1 e é mostrada na figura 50:

$$V_{est\u00e1gio1} = 1 * 0.65V + 1.6V \approx 2.25V \quad (5.4)$$

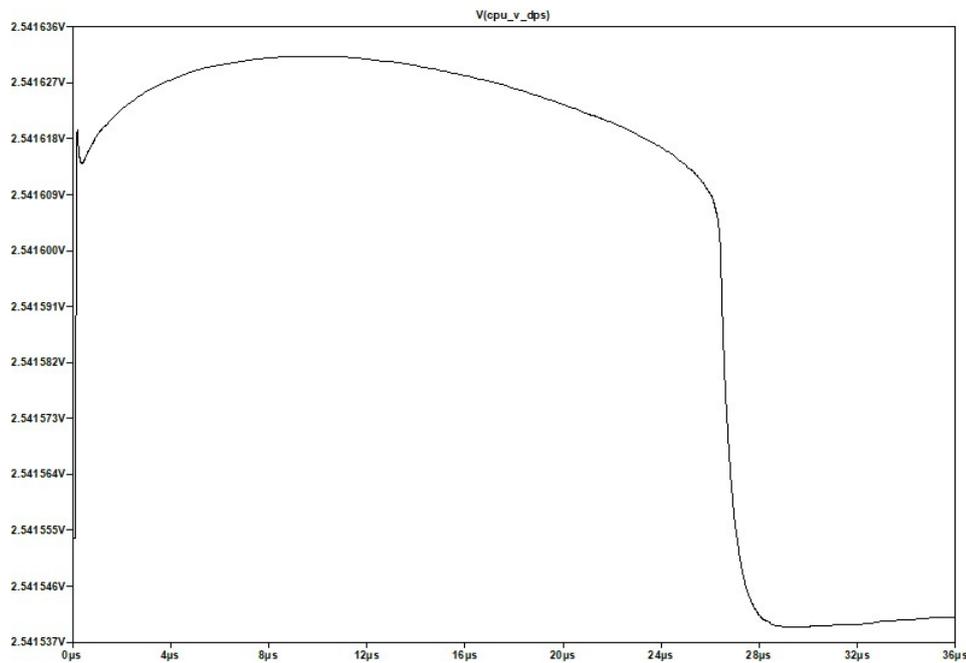


Figura 50 – Saída simulada do circuito de condicionamento de tensão para um surto.

A diferença na saída do circuito justifica-se porque os circuitos utilizados no presente trabalho são modelagens dos componentes reais e apresentam o comportamento semelhante ao real e não ao ideal.

5.1.8 Sensor de Corrente

Nesta simulação foram adicionados o circuito de onda de surto, o modelo do varistor da TDK e o circuito de condicionamento apresentado na figura 29. Na figura 51 são observadas as curvas de saída da onda de corrente de surto e a curva de saída do circuito de condicionamento da corrente de fuga. A curva observada na saída do circuito é extremamente pequena porque o varistor, idealmente, deveria desviar a corrente para o terra do circuito para não prejudicar o microcontrolador, entretanto, é observada uma corrente indesejada proveniente de fios ou estágios não isolados.

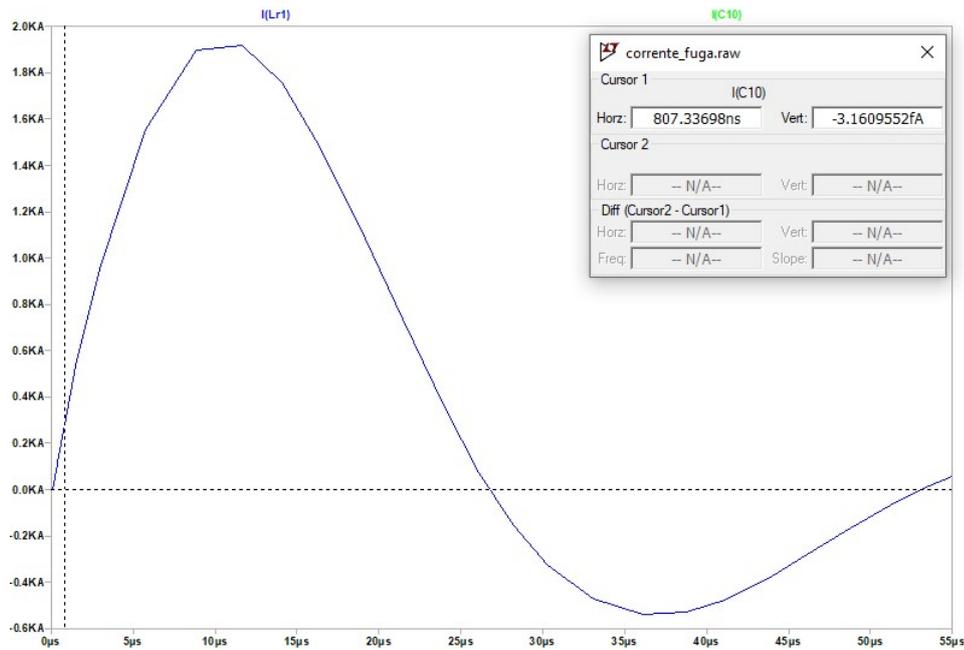


Figura 51 – Saída simulada do circuito de condicionamento de corrente de fuga.

Na figura 52 são observadas as curvas de saída do primeiro estágio de amplificação e a curva de saída do circuito de condicionamento da corrente de fuga.

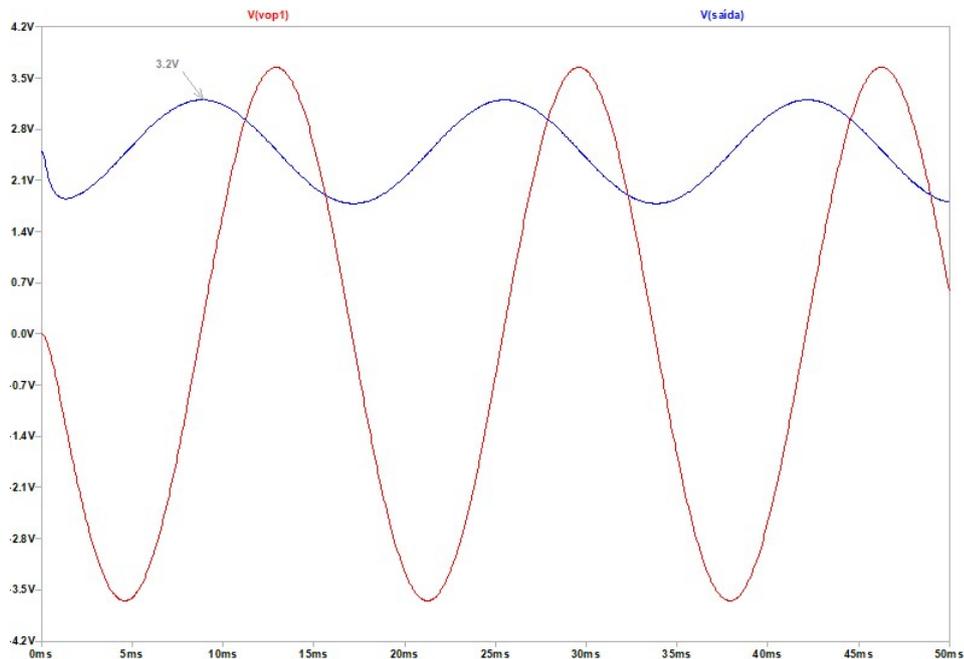


Figura 52 – Saída simulada do circuito de condicionamento de corrente de fuga.

Percebe-se que os valores estão dentro dos limites aceitos pelo microcontrolador. Fazer o acompanhamento da corrente de fuga é importante porque essa corrente é um dos principais fatores que indica o nível de degradação do varistor.

6 Conclusão

O foco deste trabalho foi fazer um levantamento bibliográfico sobre o condicionamento de sinais para dispositivos inteligentes de proteção contra surtos, identificando os fatores responsáveis pela degradação desses dispositivos, bem como, o comportamento dos componentes, através de modelagens. Conhecer o sistema que pretendia-se trabalhar foi importante para modelar o sistema, visto que, a modelagem dependia das características e do comportamento do material ou do componente. Ressalta-se ainda que para modelar os circuitos também foi importante observar as normas associadas aos sistemas. Foram modeladas no trabalho a onda de surto, as características V-I do varistor, o modelo do fabricante, as propriedades térmicas e os circuitos de condicionamento.

O uso da modelagem da onda de surto contribuiu com as análises feitas no presente trabalho porque os resultados se aproximam dos resultados esperados, diferente do TCC1 que fazia a análise com uma fonte de pulso. Outra contribuição importante para o estudo foi a modelagem térmica do varistor observando as propriedades térmicas do Óxido de Zinco, porque através desse entendimento e do experimento realizado pela Clamper, observou-se que existe uma relação entre a temperatura de operação, a tensão e a aplicação de múltiplos surtos nos varistores com a degradação do MOV.

Durante a realização do trabalho foi encontrada uma limitação no software usado na análise da influência da temperatura. O *LTspice* não permite fazer esse tipo de simulação e o *Cadence* apresentou algumas instabilidades durante o semestre, impossibilitando a sua utilização. Por isso, para apresentar esses resultados, foram usadas equações nos componentes do software para simular o comportamento esperado, visto que a temperatura e a energia são os principais fatores de degradação dos varistores. Entretanto, para uma análise mais precisa é necessária a utilização de um software mais completo ou, até mesmo, de uma modelagem em um software especializado em modelagem térmica.

Por fim, conclui-se que os circuitos de condicionamento projetados funcionaram bem com os circuitos modelados. A tensão na saída dos circuitos apresentados nunca excede o valor seguro na presença de um surto de tensão e as correntes observadas nas saídas são sempre desviadas para o terra.

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.
- ALEXANDER, C. K.; SADIKU, M. N. O. *Fundamentos de Circuitos Elétricos*. [S.l.]: AMGH Editora, 2013. v. 5. 155 p. Citado na página 28.
- 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 2 vezes nas páginas 8 e 52.
- DORF, R. C.; SVODOBA, J. A. *Introdução aos Circuitos Elétricos*. [S.l.]: Grupo Editorial Nacional, 2012. v. 8. 56 p. Citado na página 25.
- 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 39.
- GUERRA, F. das C. F. *Modelos de Transformador de para Estudos em Baixas Frequências*. 35 f. — Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande - PB, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 26.
- 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, 33 e 34.
- Jinliang He. *Metal Oxide Varistors From Microstructure Macro-Characteristics*. [S.l.]: Wiley-VCH Verlag, 2019. v. 1. 484 p. Citado 3 vezes nas páginas 7, 20 e 21.
- KULARATNA, N. *Design of transient protection systems : including supercapacitor based design approaches for surge protectors*. [S.l.]: Elsevier, 2018. v. 1. 282 p. Citado 4 vezes nas páginas 7, 21, 37 e 38.
- 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 5 vezes nas páginas 7, 35, 36, 37 e 48.
- MORKOC, H.; OZGUR Ümit. *Zinc Oxide: Fundamentals materials and device technology*. [S.l.: s.n.], 2009. v. 1. 488 p. Citado na página 50.
- OLIVEIRA, P. C. D. *Análise de Transformadores de Corrente Para Medição*. 35 f. — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Paraná, 2001. Citado na página 26.
- OPPENHEIM, A. V.; WILLSKY, A. S. *Sinais e Sistemas*. [S.l.]: Pearson, 2010. v. 2. 306-307 p. Citado na página 29.
- 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 3 vezes nas páginas 7, 19 e 20.
- 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 3 vezes nas páginas 7, 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 2 vezes nas páginas 20 e 22.
- SEDRA, A. S.; SMITH, K. C. *Microeletronic circuits*. [S.l.]: Microeletronic Circuits, 2015. v. 7. 1489 p. Citado 3 vezes nas páginas 27, 28 e 29.
- 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 35.
- 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 39 e 40.

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

Apêndices

