

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

Circuito para Leitura de Grandezas Físicas de Dispositivo de Proteção Contra Surtos

Autor: Ricardo Vieira Borges
Orientador: Prof. Dr. Sandro Augusto Pavlik Haddad

Brasília, DF
2019



Ricardo Vieira Borges

Circuito para Leitura de Grandezas Físicas de Dispositivo 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

Coorientador: Prof. Dr. Alex Reis

Brasília, DF

2019

Ricardo Vieira Borges

Circuito para Leitura de Grandezas Físicas de Dispositivo de Proteção Contra Surtos/ Ricardo Vieira Borges. – Brasília, DF, 2019-

62 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 , 2019.

1. DPS. 2. Circuito. I. Prof. Dr. Sandro Augusto Pavlik Haddad. II. Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. Circuito para Leitura de Grandezas Físicas de Dispositivo de Proteção Contra Surtos

CDU 02:141:005.6

Ricardo Vieira Borges

Circuito para Leitura de Grandezas Físicas de Dispositivo 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, 12 de dezembro de 2019:

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

Prof. Dr. Alex Reis
Convidado 1

Prof. Dr. Renato Coral Sampaio
Convidado 2

Brasília, DF
2019

Resumo

Devido a grande quantidade de descargas atmosféricas que ocorrem no território brasileiro e suas consequências nocivas à equipamentos eletrônicos, deve-se levar em consideração padrões de proteção para reduzir prejuízos e evitar acidentes. Um padrão de proteção conhecido é o de Dispositivo de Proteção Contra Surtos (DPS), que absorve transientes na rede elétrica ocasionados por uma descarga atmosférica que ocorreria próximo a edificação, por exemplo. Devido a necessidade de se obter maiores informações sobre o componente presente em um DPS, foi definido um circuito para leitura de tensão, corrente e temperatura no dispositivo, levando em consideração todos os tipos de sinais presentes na aplicação. O intuito da leitura dessas grandezas é de obter informações em tempo real sobre a rede elétrica, informações sobre surtos que podem ocorrer e identificar possíveis deteriorações no componente presente no DPS a partir dos dados mensurados. Os circuitos para leitura das grandezas foram dimensionados e validados por meio de simulações computacionais, os resultados se mostraram coerentes com a base teórica aplicada no projeto, conseguindo representar as grandezas disponibilizadas para o condicionamento de forma adequada para que outro sistema possa realizar a leitura.

Palavras-chaves: DPS. Surto. Descargas Atmosféricas. Circuitos. Tensão. Corrente. Temperatura.

Abstract

Due to the large amount of atmospheric discharges that occurs in the Brazilian territory and its harmful consequences to electronic equipment, protection standards must be taken into consideration to reduce damage and prevent accidents. A known protection standard is the Surge Protection Device (DPS), which absorbs transients in the power line caused by an atmospheric discharge that occurred near the building, for example. Due to the need to obtain more information about the component present in a DPS, a circuit was defined to read voltage, current and temperature in the device, taking into consideration all types of signals present in the application. The purpose of reading these quantities is to obtain real-time information about the power line, information about surges that may occur, and to identify possible deteriorations in the component present in the DPS from the measured data. The circuits for reading the magnitude were dimensioned and validated by computer simulations, the results were consistent with the theoretical basis applied in the project, being able to represent the magnitude available for conditioning adequately so that another system can perform the reading.

Key-words: DPS. Surge. Atmospheric Discharges. Circuits. Voltage. Current. Temperature.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Frentes de onda para tensão e corrente. (A) Tensão de circuito aberto; (B) Corrente de curto-circuito. Adaptado de (CLAMPER, 2016).	25
Figura 2 – Configuração de amplificador de diferença. Adaptado de (SEDRA; SMITH, 2015).	27
Figura 3 – Circuito Divisor de Tensão.	28
Figura 4 – (a) Filtro passa baixa (b) Filtro passa alta. Adaptado de (SEDRA; SMITH, 2015).	29
Figura 5 – (a) Filtro passa baixa ativo (b) Filtro passa alta ativo. Adaptado de (SEDRA; SMITH, 2015).	30
Figura 6 – Curva característica de modelos de NTC. Adaptado de (MURATA, 2018).	33
Figura 7 – Efeito de clamp de tensão utilizando diodos do tipo PN. Adaptado de (INSTRUMENTS, 2018).	34
Figura 8 – Curva de Impedância x Frequência de alguns modelos de ferrite. Adaptado de (INCOMPILANCE, 2010).	34
Figura 9 – Fluxo de projeto Top-Down para realização de um projeto de circuito eletrônico.	38
Figura 10 – Diagrama geral do sistema de condicionamento de sinal.	38
Figura 11 – Bloco de adequação/tradução da grandeza de entrada.	39
Figura 12 – Bloco de proteção de componentes.	40
Figura 13 – Bloco de filtragem de sinal.	40
Figura 14 – Bloco de amplificação de sinal.	40
Figura 15 – Circuito gerador de tensão de offset.	43
Figura 16 – Amplificador de diferença com offset.	44
Figura 17 – Topologia utilizada de circuito condicionador.	44
Figura 18 – Estágio divisor de tensão para leitura de tensão.	45
Figura 19 – Estágios para o circuito integrador.	47
Figura 20 – Divisor de tensão com NTC.	48
Figura 21 – Modelo real do varistor de Óxido de Zinco. Adaptado de (TDK, 2018).	49
Figura 22 – Tensão e corrente em regime permanente no DPS.	50
Figura 23 – Tensão e corrente de surto no DPS.	51
Figura 24 – Saída do circuito para leitura de tensão em regime permanente.	51
Figura 25 – Saída do circuito para leitura de tensão transiente.	52
Figura 26 – Saída do circuito para leitura de corrente em regime permanente.	53
Figura 27 – Saídas dos circuitos para leitura de temperatura da superfície do DPS e ambiente.	54
Figura 28 – Resposta em frequência do filtro anti-aliasing.	54

Figura 29 – Simulação de circuitos de leitura de tensões. 61

Figura 30 – Simulação de circuitos de leitura de correntes. 61

Figura 31 – Simulação de circuitos de leitura de temperaturas. 62

Lista de tabelas

Tabela 1 – Cronograma de atividades	55
---	----

Lista de abreviaturas e siglas

DPS	Dispositivo de Proteção Contra Surtos
NBR	Norma Brasileira
PCI	Placa de Circuito Impresso
EMI	Electromagnetic Induction
VDR	Voltage Dependent Resistor
TVS	Transient Voltage Suppressor
AmpOp	Amplificador Operacional
CMRR	Common-Mode Rejection Ratio
NTC	Negative Temperature Coefficient
PTC	Positive Temperature Coefficient
DC	Corrente Contínua
AC	Corrente Alternada
SPICE	Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis
A/D	Conversor Analógico Digital
GND	Referência do Circuito

Lista de símbolos

p	pico (10^{-12})
n	nano (10^{-9})
μ	micro (10^{-6})
m	mili (10^{-3})
k	kilo (10^3)
M	mega (10^6)
V	Volt
A	Ampere
I	Corrente
V _{rms}	Tensão média quadrática
V _p	Tensão de pico
R	Resistência
C	Capacitância
L	Indutância
Z	Impedância
F	Farads
H	Henry
Wb	Weber
Hz	Hertz
s	Segundo
j	Número imaginário
f	Frequência
t	Tempo

$^{\circ}\text{C}$	Graus Celsius
$\frac{d}{dt}$	Derivada em relação ao tempo
\int	Integral
dB	Decibel
sps	Samples per second
π	constante
Ω	Ohm
β	Letra grega minúscula beta
ϵ	Letra grega minúscula epsilon
Δ	Letra grega maiúscula delta
ϕ	Letra grega minúscula phi

Sumário

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	Contextualização	19
1.2	Definição do Problema	20
1.3	Objetivos	21
1.3.1	Objetivo Geral	21
1.3.2	Objetivos Específicos	21
2	REFERENCIAL TEÓRICO	23
2.1	Varistores	23
2.2	DPS	23
2.2.1	DPS Baseado em Varistor de Óxido de Zinco	23
2.2.2	DPS Baseado em Centelhador a Gás	24
2.2.3	DPS Baseado em Diodo Supressor de Transiente	24
2.3	Indução Eletromagnética	24
2.3.1	Tensões Induzidas em Linhas de Transmissão	25
2.4	Circuitos Condicionadores de Sinais	25
2.4.1	Amplificador Operacional	26
2.4.1.1	CMRR	26
2.4.1.2	Slew Rate	26
2.4.1.3	Configuração Inversora e Não Inversora	26
2.4.1.4	Amplificador de Diferença	27
2.4.1.5	Circuito Integrador e Diferenciador	27
2.4.2	Divisores de Tensão	28
2.4.3	Filtros Analógicos	28
2.4.3.1	Filtros Passivos	28
2.4.3.2	Filtros Ativos	30
2.4.3.3	Filtro Anti-Aliasing	30
2.5	Sensores	31
2.5.1	Sensor de Corrente	31
2.5.1.1	Não Invasivo	31
2.5.1.2	Invasivo	32
2.5.2	Sensor de Temperatura	32
2.5.2.1	Termistores	32
2.5.2.2	Termopar	33
2.6	Topologias e Elementos de Proteção de Circuitos	33

2.6.1	Limitação de Tensão com Diodos (Clamping)	33
2.6.2	Ferrites	34
2.6.3	Capacitores de Bulk e Desacoplamento	35
2.7	Ferramentas de Simulação de Circuitos	35
2.7.1	SPICE	35
3	METODOLOGIA	37
3.1	Metodologia Top-Down	37
3.2	Estágios de Aquisição	38
3.3	Topologias	39
3.4	Validação de Topologias	41
4	DESENVOLVIMENTO	43
4.1	Leitura de Grandezas	45
4.1.1	Tensão	45
4.1.2	Corrente	46
4.1.3	Temperatura	47
4.1.4	Proteções	48
4.1.5	Modelo Real do Varistor de Óxido de Zinco	49
4.2	Simulações e Resultados	49
4.2.1	Estímulos de Entrada	49
4.2.2	Tensão	51
4.2.3	Corrente	52
4.2.4	Temperatura	53
4.2.5	Resposta em frequência	54
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	55
5.1	Cronograma	55
	REFERÊNCIAS	57
	ANEXOS	59
	ANEXO A – PRIMEIRO ANEXO	61

1 Introdução

1.1 Contextualização

O Brasil possui cerca de 77,8 milhões de ocorrência de raios por ano, esse fato torna o Brasil o país com maior incidência de raios em todo o mundo ([INPE/ELAT, s.dc](#)). A explicação para a alta taxa de ocorrência do fenômeno é geográfica: É o maior país localizado na zona tropical do planeta, área próximo a linha do equador onde o clima é mais quente, favorecendo a formação de tempestades e de raios. Outro fenômeno denominado como “ilha de calor” também influencia na ocorrência de raios em grandes cidades ([INPE/ELAT, s.dc](#)), pois em grandes centros urbanos fatores como a capacidade de absorção de calor das superfícies urbanas (asfalto e tijolos), bloqueio de circulação de ar por grandes edifícios e poluição causam aumento na temperatura do local, o que favorece alguns tipos de tempestades e consequentemente a ocorrência de descargas elétricas atmosféricas.

Um raio é uma descarga atmosférica do tipo nuvem-solo ou solo-nuvem pelo ar que possui pico médio de corrente entre 10kA e 30 kA e diferença de potencial de 100 MV em um curto período de tempo quando próximo ao solo ([INPE/ELAT, s.db](#)). Caso uma pessoa seja atingida por um raio, a grande intensidade de corrente elétrica pode causar queimaduras e outros danos a diversas partes do corpo, podendo ser fatal. A maioria das mortes de pessoas atingidas por um raio é causada por parada cardíaca e respiratória ([INPE/ELAT, s.dc](#)). Além dos riscos à saúde humana, descargas atmosféricas são responsáveis pela morte de centenas de animais por ano no Brasil ([INPE/ELAT, s.da](#)), pelo início de incêndios em edificações e principalmente incêndios florestais.

Milhões de dólares são perdidos anualmente devido a queima de equipamentos eletroeletrônicos por descargas atmosféricas ao redor do mundo. Em uma sociedade cada vez mais dependente de equipamentos eletroeletrônicos, além dos custos financeiros, a perda de equipamentos traz uma série de transtornos aos usuários, principalmente os relacionados a serviços considerados essenciais. A queda de um raio gera um campo eletromagnético que pode danificar equipamentos eletroeletrônicos próximos, esse campo eletromagnético gerado também induz um sobretensão na rede elétrica local e redes de telecomunicação a uma distância de até 5 km do local de origem da descarga, denominado surto elétrico ([CLAMPER, 2016](#)). Um surto induzido por um raio pode gerar uma diferença de potencial acima de 5 kV e intensidade de corrente de até 100 kA por um tempo proporcional ao tempo da descarga originária, na ordem de microssegundos ([CLAMPER, 2016](#)). Além de serem ocasionados por descargas atmosféricas os surtos elétricos também podem ser causados por manobras na rede elétrica ou ligamento e religamento de máquinas elétricas

de alta potência.

Pela necessidade de proteção de vidas, propriedades, edificações e equipamentos, existem diversas medidas aplicadas para lidar com descargas atmosféricas. As técnicas envolvem geralmente malhas de proteção, aterramento e componentes supressores de surto que possuem critérios a serem adotados de acordo com a Norma Brasileira de Proteção Contra Descargas Atmosféricas (NBR 5419) que possui análises de riscos que auxilia o projetista na escolha de técnicas de proteção mais adequadas. A NBR leva em consideração a finalidade da proteção, os tipos de descargas atmosféricas, fatores de ambiente, tipos de edificação e tipos de linhas de transmissão de energia e telecomunicações que atendem à estrutura (NBR5419, 2015) Para se obter níveis seguros de proteção deve-se adotar um conjunto de medidas e orientações.

Além de para raios, malhas, esquemas de aterramento e equipotencialização, um conjunto bastante eficaz na supressão de surtos elétricos, conhecido como DPS, é instalado diretamente na rede, normalmente junto ao quadro de distribuição de energia da edificação. É um conjunto de proteção baseado em um componente discreto, podendo ser um centelhador, diodo supressor ou resistor variável (varistor), todos eles com tolerâncias de corrente, tensão e temperatura bastante superiores à de componentes comumente utilizados em equipamentos eletrônicos. Estes tipos de componentes detectam sobretensões transitórias na rede elétrica e atuam criando um canal alternativo para a corrente do surto, direcionando toda a corrente prejudicial para um caminho onde a chance de dano a componentes conectados à rede seja menor, como para o aterramento, por exemplo.

A NBR 5410 assegura que todas as instalações elétricas de baixa tensão devam ter Dispositivos de Proteção contra Surtos instalados (NBR5410, 2004), algumas empresas brasileiras especializadas possuem produtos padronizados de acordo com as normas citadas e classes para cada tipo de aplicação.

1.2 Definição do Problema

Como todo material, ferramenta, componente e equipamento, o DPS (Dispositivo de Proteção Contra Surtos) possui uma vida útil finita, que pode ser dada pela quantidade de ciclos de uso ou tempo utilização. No caso do DPS baseado em um varistor (que será o componente supressor de surto abordado nesse trabalho), os picos de corrente na ordem de kA que são conduzidas pelo componente, mesmo que por durações de alguns microssegundos, ocasionam uma elevação na temperatura do mesmo, deteriorando fisicamente o componente, o que afeta suas características originais e reduz sua vida útil.

Atualmente a solução mais observada no mercado para verificação do fim da vida útil de um DPS é dada de forma empírica, uma bandeira de sinalização na frente do equipamento feita com um papel especial que altera sua cor de acordo com a tempera-

tura do componente interno presente no DPS, a medida em que ciclos de descargas são conduzidos pelo dispositivo haverá picos de temperatura que irão mudar gradualmente a cor da bandeira de sinalização até uma cor que indique que provavelmente o dispositivo está próximo do fim de sua vida útil, recomendando a substituição do mesmo.

Partindo do princípio que esse modo empírico de identificação não traz informações satisfatórias sobre o real estado do dispositivo, surge a ideia de obter as grandezas físicas atuantes no varistor presente no DPS e utilizar os dados coletados para estimar um tempo de vida útil conceitual para o dispositivo em questão, com uma coleta de dados contínua e acompanhada, também informar em tempo real o estado atual do componente, sinalizar o fim de sua vida útil com maior precisão e obter informações sobre a rede elétrica.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Obter grandezas físicas de tensão, corrente e temperatura provenientes de um varistor de Óxido de Zinco presente em um modelo de DPS por meio de um conjunto de circuitos eletrônicos condicionadores, levando em consideração as necessidades de condicionamento, cuidados a serem tomados de acordo com cada grandeza que será aferida e fatores externos indiretos que podem afetar o circuito.

Através de testes em laboratório monitorados pelo circuito em questão, utilizar dados obtidos para realizar uma análise sobre a deterioração do varistor e estimar um tempo de vida útil para dispositivos que utilizam este tipo de componente.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Obter informações sobre os tipos de descargas atmosféricas que o componente estará sujeito a suportar e como essas descargas podem ser reproduzidas com fidelidade em ambiente controlado.
- Dimensionar circuitos condicionadores levando em consideração o tempo e amplitude das descargas (naturais e em laboratório), utilizando topologias básicas capazes de identificar cada uma das grandezas: tensão, corrente e temperatura. Disponibilizar sinais condicionados para serem lidos por um conversor analógico-digital de um microcontrolador.
- Devido a exposição direta e indireta de todo o conjunto de circuitos à grandes tensões e correntes, dimensionar topologias e componentes de proteção contra sobretensões e ruídos provenientes do surto.

- Obter modelo teórico equivalente de um varistor de Óxido de Zinco para fins de simulação.
- Simulação por software do conjunto de circuitos condicionadores para validação de dimensionamentos e observar comportamentos não ideais dos componentes.
- Desenvolvimento de placa de circuito impresso (PCI) com todos os circuitos propostos, levando em consideração possíveis interferências eletromagnéticas (EMI) nas trilhas e área limitada.
- Testes e validação da aquisição de dados.

2 Referencial Teórico

Para realização desse trabalho, é necessário um levantamento teórico sobre componentes, topologias e métodos que podem ser utilizados. O conhecimento sobre o comportamento de cada elemento do projeto e suas características podem ser úteis para prevenir equívocos e agilizar a confecção do trabalho.

2.1 Varistores

Varistores ou VDR (Voltage Dependent Resistor) são bastante utilizados como componente de sacrifício na maioria dos circuitos comercializados, geralmente combinado em um conjunto de varistores ou com fusíveis. O tipo mais comum é o varistor de Óxido de Metal, sendo o Óxido de Zinco bastante utilizado, consiste em um bloco de Óxido Metálico com dois eletrodos.

2.2 DPS

Existem três classes de DPS:

Classe I: Dispositivos que suportam correntes parciais de um raio, utilizados em ambientes sujeitos a descargas atmosféricas diretas, como áreas urbanas periféricas ou áreas rurais. São instalados em quadros primários de distribuição.

Classe II: Dispositivos capazes de suportar efeitos indiretos de uma descarga atmosférica, ou seja, correntes induzidas por um raio próximo à edificação. São instalados em quadros secundários de distribuição, usados comumente em áreas urbanas.

Classe III: Dispositivos para proteção de equipamentos ligados à rede elétrica, linhas telefônicas e linha de dados. Suportam correntes induzidas por raios que foram transportadas pela rede até a edificação. (CLAMPER, 2016)

2.2.1 DPS Baseado em Varistor de Óxido de Zinco

O varistor de Óxido de Zinco possui uma característica de resistência não linear de acordo com a aplicação de uma tensão, à medida que a tensão é elevada até ultrapassar a tensão nominal do varistor há uma queda drástica na resistência do mesmo, tendo sua temperatura elevada pela condução de uma maior corrente (TDK, 2018). Isso torna o varistor um componente útil na absorção de picos de energia eventuais que poderiam danificar um circuito.

Característica de tensão-corrente de um varistor de Óxido de Zinco:

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

Onde C (constante da cerâmica) e α (coeficiente de não-linearidade) são constantes características do material. Quanto maior α , maior será a sensibilidade a variação de tensão (TDK, 2018).

2.2.2 DPS Baseado em Centelhador a Gás

Opera como uma chave dependente de tensão, baseia-se na criação de um arco-voltaico entre seus terminais para valores de tensão acima de sua tensão de operação, criando um caminho para a corrente de surto, esse valor de tensão varia de acordo com o gás encapsulado e distância entre os terminais do componente. Um gás bastante utilizado nessa aplicação é o argônio dopado com um ionizador primário.

2.2.3 DPS Baseado em Diodo Supressor de Transiente

Conhecido como diodo TVS (Transiente Voltage Suppressor), é um tipo de diodo semelhante ao diodo Zener, porém capaz de suportar elevados picos de tensão transiente por um curto período de tempo (LEPKOWSKI, 2012), mantendo sua tensão nominal ao custo de um maior fluxo de corrente pelo componente. É fabricado de forma simples ou bidirecional, protegendo também contra surtos com polaridade invertida.

2.3 Indução Eletromagnética

Em física, eletromagnetismo relaciona forças da eletricidade e do magnetismo como um só fenômeno, explicado pelo campo magnético. (SADIKU, 2004) Os campos magnéticos podem ser explicados pelos efeitos da indução eletromagnética, que é o surgimento de uma corrente elétrica em um condutor imerso em um campo magnético que varia.

Esse fenômeno pode ser expressado pela Lei de Faraday:

$$\varepsilon = \frac{\Delta\phi}{\Delta t} \quad (2.2)$$

Onde,

ε : Força eletromotriz induzida (V);

$\Delta\phi$: Variação do fluxo magnético (Wb);

Δt : Intervalo de tempo (s);

(SADIKU, 2004)

O caminho inverso também é válido, uma corrente circulando por um condutor acaba gerando um campo magnético e uma descarga atmosférica também pode ser vista como uma corrente elétrica em grande escala circulando por um condutor, no caso o ar, gerando um campo magnético proporcional que repete o efeito de indução em condutores próximos.

2.3.1 Tensões Induzidas em Linhas de Transmissão

As descargas atmosféricas que ocorrem nas proximidades de linhas de transmissão induzem picos de corrente nos condutores, que acabam sendo levados às edificações e pondo em risco a integridade de equipamentos eletroeletrônicos.

As formas de onda de tensão e corrente geradas por esse pico de energia possuem características conhecidas, que facilitam a aplicação de técnicas para proteção contra cada tipo de surto. Para instalações residenciais de baixa tensão, a amplitude de tensão do surto nas entradas de rede da edificação fica limitada a cerca de 6kV, devido ao centelhamento que ocorre na linha de transmissão para maiores tensões. Um gerador de onda combinada pode reproduzir as formas de onda típicas para esse tipo de descarga, que são de 1,2/50us para tensão e 8/20us para corrente, ou seja, frente de onda e tempo de decaimento, respectivamente (CLAMPER, 2016).

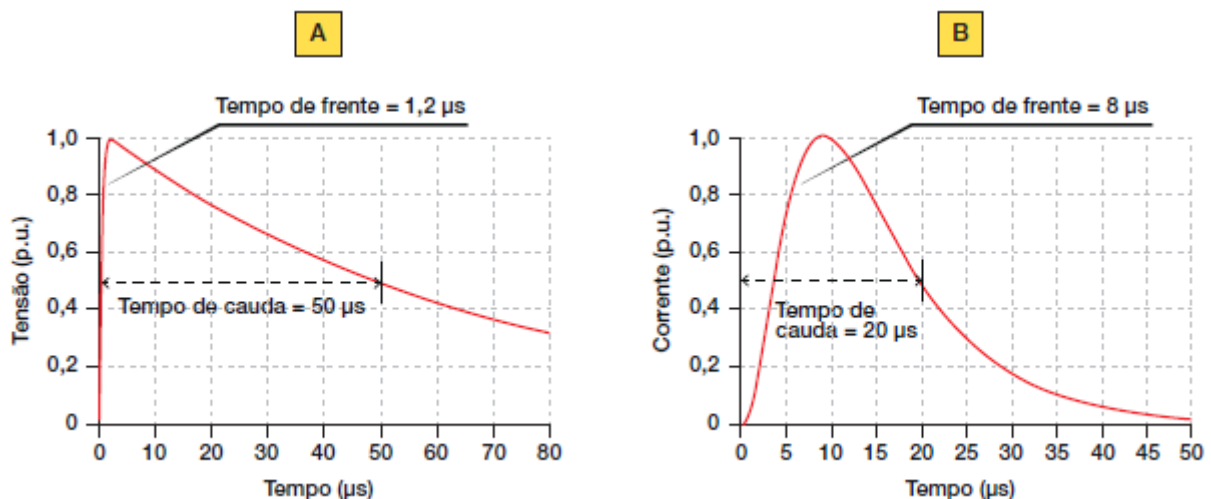


Figura 1 – Frentes de onda para tensão e corrente. (A) Tensão de circuito aberto; (B) Corrente de curto-circuito. Adaptado de (CLAMPER, 2016).

2.4 Circuitos Condicionadores de Sinais

Para uma boa aquisição de dados, condicionadores de sinais são utilizados para adequar grandezas a um nível em que elas fiquem compatíveis aos demais elementos do circuito. Neste caso há a leitura de grandezas na ordem de milhares de Volts e milhares

de Ampères e deve-se atenuar os níveis elétricos proporcionalmente para possibilitar a leitura dos dados.

2.4.1 Amplificador Operacional

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 ampop que for utilizado (SEDRA; SMITH, 2015). As configurações mais usuais com ampops utilizam elementos passivos para realizar realimentação negativa, determinando seu ganho de acordo com os elementos adicionados e possibilitando diversas configurações, como de amplificador inversor, não inversor e subtrator por exemplo. Além disso, um ampop possui elevada impedância de entrada e baixa impedância de saída, o que favorece na isolação de determinados circuitos.

2.4.1.1 CMRR

Idealmente, um ampop deveria ter saída nula quando dois sinais exatamente iguais fossem aplicados em suas entradas, pois a saída reflete a diferença (subtração) das entradas multiplicadas por um ganho, porém em aplicações reais, um pequeno sinal aparece na saída mesmo com as condições citadas anteriormente. O CMRR, Relação de Rejeição em Modo Comum (Common Mode Rejection Ratio) é a capacidade do ampop de rejeitar esses sinais equivalentes na entrada (SEDRA; SMITH, 2015).

2.4.1.2 Slew Rate

Velocidade de resposta de um amplificador quando ocorre uma variação de tensão na entrada (SEDRA; SMITH, 2015). É útil para identificar a frequência máxima que pode ser aplicada ao amplificador sem que haja distorções do sinal.

2.4.1.3 Configuração Inversora e Não Inversora

Amplificador inversor e não inversor defasa o sinal em 180° ou reflete a mesma fase do sinal de entrada, respectivamente. Podem aplicar ganho ao sinal de acordo com os valores dos elementos passivos da topologia.

Os ganhos para esses tipos de amplificadores são respectivamente:

$$V_o = -\frac{R_2}{R_1}V_{in} \quad (2.3)$$

$$V_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)V_{in} \quad (2.4)$$

2.4.1.4 Amplificador de Diferença

Uma topologia bastante comum em aplicações com amplificadores operacionais, que usa o CMRR para rejeitar ruídos de modo comum na entrada.

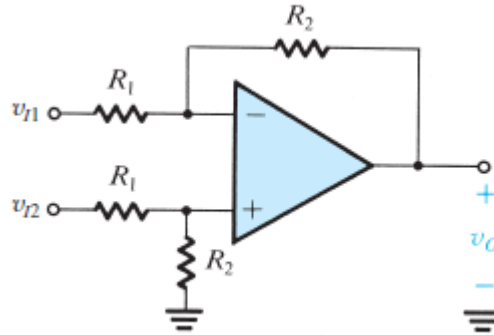


Figura 2 – Configuração de amplificador de diferença. Adaptado de (SEDRA; SMITH, 2015).

A equação da tensão de saída é dada por:

$$v_o = \frac{R_2}{R_1}(v_{I2} - v_{I1}) \quad (2.5)$$

Dependendo da combinação de elementos passivos, pode ser utilizado como filtro ativo, amplificador ou atenuador.

2.4.1.5 Circuito Integrador e Diferenciador

Com realimentação negativa através de um capacitor, o circuito integrador pode ser realizado a partir de um amplificador operacional e fornece na saída a equivalente integral do sinal de entrada em relação ao tempo. Nessa topologia a tensão de entrada é aplicada na entrada inversora do ampop, o que torna o integrador também um circuito inversor.

$$V_o = -\frac{1}{RC} \int V_{in}(t) dt \quad (2.6)$$

Para o circuito diferenciador, a realimentação negativa é feita através de um resistor, com capacitor presente na entrada inversora do ampop, em série com a tensão de entrada. O amplificador diferenciador também é inversor.

$$V_o = -RC \frac{dV_{in}(t)}{dt} \quad (2.7)$$

2.4.2 Divisores de Tensão

Técnica utilizada para obter uma tensão elétrica em um ponto do circuito de acordo com uma tensão geral de entrada e os componentes de malha do circuito. Um exemplo de divisor de tensão é o de resistores em série, onde a queda de tensão em cada resistor será proporcional a resistência de cada um deles e da tensão de alimentação da malha resistiva.

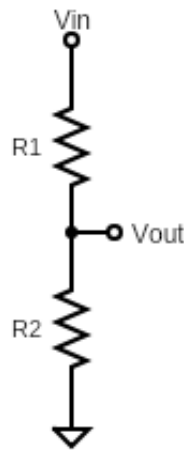


Figura 3 – Circuito Divisor de Tensão.

Com a saída de tensão dada pela Eq. (2.8).

$$V_{out} = \frac{R2}{R1 + R2} V_{in} \quad (2.8)$$

2.4.3 Filtros Analógicos

Como uma boa prática em projetos de circuitos eletrônicos, deve-se levar em consideração variações de sinais indesejáveis para o circuito, que para a aplicação são apenas ruídos que podem levar os circuitos da aplicação a comportamentos indesejáveis ou até mesmo danificar os mesmos. Para isso são adicionados filtros eletrônicos pelo projeto, que possuem a função de atenuar sinais fora da faixa de frequência para que foram projetados. Podemos separar os filtros em quatro topologias: filtro passa baixa, passa alta, passa faixa e rejeita faixa. A quantidade de filtros em um circuito e seus tipos vão depender de cada projeto e suas aplicações.

2.4.3.1 Filtros Passivos

Levando em consideração a resposta em função da frequência de componentes armazenadores de energia, no caso capacitores e indutores, é possível realizar topologias

de circuitos para estipular a faixa de frequência em que um sinal pode atuar com o filtro atuando.

Capacitores possuem impedância inversamente proporcional à frequência:

$$Z_c = R + \frac{1}{j2\pi fC} \quad (2.9)$$

Indutores possuem impedância diretamente proporcional à frequência:

$$Z_l = R + j2\pi fL \quad (2.10)$$

([SEDRA; SMITH, 2015](#))

Onde,

R: Parte real da impedância, pode ser vista como a resistência do componente real, ou um resistor em série;

f: frequência do sinal [Hz];

C: Capacitância em Farads [F];

L: Indutância em Henry [H];

j: Número imaginário, está relacionado com a defasagem do sinal;

Um exemplo de topologia de passa baixa ou passa alta simples, pode ser realizado por um circuito com resistor em série com um capacitor ou indutor, conhecidos como filtros RC ou RL. O capacitor tende a bloquear baixas frequências, e o indutor tende a bloquear altas frequências, a combinação da posição desses elementos de acordo com o sinal definirá se o mesmo irá se comportar como um passa baixa ou como passa alta.

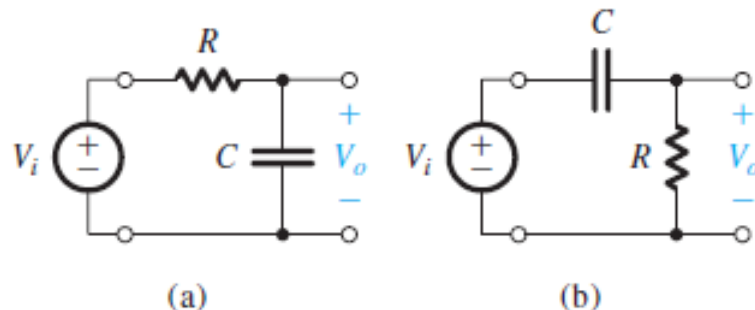


Figura 4 – (a) Filtro passa baixa (b) Filtro passa alta. Adaptado de ([SEDRA; SMITH, 2015](#)).

A frequência de corte tanto para a passa alta quanto para o passa baixa será definida pela resistência e capacitância dos elementos escolhidos.

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (2.11)$$

(SEDRA; SMITH, 2015)

Com uma combinação mais elaborada de elementos ou cascatas em série de filtros, podemos obter características de passa faixa, rejeita faixa e também obter um filtro de maior ordem, que define a velocidade de corte de um filtro na frequência projetada.

2.4.3.2 Filtros Ativos

Possui mesma função dos filtros analógicos, porém com a utilização de elementos ativos no circuito, como amplificadores operacionais e transistores (SEDRA; SMITH, 2015). No caso do uso de amplificadores operacionais, capacitores ou indutores definirão a frequência de corte do filtro. As vantagens de associação de elementos ativos à filtros são: Evitar perdas por inserção, pois o circuito pode proporcionar um ganho real de potência de acordo com a necessidade do projetista e maior possibilidade combinação de filtros, aumentando sua ordem com configurações simples repetidas, tirando proveito da característica de alta impedância de entrada e baixa impedância de saída dos ampops.

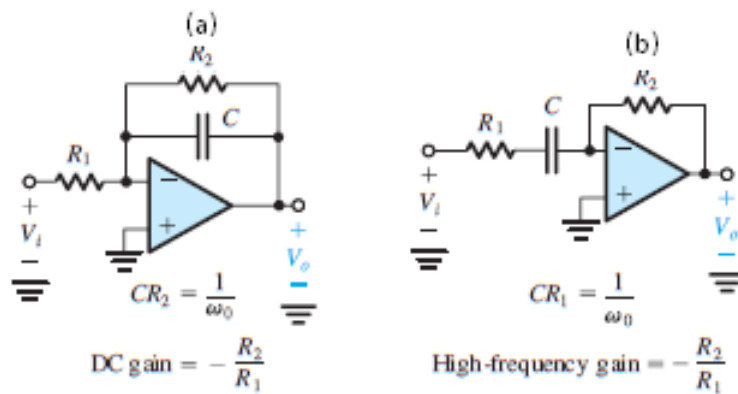


Figura 5 – (a) Filtro passa baixa ativo (b) Filtro passa alta ativo. Adaptado de (SEDRA; SMITH, 2015).

O ganho do ampop dependerá da configuração do mesmo, e a frequência de corte do filtro seguirá como nos filtros passivos, dependendo da ordem.

2.4.3.3 Filtro Anti-Aliasing

Utilizados para evitar o efeito de Aliasing em uma amostragem, que é o erro de reconstrução de um sinal amostrado pelo fato do sinal possuir frequências superiores a metade da frequência de amostragem, não obedecendo o critério de Nyquist.

Para garantir que não haja reconstrução errônea do sinal amostrado, um filtro passa-baixa pode ser aplicado em um estágio do circuito com frequência de corte na

metade da frequência de amostragem, esta aplicação específica do filtro passa-baixa é denominada filtro anti-aliasing.

2.5 Sensores

Componentes que respondem à um estímulo físico ou químico, o transformando em outra grandeza física ([BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2019](#)), para eletrônica, as saídas se dão em tensão, corrente ou resistência.

2.5.1 Sensor de Corrente

2.5.1.1 Não Invasivo

Modelo que realiza a leitura de uma corrente circulando por um condutor a partir do seu campo magnético, portanto não há interferências no circuito em que a corrente está sendo aferida. Modelos comuns disponíveis no mercado possuem núcleo de ferrite para confinamento do campo magnético e uma bobina ou sensor de efeito Hall que transformam o campo magnético em um pequeno fluxo de corrente ou diferença de potencial, respectivamente. Esse tipo de sensor pode ser utilizado para amplas faixas de corrente dependendo do modelo, porém com menor sensibilidade para correntes muito pequenas, na ordem de microampères.

Um tipo de sensor não invasivo de corrente não convencional é denominado Bobina de Rogowski. Trata-se de um toróide com um enrolamento de material condutor sob um núcleo de material não magnético, o conjunto obedece ao mesmo princípio de indução por campo magnético, e suas expressão para a tensão na saída são dadas por:

$$V(t) = -M \frac{di(t)}{dt} \quad (2.12)$$

O conjunto M é a indutância mútua entre a bobina e o condutor, dada por:

$$M = \mu_o n S \quad (2.13)$$

Onde,

μ_o : Permissividade elétrica no vácuo;

n: Número de espiras de condutor no toróide;

S: Área da seção transversal da bobina;

$\frac{di(t)}{dt}$: derivada da corrente que passa pelo condutor;

([GOVEIA, 2013](#))

Uma característica desse método, é a baixa variação da tensão de acordo com o fluxo de corrente, o que torna a bobina um bom método para sensoriamento de corrente desde a ordem de microampères até kiloampères. Torna-se necessário o uso de dois circuitos condicionadores para a aplicação: o primeiro para filtro de ruídos e amplificação do sinal de saída, o que determinará também a faixa de operação do sensor e o segundo um circuito integrador para obter um sinal de tensão proporcional a corrente do condutor, sabendo que a saída original está relacionada a derivada da corrente (GOVEIA, 2013).

2.5.1.2 Invasivo

Necessita que o dispositivo que está realizando a leitura esteja em série com o ramo do circuito a ter sua corrente mensurada. Uma solução comum é utilizar um resistor de referência que ficará em série com o circuito, denominado “resistor shunt”, que normalmente possui baixo valor de resistência e alta potência. A tensão gerada nesse resistor de valor conhecido reflete a corrente que está passando pelo circuito. Para grandes fluxos de corrente, este método pode apresentar problemas devido a potência limitada do resistor shunt.

Alguns modelos de sensor de corrente invasivos também usam o princípio do efeito Hall, porém com a mesma necessidade de estar em série com o circuito que terá sua corrente mensurada. Os chips com essa funcionalidade possuem uma trilha transversal a um sensor de efeito Hall, causa menor interferência no circuito e possibilita a medição de maiores fluxos de corrente.

2.5.2 Sensor de Temperatura

2.5.2.1 Termistores

Existem basicamente dois tipos de termistores: NTC (Negative Temperature Coefficient) e PTC (Positive Temperature Coefficient). São resistores que variam sua resistência de acordo com a temperatura, o termistor NTC diminui sua resistência com o aumento da temperatura e o PTC aumenta sua resistência com o aumento da temperatura.

São componentes bastante sensíveis a variações de temperatura, porém com uma faixa de medição estável limitada, de -50°C até 150°C para um NTC típico. Para temperaturas elevadas, o componente apresenta não linearidade, dificultando a obtenção da variação exata da temperatura (DKSK, n.d.).

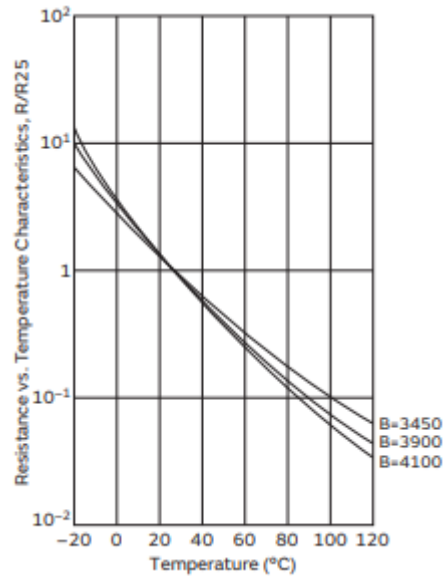


Figura 6 – Curva característica de modelos de NTC. Adaptado de (MURATA, 2018).

2.5.2.2 Termopar

Baseia-se em dois diferentes metais unidos em uma das suas extremidades, a diferença de temperatura entre a extremidade de união e a extremidade externa gera uma diferença de potencial em função dessa temperatura. É uma solução de baixo custo que possibilita a leitura de temperaturas negativas até temperaturas acima de 1000°C , dependendo do seu tipo.

2.6 Topologias e Elementos de Proteção de Circuitos

Devido à preocupação com transientes de elevada tensão e ruídos e alta frequência comuns em grande parte das aplicações com eletrônica, deve-se garantir que pontos críticos de um circuito estejam menos suscetíveis a essas interferências não desejadas com elementos adicionais ao circuito.

2.6.1 Limitação de Tensão com Diodos (Clamping)

Consiste em ceifar toda variação de tensão fora de uma faixa especificada, entre a referência do circuito e a alimentação, por exemplo.

Aproveitando a característica de condução de um diodo de acordo com o potencial aplicado, é possível aplicar uma topologia com diodos antiparalelos, que limitarão a tensão da linha de acordo com a tensão de referência aplicada no terminal oposto com a adição de sua tensão de condução, que é de aproximadamente $0,7\text{V}$ em diodos do tipo PN de propósito geral.

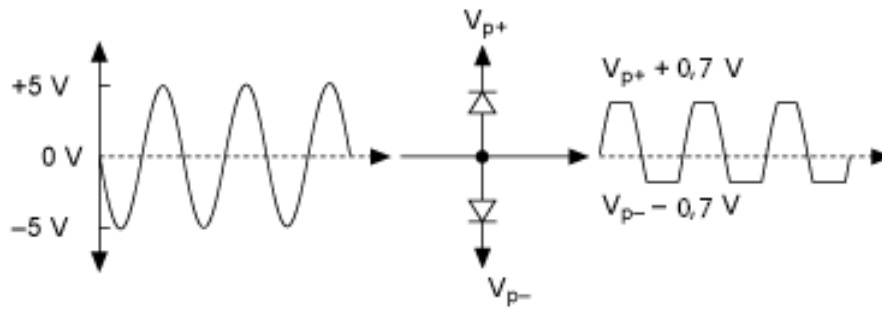


Figura 7 – Efeito de clamp de tensão utilizando diodos do tipo PN. Adaptado de (INSTRUMENTS, 2018).

Para essa topologia, é ideal a utilização de diodos do tipo Schottky, que possuem junção de um metal com um material semicondutor do tipo N, diferentes dos diodos comuns, que possuem junção de dois materiais semicondutores do tipo P e N. A junção metal-semicondutor possui característica de menor tensão de condução (cerca de 0,3V), maior capacidade de condução de corrente e menor capacitância parasita, que influencia em uma resposta mais rápida de condução (SEDRA; SMITH, 2015).

2.6.2 Ferrites

Indutores específicos para supressão de interferências de alta frequência externas a um circuito. São bastante utilizados em entradas de circuitos de comunicação serial, fontes e conversores DC/DC. Podem ser classificados de acordo com a faixa de frequência de atuação, velocidade de resposta e capacidade de corrente. Ferrites com enrolamento possuem maior capacidade de corrente e atenuam sinais em frequências mais baixas que os ferrites tradicionais de chip (ELECTRONICSNOTES, n.d.).

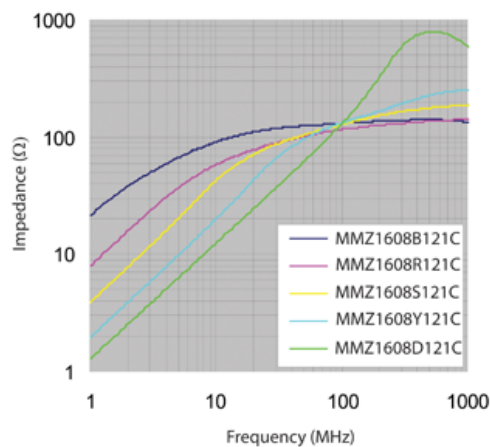


Figura 8 – Curva de Impedância x Frequência de alguns modelos de ferrite. Adaptado de (INCOMPILANCE, 2010).

2.6.3 Capacitores de Bulk e Desacoplamento

Como boa prática em projeto de circuitos, deve-se levar em consideração a adição de capacitores de bulk desacoplamento imediatamente antes da entrada de alimentação dos componentes ativos, posicionados entre as trilhas de alimentação e terra. A motivação para essa topologia é a de fornecer uma tensão de melhor qualidade possível para os chips do circuito.

A diferença entre capacitores de desacoplamento e bulk é apenas de escala, o desacoplamento evita transientes de curta duração oriundos da fonte ou induzidos pela própria trilha da placa, já os capacitores de bulk possuem valores maiores de capacitância que evitam a que a tensão nas proximidades do mesmo seja reduzida, caso a fonte abaixe a tensão por um curto período de tempo.

2.7 Ferramentas de Simulação de Circuitos

Para validação de dimensionamentos e observar comportamentos não ideais de componentes de acordo com estímulos, é recomendável realizar uma simulação através de software dos circuitos propostos para o projeto.

2.7.1 SPICE

A sigla SPICE significa Simulation Program with Integrated Circuits Emphasis, realizado por Laurence W. Nagel na Universidade da Califórnia em 1972 ([NAGEL; PEDERSON, 1973](#)). Permite a simulação de circuitos eletrônicos descritos por texto, onde são inseridos os parâmetros de comportamento do componente e de análise desejada. Para descrição dos componentes, algumas regras de sintaxe devem ser respeitadas, como em uma linguagem de programação.

Atualmente, existem variações de interfaces baseadas em simulações SPICE disponíveis gratuitamente com uma infinidade de bibliotecas de componentes e diversos tipos de análise. Também é possível a inserção de componentes específicos através do modelo SPICE do componente, que é disponibilizado pela maioria dos fabricantes.

3 Metodologia

O estudo proposto consiste em buscar soluções simples e de baixo custo para as necessidades do projeto, levando em consideração etapas futuras e possíveis alterações na proposta inicial. O esquemático do circuito e tipos de componentes serão definidos considerando o desenvolvimento do layout de uma placa de circuito impresso com área limitada e práticas necessárias à aplicação.

Um fluxo de projeto foi definido para o trabalho a ser realizado, visando observar o sistema em questão de modo amplo e, a partir de suas necessidades, compor os subsistemas necessários para a aplicação. Essa metodologia é denominada fluxo de projeto Top-Down

3.1 Metodologia Top-Down

Como citado acima, a partir de uma visão geral do sistema, deve-se obter uma fragmentação do mesmo para compreensão de todos os seus subsistemas e consequentemente as especificações dos níveis mais básicos do projeto.

Para aplicação deste fluxo no trabalho em questão, é necessário especificar os dados relevantes para os objetivos que podem ser obtidos a partir de sensoramento em um varistor de Óxido de Zinco. Após a definição dos dados que serão de fato relevantes, serão definidos os sub blocos com métodos para a obtenção desses dados. Os sub blocos serão divididos em topologias de circuitos eletrônicos até finalmente atingir o nível de componentes necessários para a aplicação. Os níveis de fluxo para o projeto podem ser observado na Fig. (9).

Cada bloco do fluxo Top-Down define bem as especificações de seus sub blocos recorrentes, o que reduz o risco de possíveis erros nos blocos de baixo nível e facilita alterações nos mesmos, porém para a ocorrência de uma especificação equivocada seria necessário uma revisão de um dos blocos de alto nível, e no pior caso, uma revisão no sistema geral.

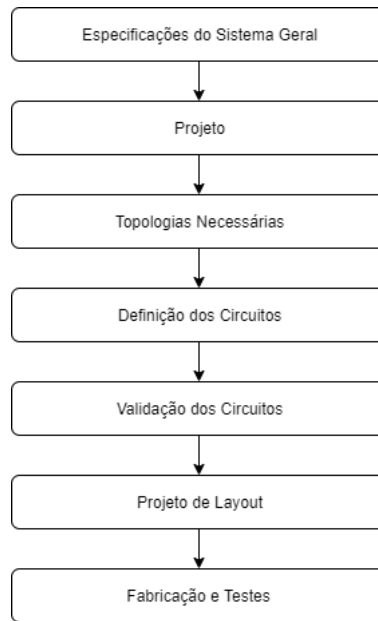


Figura 9 – Fluxo de projeto Top-Down para realização de um projeto de circuito eletrônico.

3.2 Estágios de Aquisição

O sistema que será desenvolvido terá a capacidade de ser exposto a uma grandeza específica e através de estágios de condicionamento, adequar os sinais para que se tornem legíveis por outro sistema.

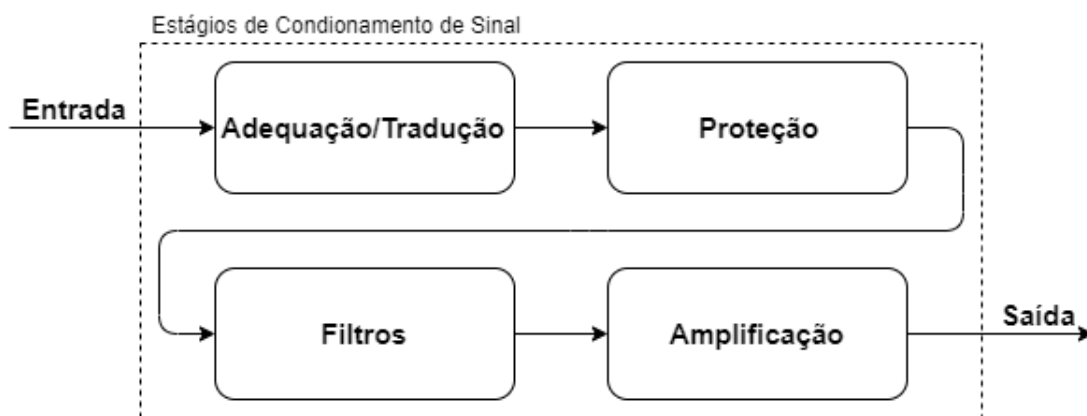


Figura 10 – Diagrama geral do sistema de condicionamento de sinal.

O sistema de adequação da grandeza, é normalmente desempenhado por um sensor. Há uma tradução da grandeza física em um nível elétrico proporcional à mesma, possibilitando a leitura e tratamento do sinal pelo circuitos eletrônicos.

Dependendo da aplicação, componentes de um estágio genérico de um circuito acabam se tornando sensíveis a picos de energia que podem ocorrer em um determinado momento. A função de estágios de proteção se assemelha a um estágio de filtros, porém

com funcionalidade de interromper sinais prejudiciais a integridade dos elementos do sistema.

Devido a interferências externas, o estágio de filtragem de sinal é necessário para reduzir a possibilidade de interpretações equivocadas devido a contaminação que esses ruídos provocam no sinal útil.

Para casos onde o nível de tensão disponibilizado pela entrada possui baixa energia, deve-se amplificar o sinal para obtenção de uma melhor resolução. Essa adequação diminui a necessidade de um instrumento de leitura com alta sensibilidade.

3.3 Topologias

Os circuitos condicionadores do projeto seguirão um padrão geral de tratamento de sinais, sendo específico de cada medição os valores de ganho, configuração do amplificador operacional, frequências de corte de filtros e topologias de proteção.

Todos os estágios de condicionamento de sinal serão baseados em amplificadores operacionais, cada um com parâmetros e topologias adicionais de acordo com cada grandeza e tipo de sinal que será medido.

Os estágios de tratamento de sinais são:

- Estágio de tradução ou adequação das grandezas que será realizado por meio de sensores ou atenuadores de sinal.

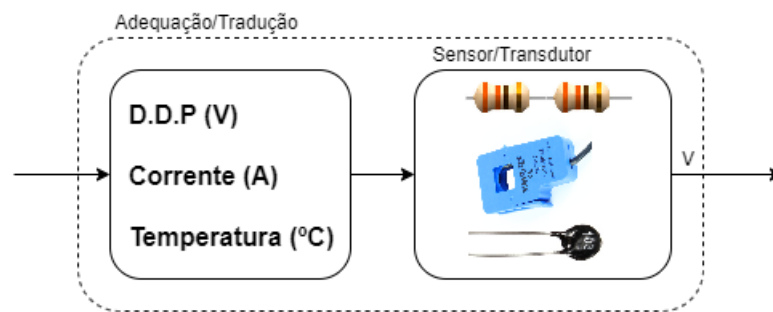


Figura 11 – Bloco de adequação/tradução da grandeza de entrada.

- Estágio que diminuirá consideravelmente a possibilidade de ocorrência de danos aos elementos do circuito, devido a absorção de picos de energia pelos componentes de proteção que serão utilizados. Este estágio será baseado em topologias de proteção utilizando diodos, indutores do tipo ferrite ou capacitores em alguns casos.

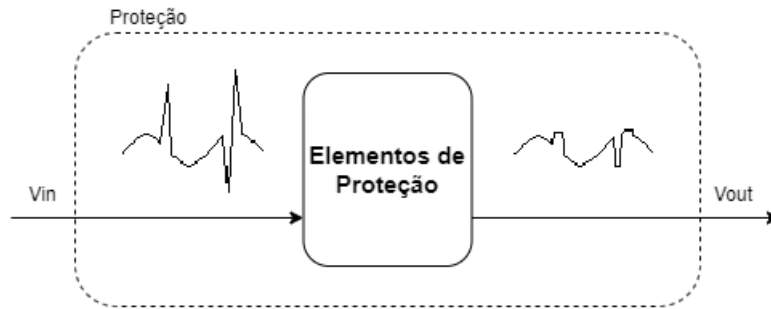


Figura 12 – Bloco de proteção de componentes.

- Estágio de filtragem de ruídos que não são úteis a aplicação, possibilitando uma leitura do sinal original com maior clareza. Todos os filtros de sinais serão baseados em topologias de filtros passivos.

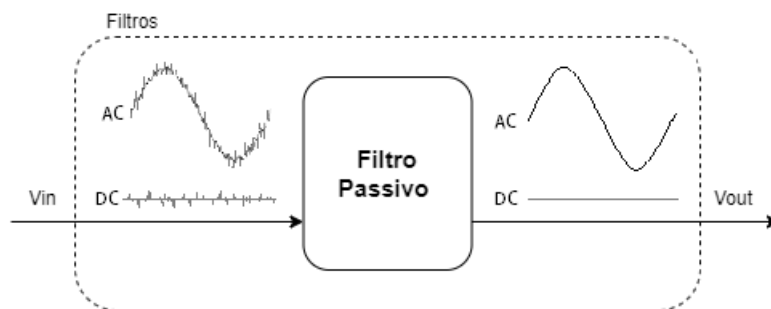


Figura 13 – Bloco de filtragem de sinal.

- Estágio amplificador de tensão baseado em um amplificador operacional que irá aplicar um ganho previamente definido em seu sinal de entrada, gerando um sinal de amplitude superior na saída.

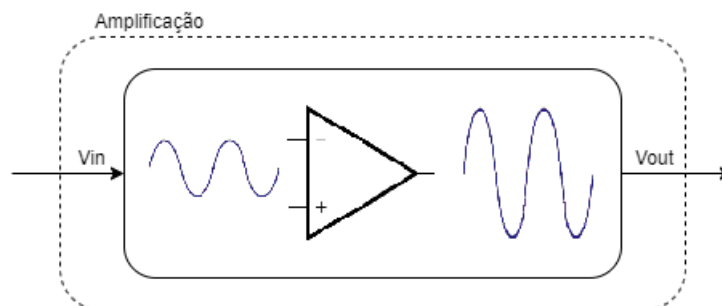


Figura 14 – Bloco de amplificação de sinal.

Vale ressaltar que os estágios descritos anteriormente podem ser implementados mais de uma vez no mesmo circuito, e em ordens diferentes das descritas.

3.4 Validação de Topologias

As topologias de circuitos propostos serão simuladas no software LTSpice, da empresa americana Analog Devices, que conta com a possibilidade de adição de diversos parâmetros em componentes passivos para simular seus efeitos não ideais no circuito. O software possui uma vasta biblioteca de componentes ativos e passivos genéricos que são utilizados no projeto.

Os estímulos de entrada para as simulações dependerão de cada grandeza para qual o circuito foi projetado, considerando a reprodução dos sinais que o circuito estará exposto e observar o comportamento dos mesmos.

4 Desenvolvimento

Para realização das topologias, o amplificador operacional utilizado será o TLV9002 da Texas Instruments, com as seguintes características que são críticas para o projeto:

- Bandwidth máximo de 1MHz (suficiente para leitura de um surto do tipo 8/20us);
- Tensão de alimentação de 1,8V até 5,5V (alimentação definida em 3,3V);
- Tensão máxima de entrada dada pela tensão de alimentação +0,5V;
- CMRR de até 95dB;
- Proteção contra descarga eletrostática de até 2kV;

([TEXAS INSTRUMENTS, 2019](#))

A configuração utilizada em todas as leituras (exceto na aquisição de corrente de surto), será a do amplificador de diferença, que amplificará a diferença da entre os sinais de entrada, tirando proveito da característica do CMRR para rejeitar ruídos de modo comum que possam afetar a leitura.

Como não será utilizada uma fonte simétrica para alimentar os amplificadores e os sinais mensurados podem assumir valores negativos, deve-se definir uma tensão de referência para gerar um offset positivo nas medições, essa solução também beneficia a leitura do conversor A/D que não suporta valores negativos de tensão. O offset foi gerado a partir de da tensão de alimentação dos circuitos ativos com um divisor de tensão simétrico, isolado por um buffer.

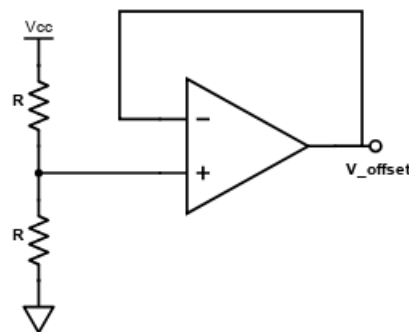


Figura 15 – Circuito gerador de tensão de offset.

Na topologia utilizada, essa referência de tensão é atrelada a referência da malha de resistores, amarrando a saída da configuração do amplificador de diferença ao offset.

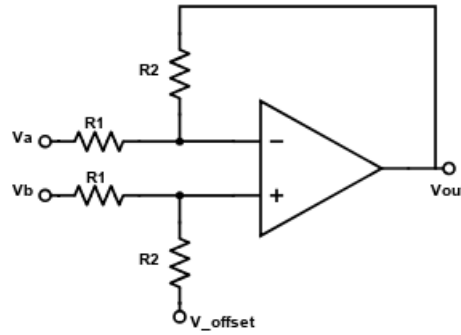


Figura 16 – Amplificador de diferença com offset.

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

Um estágio adicional utilizando um amplificador operacional como buffer (para isolamento entre circuitos) e um filtro passa baixa irão compor a topologia de filtro anti-aliasing. A frequência de aquisição do conversor A/D irá definir a frequência de corte do filtro passa baixa, que será de no máximo a metade de frequência de aquisição do conversor, impedindo que frequências acima do limite gerem efeito de aliasing na leitura, obedecendo assim o critério de Nyquist.

Estágios de proteção dependerão da grandeza específica que estará sendo condicionada, sendo padrão em todos os circuitos a presença de diodos Schottky de clamping logo antes a entrada do conversor A/D. O circuito da Fig. (17) é a topologia básica utilizada em grande parte do projeto.

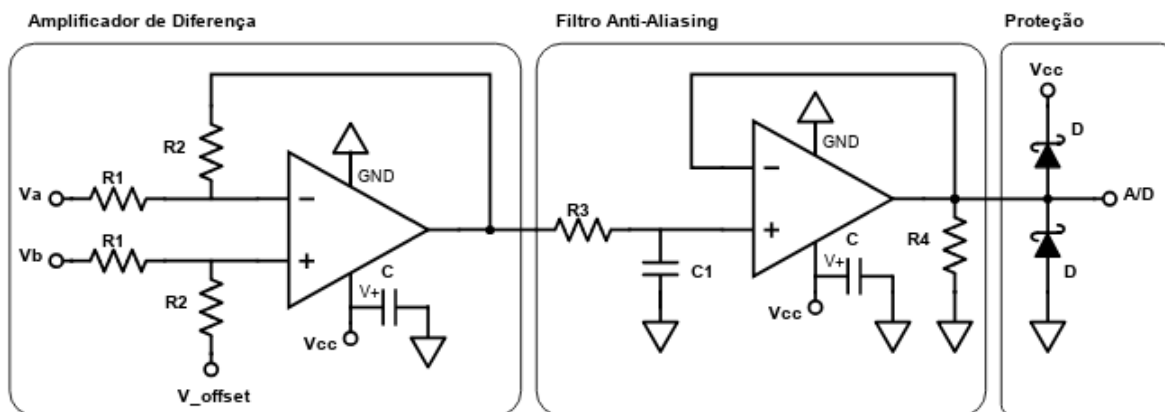


Figura 17 – Topologia utilizada de circuito condicionador.

Os valores utilizados nos componentes discretos para definir o ganho, frequências de corte, entre outros efeitos do circuito podem ser observado nas imagens em “Anexo 1”.

4.1 Leitura de Grandezas

4.1.1 Tensão

O circuito condicionador para leitura de tensão no DPS será dividido em duas leituras distintas, cada uma com adaptações de acordo com os sinais a serem medidos.

Uma adaptação comum às duas medições, será a da utilização de um divisor de tensão com resistores de valor elevado, devido ao fato de que as tensões que serão medidas possuem valores não suportados pelos circuitos que serão utilizados. O divisor funcionará como um estágio abaixador de tensão, que será proporcional a tensão original, possibilitando a leitura da grandeza sem danos aos componentes.

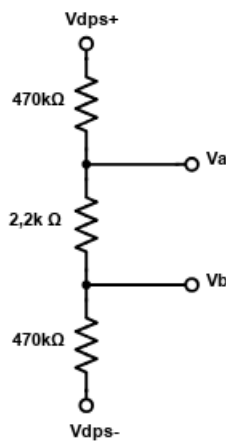


Figura 18 – Estágio divisor de tensão para leitura de tensão.

Com os valores de resistores utilizados, a tensão de entrada será reduzida em aproximadamente 0,32% dos seus valores originais, que é a diferença de potencial entre os terminais do resistor central.

- Regime Permanente

É de interesse para o projeto, um acompanhamento do sinal oriundo da rede elétrica atuando sobre o DPS em condições normais. Neste caso é considerado o sinal de uma rede elétrica de baixa tensão, ou seja, amplitude de 220Vrms (311 Vp) e frequência de 60Hz.

O primeiro estágio de leitura é composto pelo amplificador diferencial com ganho unitário, segundo estágio com o conjunto anti-aliasing com frequência de corte de 1,5kHz e clamp de tensão com diodos Schottky como referenciado na Fig. (17). Com a frequência de corte do filtro acima da frequência fundamental da rede é possível detectar harmônicos e pequenos distúrbios no sistema de fornecimento de energia. A frequência de amostragem nesse caso deve ser de no mínimo 3ksps.

- Transiente

Leitura de uma onda do tipo 8/20us que poderá assumir um sinal de milhares de Volts.

O Primeiro estágio irá atuar como um atenuador de diferença, com uma relação de atenuação de $(1/5)V/V$ (Fig. 17), devido as amplitudes do sinal refletidas no divisor de tensão. Considerando a proporção de 0,32% da tensão original na entrada do diferenciador com a atenuação e os limites dados pela tensão de alimentação do AmpOp, é possível a leitura de um sinal original de até 2kV sem saturação na saída do conjunto.

A frequência de corte do passa baixas do segundo estágio será elevada pelo fato do surto ter um tempo de duração de 28us, sendo necessário a aquisição de uma quantidade considerável de amostras da onda de surto. A frequência de corte foi definida em torno de 500kHz, de acordo com o limite de amostragem do conversor A/D de 1Msps, mantendo a funcionalidade do filtro anti-aliasing.

4.1.2 Corrente

Também dividido entre leituras de corrente em regime permanente e em regime transitório, a corrente conduzida pelo DPS será monitorada por meio de sensores não invasivos de corrente, após a opção de utilização de um resistor “shunt” ser descartada por se mostrar inviável para atuar nos níveis de corrente do surto.

- Regime Permanente

Considerando a entrada de tensão vinda de um sensor não invasivo, e que esses tipos de sensores são estendido por fios e acoplados diretamente no condutor do componente que está sendo monitorado, foi adicionado um estágio de proteção extra com ferrites na entrada do circuito da Fig. (17), devido a preocupação com induções provenientes do surto pelo fio que irá acompanhar o sensor. Definindo como exemplo um sensor comum no mercado, como o modelo SCT-013 (YHDC, n.d.), o ganho do diferenciador será de 2V/V.

O estágio do filtro anti-aliasing seguirá a mesma justificativa da leitura de tensão em regime permanente, definindo o passa baixas em 1,5kHz com amostragem mínima de 3ksps.

- Transiente

A topologia nesse caso difere das utilizadas no projeto pelo fato da saída do sensor não invasivo utilizado ser a derivada da função de interesse, este sensor é chamado de Bobina de Rogowski.

Faz-se necessário a utilização de um estágio integrador com amplificador operacional para anular a derivada do sinal e ganho determinado pela amplitude de sinal da bobina. Devido ao integrador também possuir característica de inversor, um segundo estágio com um amplificador inversor de ganho unitário foi colocado para anular a inversão do sinal original.

Por último o estágio de filtro anti-aliasing seguindo o mesmo padrão de aquisição para tensão de transiente, com frequência de corte em 500kHz para aquisição mínima de 1Mbps.

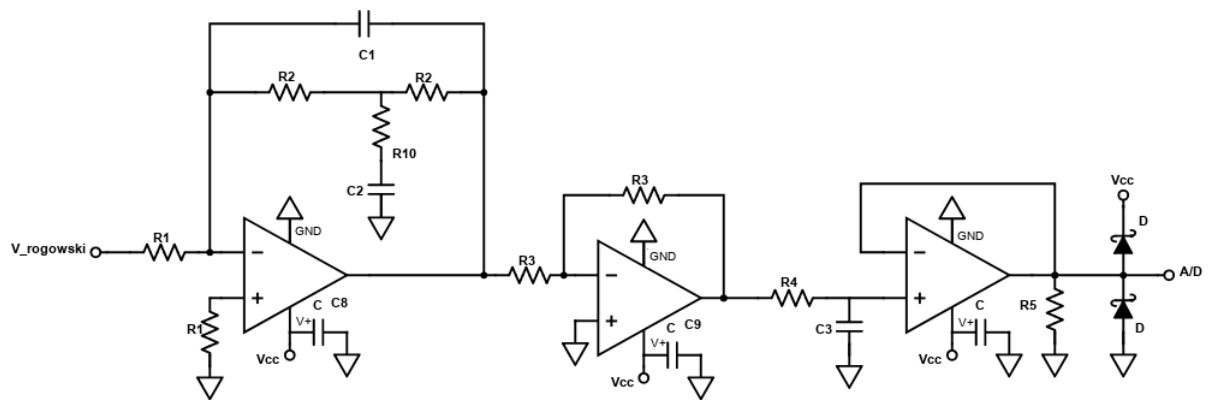


Figura 19 – Estágios para o circuito integrador.

4.1.3 Temperatura

Serão utilizados dois termistores do tipo NTC de $10k\Omega@25^{\circ}C$, ou seja, por definição possuem resistência de $10k\Omega$ na temperatura de $25^{\circ}C$ e diminuem sua resistência à medida em que sua temperatura aumenta. Serão efetuadas leituras da temperatura ambiente e da superfície do varistor presente no DPS.

Um divisor de tensão será combinado com o termistor para os dois casos, tomando como referência a tensão de alimentação de 3,3V. Os próximos estágios seguirão o padrão de amplificador de diferença da Fig. (17) com ganho unitário e filtro anti-aliasing com frequência de corte de 15Hz, sendo que o sistema não necessita de grandes taxas de amostragem, pois as transições de temperatura serão lentas.

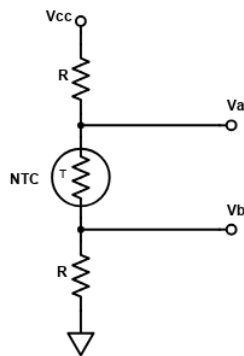


Figura 20 – Divisor de tensão com NTC.

4.1.4 Proteções

Nota-se que em todos os circuitos em “Anexo 1” existem componentes de proteção, como diodos, indutores do tipo ferrite e capacitores, medidas necessárias devido a exposição do circuito a campos eletromagnéticos de grandes descargas e ruídos de alta frequência que podem ocasionar mal funcionamento dos componentes ou até mesmo danificá-los.

- Diodos Schottky

Todas as saídas dos circuitos que são ligadas ao microcontrolador possuem um circuito ceifador de tensão, utilizando diodos do tipo Schottky com as referências de tensão de alimentação e GND (Fig. 17), que será a faixa de tensão admitida na trilha com o adicional da tensão de condução do diodo, qualquer tensão acima ou abaixo dos limites fará o diodo conduzir e regular a tensão da trilha.

- Ferrite Bead

Um par de ferrites será utilizado nas entradas externas do circuito por meio de conectores, como os circuitos de leitura de corrente e temperatura, com exceção da entrada da bobina de Rogowski.

O intuito da adição destes componentes é atenuar variações bruscas de sinal que podem ser induzidos pelos fios que saem do conector e que estarão próximos ao DPS. Ferrites comerciais aplicáveis ao projeto são de $880\Omega@100\text{kHz}$, ou seja, possuem uma curva de impedância que atinge 880Ω em frequências de 100kHz . Existem diversas faixas de impedância e frequência para esses tipos de componentes.

- Capacitores de Desacoplamento

Como boa prática, foi adicionado aos terminais de alimentação de todos os componentes ativos um capacitor de 100nF em paralelo, para efeito de desacoplamento da tensão de alimentação, esses capacitores podem ser observados nas vias de alimentação dos AmpOps da Fig. (17).

4.1.5 Modelo Real do Varistor de Óxido de Zinco

O componente a ser analisado possui algumas características do material de construção e componentes parasitas que devem ser considerados na simulação. O modelo de varistor de Óxido de Zinco em questão pode ser representado pelo seguinte circuito equivalente, onde os valores de cada componente dependem das dimensões físicas do varistor e dos materiais de construção do mesmo.

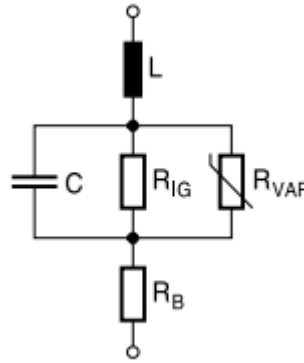


Figura 21 – Modelo real do varistor de Óxido de Zinco. Adaptado de (TDK, 2018).

R_{ig} : Resistência Intergranular da fronteira entre os grãos de Óxido de Zinco ($10^{13}\Omega\cdot\text{cm}$);

R_{var} : Varistor ideal;

R_b : Resistência de Bulk do Óxido de Zinco ($1\Omega\cdot\text{cm}$ até $10\Omega\cdot\text{cm}$);

C : Capacitância;

L : Indutância ($1\text{nH}/\text{mm}$);

(TDK, 2018)

Os valores desses parâmetros para simulação foram definidos de acordo com as dimensões de 4cm^2 do varistor presente no DPS utilizado.

4.2 Simulações e Resultados

Para obter uma melhor aproximação do cenário real, foram buscados os modelos SPICE dos componentes ativos utilizados disponíveis no site de cada fabricante e os mesmos foram adicionados à biblioteca. É uma prática comum fabricantes de circuitos integrados disponibilizarem o modelo SPICE equivalente do produto.

4.2.1 Estímulos de Entrada

Para simular as possíveis situações em que o circuito estará exposto, foram definidos dois tipos de entradas que foram ligadas em paralelo ao modelo equivalente do

varistor.

Regime Permanente: Fonte de tensão com amplitude de 311V (220Vrms equivalente) e frequência de 60Hz, simulando a rede elétrica convencional de baixa tensão.

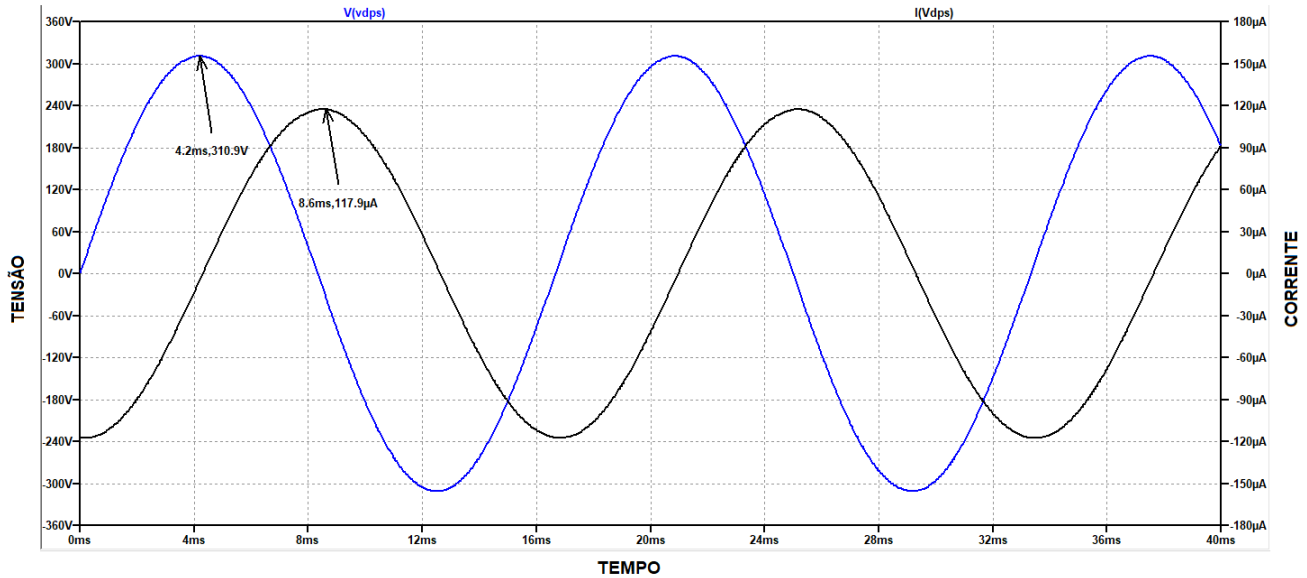


Figura 22 – Tensão e corrente em regime permanente no DPS.

Em regime permanente, o DPS possui pico de corrente de 117,9µA e o sinal de corrente possui atraso de 4,4ms em relação a tensão.

Transiente: Fonte de corrente com onda de tempo de subida de 8µs e decaimento de 20µs, atingindo a amplitude de 20kA, reproduzindo um surto do tipo 8/20µs.

O DPS simulado irá possuir a característica de varistor ideal definida para 0,1Ω quando a tensão ultrapassa um valor definido de 500V.

Como podemos observar na Fig. (23), um surto genérico de entrada com atraso de início de 1µs, do tipo 8/20µs e pico de 20kA gera uma tensão de pico de 1,28kV nos terminais do varistor, ao final do decaimento do surto, uma tensão de cerca de 250V se mantém no circuito por um certo tempo devido as capacitâncias envolvidas.

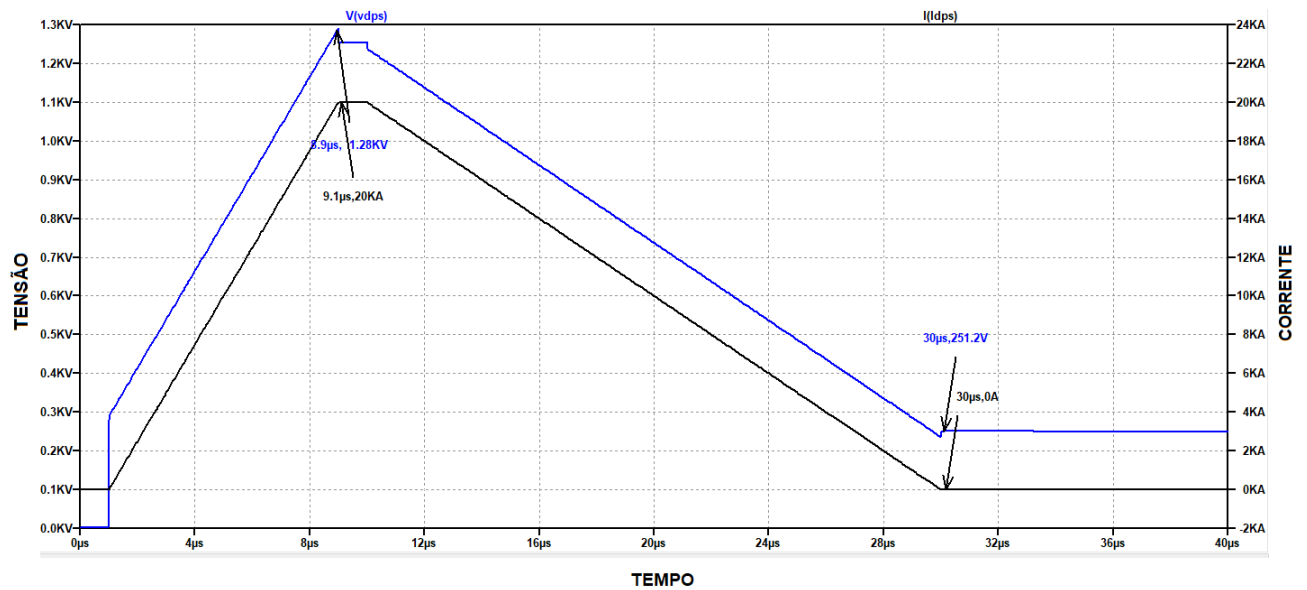


Figura 23 – Tensão e corrente de surto no DPS.

4.2.2 Tensão

As saídas do circuito condicionador para leitura de tensão apresentam resultados esperados, refletindo a forma de onda tanto em regime permanente quanto em transiente com tensão reduzida, possibilitando a leitura do conversor A/D.

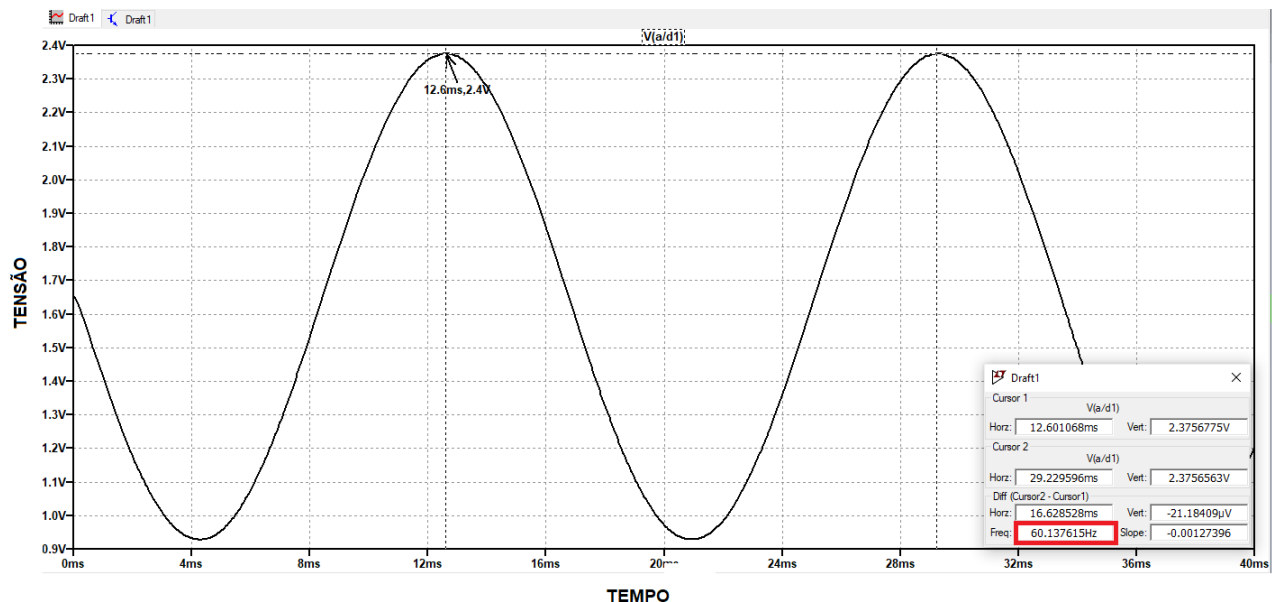


Figura 24 – Saída do circuito para leitura de tensão em regime permanente.

A Fig. (24) reflete a onda senoidal de 60Hz da rede elétrica, o pico máximo de 2,4V (equivalente aos 311Vp) permite uma margem para leitura de pequenos transientes que não serão bem conduzidos pelo DPS, pois os valores de tensão permitidos na entrada

do A/D são de até 3,3V.

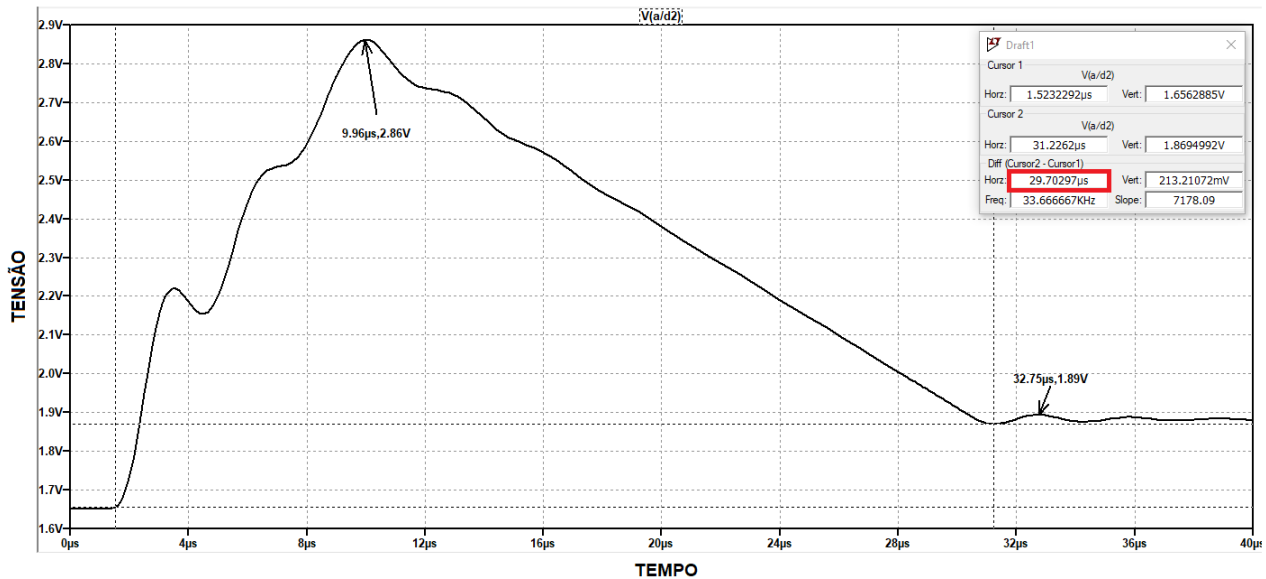


Figura 25 – Saída do circuito para leitura de tensão transiente.

Apesar de possuir algumas distorções, é possível identificar o formato do surto do tipo 8/20µs mostrado na Fig. (25), semelhante ao transiente da Fig. (23). O pico de tensão na entrada do A/D é de 2,86V (equivalente ao pico de 1,28kV transiente) permitindo a leitura de transientes de maior tensão. Também é possível a leitura de transientes com polaridade invertida, devido ao offset aplicado no circuito.

A saída do circuito também apresenta uma tensão residual ao final da onda, como no surto original.

4.2.3 Corrente

Para as simulações em questão, foram assumidos alguns parâmetros de componentes não evasivos, com o intuito de reproduzir um sensor de corrente que não está ligado diretamente ao circuito condicionador.

- Para a leitura de corrente em regime permanente, foi adotada uma fonte de tensão controlada pela corrente conduzida pelo modelo do varistor.
- Para leitura de corrente transiente, também foi adotada uma fonte de tensão controlada por corrente, porém com um estágio adicional com um circuito derivador realizado com ampop, simulando o efeito da bobina de Rogowski para possibilitar a validação do projeto de circuito integrador presente no condicionamento específico desse regime transiente.

A saída do circuito condicionador de corrente para regime permanente apresentou um bom reflexo da corrente conduzida na ordem de μA pelo varistor.

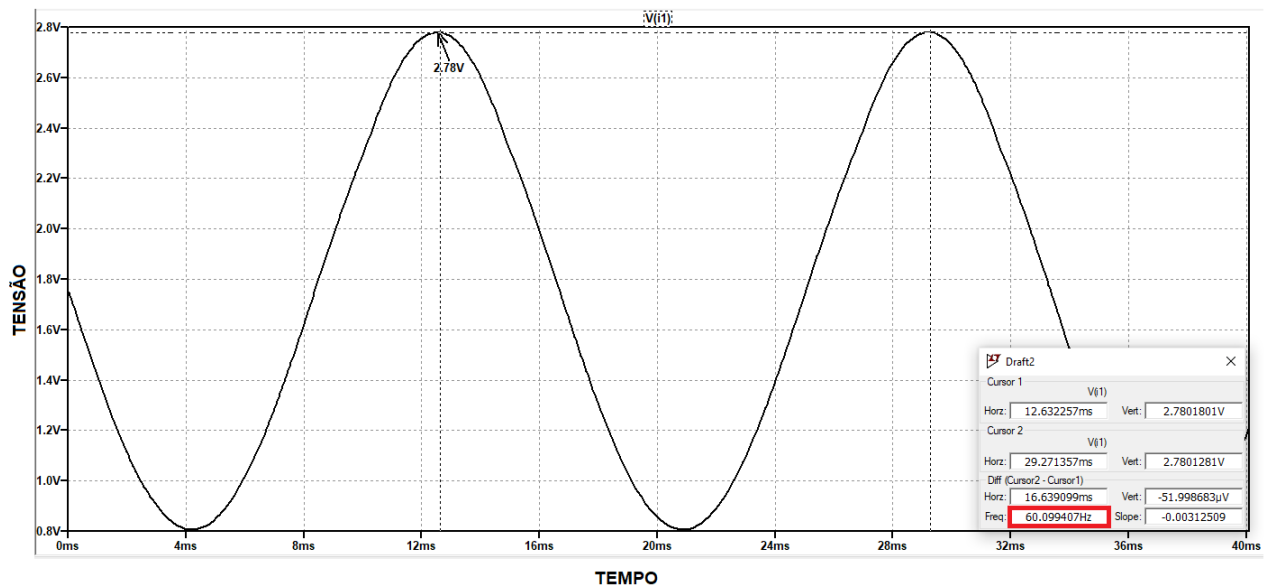


Figura 26 – Saída do circuito para leitura de corrente em regime permanente.

As simulações para corrente transiente dependem de revisão no circuito da Fig. (19). Não foi possível ainda determinar os parâmetros necessários para simulação da bobina de Rogowski para consequentemente obter o comportamento esperado do circuito integrador.

4.2.4 Temperatura

Os circuitos para leitura de temperatura no DPS e temperatura ambiente possuem exatamente a mesma topologia, diferencia-se apenas a localização do sensor NTC na aplicação.

A validação do circuito foi realizada assumindo o NTC como um potenciômetro, a medida que a resistência aumenta ou diminui, podemos observar uma variação na tensão de saída dos circuitos condicionadores.

A tensão de 2,5V representa o varistor na condição de temperatura ambiente de 25°C com resistência de 10kΩ, esse será o valor de referência para interpretação dos sinais.

A tensão de 1,06V representa a saída quando o varistor apresenta resistência de 1k Ω . De acordo com uma das curvas apresentadas na Fig. (6), essa resistência seria equivalente a uma temperatura de 90°C no NTC.

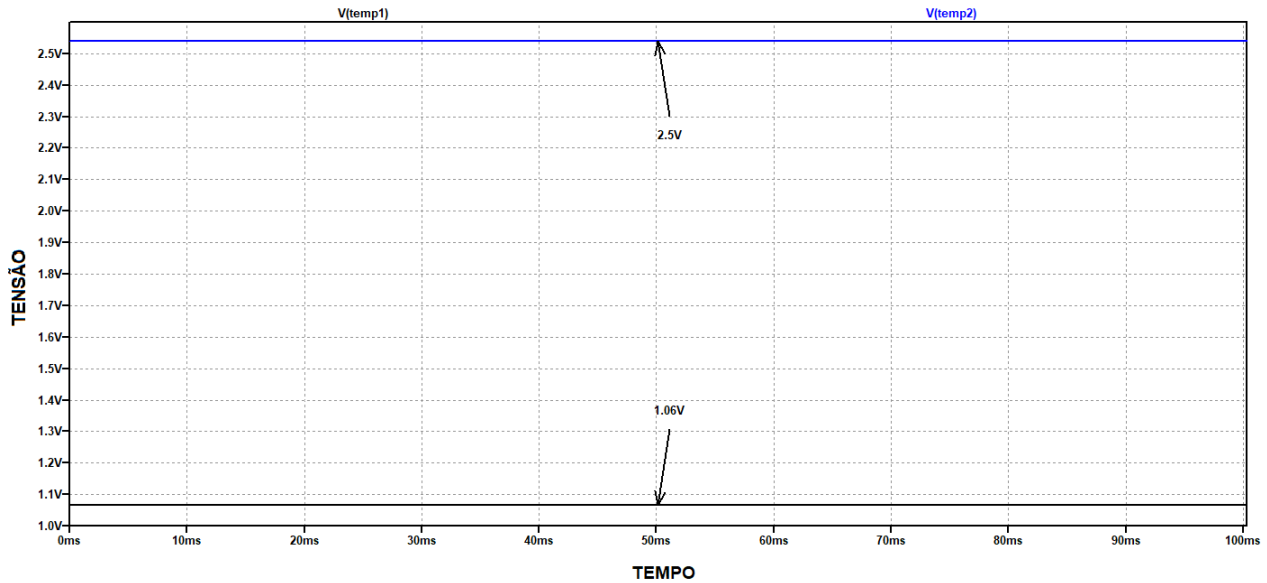


Figura 27 – Saídas dos circuitos para leitura de temperatura da superfície do DPS e ambiente.

4.2.5 Resposta em frequência

Devido a presença dos filtros anti-aliasing, sua função também foi validada por meio de simulação no domínio da frequência. Foram analisados os filtros mais críticos do projeto, com frequência de corte teórica de 500kHz.

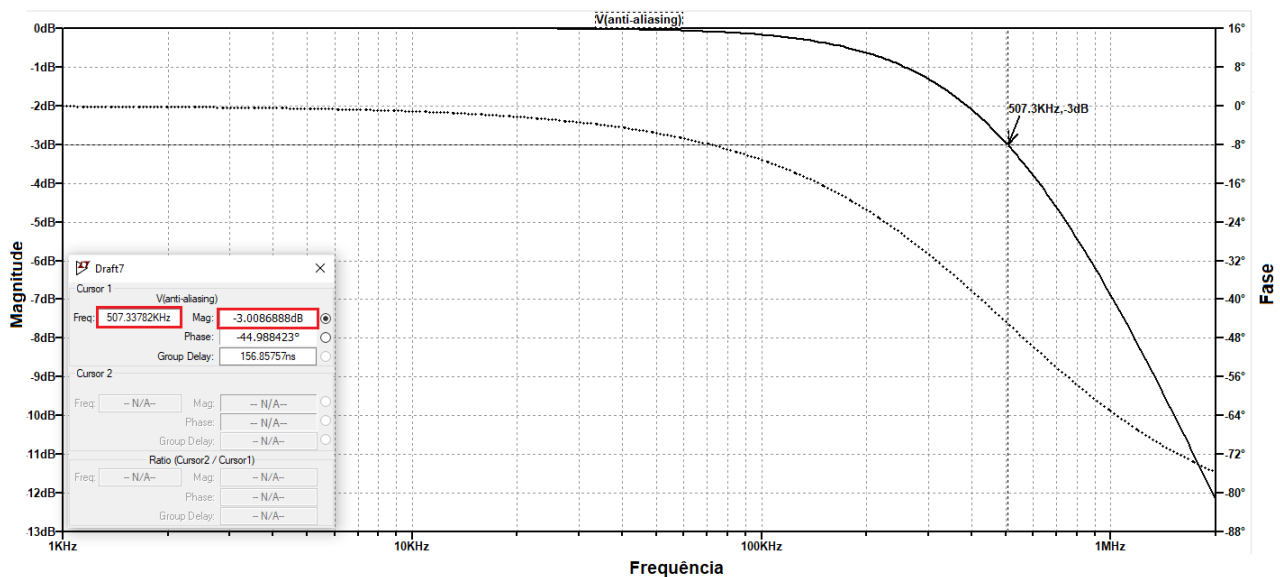


Figura 28 – Resposta em frequência do filtro anti-aliasing.

Ao analisar a resposta em frequência da Fig. (28), podemos observar uma atenuação de -3dB no sinal próximo a frequência projetada para o filtro, validando sua frequência de corte em aproximadamente 507kHz.

5 Considerações Finais

O trabalho realizado teve como fim analisar a fundo as topologias utilizadas em seus sistemas, utilizando embasamento teórico e considerando necessidades do projeto. Houve a validação dessas topologias por meio de simulações computacionais, o que permite prosseguir para as próximas etapas do projeto, visando a finalização de um produto funcional e de baixo custo que possibilite a obtenção de dados para auxiliar em um dos objetivos: a estimativa de vida útil e deterioração do varistor de Óxido de Zinco presente no DPS.

5.1 Cronograma

O cronograma de atividades para seguimento do projeto será dividido entre blocos de tarefas que deverão ser realizadas de acordo com as semanas de cada mês indicado na Tabela (1).

As tarefas serão divididas da seguinte maneira:

- a) Pendências do projeto;
- b) Solução para aquisição de onda do tipo 8/20us via A/D;
- c) Verificar necessidade de alterações nos circuitos e mensurar impactos provocados pelas mudanças;
- d) Design de PCB multicamada no software Altium Designer;
- e) Produção e testes;
- f) Documentação;

Tabela 1 – Cronograma de atividades

Semanas	Meses							
	dez	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul
1	-	-	a b	c	d	e	e f	f
2	-	-	b	c	d	e	e f	-
3	a b	-	b	d	e	e	f	-
4	a b	a b	b	d	e	e	f	-

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5410: Instalações elétricas de baixa tensão*. [S.l.], 2004. Citado na página 20.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5419: Proteção contra descargas atmosféricas*. [S.l.], 2015. Citado na página 20.

BALBINOT, A.; BRUSAMARELLO, V. J. Instrumentação e fundamentos de medidas. In: *Instrumentação e Fundamentos de Medidas*. [S.l.: s.n.], 2019. v. 3, p. s.n. Citado na página 31.

CLAMPER. *Proteção de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos Contra Surtos Elétricos em Instalações*. Lagoa Santa - MG, Brasil, 2016. 258 p. Citado 4 vezes nas páginas 9, 19, 23 e 25.

DKSK. Terminology and basics characteristics of ntc termistor. n.d. Disponível em: <http://www.dk-sensor.com/?module=Html&action=SiteComp_Eng&SubNo=9>. Citado na página 32.

ELETRONICSNOTES. Indutores de esferas de ferrite. n.d. Disponível em: <https://www.electronics-notes.com/articles/electronic_components/inductors-transformers/ferrite-bead-chokes.php>. Citado na página 34.

GOVEIA, S. C. M. Transdutor de corrente do tipo bobina de rogowski. 2013. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/96217>>. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 32.

INCOMPLIANCE. All ferrite beads are not created equal. 2010. Disponível em: <<https://incompliancemag.com/article/all-ferrite-beads-are-not-created-equal-understanding-the-importance-of-ferrite-bead-material-behavior/>>. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 34.

INPE/ELAT. Animais. s.d. Disponível em: <<http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/infor/relampagos.e.efeitos/animais.php>>. Citado na página 19.

INPE/ELAT. Corrente elétrica do raio. s.d. Disponível em: <<http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/relamp/relampagos/caracteristicas.da.corrente.eletrica.php>>. Citado na página 19.

INPE/ELAT. Você sabia? s.d. Disponível em: <<http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/el.atm/perguntas.e.respostas.php>>. Citado na página 19.

INSTRUMENTS, N. Input protection. 2018. Disponível em: <http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/370520P-01/hsdio/hinput_protection_6545/>. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 34.

LEPKOWSKI, J. Evaluating tvs protection circuits with spice. 2012. Disponível em: <<https://web.archive.org/web/20120503135901/http://powerelectronics.com/mag/601PET24.pdf>>. Citado na página 24.

- MURATA. *NTC Thermistors*. [S.l.], 2018. Disponível em: <<https://www.murata.com/~media/webrenewal/support/library/catalog/products/thermistor/ntc/r44e.ashx>>. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 33.
- NAGEL, L. W.; PEDERSON, D. Spice (simulation program with integrated circuit emphasis). In: . [S.l.: s.n.], 1973. p. n.d. Citado na página 35.
- SADIKU, M. N. O. Elementos de eletromagnetismo. In: *Elementos de Eletromagnetismo*. [S.l.: s.n.], 2004. v. 3. Citado na página 24.
- SEDRA, A. S.; SMITH, K. C. Microeletronic circuits. In: *Microeletronic Circuits*. [S.l.: s.n.], 2015. v. 7, p. 1489. Citado 6 vezes nas páginas 9, 26, 27, 29, 30 e 34.
- TDK. *SIOV metal oxide varistors*: General technical information. [S.l.], 2018. Citado 4 vezes nas páginas 9, 23, 24 e 49.
- TEXAS INSTRUMENTS. *TLV900x Low-Power, RRIO, 1-MHz Operational Amplifier for Cost-Sensitive Systems*. [S.l.], 2019. Citado na página 43.
- YHDC. *Split core current transformer*: Sct-013. [S.l.], n.d. Disponível em: <https://www.mcielectronics.cl/website_MCI/static/documents/Datasheet_SCT013.pdf>. Citado na página 46.

Anexos

ANEXO A – Primeiro Anexo

Circuitos utilizados para simulação no software LTSPICE.

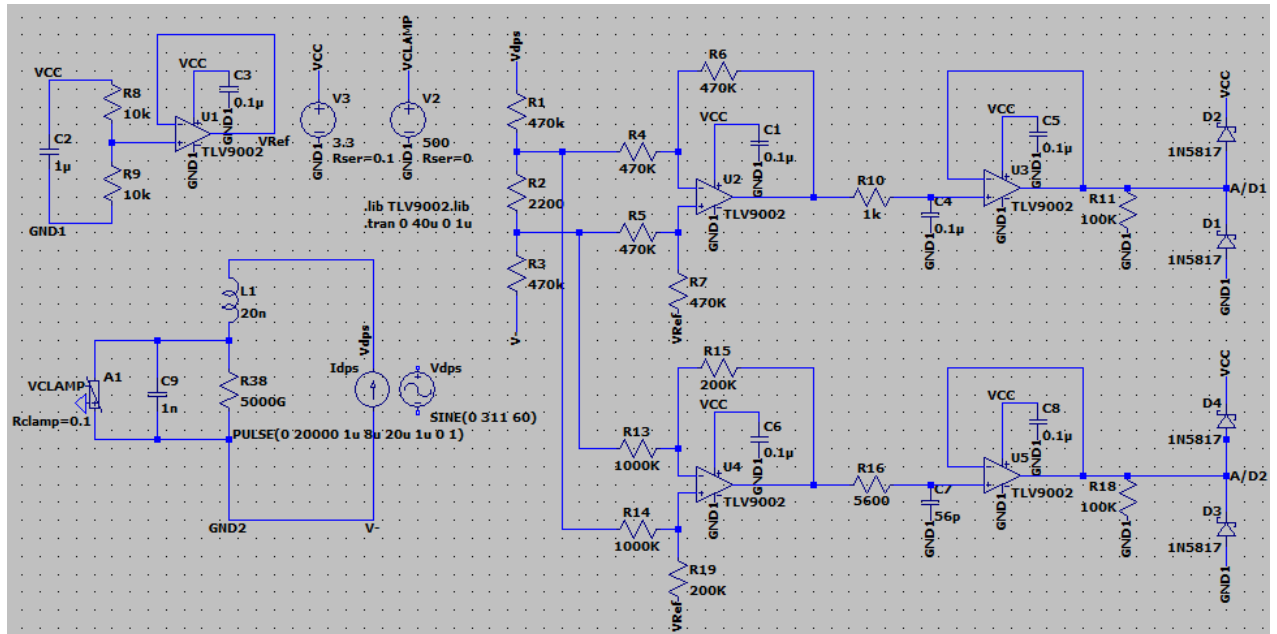


Figura 29 – Simulação de circuitos de leitura de tensões.

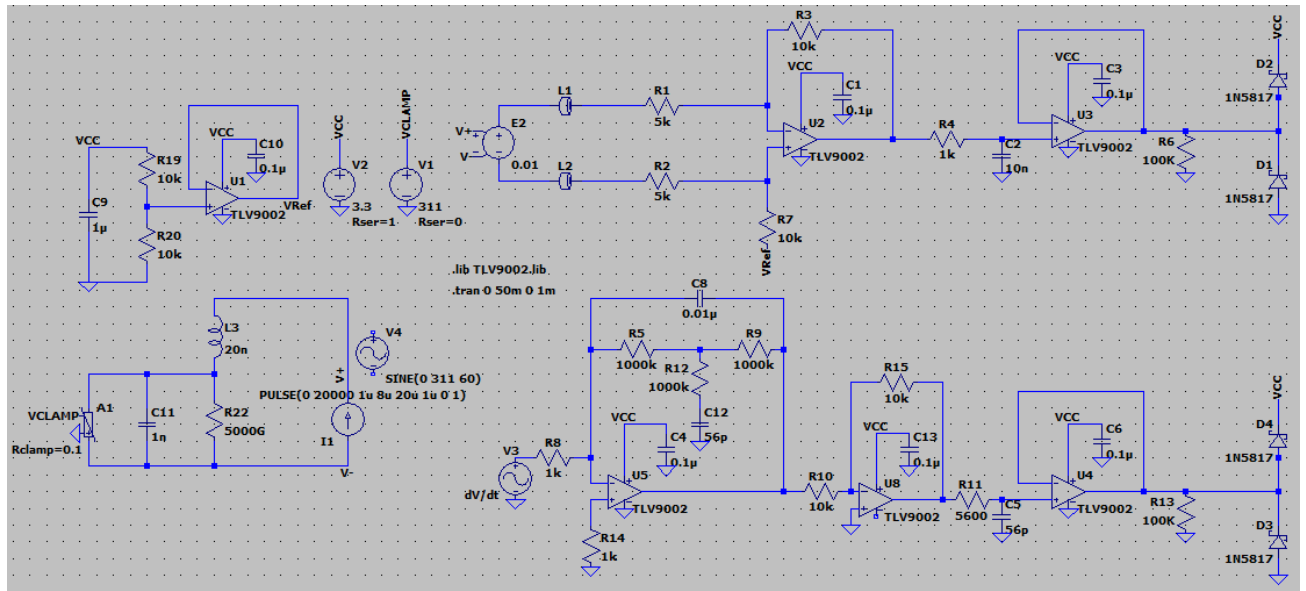


Figura 30 – Simulação de circuitos de leitura de correntes.

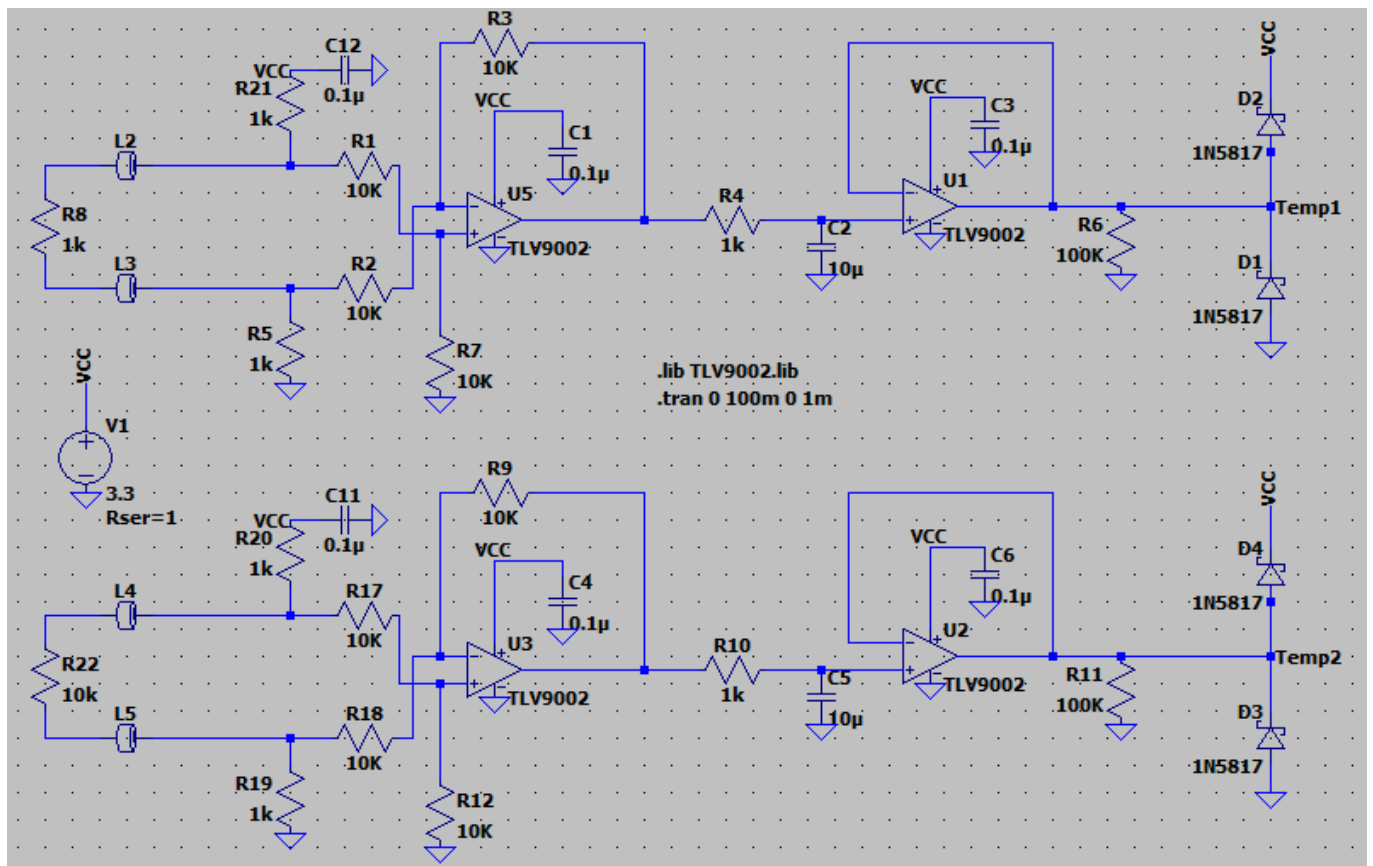


Figura 31 – Simulação de circuitos de leitura de temperaturas.