

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Manoela Bremm

**DESENVOLVIMENTO DE UM CIRCUITO PARA MONITORAMENTO
DA RESISTÊNCIA DE ISOLAMENTO DE UMA ESTAÇÃO DE
RECARGA RÁPIDA PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS**

Santa Maria, RS
2023

Manoela Bremm

**DESENVOLVIMENTO DE UM CIRCUITO PARA MONITORAMENTO DA
RESISTÊNCIA DE ISOLAMENTO DE UMA ESTAÇÃO DE RECARGA RÁPIDA
PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Eletrônica de Potência, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Bacharel em Engenharia Elétrica**. Defesa realizada por videoconferência.

Orientador: Prof. Cassiano Rech

Santa Maria, RS
2023

Manoela Bremm

**DESENVOLVIMENTO DE UM CIRCUITO PARA MONITORAMENTO DA
RESISTÊNCIA DE ISOLAMENTO DE UMA ESTAÇÃO DE RECARGA RÁPIDA
PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Eletrônica de Potência, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Bacharel em Engenharia Elétrica**.

Aprovado em 4 de agosto de 2023:

**Cassiano Rech, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)**

Lucas Vizzotto Bellinaso, Dr. (UFSM) (videoconferência)

Jonas Menon da Rosa, Eng. (UFSM) (videoconferência)

Santa Maria, RS
2023

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha mãe Simone, que é a pessoa para quem eu ligo em dias difíceis, por toda ajuda, lições e suporte emocional dados ao longo destes anos. Ao meu pai, por todo o trabalho adicional para conseguir fornecer suporte financeiro para a realização do meu ensino médio e graduação longe de casa. Aos meus irmãos, Mariele e Leandro, que são os meus melhores amigos e companheiros de vida.

Às amigas que fiz durante a faculdade, em especial à Thais Schmidt, que tornaram esta caminhada mais leve e estão presentes em minhas melhores memórias. À minha prima e amiga Larissa Werle, que foi meu ombro amigo principalmente na reta final do curso.

Ao meu orientador, Cassiano Rech, pelos quatro anos de orientação na Iniciação Científica e pela disponibilidade e auxílio na elaboração deste trabalho. Aos colegas de laboratório, pela amizade e troca de conhecimento, especialmente ao Jonas Menon da Rosa, que forneceu grande auxílio ao longo de toda a elaboração deste trabalho.

RESUMO

DESENVOLVIMENTO DE UM CIRCUITO PARA MONITORAMENTO DA RESISTÊNCIA DE ISOLAMENTO DE UMA ESTAÇÃO DE RECARGA RÁPIDA PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS

AUTOR: Manoela Bremm
Orientador: Cassiano Rech

Em uma estação de recarga rápida é obrigatório, por norma, o monitoramento das resistências de isolamento, evitando que recargas sejam realizadas quando há perigo de choque elétrico para quem estiver a manuseando. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um circuito que realiza a medição da resistência de isolamento de uma estação de até 1000 V e informa ao sistema de controle e supervisão da estação se o valor da resistência está adequado para o carregamento. Este circuito emite um aviso em dois valores de resistência que dependem da tensão máxima de saída da estação, seguindo as exigências das normas que abrangem o tema. Este trabalho apresenta uma síntese das normas estudadas e dos modelos comerciais destes circuitos, que são conhecidos por Dispositivos Supervisores de Isolamento (DSI). Ainda, é demonstrado o passo a passo da elaboração do circuito e sua análise no software de simulação PowerSIM. Por fim, é apresentado o projeto das placas de circuito impresso deste circuito e a sua implementação prática, além dos testes necessários para a validação, que mostram que o circuito é eficaz e uma solução extremamente barata quando comparada aos modelos presentes no mercado.

Palavras-chave: Dispositivo supervisor de isolamento. Estação de recarga rápida para veículos elétricos. Resistência de isolamento.

ABSTRACT

DEVELOPMENT OF A CIRCUIT FOR MONITORING THE INSULATION RESISTANCE OF A FAST CHARGING STATION FOR ELECTRIC VEHICLES

AUTHOR: Manoela Bremm

ADVISOR: Cassiano Rech

In a fast charging station, it is mandatory, by technical standards, the monitoring of insulation resistances, preventing recharges from being carried out when there is danger of electric shock for consumers. This paper presents the development of a circuit that measures the insulation resistance of a fast charging station up to 1000 V and informs the control and supervision system of the charging station if the resistance value is suitable for charging. This circuit issues a warning in two resistance values which depend on the maximum output voltage of the station, following the requirements of the standards covering this subject. This paper presents a synthesis of the standards studied and the commercial models of these circuits, which are known as Insulation Monitoring Device (DSI). Also, a step-by-step circuit design and analysis in the PowerSIM simulation software is demonstrated. Finally, the design of the printed circuit boards of this circuit and its practical implementation are presented, in addition to the necessary tests for validation, which show that the circuit is effective and an extremely cheap solution when compared to models presents on the market.

Keywords: Fast charging station for electric vehicles. Insulation Monitoring Device. Insulation resistance.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Frota mundial de veículos elétricos.	13
FIGURA 2 – Frota brasileira de veículos elétricos.	13
FIGURA 3 – Esquema sistema de recarga.	14
FIGURA 4 – Conexões do DSI.	15
FIGURA 5 – Autoteste DSI.	19
FIGURA 6 – Diretrizes das normativas.	21
FIGURA 7 – Circuito monitor de isolamento KR101303597B1.	22
FIGURA 8 – Circuito monitor de isolamento EP2413148B1.	23
FIGURA 9 – Relé de monitoramento de isolamento CM-IWM.10 da empresa ABB. .	24
FIGURA 10 – DSI RN 5897/020 da empresa DOLD.	25
FIGURA 11 – ISO685 da empresa BENDER.	25
FIGURA 12 – ISOEV425 da empresa BENDER.	26
FIGURA 13 – Conexões entre conversor e resistências de aterramento.	28
FIGURA 14 – Circuito base de medição.	28
FIGURA 15 – Topologia oscilador de relaxação.	29
FIGURA 16 – Circuito analógico que gera o PWM.	30
FIGURA 17 – Filtro passa-altas e offset.	32
FIGURA 19 – Circuito do isolador óptico.	32
FIGURA 18 – Circuito para comparação.	33
FIGURA 20 – Circuito completo.	34
FIGURA 21 – Sinal PWM.	34
FIGURA 22 – Sinal VRs.	35
FIGURA 23 – Sinal VRs com resistências desequilibradas.	35
FIGURA 24 – Sinal de saída do amplificador com offset de 2,5 V.	36
FIGURA 25 – Tensões de calibração.	36
FIGURA 26 – Sinais de saída.	37
FIGURA 27 – Saída final do circuito de monitoramento.	37
FIGURA 28 – Saída de 100 inválida para $R = 101 \text{ k}\Omega$	38
FIGURA 29 – Saída de 100 válida para $R = 101,5 \text{ k}\Omega$	38
FIGURA 30 – Saída de 300 inválida para $R = 299,5 \text{ k}\Omega$	39
FIGURA 31 – Saída de 300 válida para $R = 299,75 \text{ k}\Omega$	39
FIGURA 32 – Vista superior do projeto da PCI.	40
FIGURA 33 – Vista inferior do projeto da PCI.	41
FIGURA 34 – PCI implementada em laboratório.	41
FIGURA 35 – Resultados válido e inválido, respectivamente.	42
FIGURA 36 – Teste número 1 para saída de $100 \text{ k}\Omega$	43

FIGURA 37 – Teste número 2 para saída de 100 k Ω	44
FIGURA 38 – Teste número 1 para saída de 300 k Ω	44
FIGURA 39 – Teste número 2 para saída de 300 k Ω	45

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Estimativa de custos dos componentes do DSI.	46
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>ABNT</i>	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<i>ANFAVEA</i>	Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores
<i>CA</i>	Corrente Alternada
<i>CC</i>	Corrente Contínua
<i>DSI</i>	Dispositivo Supervisor de Isolamento
<i>GEPOC</i>	Grupo de Eletrônica de Potência e Controle
<i>IEC</i>	<i>International Electrotechnical Commission</i>
<i>INRI</i>	Instituto de Redes Inteligentes
<i>LIW</i>	<i>Local Insulation Warning</i>
<i>NBR</i>	Norma Brasileira
<i>VE</i>	Veículo elétrico
<i>PCI</i>	Placa de Circuito Impresso
<i>PE</i>	Condutor de Proteção
<i>PWM</i>	<i>Pulse Width Modulation</i>
<i>RIW</i>	<i>Remote Insulation Warning</i>
<i>SMD</i>	<i>Surface Mounted Device</i>
<i>UFSM</i>	Universidade Federal de Santa Maria

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Ampère
B	Razão cíclica do PWM
F	Farad
Hz	Hertz
Ω	Ohm
R_{PG}	Resistência entre o polo positivo e o terra
R_{NG}	Resistência entre o polo negativo e o terra
U	Tensão nominal
V	Volts
V_{CC}	Tensão contínua

SUMÁRIO

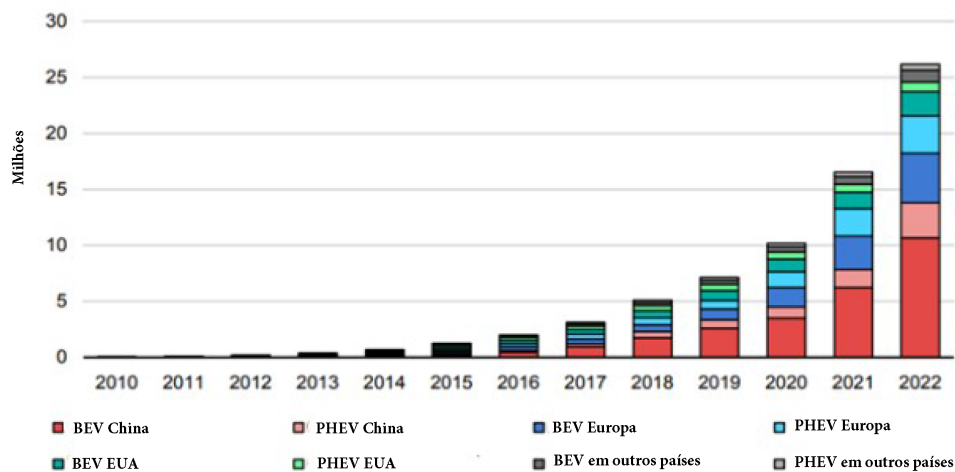
1	INTRODUÇÃO	13
1.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	13
1.2	OBJETIVOS	16
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	NORMAS VIGENTES	17
2.1.1	ABNT NBR 5410 - Instalações elétricas de baixa tensão	17
2.1.2	ABNT NBR 17019 - Instalações elétricas de baixa tensão - Requisitos para instalação em locais especiais - Alimentação de veículos elétricos	17
2.1.3	NBRIEC61851-23 - Sistema de recarga condutiva para veículos elétricos - Parte 23: Estação de recarga em corrente contínua para veículos elétricos	18
2.1.4	IEC 61557-8 - <i>Electrical safety in low voltage distribution systems up to 1 000 V a.c. and 1 500 V d.c. - Equipment for testing, measuring or monitoring of protective measures - Part 8: Insulation monitoring devices for IT systems</i>	19
2.1.5	Compilado das normas abrangentes	20
2.2	BUSCA DE PATENTES	21
2.3	MODELOS COMERCIAIS	23
3	CIRCUITO DE MONITORAMENTO	27
3.1	PROJETO DO CIRCUITO	27
3.1.1	Circuito de medição	27
3.1.2	Circuito gerador do PWM	29
3.1.3	Filtro passa-altas e offset	31
3.1.4	Circuito de comparação	31
3.1.5	Isolador óptico	32
3.2	CIRCUITO COMPLETO	33
3.3	SIMULAÇÕES	33
4	IMPLEMENTAÇÃO PRÁTICA	40
4.1	CONCEPÇÃO DAS PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO	40
4.2	TESTES EXPERIMENTAIS	42
4.2.1	Teste dos limites da saída de 100 kΩ	43
4.2.2	Teste dos limites da saída de 300 kΩ	44
4.3	ESTIMATIVA DE PREÇO DO DSI PRODUZIDO	45
5	CONCLUSÃO	47
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

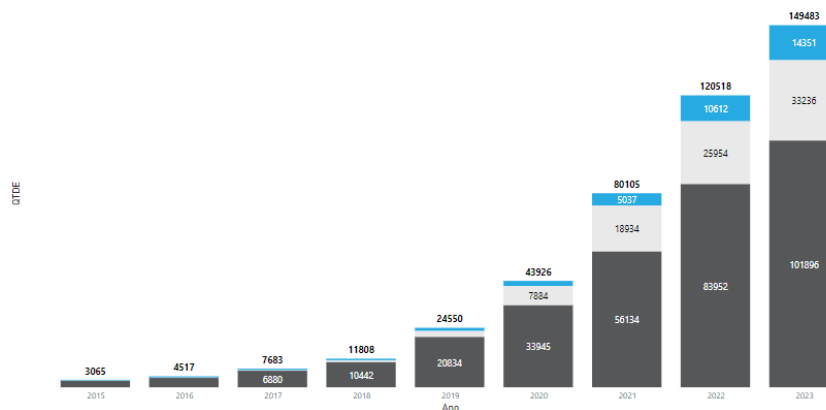
Ao longo da última década, observou-se um notável crescimento exponencial na frota global de veículos elétricos, conforme ilustrado na Figura 1. No ano de 2010, o número de veículos elétricos presentes na frota mundial era de 17 mil. No entanto, em 2023, esse número superou a marca de 25 milhões (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2023). No Brasil, embora a proporção de veículos elétricos ainda seja relativamente baixa, o crescimento acompanha a curva mundial, conforme mostrado na Figura 2.

Figura 1 – Frota mundial de veículos elétricos.



Fonte: Adaptado de INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (2023)

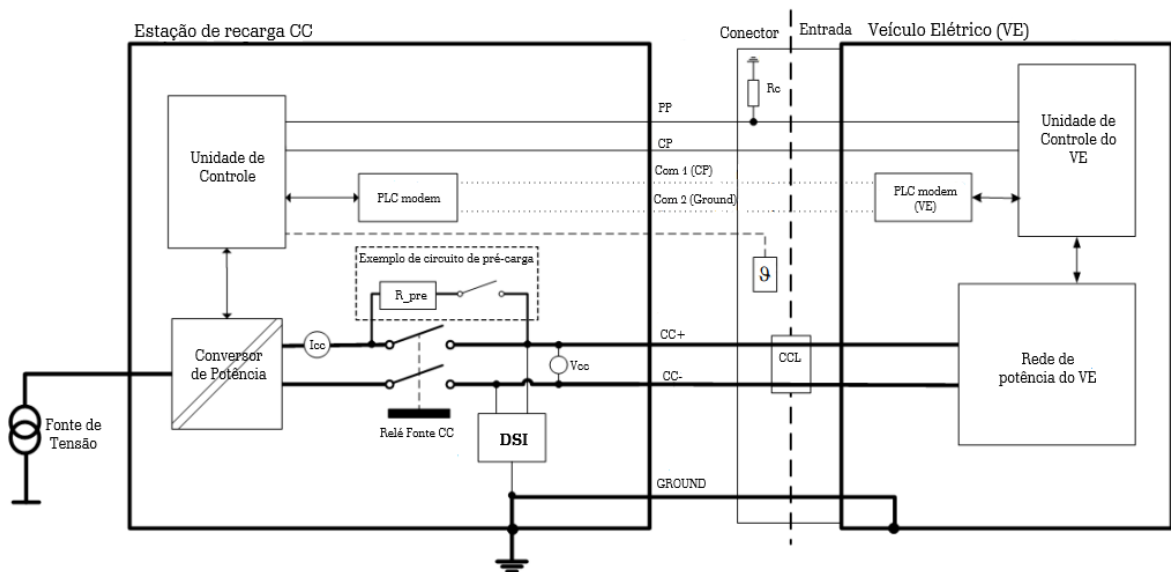
Figura 2 – Frota brasileira de veículos elétricos.



Fonte: Adaptado de NeoCharge (2023)

Com o rápido crescimento do número de veículos elétricos na frota, também se faz necessária uma infraestrutura de recarga eficiente e segura para estes veículos. Por isso, estão sendo realizadas várias pesquisas no tema, principalmente no que tange o aumento da quantidade das estações e também a rapidez com que a recarga é realizada. Na Figura 3, é demonstrada a estrutura do sistema de recarga completo.

Figura 3 – Esquema sistema de recarga.

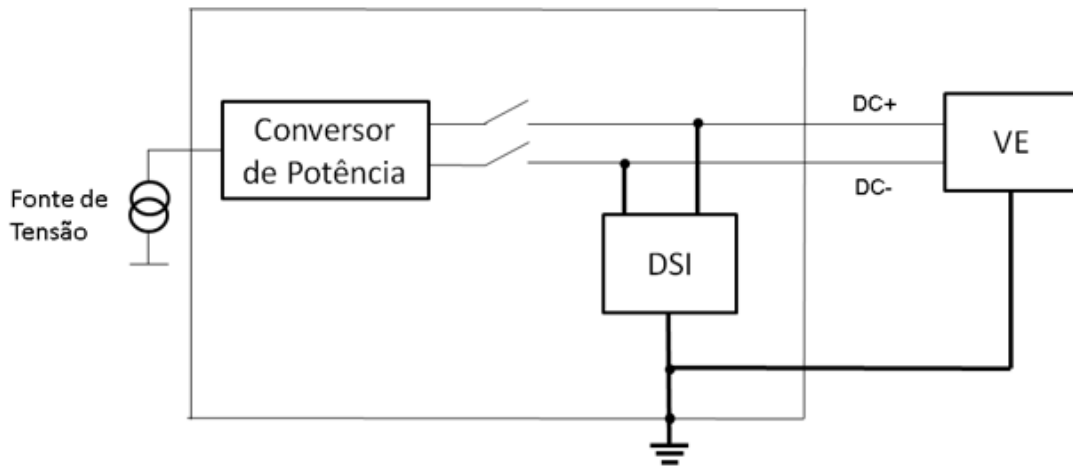


Fonte: Adaptado de ABNT (2020).

Na figura, é perceptível que a estação de recarga recebe uma tensão CA, que geralmente é a própria rede elétrica de energia. O conversor de potência transforma esta tensão CA em uma tensão CC. A unidade de controle é responsável por coordenar o conversor e realizar a comunicação com o veículo elétrico. Entre o conversor de potência e o veículo, encontra-se o Dispositivo Supervisor de Isolamento.

Toda estação de recarga precisa possuir o monitoramento das resistências de isolamento para garantir a segurança dos usuários da estação, uma vez que uma fuga de corrente pode causar um choque elétrico no usuário da estação. Estes dispositivos que realizam este monitoramento são conhecidos por DSI ou IMD, que significam dispositivo supervisor de isolação em português e inglês, respectivamente. O DSI é responsável por monitorar as resistências de isolamento entre os polos CC+ e CC- e o terra. A resistência de isolamento equivalente é o paralelo das duas. Na Figura 4 é possível visualizar as conexões do dispositivo no circuito de forma resumida.

Figura 4 – Conexões do DSI.



Fonte: Autora, 2023.

O DSI envia um sinal ao controle informando se o valor está acima ou abaixo dos limites seguros definidos por norma e, caso o valor não permita a recarga, a unidade de controle envia um sinal que abre os interruptores e a recarga é interrompida.

Além das estações de recarga, estes dispositivos costumam ser utilizados em máquinas e geradores, fontes de alimentação de emergência, navios, aplicações ferroviárias, inversores fotovoltaicos, entre outros. Este monitor de isolamento deve garantir a segurança das pessoas e dos equipamentos contra perigos causados pela corrente elétrica, melhorar a continuidade operacional e contribuir para a eficiência do sistema elétrico, tendo uma resposta rápida às condições operacionais críticas em instalações elétricas e reduzindo custos e despesas de manutenção devido à falhas (BENDER, 2004).

O circuito para monitoramento deve estar em conformidade com as normas que englobam este assunto. As principais normas utilizadas para este estudo foram:

1. NBRIEC61851-23; Sistema de recarga condutiva para veículos elétricos - Parte 23: Estação de recarga em corrente contínua para veículos elétricos.
2. IEC 61557-8; *Electrical safety in low voltage distribution systems up to 1 000 V a.c. and 1 500 V d.c. - Equipment for testing, measuring or monitoring of protective measures - Part 8: Insulation monitoring devices for IT systems.*
3. ABNT NBR 17019; Instalações elétricas de baixa tensão - Requisitos para instalações em locais especiais - Alimentação de veículos elétricos.

No capítulo 2, são abordadas as especificações estabelecidas por estas normas.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é realizar o projeto e a implementação prática do circuito para monitoração das resistências de isolamento de uma estação de recarga rápida com tensão de saída de até 1000V.

O circuito deve medir as resistências de isolamento, que são as resistências entre o polo CC positivo e o terra e entre o polo CC negativo e o terra, e verificar se estas resistências estão acima ou abaixo dos limites definidos pelas normas técnicas. A resposta do DSI é um sinal digital em tensão, que pode assumir o nível lógico alto ou baixo e este é enviado à unidade de controle da estação de recarga que irá ou não interromper a recarga.

Após análises teóricas realizadas por meio de simulação no software PSIM, este circuito foi implementado em uma placa de circuito impresso e então foram realizados os testes pertinentes.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho é dividido em 5 capítulos. Este primeiro capítulo apresenta a introdução geral ao tema de estação de recarga e circuito para monitoração de isolamento, além dos objetivos deste trabalho.

No segundo capítulo, é apresentada uma revisão bibliográfica. Nesta são apresentadas as normas vigentes que abordam o tema e alguns modelos de monitores de isolamento já presentes no mercado.

No terceiro capítulo, é demonstrado o projeto do circuito para monitoramento das resistências de isolamento, sua análise no software PSIM e as simulações realizadas no programa.

No quarto capítulo, é mostrada a implementação prática do circuito e os testes experimentais realizados com o mesmo. Por fim, no quinto capítulo, são demonstradas as conclusões obtidas na elaboração deste trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No presente capítulo, são discutidas as regulamentações em vigor relacionadas ao tema em questão, bem como alguns dos diferentes modelos comerciais de DSI encontrados no mercado.

2.1 NORMAS VIGENTES

Neste tópico são abordados os trechos das normas que abrangem o tema de supervisionamento de resistências de isolamento.

2.1.1 ABNT NBR 5410 - Instalações elétricas de baixa tensão

A NBR 5410 (ABNT, 2004) define que, em esquemas de aterramento do tipo IT, deve ser previsto um DSI que indica a ocorrência da primeira falta à massa ou à terra. O DSI deve acionar um sinal sonoro e/ou visual que perdura enquanto a falta existir.

Esquemas IT são aqueles onde a alimentação é isolada da terra ou aterrada através de uma impedância de valor alto (ABNT, 2004). De acordo com a NBRIEC61851-23 (ABNT, 2020), o circuito secundário (lado de saída) da fonte de alimentação CC de uma estação de recarga rápida deve ser projetado como um esquema IT.

2.1.2 ABNT NBR 17019 - Instalações elétricas de baixa tensão - Requisitos para instalação em locais especiais - Alimentação de veículos elétricos

A NBR 17019 (ABNT, 2022), por sua vez, define que se não existir um dispositivo de proteção para interromper o circuito em uma primeira falta à massa ou à terra, deve existir um DSI, conforme a IEC 61557-8 (IEC, 2014). Ele deve atender aos requisitos:

- Pré-alarme: quando a resistência de isolamento estiver menor que $300 \Omega/V$, convém que seja enviado ao usuário um sinal visual e/ou sonoro. A recarga em andamento pode continuar mas não pode ser iniciada uma nova recarga.
- Alarme: quando a resistência de isolamento estiver menor que $100 \Omega/V$, convém que seja enviado ao usuário um sinal visual e/ou sonoro. A recarga em andamento deve ser interrompida em até 10 segundos.

2.1.3 NBRIEC61851-23 - Sistema de recarga condutiva para veículos elétricos - Parte 23: Estação de recarga em corrente contínua para veículos elétricos

A norma IEC 61851-23 (ABNT, 2020) abrange as estações de recarga rápida e representa a principal referência seguida no âmbito deste trabalho.

Na seção 6.4.3.106 da norma é abordado o teste de isolamento que deve ser feito antes da recarga. De acordo com a IEC, é necessário medir a resistência de isolamento entre a saída positiva de corrente contínua (CC) e o condutor de proteção (PE), bem como entre a saída negativa CC e o PE. O valor mínimo exigido é dado pela equação 2.1

$$R \geq R_m \times U \quad (2.1)$$

Onde R é a resistência mínima exigida para a recarga ser autorizada, U é a tensão nominal de saída da estação de recarga e R_m é $100 \Omega/V$ para a falta e $300 \Omega/V$ para o aviso.

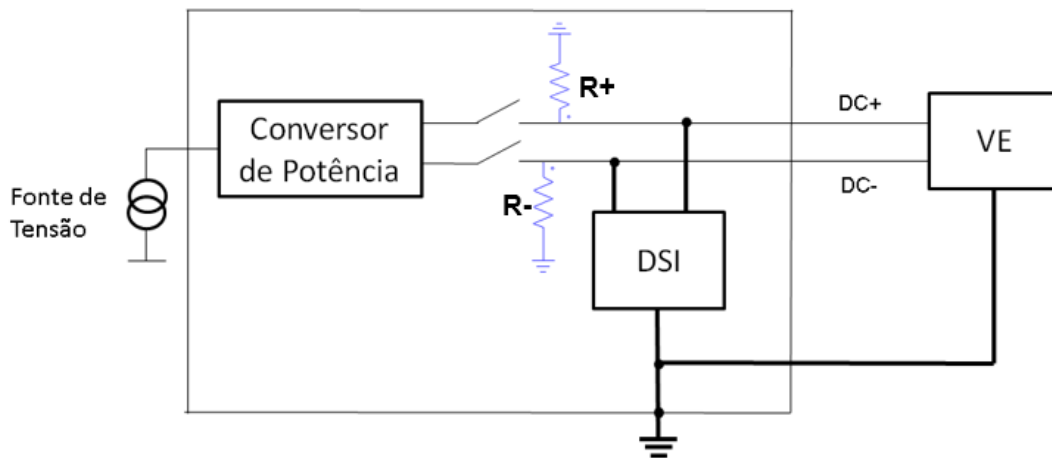
Se o valor mínimo exigido não for atingido, deve ser enviado um sinal ao veículo informando que o carregamento não é permitido.

Ainda, na seção CC.4 da IEC 61851-23, onde são abordadas as medidas de segurança, é afirmado que o lado de saída da estação deve ser projetado como um sistema IT. No caso de utilizar um DSI para a proteção deste sistema, ele deve estar em conformidade com a IEC 61557-8 (IEC, 2014). Deve ser realizado o monitoramento das resistências entre o polo CC+ e o PE e o polo CC- e o PE. O monitoramento deve ocorrer durante a recarga e periodicamente deve ser comunicado ao veículo o estado de isolação, que pode ser válido, inválido, aviso ou falta.

Antes de iniciar cada ciclo de fornecimento de energia por parte da estação, devem ser realizados os testes de isolamento descritos abaixo.

- Autoteste da função de monitoramento de isolação da alimentação CC: deve ser aplicado um resistor de falta entre o trilho de saída CC e a ligação equipotencial (como o PE), como demonstrado na Figura 5. Pode ser usado apenas R+, R- ou ambos. O resistor de falta é um resistor de valor abaixo do limite estabelecido, de forma que a estação aponte falha (neste caso, menor que $100 \text{ k}\Omega$).
- Com a confirmação do correto funcionamento do DSI, este pode verificar a resistência de isolamento do sistema.

Figura 5 – Autoteste DSI.



Fonte: Autora, 2023.

Nos tópicos abaixo, são definidas as especificações para cada estado de isolamento.

- Válido: quando o autoteste foi concluído com sucesso e a recarga é permitida.
- Inválido: quando o autoteste ainda não foi realizado e a recarga não é permitida.
- Aviso: se a resistência de isolamento está abaixo de $300 \Omega/V \times U$. Deve ser enviada uma mensagem de aviso.
- Falta: se o autoteste falhou ou a resistência de isolamento está abaixo de $100 \Omega/V \times U$. Deve ser enviado um sinal visual e/ou sonoro e a recarga deve ser interrompida.

2.1.4 IEC 61557-8 - *Electrical safety in low voltage distribution systems up to 1 000 V a.c. and 1 500 V d.c. - Equipment for testing, measuring or monitoring of protective measures - Part 8: Insulation monitoring devices for IT systems*

A norma IEC 61557-8 (IEC, 2014) aborda especificamente os DSIs. Todas as normas mencionadas anteriormente prescrevem que o DSI ou o DSI deve aderir a essa norma. A IEC 61557-8 estabelece os requisitos para tais dispositivos, que monitoram continuamente a resistência de isolamento em sistemas IT CA, sistemas IT CA com circuitos CC conectados galvanicamente e com tensões nominais de até 1000 V CA, bem como sistemas IT CC não aterrados com tensões de até 1.500 V CC, independentemente do método de medição.

Segundo a IEC, o DSI deve ser capaz de monitorar a resistência de isolamento sejam elas alocadas simétrica ou assimetricamente e fornecer um aviso se a resistência entre o sistema e o terra for abaixo do valor de resposta (valor limite que queremos), incluindo a sua incerteza.

Existem 3 tipos de DSI segundo a norma. São eles: o DSI CA para sistemas IT CA puros; DSI CA/CC para sistemas IT CA com retificadores diretamente conectados, para sistemas IT CC puros e para sistemas IT CC com inversores CA diretamente conectados; e o DSI CC para sistemas IT CC puros. O DSI desenvolvido neste trabalho se enquadra na categoria DSI CC, uma vez que este é implementado no lado CC do conversor, conforme demonstrado na Figura 3.

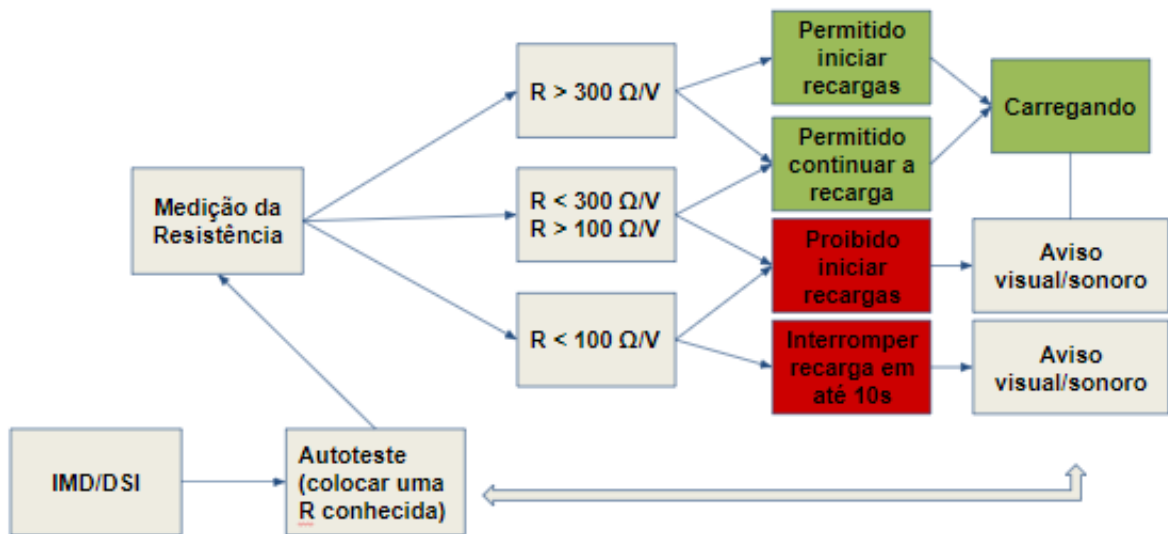
Sobre as funções mandatórias dos DSIs, eles devem dispor de um aviso visual local (LIW) e/ou ter a possibilidade de conectar um aviso de isolamento remoto (RIW). O DSI não deve ter um meio de desligamento disponível. Contudo, os dispositivos de sinalização sonora podem ser embutidos ou conectáveis e podem possuir o recurso de reinicialização. Deve ser assegurado que um aviso de isolamento (LIW ou RIW) seja enviado no caso de uma nova falta, após a falta que foi eliminada, e depois os dispositivos podem ser resetados. Ainda, a indicação do valor da resistência de isolamento não é considerável como um sinal visual de aviso. Este sinal geralmente é dado por meio do acionamento de LEDs.

Os DSI devem possuir um dispositivo de teste ou ter a possibilidade de conectar um dispositivo de teste para detectar se o DSI é capaz de cumprir sua função de alerta. O sistema IT a ser monitorado não deve estar diretamente aterrado quando a função de teste é ativada e esta função não deve influenciar negativamente o DSI e o sistema IT. O DSI deve fornecer a indicação se está funcionando corretamente durante ou depois do teste, que pode ser indicado em um display, outra indicação visual ou com um sinal de saída remoto.

2.1.5 Compilado das normas abrangentes

Realizando um compilado das normas abrangentes no Brasil sobre os DSI, é definido que o mesmo deve seguir as diretrizes demonstradas na Figura 6.

Figura 6 – Diretrizes das normativas.



Fonte: Autora, 2023

2.2 BUSCA DE PATENTES

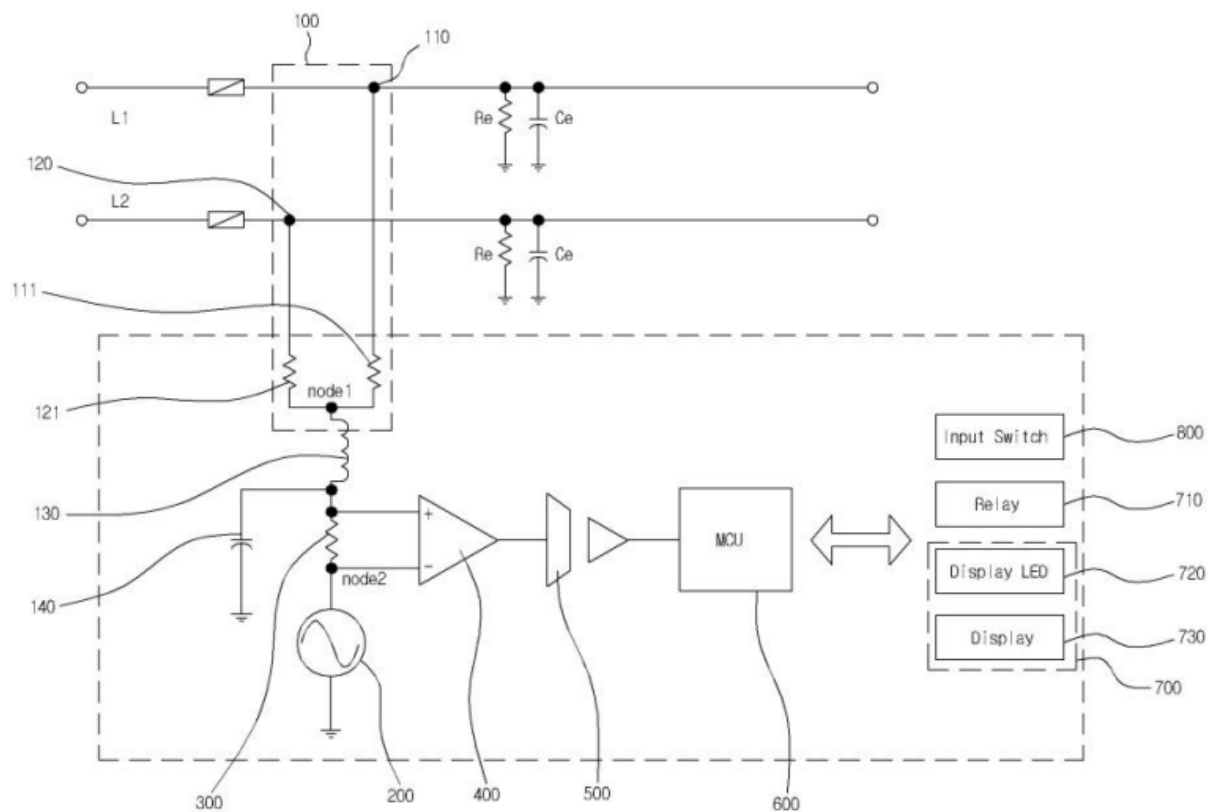
Foi conduzida uma pesquisa aprofundada de patentes de circuitos dedicados à monitoração da resistência de isolamento em sistemas. Monitores de isolamento podem ser classificados em G01R27/08. Esta é uma classificação específica de patentes de acordo com o sistema de classificação internacional de patentes (IPC - International Patent Classification). Essa classe está relacionada a métodos ou dispositivos para testar a resistência de isolamento de materiais elétricos, fiação elétrica, cabos ou isoladores.

Na classificação G01R27/08, G01R se refere à seção do IPC relacionada a Medição de Quantidades Elétricas, e 27/08 é uma subclasse que se concentra em testes de resistência de isolamento. Esta subclasse abrange invenções relacionadas a testes e medições de resistência de isolamento em sistemas elétricos, incluindo métodos, dispositivos, circuitos e sistemas para realizar essas medições. Dentro desta classificação, são encontrados diferentes circuitos.

A patente KR101303597B1, intitulada de Dispositivo de Medição de Resistência de Isolamento em Linha Viva, traz o circuito da Figura 7 para o monitoramento da resistência de isolamento em fios energizados. Observa-se que foi anexado aos terminais L1 e L2 um circuito para medição. Esse circuito é composto por resistências auxiliares (111 e 121), indutor e capacitor de filtro (130 e 140), uma resistência sensor

onde é lida a tensão (300), um gerador de onda senoidal (200), um amplificador de tensão (400), unidade de amplificação de isolamento (500), e um MCU para processamento de sinal (600). É o MCU que define se o valor da resistência está adequado ou não, exibindo o resultado no display.

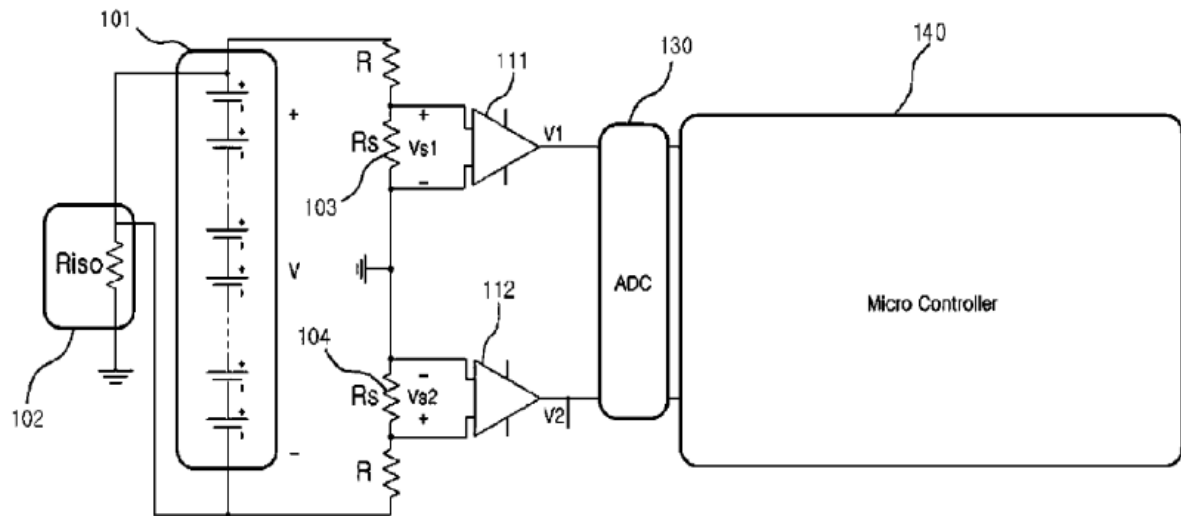
Figura 7 – Circuito monitor de isolamento KR101303597B1.



Fonte: Kim (2013)

Além desta, outras patentes usam a resistência sensor e um amplificador como base, como a EP2413148B1, intitulada de circuito de medição de resistência de isolamento livre de influência da tensão da bateria, demonstrado na Figura 8.

Figura 8 – Circuito monitor de isolamento EP2413148B1.



Fonte: YangKi, Choi, Lim (2020)

A topologia utilizando a leitura de tensão em um resistor sensor e um amplificador foi a base para o circuito desenvolvido nesse trabalho.

2.3 MODELOS COMERCIAIS

Há vários modelos comerciais de DSI, porém costumam ter um preço bastante elevado, chegando em até R\$ 30.000,00. Logo, a maior vantagem do DSI desenvolvido é o baixo custo, que será avaliado na seção 4.3.

Foram avaliados os modelos de DSI que recebem no mínimo uma tensão nominal de até $1000 V_{CC}$, de forma que ele possa ser inserido na estação de recarga considerada. Entre os modelos encontrados, destacam-se:

- ABB CM-IWM.10
- BENDER Isometer685
- BENDER ISOEV425
- DOLD RN 5897

Os modelos da ABB, inclusive o CM-IWM.10, são relés de monitoramento de isolamento. É medida a resistência de isolamento e, se os valores estiverem abaixo do limite, os relés de saída comutam para o estado de falta. Além disso, esse dispositivo possui recursos de detecção de fio quebrado e falhas de conexões.

Este modelo pode ser utilizado em redes CA/CC não aterradas e redes IT mistas, fontes de alimentação ininterrupta (UPS), redes com inversores de frequência, redes de baterias, sistemas fotovoltaicos, veículos híbridos e elétricos, entre outros.

Este modelo fabricado pela ABB encontra-se disponível no mercado brasileiro pelo valor aproximado de R\$ 20.000,00, conforme verificado em cotação realizada no dia 13 de janeiro de 2023, no endereço eletrônico <https://new.abb.com/br>. Na Figura 9 é demonstrado o dispositivo.

Figura 9 – Relé de monitoramento de isolamento CM-IWM.10 da empresa ABB.



Fonte: ABB (2022)

Além das funcionalidades mencionadas anteriormente, é importante destacar que no modelo CM-IWM.10 da ABB, é possível configurar diversos parâmetros de acordo com a necessidade do usuário. Entre esses parâmetros estão a máxima resistência para sinalizar uma falha, a resistência para pré-aviso e a capacitância máxima de fuga.

Uma característica adicional relevante é a capacidade do dispositivo de fornecer o valor medido de resistência por meio de LEDs, proporcionando uma visualização clara e imediata dos dados de monitoramento.

Alguns modelos da DOLD, como por exemplo o RN 5897/020 (Figura 10), possuem aplicação específica em estações de recarga. Tanto neste modelo quanto o da ABB é possível configurar os valores limites das resistências. Contudo, este modelo em específico possui como valores de resposta apenas até 100 k Ω . Outros modelos como o RN 5897/240 possuem valor de resposta até 500 k Ω .

Figura 10 – DSI RN 5897/020 da empresa DOLD.



Fonte: DOLD (2023)

O modelo Isometer685 da BENDER (Figura 11) dispara um alarme quando o valor atinge o valor pré-definido. Este modelo também oferece recursos de configuração flexíveis, permitindo aos usuários ajustar o valor limite e outros parâmetros de acordo com as necessidades específicas de cada aplicação. O modelo foi orçado em R\$18.000,00 em novembro de 2022, no endereço eletrônico <https://www.directindustry.com>.

Figura 11 – ISO685 da empresa BENDER.



Fonte: BENDER (2021)

O modelo ISOEV425 (Figura 12), também da fabricante BENDER, foi cotado em aproximadamente R\$ 5.000,00 em novembro de 2022, no endereço eletrônico <https://www.directindustry.com>.

Figura 12 – ISOEV425 da empresa BENDER.



Fonte: BENDER (2020)

Este modelo possui sua aplicação voltada à estações de recarga CC de veículos elétricos e segue as disposições da IEC 61851-23. Ele monitora sistemas com tensão nominal de 0 a 1000 V e monitora também sistemas desenergizados. Este modelo é ajustado para dois valores de resposta, 100 k Ω e 500 k Ω e o tempo de resposta é de 10 segundos. Com este modelo também pode ser ativada a memória de falhas. O aviso quando a resistência alcança o valor limite deste dispositivo é dado por sinal luminoso, por meio de LEDs. Também possui display e relés de alarme.

3 CIRCUITO DE MONITORAMENTO

Primeiramente, de modo a simplificar a elaboração do circuito, foi definido que a estação de recarga está sempre operando no pior caso, ou seja, na sua tensão máxima de 1000 V. Desta forma, com base nas normas citadas no capítulo 2, foi definido que o DSI projetado deve emitir dois sinais:

1. Sinal que avalia se a resistência de isolamento está acima ou abaixo de 100 k Ω . Se a resistência estiver abaixo deste valor, o circuito deve emitir um alarme, que é um sinal visual e/ou sonoro que indica que a recarga deve ser interrompida em até 10 segundos.
2. Sinal que avalia se a resistência de isolamento está acima ou abaixo de 300 k Ω . Se a resistência estiver abaixo deste valor, o circuito deve emitir um pré-alarme, que é um sinal visual e/ou sonoro que indica que a recarga pode continuar mas não pode ser iniciada uma nova recarga.

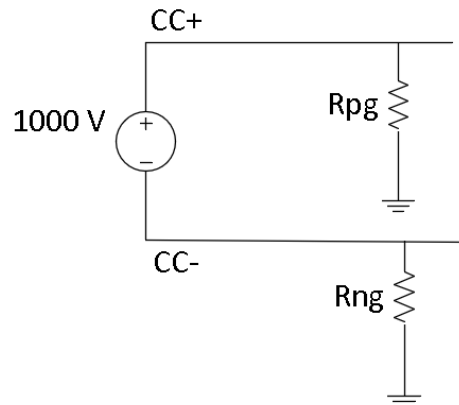
A ideia geral do circuito é a inserção de resistências conhecidas ao circuito e uma resistência "sensor", a partir da qual podemos medir a tensão em cima dela. Com esta tensão, é feita uma comparação para averiguar se o valor está acima ou abaixo dos limites definidos.

3.1 PROJETO DO CIRCUITO

3.1.1 Circuito de medição

Como demonstrado na Figura 4, o DSI está conectado ao conversor de potência, que fornece uma tensão de 1000 V. Para modelar o isolamento entre os terminais CC e a carcaça aterrada, utilizamos resistências fictícias, chamadas de resistências de aterramento e alocadas entre os polos CC+ e terra, e CC- e terra, conforme representado na Figura 13. É importante ressaltar que a resistência de isolamento total é dada pelo paralelo das resistências R_{PG} e R_{NG} .

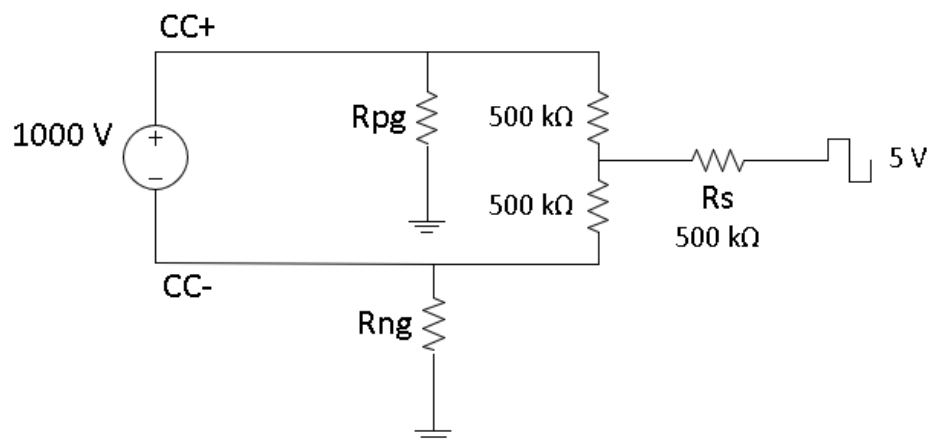
Figura 13 – Conexões entre conversor e resistências de aterramento.



Fonte: Autora, 2023.

Para conseguir realizar a medição destas resistências, acrescentamos resistências auxiliares de valor elevado, 500 k Ω , e ainda uma resistência sensor também de 500 k Ω . É a tensão em cima da resistência sensor que será medida para comparação de forma a obter a resistência de isolamento. Além disso, realizamos a adição de um sinal de Modulação por Largura de Pulso (PWM) com uma faixa de variação de 0 a 5V e frequência de 1 kHz. Ao inserir o sinal PWM, a tensão contínua (CC) proveniente do conversor não exerce influência no circuito em questão. Isso ocorre devido à aplicação de uma análise em corrente alternada (CA) durante o processo. Essa abordagem permite que o circuito seja avaliado em termos de seu comportamento e resposta às variações de tensão alternada, independentemente da tensão contínua presente no conversor. Desta forma, tem-se o circuito base de medição demonstrado na Figura 14.

Figura 14 – Circuito base de medição.



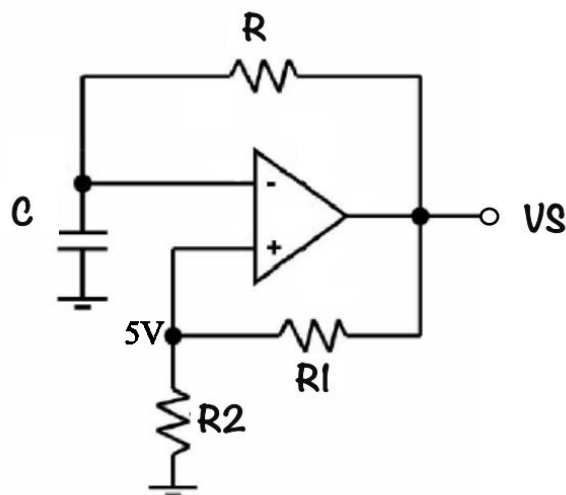
Fonte: Autora, 2023.

3.1.2 Circuito gerador do PWM

Como será feita a implementação prática, é necessário um circuito analógico para gerar o PWM inserido no circuito de medição, uma vez que utilizar um gerador de sinais na implementação prática é inviável.

Para gerar o PWM de 0 a 5V com frequência de 1 kHz foi utilizada a topologia de um oscilador de relaxação com amplificador operacional (ampop), conforme descrito por (Petry, 2012). Os osciladores de relaxação com amplificadores operacionais utilizam o método de comparação entre a saída inversora e não inversora do amplificador para gerar o resultado final. A topologia básica destes osciladores é demonstrada na Figura 15.

Figura 15 – Topologia oscilador de relaxação.



Fonte: Adaptado de Petry (2012)

As resistências R1 e R2 são responsáveis por fornecer a tensão de referência na entrada não-inversora do amplificador. A resistência R limita a tensão de carga no capacitor em um determinado tempo, proveniente da saída do circuito. O capacitor C fornece a tensão positiva ou negativa à entrada inversora do amplificador, para ir alterando a saída entre nível baixo e nível alto (Petry, 2012).

Basicamente, o funcionamento do circuito se dá da seguinte forma: na entrada não-inversora tem-se uma tensão de referência. Para gerar essa tensão de referência, é injetado 5V no ponto que conecta os resistores R1 e R2. Inicialmente, o capacitor está descarregado. Logo, como a entrada positiva do amplificador é maior que a entrada negativa, tem-se na saída o nível alto (neste caso, 5V).

Então, o resistor R impulsiona o carregamento do capacitor, que carrega até que a tensão na entrada negativa do ampop seja maior que a tensão de referência na entrada positiva. Neste momento, como a entrada negativa é maior que a entrada

positiva, tem-se o nível baixo na saída (0V neste caso). Quando há 0V na saída, o capacitor vai descarregando até que novamente a tensão de referência seja maior que a tensão na entrada inversora, e este ciclo irá se repetindo, formando o PWM.

Para o projeto do circuito que gera o PWM de 0 a 5V, consideramos $C = 47$ nF e $R1 = R2 = 4,7$ k Ω por serem valores comerciais de fácil acesso. Desta forma, considerando a frequência desejada (f_o) de 1 kHz, obtém-se a sequência de cálculos demonstrada nas equações abaixo.

$$B = \frac{R2}{R2 + R1} \quad (3.1)$$

Onde B é a razão cíclica do PWM.

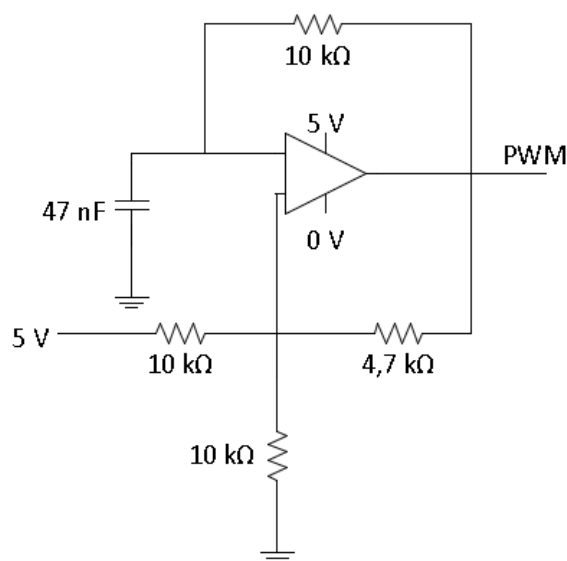
$$B = \frac{4,7k}{4,7k + 4,7k} = 0,5 \quad (3.2)$$

$$f_o = \frac{1}{2RC \ln\left(\frac{1+B}{1-B}\right)} \quad (3.3)$$

$$1k = \frac{1}{2R \cdot 47n \cdot \ln\left(\frac{1+0,5}{1-0,5}\right)} \quad (3.4)$$

Com a equação 3.4 obtém-se $R = 9,68$ k Ω . Arredondando para um valor comercial, tem-se $R = 10$ k Ω . Ainda, é necessário alimentar este circuito com a tensão de 5 V. Para isso, também é necessário dividir o R2 em duas resistências paralelas. Finalmente, tem-se o circuito demonstrado na Figura 16.

Figura 16 – Circuito analógico que gera o PWM.



Fonte: Autora, 2023.

Para a implementação prática, foi escolhido o amplificador operacional MCP6004,

por disponibilidade no laboratório e por ser um amplificador do tipo *rail-to-rail*, que é ideal para esta aplicação pela necessidade de alcançar na saída os valores da alimentação.

3.1.3 Filtro passa-altas e offset

Simulando o circuito da topologia base mostrado na Figura 14, foi notado que, quando R_{PG} é diferente de R_{NG} tem-se uma componente de tensão CC muito grande em relação ao sinal que deseja-se medir. Por isso e para evitar que outras componentes CC influenciem no circuito, foi implementado um filtro passa-altas. A frequência de corte do filtro pode ser bem baixa, ou seja, menor que 100 Hz. Usamos um capacitor de 2,2 nF e um resistor de 10 M Ω , e tem-se uma frequência de corte de 7,23 Hz, conforme a equação 3.6.

$$f_c = \frac{1}{2.\pi.R.C} \quad (3.5)$$

$$f_c = \frac{1}{2.\pi.10M.2,2n} = 7,23Hz \quad (3.6)$$

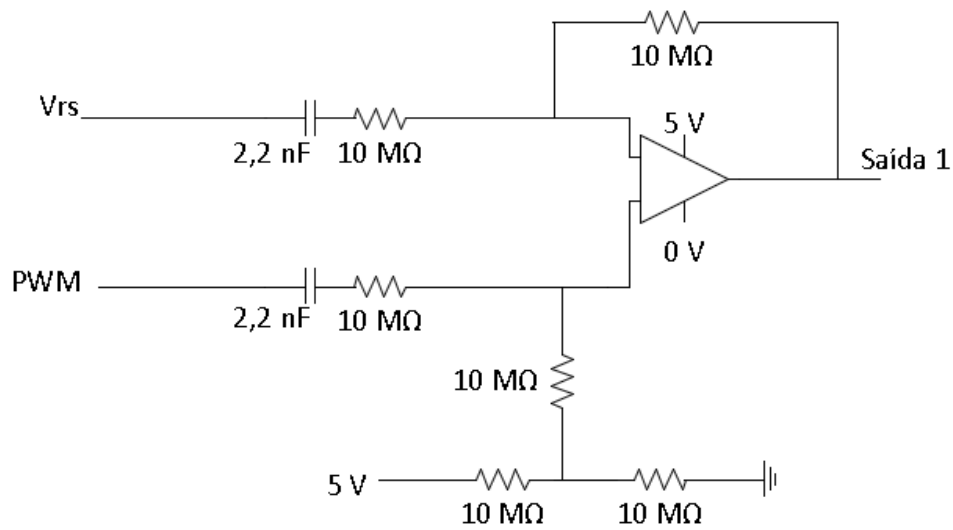
Ainda, o sinal de tensão V_{Rs} obtido do resistor sensor está centrado em 0 V. Como objetiva-se um sinal de 0 a 5V, ele precisa estar centrado em 2,5 V. Por isso, com um amplificador diferencial foi adicionado um offset de 2,5 V. O amplificador também isola as impedâncias do filtro, para que estas não influenciem nos amplificadores que serão implementados futuramente. O ganho do amplificador projetado é de 1. Para gerar o offset de 2,5 V, foi utilizada a entrada de 5 V e um divisor de tensão.

Com o filtro e o amplificador, obtém-se o circuito demonstrado na Figura 17.

3.1.4 Circuito de comparação

Por fim, é necessário verificar se o sinal está acima ou abaixo de 100 k Ω e 300 k Ω . Para isso, foi simulado o circuito que tem-se até o momento e configurar uma tensão de calibração. A partir de repetidos testes, foi encontrada a tensão de calibração de 3,983 V para 100 k Ω e de 3,7065 V para 300 k Ω . Essa tensão também pode ser obtida a partir da divisão de resistores. Para realizar a comparação, foi utilizado um amplificador operacional. Desta forma, tem-se o circuito apresentado na Figura 18 e com ele chega-se nas tensões de 3,9792 V e 3,70644 V para as saídas de 100 k Ω e 300 k Ω , respectivamente.

Figura 17 – Filtro passa-altas e offset.

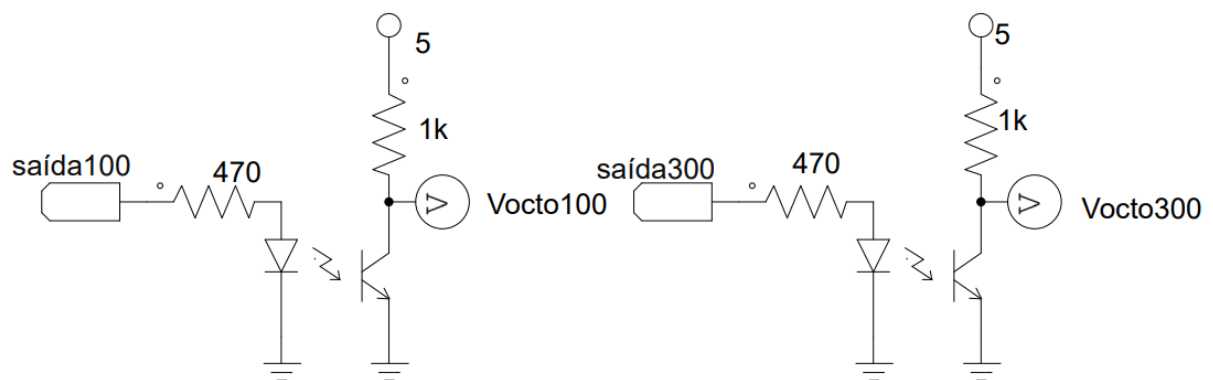


Fonte: Autora, 2023.

3.1.5 Isolador óptico

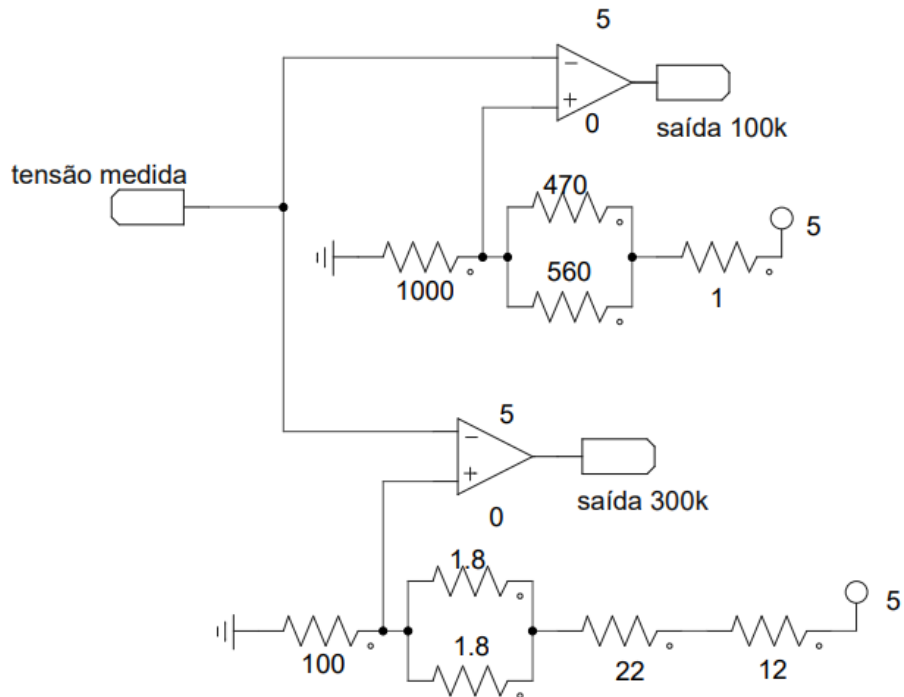
Para garantir a segurança do DSI e também dos componentes da estação que estiverem conectados a ele, é necessário projetar um isolador óptico, que transmite o sinal de um circuito para outro sem conexão elétrica. Para isto, foi utilizado o optoacoplador 4N35. O circuito é mostrado na Figura 19.

Figura 19 – Circuito do isolador óptico.



Fonte: Autora, 2023.

Figura 18 – Circuito para comparação.



Fonte: Autora, 2023.

3.2 CIRCUITO COMPLETO

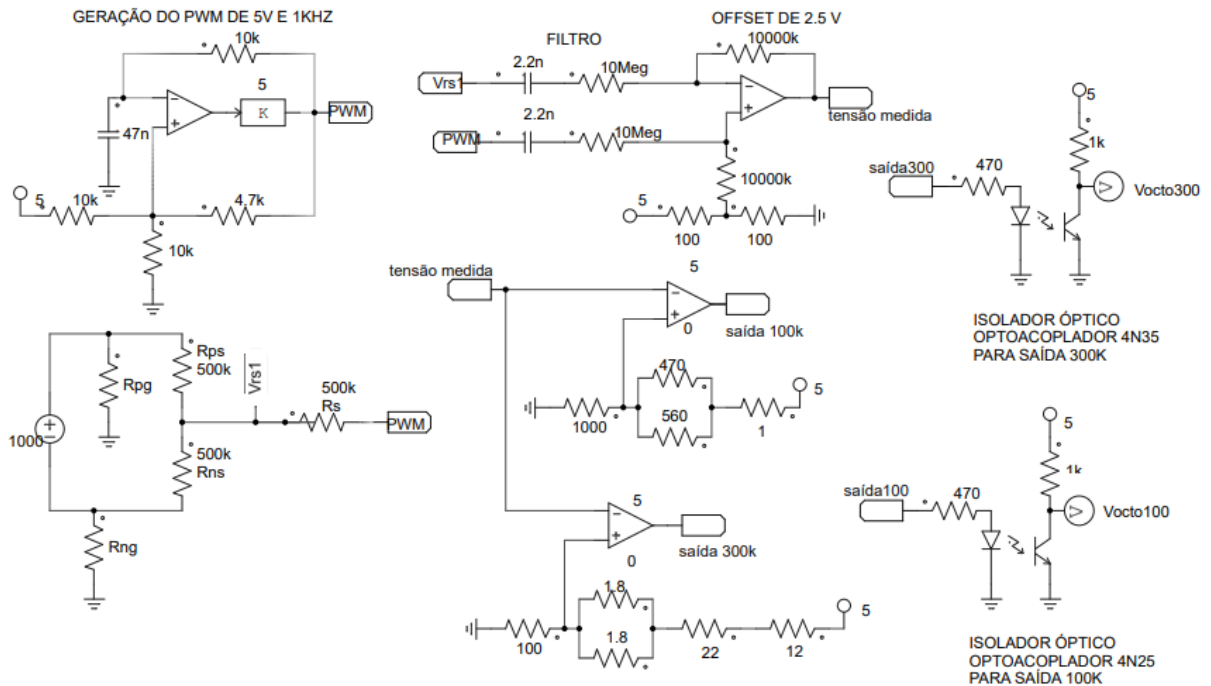
Por fim, obtém-se o circuito completo do DSI, que é apresentado na Figura 20.

3.3 SIMULAÇÕES

Com o circuito demonstrado na seção 3.2, foram realizadas simulações para teste do circuito no software PSIM. Definindo uma resistência de isolamento fictícia de $150k\Omega$, obteve-se os resultados demonstrados abaixo.

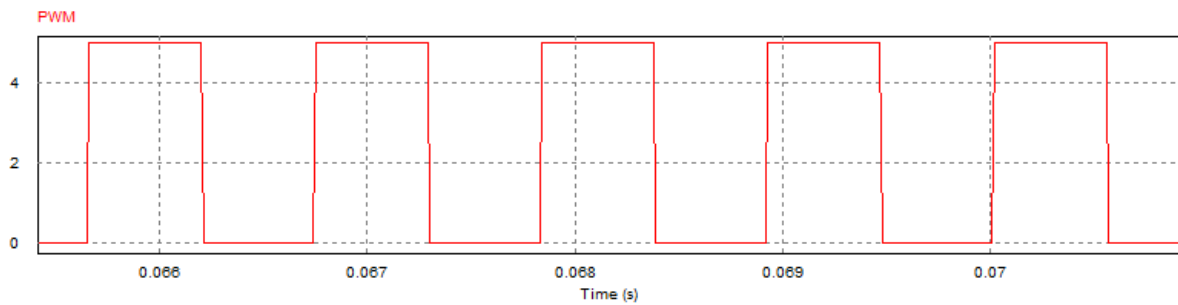
Primeiramente, foi testada a saída do circuito que gera o PWM, demonstrada na Figura 21.

Figura 20 – Circuito completo.



Fonte: Autora, 2023.

Figura 21 – Sinal PWM.

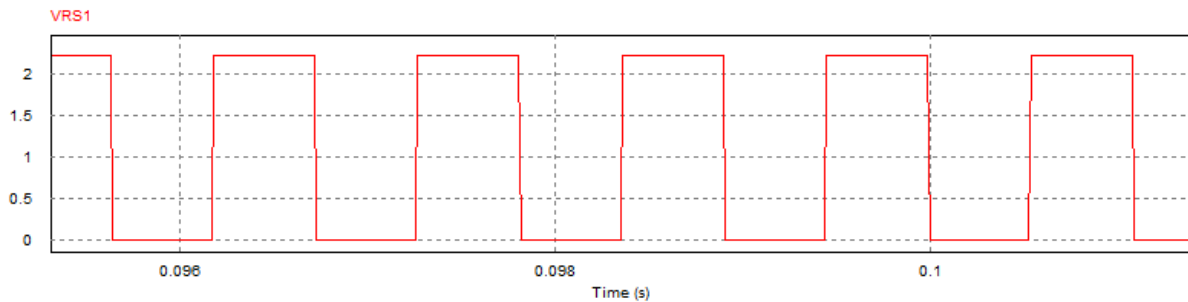


Fonte: Autora, 2023.

O PWM apresentou a amplitude esperada de 5 V e uma frequência de aproximadamente 900 Hz, ou seja, o resultado é satisfatório, visto que 10% de diferença na frequência do PWM não impacta no funcionamento do circuito.

Aplicando o PWM no circuito de medição, verificou-se a tensão no ponto anterior ao resistor sensor, conforme Figura 22.

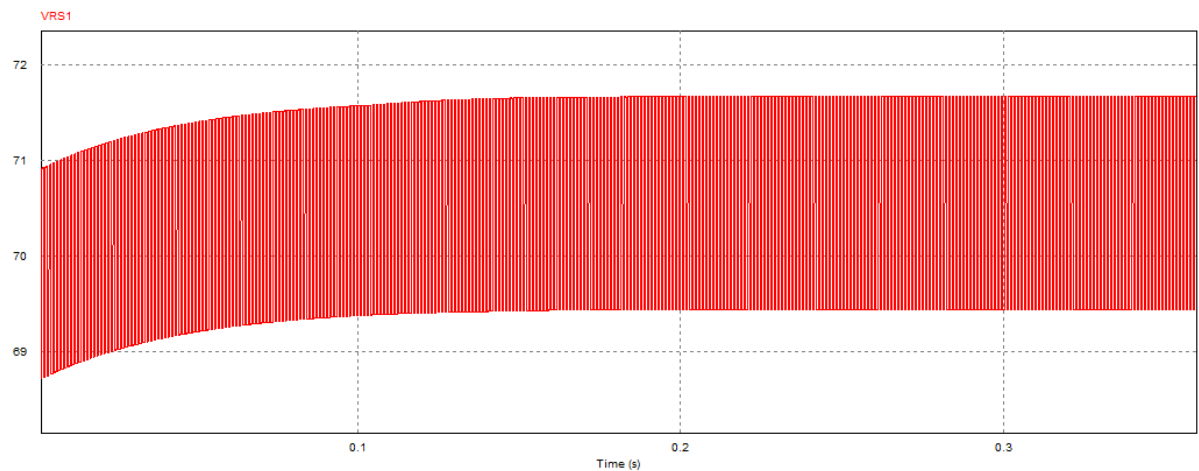
Figura 22 – Sinal VRs.



Fonte: Autora, 2023.

Observa-se que o sinal VRs tem o valor de 2,22 V. Como foi utilizada a resistência $R_{pg} = R_{ng} = 300 \text{ k}\Omega$, resultando em uma resistência de isolamento de $150 \text{ k}\Omega$. Com o objetivo de demonstração, na Figura 23 tem-se o resultado de VRs quando é setada uma resistência desequilibrada. Neste caso, $R_{pg} = 400 \text{ k}\Omega$ e $R_{ng} = 240 \text{ k}\Omega$, resultando na mesma resistência de isolamento de $150 \text{ k}\Omega$.

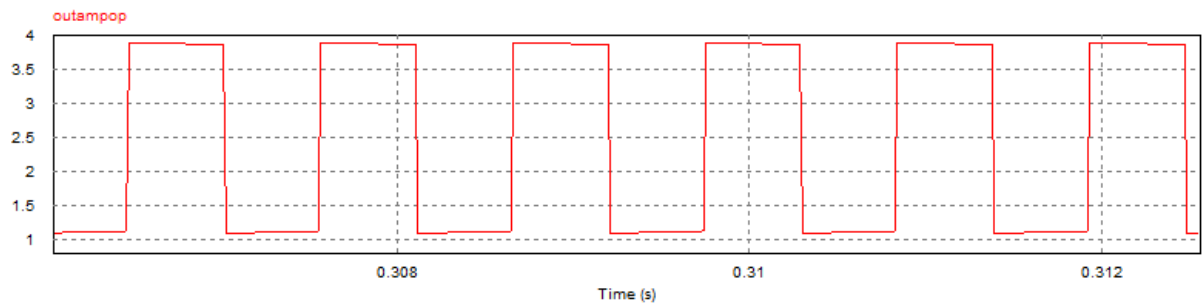
Figura 23 – Sinal VRs com resistências desequilibradas.



Fonte: Autora, 2023.

Observa-se que a tensão de pico-a-pico continua sendo 2,22 V mas tem-se uma tensão CC de 69,4 V. Após o filtro passa-altas implementado, a tensão será a mesma tanto para casos equilibrados quanto para casos desequilibrados. O sinal filtrado e com um offset de 2,5 V dado pelo amplificador operacional, tem-se o sinal demonstrado na Figura 24.

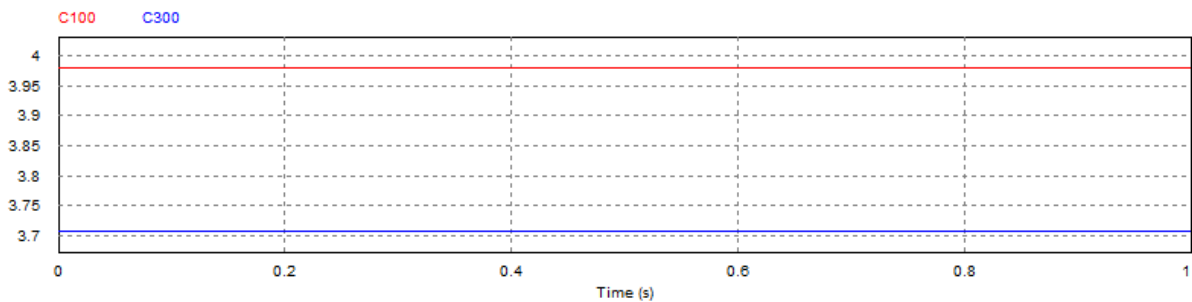
Figura 24 – Sinal de saída do amplificador com offset de 2,5 V.



Fonte: Autora, 2023.

Com esta tensão, fazemos a comparação para identificar se o sinal é pertencente à um sistema com uma resistência de isolamento acima ou abaixo de 100 k Ω e 300 k Ω . Primeiramente, na Figura 25 são demonstradas as tensões de calibração utilizadas.

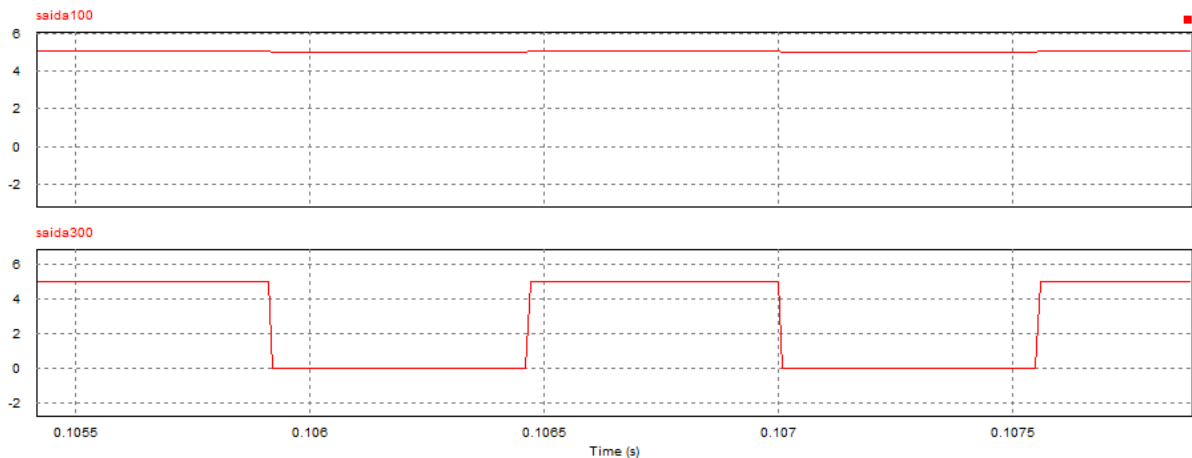
Figura 25 – Tensões de calibração.



Fonte: Autora, 2023.

A tensão de calibração para a saída de 100, que corresponde ao sinal de alarme, é de 3,9792 V e para a saída de 300, que corresponde ao pré-alarme, é de 3,7064 V. Ou seja, se o pico do sinal demonstrado na Figura 24 estiver acima das tensões de calibração será inválido. Se estiver abaixo, estará válido. Logo, as saídas são demonstradas na Figura 26.

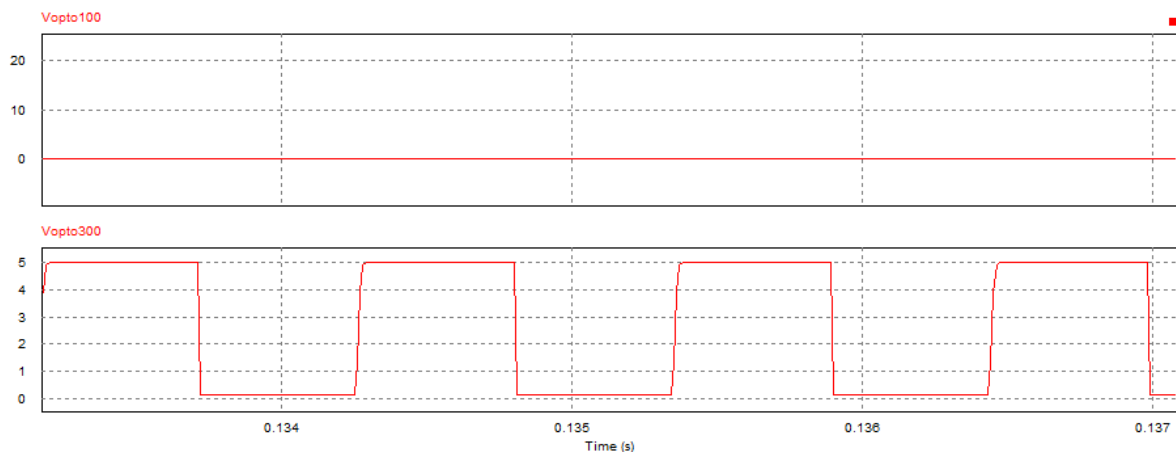
Figura 26 – Sinais de saída.



Fonte: Autora, 2023.

Logo, é possível visualizar que, na saída de 100 tem-se um sinal contínuo, ou seja, é válido. Na saída de 300 tem-se um PWM de 0 a 5 V, ou seja, é inválido. Logo, o resultado obtido está conforme o esperado. Ainda, o sinal precisa passar pelo circuito de isolamento óptico. O optoacoplador inverte o sinal, ou seja, o resultado válido será 0 e o sinal inválido será o mesmo PWM de 0 a 5V, como demonstrado na Figura 27.

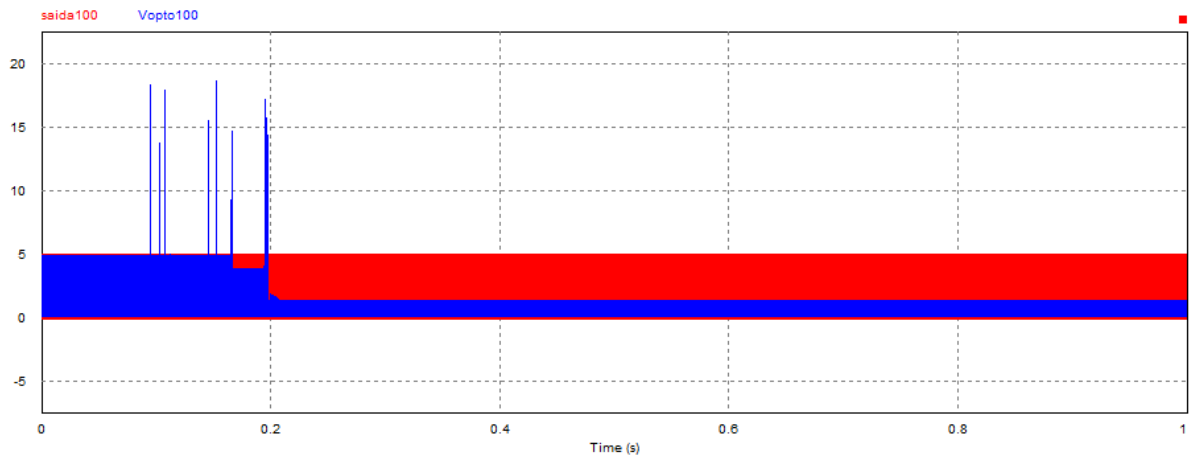
Figura 27 – Saída final do circuito de monitoramento.



Fonte: Autora, 2023.

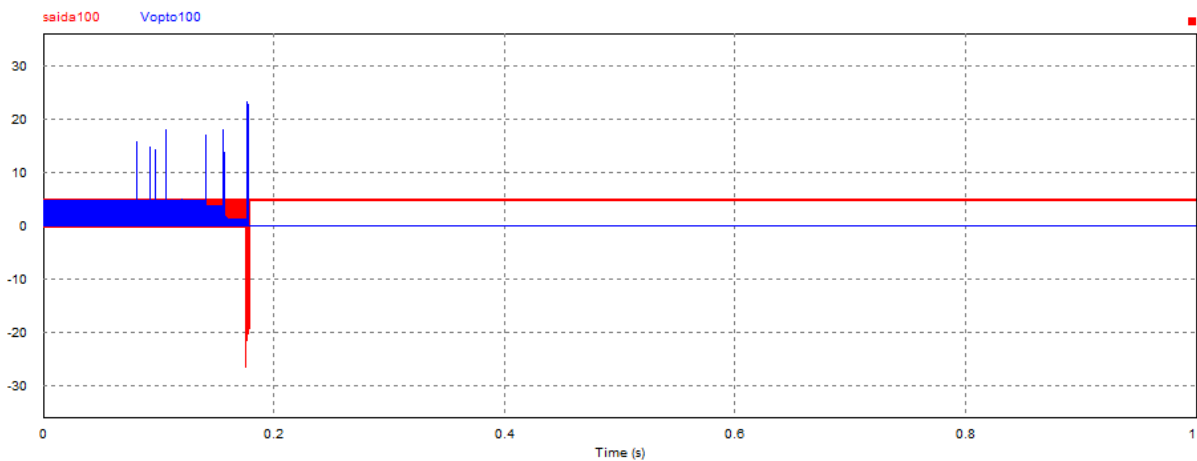
Também é necessário verificar os limites da saída, ou seja, em quais resistências estão sendo obtidos os resultados válido ou inválido. Primeiramente, foi feito o teste com a saída de 100 k Ω . Para as resistências 202 k Ω em paralelo com 202 k Ω , ou seja, 101 k Ω , ainda tem-se um sinal inválido (Figura 28). Para uma resistência de isolamento de 203 k Ω em paralelo com 202 k Ω , $R = 101,25$ k Ω , obtém-se um resultado válido (Figura 29).

Figura 28 – Saída de 100 inválida para $R = 101 \text{ k}\Omega$.



Fonte: Autora, 2023.

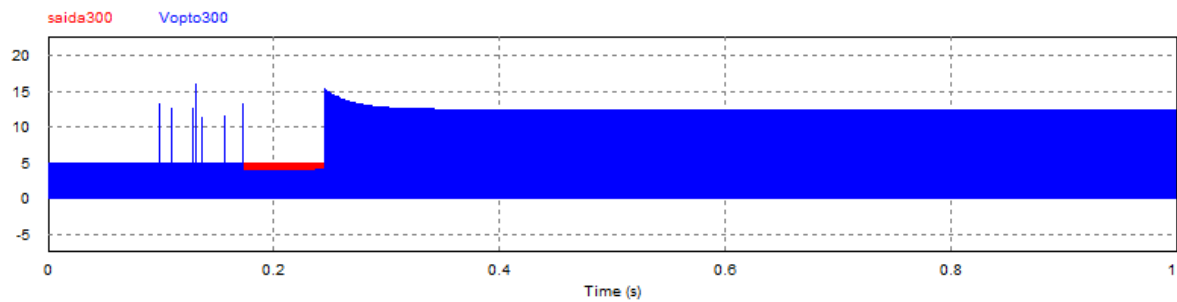
Figura 29 – Saída de 100 válida para $R = 101,5 \text{ k}\Omega$.



Fonte: Autora, 2023.

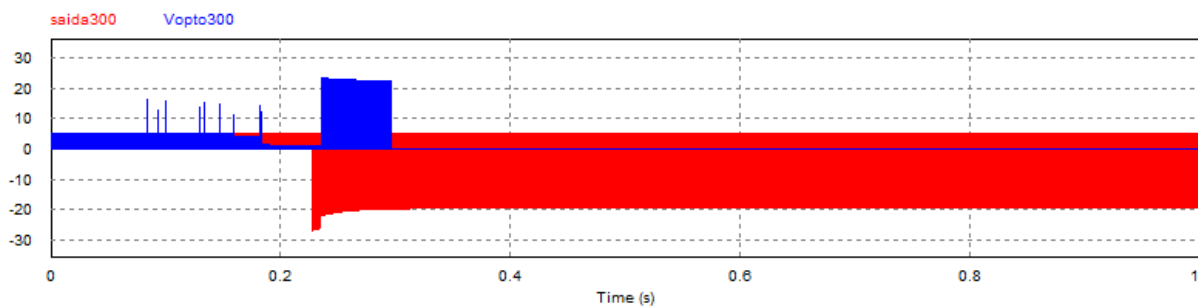
Para a saída de $300 \text{ k}\Omega$, as resistências $599 \text{ k}\Omega$ em paralelo com $599 \text{ k}\Omega$, ou seja, $299,5 \text{ k}\Omega$, ainda obtém-se um sinal inválido (Figura 30). Para uma resistência de isolamento de $599 \text{ k}\Omega$ em paralelo com $600 \text{ k}\Omega$, $R = 299,75 \text{ k}\Omega$, já obtém-se um resultado válido na saída final do circuito, que é na saída do optoacoplador. Contudo, na saída do amplificador de comparação ainda obteve-se um sinal inválido (Figura 31).

Figura 30 – Saída de 300 inválida para $R = 299,5 \text{ k}\Omega$.



Fonte: Autora, 2023.

Figura 31 – Saída de 300 válida para $R = 299,75 \text{ k}\Omega$.



Fonte: Autora, 2023.

Utilizando uma fonte de tensão, em software, para configurar uma tensão de calibração, é possível alcançar um valor de tensão que valide a resistência exatamente nos pontos $100 \text{ k}\Omega$ e $300 \text{ k}\Omega$. Contudo, como estão sendo utilizados resistores para obter a tensão a partir dos 5 V de entrada, este é o mais perto que consegue-se chegar. De qualquer forma, o resultado está muito satisfatório. Na prática, o erro é maior, como pode ser visto no próximo capítulo.

4 IMPLEMENTAÇÃO PRÁTICA

4.1 CONCEPÇÃO DAS PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO

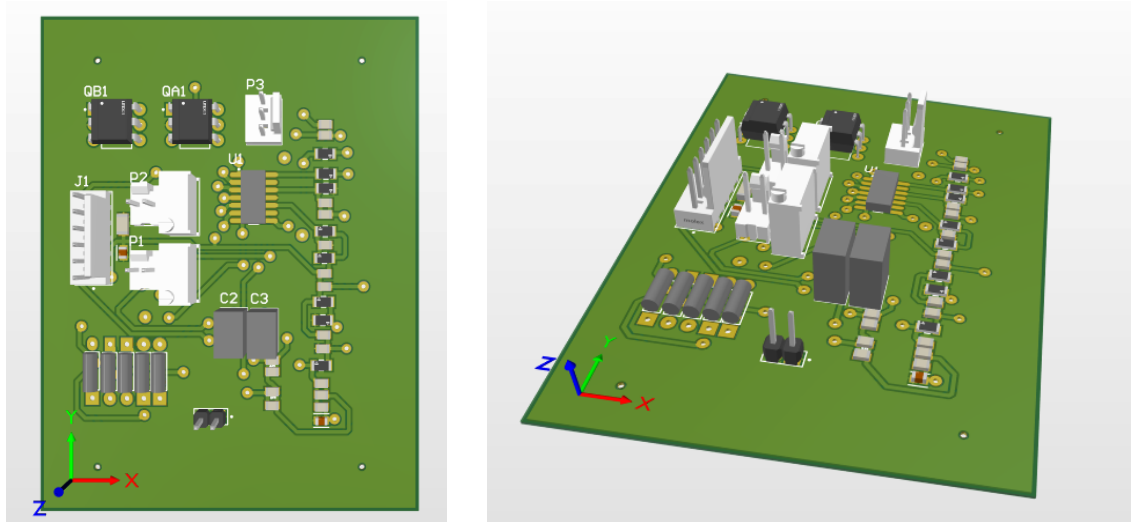
Para a realização do projeto da placa de circuito impresso foi utilizado o software Altium Designer. Para a implementação prática, foram utilizados os componentes disponíveis nos laboratórios pertencentes ao GEPOC. Por este motivo, houveram algumas limitações. Primeiramente, foram procurados os componentes SMD. Ainda, foram procurados resistores de precisão, uma vez que o circuito é bem sensível com as variações de resistência.

Ainda, foi necessário utilizar trimpots simulando as resistências de isolamento para validar o circuito. Quando for conectada ao sistema real, eles podem ser desconectados do circuito.

Também foram acrescentados capacitores de desacoplamento para remover componentes CA do sinal de 5 V que alimenta o amplificador operacional e também logo na entrada dos 5 V no circuito.

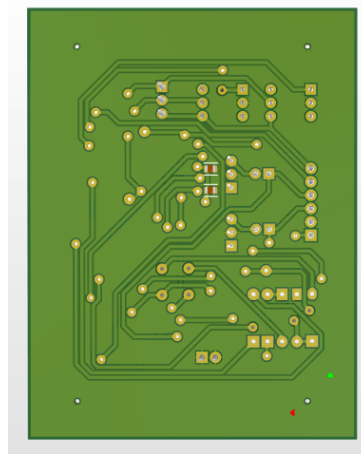
Com isso, foi criada uma placa de dois layers de dimensões aproximadas de 6x8 cm, demonstrada nas Figuras 32 e 33.

Figura 32 – Vista superior do projeto da PCI.



Fonte: Autora, 2023.

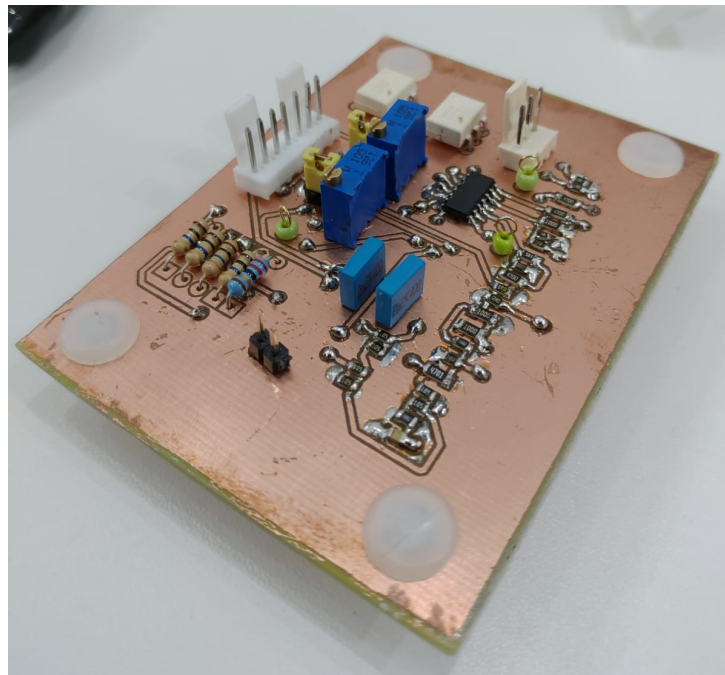
Figura 33 – Vista inferior do projeto da PCI.



Fonte: Autora, 2023.

A placa foi confeccionada em laboratório pela autora deste trabalho. Na figura 34, pode ser vista a PCI montada.

Figura 34 – PCI implementada em laboratório.



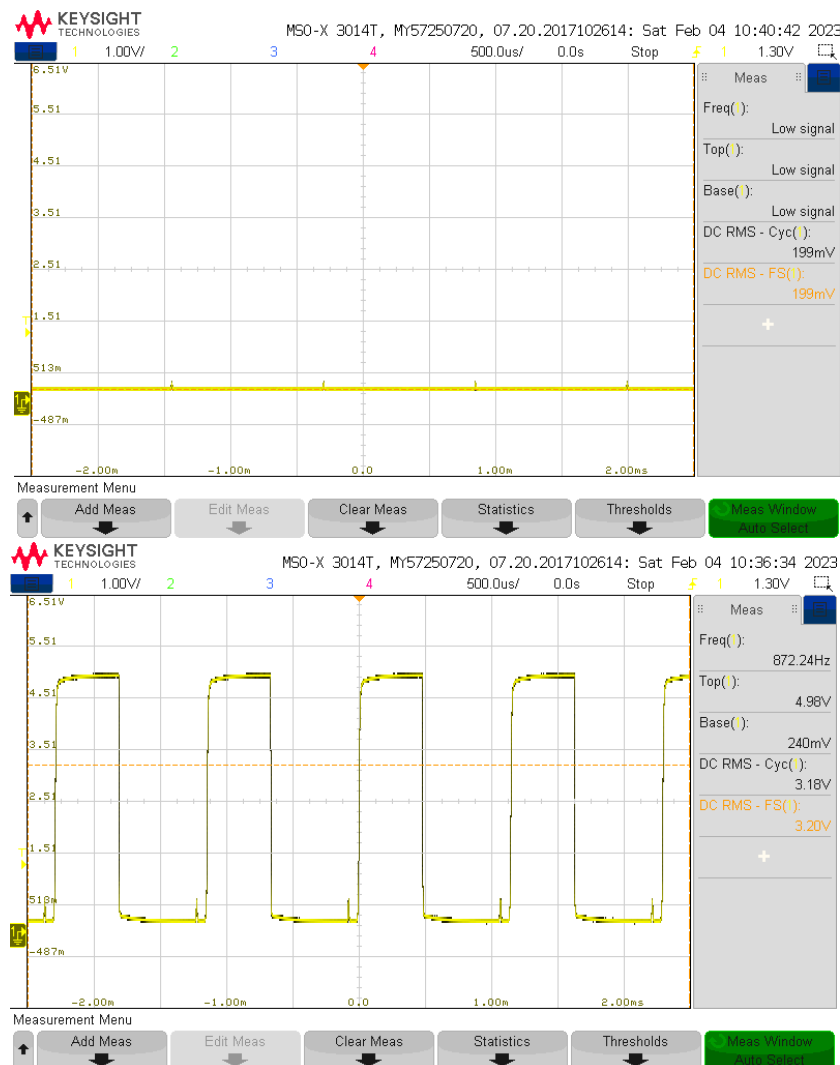
Fonte: Autora, 2023.

4.2 TESTES EXPERIMENTAIS

Os testes experimentais foram feitos da mesma forma que as simulações demonstradas no capítulo anterior. Para os testes, foi utilizada uma fonte de bancada e um osciloscópio.

Para entender os resultados que estão sendo obtidos, na Figura 35 são demonstrados os gráficos com resultados válido e inválido na prática, respectivamente.

Figura 35 – Resultados válido e inválido, respectivamente.



Fonte: Autora, 2023.

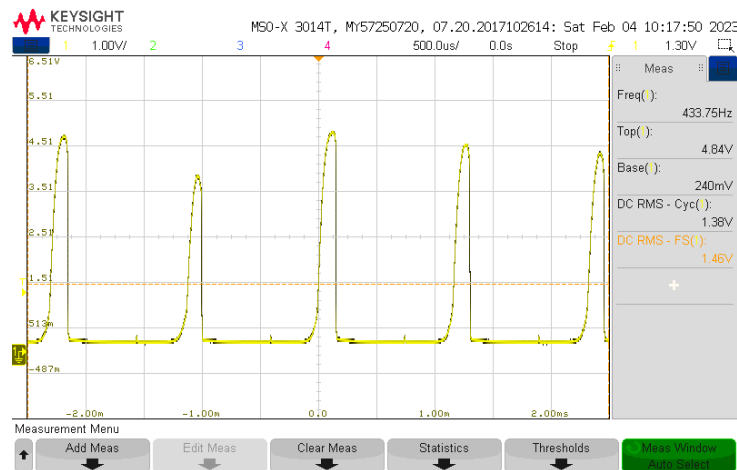
É notório que há um pequeno ruído mas este não atrapalha a fácil identificação do resultado. Quando é válido, o sinal na saída é de aproximadamente 0 V. Quando é inválido, o sinal é um PWM de 0 a 5V com uma frequência de aproximadamente 900 Hz. Válido significa que o sinal é maior que a resistência limite. Ou seja, se tivermos uma resistência de 400 k Ω teremos um sinal contínuo em 0 V tanto na saída de 100

$k\Omega$ quanto na saída de $300\ k\Omega$. Já uma resistência de $50\ k\Omega$ geraria um PWM de 0 a 5 V nas duas saídas.

4.2.1 Teste dos limites da saída de $100\ k\Omega$

Nos testes experimentais, foi avaliado o valor de resistência onde a saída em questão começa a gerar um resultado válido ou inválido. Primeiramente, foi feito um teste diminuindo a resistência até a saída apresentar um resultado inválido. Na figura 36 vemos a saída de 100 gerando um resultado inválido para as resistências $258,4\ k\Omega$ e $236,2\ k\Omega$, que resulta em uma resistência equivalente de $123,4\ k\Omega$.

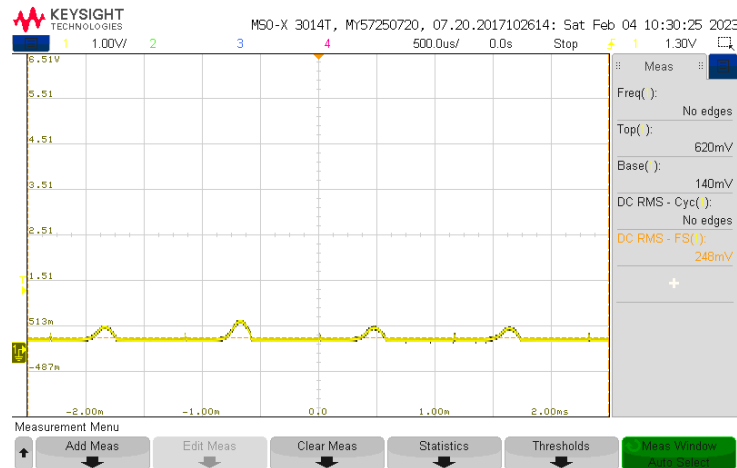
Figura 36 – Teste número 1 para saída de $100\ k\Omega$.



Fonte: Autora, 2023.

Depois, foi iniciado o teste inverso, ou seja, foi aumentada a resistência até o resultado ficar válido. Na Figura 37 obtém-se o resultado válido para as resistências de $275,4\ k\Omega$ e $257,9\ k\Omega$, resultando em $133,18\ k\Omega$.

Figura 37 – Teste número 2 para saída de 100 k Ω .

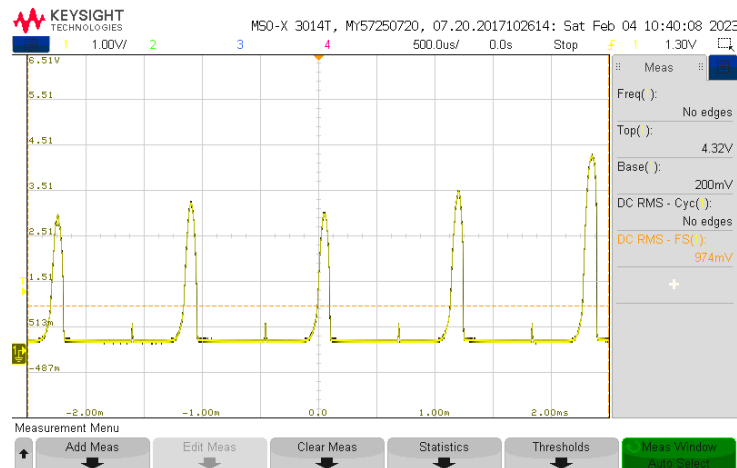


Fonte: Autora, 2023.

4.2.2 Teste dos limites da saída de 300 k Ω

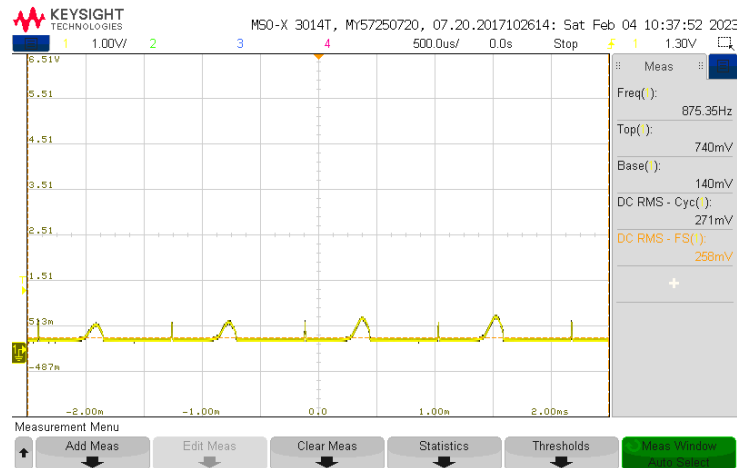
Para a saída de 300, primeiramente foi testado o ponto onde o resultado é inválido, em 347 k Ω , demonstrado na Figura 38.

Figura 38 – Teste número 1 para saída de 300 k Ω .



Fonte: Autora, 2023.

Ainda, esta saída começa a apresentar um resultado válido em 358 k Ω , demonstrado na Figura 39.

Figura 39 – Teste número 2 para saída de 300 k Ω .

Fonte: Autora, 2023.

Com os textos experimentais, foi percebido que a placa apresenta os sinais válido e inválido da forma correta. Contudo, o circuito emite o sinal de aviso e pré-aviso nas resistências 123,4 k Ω e 347 k Ω , respectivamente. Calculando a margem de erro para estes valores, obtemos 23,4% para o aviso e 15,67 % para o pré-aviso.

4.3 ESTIMATIVA DE PREÇO DO DSI PRODUZIDO

Na Tabela 1 são demonstrados os custos de cada componente utilizado na confecção do DSI. O cálculo realizado é uma mera estimativa. Para essa estimativa, foi considerado o valor do dólar americano em 26/03/23, que estava cotado a R\$ 5,25. Cabe ressaltar que alguns custos, como o encapsulamento e os materiais empregados na solda, não foram levados em consideração. Os valores apresentados foram obtidos a partir das principais lojas especializadas na venda de componentes. Além disso, é importante mencionar que os componentes em questão não foram adquiridos, uma vez que já estavam disponíveis no laboratório. É válido destacar que, ao adquirir esses componentes em maior quantidade, é possível obter um preço mais vantajoso.

Tabela 1 – Estimativa de custos dos componentes do DSI.

Componente	Custo unidade (R\$)	Quantidade	Custo total (R\$)
Optoacoplador 4N35	2,36	2	4,72
Amplificador operacional MCP6004	3,04	1	3,04
Trimpot 1M	9,29	2	18,58
Conector Pin Header 6 pinos	7,82	1	7,82
Header Jumper	0,63	2	1,26
Conector KK macho 6 pinos	2,20	1	2,20
Conector KK fêmea 6 pinos	1,83	1	1,83
Conector KK macho 3 pinos	1,94	1	1,94
Conector KK fêmea 3 pinos	1,83	1	1,83
Capacitor 2.2 nF Epcos 400 V	1,73	2	3,46
Capacitor SMD 47 nF	7,87	1	7,87
Capacitor SMD 100 nF	1,10	1	1,10
Capacitor SMD 10 nF	0,50	1	0,50
Capacitor SMD 200 nF	0,52	2	1,04
Resistor 10 M Ω 1/4 W	1,94	4	7,77
Resistor precisão 22 Ω 1/4 W	1,36	1	1,36
Resistor SMD 4,7 k Ω 1206	0,94	1	1,89
Resistor SMD 10 k Ω 0805	0,5	3	1,50
Resistor SMD 100 Ω 1206	0,5	3	1,50
Resistor SMD 1 Ω 0805	3,15	1	3,15
Resistor SMD 1,8 Ω 0805	0,63	2	1,26
Resistor SMD 470 Ω 1206	0,50	3	1,50
Resistor SMD 560 Ω 0805	1,20	1	1,20
Resistor SMD 1 k Ω 0805	4,09	3	12,27
Resistor SMD 12 Ω 0805	0,50	1	0,50
Placa cobre	22	1	22
Fonte de alimentação 5 V	40	1	40
		Custo total	154,59

Fonte: Autora, 2023.

O custo total foi de aproximadamente R\$ 115,00. O modelo de DSI mais barato encontrado no mercado foi de R\$ 5.000,00, ou seja, 43 vezes mais caro. Isso se deve ao fato do DSI criado ser mais simples, sem funções como configurar a resistência onde é desejado o aviso e o pré-aviso. Contudo, para a aplicação desejada, ele é eficaz e mais vantajoso por causa do custo.

5 CONCLUSÃO

Os monitores de isolamento desempenham um papel essencial na segurança dos usuários em diversos produtos da área de automação. Todas as fabricantes têm como objetivo encontrar soluções econômicas e eficazes para a implementação desses dispositivos. Neste estudo, foi desenvolvido um produto simples, acessível, de fácil implementação e eficiente.

O desenvolvimento do circuito teórico proporcionou um aprofundamento significativo nos conhecimentos de eletrônica e instrumentação adquiridos ao longo da graduação em engenharia elétrica, contribuindo substancialmente para o desenvolvimento profissional.

Ademais, a implementação prática do circuito permitiu uma compreensão aprofundada de diversos aspectos relacionados ao processo de criação de um cartão eletrônico. Esse processo engloba desde a concepção inicial da ideia até a realização dos testes de validação, passando pela definição dos requisitos, elaboração do circuito teórico, desenvolvimento do layout da PCB, escolha dos componentes e montagem do cartão. Essa abordagem abrangente permitiu uma visão completa do ciclo de desenvolvimento envolvido na criação de um cartão, constituindo-se, sem dúvida, em um fator de enriquecimento profissional inestimável.

Em relação aos resultados, o DSI desenvolvido demonstra um funcionamento adequado ao avaliar as resistências entre CC+ e o terra, bem como entre CC- e o terra, para determinar se esses valores permitem a recarga em uma estação de até 1000V, em conformidade com as normas vigentes. Embora o DSI apresente um erro de calibração devido à utilização dos componentes disponíveis em laboratório e por ser um primeiro protótipo, sua viabilidade como solução se torna evidente. Especialmente em protótipos de estações de recarga, o dispositivo revela-se uma opção atrativa devido ao seu baixo custo em relação às alternativas de mercado e ao seu formato compacto. Como resultado, conclui-se que este trabalho alcançou os objetivos estabelecidos na seção 1.2.

No entanto, para ser utilizado em uma estação de recarga real são necessárias diversas melhorias, que podem ser incentivadas em trabalhos futuros. Algumas dessas melhorias incluem:

- Aprimoramentos na calibração, utilizando apenas resistores de precisão.
- Implementação de um sistema que permita ao usuário selecionar os valores das resistências limites desejadas;
- Acrescentar sinal luminoso (com LEDs) e sinal sonoro.

- Melhorias no hardware, como a utilização exclusiva de componentes SMD para reduzir ainda mais o tamanho da placa. Além disso, é interessante desenvolver um invólucro para o cartão, a fim de torná-lo mais robusto e resistente.
- Implementação de uma janela de leitura antes de sinalizar um erro, pois é possível que o evento seja apenas um pico momentâneo e não represente um erro real.
- Realização de mais testes, incluindo uma estação de recarga real ou um emulador como o *Charging Discovery System Series* (CDS) da fabricante Keysight, e comparações com um DSI comercial.

As melhorias mencionadas acima enriquecerão o trabalho e contribuirão significativamente para torná-lo ainda melhor.

REFERÊNCIAS

ABB. **Datasheet do produto CM-IWM.10**. 2022. Acessado em 18 jan 2023. Disponível em: <<https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=2CDC112242D0201&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>>.

ABNT. **NBR 5410; Instalações elétricas de baixa tensão**. [S.l.]: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004.

_____. **NBRIEC61851-23; Sistema de recarga condutiva para veículos elétricos - Pate 23: Estação de recarga em corrente contínua para veículos elétricos**. [S.l.]: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2020.

_____. **NBR 17019; Instalações elétricas de baixa tensão - Requisitos para instalação em locais especiais - Alimentação de veículos elétricos**. [S.l.]: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2022.

BENDER. **IT Systems: The basis for reliable power supply**. Alemanha, 2004. Acessado em 20 dez 2022. Disponível em: <https://www.bender.de/fileadmin/content/Products/t/e/TechInfo01-IT-System_FA_en.pdf>.

_____. **Datasheet do produto ISOEV425**. 2020. Acessado em 23 jan 2023.

_____. **Datasheet do produto ISO685**. 2021. Acessado em 18 jan 2023. Disponível em: <https://proauto-electric.com/wp-content/uploads/2021/06/iso685-x_D00022_D_XXEN.pdf>.

DOLD. **RN 5897/020**. 2023. Acessado em 18 jan 2023. Disponível em: <<https://www.dold.com/en/products/relay-modules/monitoring-devices/insulation-monitors/rn-5897/020?c=106>>.

IEC. **IEC 61557-8; Electrical safety in low voltage distribution systems up to 1 000 V a.c. and 1 500 V d.c. - Equipment for testing, measuring or monitoring of protective measures - Part 8: Insulation monitoring devices for IT systems**. [S.l.]: International Electrotechnical Commission, 2014.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Global Electric Vehicle Outlook 2023**. France, 2023. Acessado em 16 maio 2023. Disponível em: <<https://iea.blob.core.windows.net/assets/dacf14d2-eabc-498a-8263-9f97fd5dc327/GEVO2023.pdf>>.

Kim. **EP2413148B1 - Dispositivo de medição de resistência de isolamento de fio energizado**. Escritório Coreano de Propriedade Intelectual (KR), 2013. Acesso em 08 ago. 2023. Disponível em: <<https://patentimages.storage.googleapis.com/20/de/98/3f5aa16a506180/KR101303597B1.pdf>>.

NeoCharge. **Número de carros elétricos no Brasil**. Brasil, 2023. Acessado em 01 agosto 2023. Disponível em: <<https://www.neocharge.com.br/>>.

Petry. **Oscilador de Relaxação com Amplificador Operacional**. 2012. Acessado em 21 dez 2022. Disponível em: <https://professorpetry.com.br/Ensino/Repositorio/Docencia_CEFET/Estruturas_Analogicas/2012_2/Oscilador_Relaxacao_Ampop.pdf>.

YangKi, Choi, Lim. **EP2413148B1 - Insulation resistance measuring circuit free from influence of battery voltage**. EUROPEAN PATENT OFFICE, 2020. Acesso em 08 ago. 2023. Disponível em: <<https://patentimages.storage.googleapis.com/fa/e4/77/76c47e4609e4b0/EP2413148B1.pdf>>.