

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELETRÔNICA**

UESLEI MARIAN

**REFORMULAÇÃO DO SISTEMA ELETRÔNICO DO EQUIPAMENTO
VEDADETECTOR PARA AUMENTO DA SEGURANÇA
OPERACIONAL E CONFIABILIDADE DE DETECÇÃO**

FLORIANÓPOLIS, 2026.

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELETRÔNICA**

UESLEI MARIAN

**REFORMULAÇÃO DO SISTEMA ELETRÔNICO DO EQUIPAMENTO
VEDADETECTOR PARA AUMENTO DA SEGURANÇA
OPERACIONAL E CONFIABILIDADE DE DETECÇÃO**

Trabalho de Conclusão de curso submetido
ao Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia de Santa Catarina como parte
dos requisitos para obtenção do título de
Engenheiro em Eletrônica.

Orientador:
Prof. Dr. Luis Carlos
Martinhago Schlichting

FLORIANÓPOLIS, 2026.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Marian, Ueslei
REFORMULAÇÃO DO SISTEMA ELETRÔNICO DO EQUIPAMENTO
VEDADETECTOR PARA AUMENTO DA SEGURANÇA OPERACIONAL E CONFIABILIDADE
DE DETECÇÃO / Ueslei Marian; orientação de
Luis Carlos Martinhago Schlichting. - Florianópolis,
SC, 2026.

47 p.
Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal
de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado
em Engenharia Eletrônica. Departamento Acadêmico
de Eletrotécnica.
Inclui Referências.

1. ESP32. 2. Vedadetector. 3. Ruptura dielétrica.
4. Detecção de falhas. 5. Segurança elétrica. I. Schlichting,
Luis Carlos Martinhago. II. Instituto Federal
de Santa Catarina. III. REFORMULAÇÃO DO SISTEMA ELETRÔNICO
DO EQUIPAMENTO VEDADETECTOR PARA AUMENTO DA SEGURANÇA
OPERACIONAL E CONFIABILIDADE DE DETECÇÃO.

REFORMULAÇÃO DO SISTEMA ELETRÔNICO DO EQUIPAMENTO VEDADETECTOR PARA AUMENTO DA SEGURANÇA OPERACIONAL E CONFIABILIDADE DE DETECÇÃO

UESLEI MARIAN

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro em eletrônica e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso engenharia eletrônica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 16 de julho, 2026.

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **LUIS CARLOS MARTINHAGO SCHLICHTING**
Data: 11/08/2026 10:21:15-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Luis Carlos Martinhago Schlichting, Dr.
Instituto Federal de Santa Catarina

Documento assinado digitalmente
 **CHARLES BORGES DE LIMA**
Data: 13/08/2026 06:55:41-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Charles Borges de Lima, Dr.
Instituto Federal de Santa Catarina

Documento assinado digitalmente
 **PAULO RICARDO TELLES RANGEL**
Data: 11/08/2026 14:39:36-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Paulo Ricardo Telles Rangel, Me.
Instituto Federal de Santa Catarina

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à minha família, que sempre esteve ao meu lado durante toda a minha vida e, principalmente, ao longo desta trajetória acadêmica. Aos meus pais, Cleide e Sidnei, por todo o amor, dedicação e pelos ensinamentos que moldaram quem sou hoje. Vocês sempre foram e continuam sendo minhas maiores referências como pessoas. Ao meu irmão, Uillian, por estar presente durante toda essa caminhada, compartilhando momentos, apoiando e torcendo por mim.

Quero agradecer também a pessoa mais especial e incrível da minha vida, que permitiu que tudo isso fosse possível e em meio aos momentos bons e ruins, esteve do meu lado não me deixando desanimar. Minha Morena, minha gatona, minha esposa Gabriela "S2". Obrigado por estar presente comigo nesse momento tão especial depois de TANTO tempo!!

Aos meus amigos, meu muito obrigado por toda a parceria durante esses anos. Em especial ao Alex, que sempre esteve disposto a conversar e me apoiar nos momentos mais difíceis, muito antes mesmo do início da faculdade. Ao Chico e ao Gustavo, que dividiram comigo a rotina intensa entre trabalho e faculdade, tornando essa jornada muito mais leve com incentivo, companheirismo e muitas risadas.

Agradeço também à empresa Lógica E, em especial ao Bruno, Matheus e Ghybson que me auxiliaram no aprendizado durante quase sete anos da faculdade, e a todos os colegas de equipe que sempre contribuíram com suas experiências.

Também agradeço aos meus professores, pelos conhecimentos transmitidos ao longo do curso, e em especial ao meu orientador, Luis Carlos Martinhago Schlichting, pela orientação, disponibilidade e contribuição para o desenvolvimento deste trabalho.

Por fim, e acima de tudo o mais importante, agradeço a Deus, por dar sentido à minha vida e por colocar ao meu lado pessoas tão especiais, que fizeram parte desta conquista.

RESUMO

A impermeabilização por mantas asfálticas é amplamente utilizada na construção civil para garantir a estanqueidade de estruturas como piscinas, reservatórios e terraços. A verificação da integridade dessas mantas pode ser realizada por equipamentos que geram alta tensão, capazes de detectar descontinuidades por meio da ruptura dielétrica do ar. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo estudar o equipamento Vedadetector e desenvolver melhorias eletrônicas voltadas ao aumento da segurança operacional e da confiabilidade na detecção de falhas. Inicialmente, foi realizado o levantamento bibliográfico dos princípios envolvidos na impermeabilização, nos materiais dielétricos e na detecção de falhas por alta tensão. Em seguida, foram efetuadas medições elétricas para caracterização dos sinais gerados durante a ruptura dielétrica, possibilitando o desenvolvimento de um novo circuito de detecção baseado em isolamento elétrico, processamento digital utilizando o ESP32 e transmissão do aviso sonoro para fones de ouvido sem fio. Os resultados demonstraram que a implementação do isolamento elétrico eliminou a exposição do operador às tensões presentes no circuito original, enquanto o algoritmo desenvolvido foi capaz de medir a largura temporal dos pulsos e permitir o ajuste de sensibilidade, aumentando a confiabilidade da detecção e reduzindo a influência de descargas superficiais. Além disso, a comunicação *Bluetooth* apresentou funcionamento satisfatório durante os testes realizados, proporcionando uma sinalização sonora mais eficiente em ambientes com elevados níveis de ruído. Conclui-se que as melhorias propostas atenderam aos objetivos estabelecidos, contribuindo para o aumento da segurança do operador e da confiabilidade do equipamento, além de estabelecer uma base para futuras evoluções do sistema.

Palavras-chave: ESP32. Vedadetector. Ruptura dielétrica. Detecção de falhas. Segurança elétrica.

ABSTRACT

Asphalt waterproofing membranes are widely used in civil construction to ensure the watertightness of structures such as swimming pools, reservoirs, and terraces. The integrity of these membranes can be verified using high-voltage equipment capable of detecting discontinuities through air dielectric breakdown. In this context, this study aimed to investigate the Vedadetector equipment and develop electronic improvements focused on enhancing operational safety and fault detection reliability. Initially, a literature review was conducted to investigate the principles of waterproofing systems, dielectric materials, and high-voltage fault detection. Subsequently, electrical measurements were performed to characterize the signals generated during dielectric breakdown, enabling the development of a new detection circuit based on electrical isolation, digital signal processing using the ESP32, and wireless transmission of the audible warning to Bluetooth headphones. The experimental results demonstrated that the implementation of electrical isolation eliminated the operator's exposure to the high voltages present in the original circuit, while the proposed algorithm successfully measured pulse widths and enabled sensitivity adjustment, improving fault detection reliability and reducing the influence of surface discharges. Furthermore, Bluetooth communication operated satisfactorily during the tests, providing a more efficient audible warning in high-noise environments. It is concluded that the proposed improvements achieved the established objectives by increasing operator safety and improving the reliability of the equipment, while providing a foundation for future developments of the system.

Keywords: ESP32. Vedadetector. Dielectric breakdown. Fault detection. Electrical safety.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Concentração do campo elétrico e ruptura do dielétrico do ar	18
Figura 2 - Identificação de falha na manta	20
Figura 3 - Diagrama interno optoacoplador	21
Figura 4 - Diagrama de bloco funcional do ESP.....	23
Figura 5 - Conexão ESP32 com fone Bluetooth.....	24
Figura 6 - Circuito para estudo da caracterização do sinal	26
Figura 7 - Picos de tensão no potenciômetro	29
Figura 8 - Equipamento em bancada de teste.....	30
Figura 9 - Largura mínima de pulso de detecção	30
Figura 10 - Largura máxima de pulso de detecção	31
Figura 11 - Diagrama de blocos da estrutura do equipamento	32
Figura 12 - Teste de isolamento pós optoacoplador.....	34
Figura 13 - Fluxograma do código do ESP32.....	37
Figura 14 - Log de DEBUG do código do ESP32.....	39
Figura 15 - Adaptação do protótipo no equipamento.....	40
Figura 16 - Teste final em bancada	40
Figura 17 - Layout 3D da nova placa	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Resultado das medidas de largura de pulso.....	36
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A2DP	<i>Advanced Audio Distribution Profile</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADC	<i>Analog-to-Digital Converter</i> (Conversor Analógico-Digital)
ASTM	<i>AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS</i>
BLE	<i>Bluetooth Low Energy</i> (<i>Bluetooth</i> de baixo consumo)
BR/EDR	<i>Basic Rate / Enhanced Data Rate</i> (Bluetooth Classico)
DAC	<i>Digital-to-Analog Converter</i> (Conversor digital-analógico)
GPIO	<i>General Purpose Input/Output</i> (Entrada e saídas de propósito geral)
IFSC	Instituto Federal de Santa Catarina
LED	<i>Light Emitting Diode</i> (Diodo Emissor de Luz)
PCI	Placa de Circuito Impresso
PCNT	<i>Pulse Counter</i> (Contador de pulso)
SNK	<i>Sink</i>
SoC	<i>System on Chip</i> (Sistema em um Chip)
SRC	<i>Source</i>
Vpp	Volts pico a pico

SUMÁRIO

1	Introdução	12
1.1	Justificativa	13
1.2	Definição do Problema.....	13
1.3	Objetivo Geral.....	14
1.4	Objetivos Específicos	14
1.5	Estrutura do Trabalho	14
2	Fundamentação Teórica.....	16
2.1	Impermeabilização e sua importância na construção civil	16
2.2	Mantas asfálticas como sistemas impermeabilizantes.....	16
2.3	Materiais dielétricos	17
2.4	Deteção de falhas por ruptura dielétrica do ar	19
2.5	Técnicas de isolamento elétrico.....	20
2.5.1	Optoacopladores	21
2.5.2	Fontes DC-DC isoladas	22
2.6	Microcontrolador ESP32	22
3	Metodologia	25
3.1	Métodos Aplicados.....	25
3.2	Deteção do rompimento do dielétrico e características do sinal.....	26
3.3	Condicionamento de sinal	26
3.4	Isolamento elétrico.....	27
3.5	Integração do fone de ouvido sem fio	27
4	Apresentação dos resultados	28
4.1	Caracterização do sistema original.....	28
4.2	Caracterização dos pulsos de deteção.....	29
4.3	Desenvolvimento da arquitetura proposta	31
4.4	Implementação do isolamento elétrico.....	33
4.5	Implementação do sistema digital de deteção	35
4.6	Integração do fone de ouvido sem fio	36
4.7	Testes em bancada do circuito adaptado com bluetooth.....	39
4.8	Desenvolvimento do layout da placa de circuito impresso	42
5	Considerações Finais.....	43
5.1	Sugestões para trabalhos futuros.....	44
	Referências	45

1 INTRODUÇÃO

A impermeabilização de piscinas, reservatórios e terraços em edificações é uma etapa muito importante para garantir confiabilidade estrutural e evitar infiltrações. A impermeabilização é classificada de acordo com o material de maior quantidade na sua composição. Algumas técnicas utilizadas para esses fins são: aplicação de manta asfáltica, cimento modificado com polímero, membrana epoxídica e membrana de poliuretano, das quais são classificadas como cimentícios, asfálticos e poliméricos de acordo com o principal material usado na camada impermeável (ABNT, 2010).

Umas das técnicas utilizadas para garantir a estanqueidade em piscinas ou calhas, por exemplo, é o enchimento da mesma com água limpa por no mínimo 72h (ABNT, 2008). Após esse período, se não houver mudança no nível de água, a impermeabilização foi aplicada de maneira correta. Apesar de ser uma técnica precisa, há um grande desperdício de água, por isso há outras técnicas que utilizam a alta tensão para validar a camada de impermeabilização. Para isso, o equipamento gera uma diferença de potencial elétrico sobre a manta isolante, e quando há algum furo, que pode ser gerado pelo tipo de aplicação ou até mesmo durante a fabricação, essa diferença de potencial é capaz de gerar um arco voltaico sobre o furo, permitindo a identificação visual e correção do mesmo de forma rápida.

As empresas VEDACIT e Grupo Lógica E desenvolveram em conjunto um equipamento capaz de reproduzir o teste de estanqueidade com alta tensão. O equipamento consegue gerar o arco voltaico quando há um furo na manta impermeabilizante e sinalizar com aviso sonoro integrado para o operador que está executando o teste. Esse aviso sonoro necessita de um ajuste de sensibilidade que deve ser feito pelo operador, para poder distinguir um arco voltaico devido a um furo na manta de uma descarga elétrica sobre a superfície de teste.

Apesar do equipamento fazer todas as funções do teste de maneira correta, algumas dificuldades são relatadas pelo operador. As principais delas são os relatos de choque elétrico durante o manuseio do controle de ajuste de sensibilidade e a dificuldade na percepção do sinal sonoro.

Em virtude disso, este trabalho tem como objetivo estudar o equipamento Vedadetector e aplicar uma melhoria eletrônica no projeto, desde a isolamento elétrica

do controle de sensibilidade como também a mudança do sistema de sinalização sonora feito por um sinalizador sonoro.

1.1 Justificativa

O equipamento Vedadetector é um aparelho usado principalmente na indústria da construção civil. Ele foi projetado para auxiliar nos testes de estanqueidades de sistemas como piscinas, terraços de prédios, banheiros dentre outros. Uma das funções do equipamento é detectar até microfissuras por meio da eletricidade aplicada (Vedacit, c2026).

Apesar de ser um equipamento que já está em fase de utilização, alguns problemas são relatados pelo operador. Choques elétricos e dificuldade em ouvir o aviso sonoro são os principais e que exigem maior atenção para melhoria de projeto.

Com esse cenário, foi avaliada a necessidade de implementar uma solução para isolar o controle de ajuste de sensibilidade do equipamento e também uma forma de transmitir o aviso sonoro para um fone de ouvido sem fio. Com o fone de ouvido, teria uma diminuição da interferência de ruídos externos provenientes do ambiente de trabalho, e o motivo de ser sem fio seria justamente para evitar o choque elétrico com um novo ponto de contato entre o equipamento e o operador.

Deste modo, a utilização de um microcontrolador, como o ESP32 com uma fonte isolada, apresenta-se como uma alternativa interessante para a aplicação. O ESP32 tem o *Bluetooth* integrado que pode ser utilizado para transmissão do sinal sonoro para o fone de ouvido e detectar o sinal do arco voltaico. Esse estudo justifica-se pela necessidade de aplicar uma melhoria funcional em um produto que exige cuidados com a segurança do operador e confiabilidade na detecção de falhas em sistemas impermeabilizantes.

1.2 Definição do Problema

A operação de um equipamento que trabalha com alta tensão exige sempre muita atenção. O operador, além de ser instruído, precisa ter um equipamento que lhe passe segurança e total funcionalidade no campo em operação, tendo em vista que a área de teste, por ser geralmente em obras de construção civil, podem ser barulhentas.

Para isso acontecer, o equipamento precisa ter algumas melhorias na interface com o usuário, como isolamento da alta tensão e uma forma de ouvir melhor o aviso sonoro.

Desta forma, é possível melhorar um produto já funcional para trazer mais segurança para o operador e confiabilidade durante os testes, utilizando um microcontrolador ESP32?

1.3 Objetivo Geral

Realizar o estudo do equipamento Vedadetector para desenvolver uma transmissão de sinal sonoro para fone de ouvido sem fio e também isolar a alta tensão na interface com o usuário.

1.4 Objetivos Específicos

A seguir estão os objetivos específicos deste trabalho:

- a) revisar bibliografia sobre os princípios físicos e eletrônicos relacionados ao equipamento Vedadetector;
- b) analisar sinais característicos do equipamento;
- c) integrar circuito de isolamento para proteção do usuário;
- d) implementar o *firmware* para transmissão do sinal sonoro pelo ESP32;
- e) testar o protótipo em bancada;
- f) confeccionar um novo *layout* de placa de circuito impresso (PCI) com as modificações necessárias.

1.5 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está dividido em cinco capítulos.

No primeiro capítulo são apresentados, a introdução ao tema e os objetivos gerais para contextualizar a necessidade do desenvolvimento do trabalho. Já no segundo capítulo, é feita a fundamentação teórica acerca dos elementos utilizados como estudo e solução na aplicação do problema. Em seguida, no terceiro capítulo

apresenta-se a metodologia utilizada na pesquisa. A partir do quarto capítulo, são analisados os resultados obtidos com as soluções adotadas, e por fim, no quinto capítulo, as considerações finais juntamente com as sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.

O capítulo de Fundamentação Teórica apresenta os principais conceitos necessários para a compreensão deste trabalho. São abordados conceitos relacionados aos sistemas de impermeabilização, às mantas asfálticas, aos fenômenos de ruptura dielétrica e aos métodos de detecção de falhas por alta tensão.

2.1 Impermeabilização e sua importância na construção civil

A impermeabilização consiste em um conjunto de produtos e serviços destinados a conferir estanqueidade às diversas partes de uma construção, impedindo a passagem indesejada de água, fluidos e vapores (ABNT, 2010). Esse sistema atua como uma barreira de proteção para a edificação, preservando suas características estruturais, funcionais e estéticas ao longo de sua vida útil (Silva; Junior; Holanda, 2019).

A importância da impermeabilização está diretamente relacionada à durabilidade das construções. Segundo Verçoza (1991), a presença de umidade em elementos construtivos favorece o surgimento de manifestações patológicas, como mofo, eflorescências, corrosão de armaduras, deterioração de revestimentos e redução da resistência mecânica dos materiais. Além dos impactos técnicos, a ausência ou execução inadequada da impermeabilização pode resultar em elevados custos de manutenção corretiva, que de acordo com Righi (2009), esses valores podem ser até 15 vezes maiores quando não executado de maneira preventiva.

Para poder aplicar uma impermeabilização adequada, Silva, Junior e Holanda (2019) afirmam que é fundamental o estudo característico sobre os tipos de impermeabilização para cada tipo de obra.

2.2 Mantas asfálticas como sistemas impermeabilizantes

As coberturas são, de modo geral, as áreas das edificações que mais sofrem os efeitos do sol e da chuva. Nesses casos, mesmo uma argamassa ou concreto impermeável exige a proteção de uma membrana flexível, a qual acompanha o trabalho da estrutura, impedindo a infiltração de água por possíveis trincas e fissuras

(Vedacit, 2010). Um tipo de material recomendado para esse tipo de aplicação é a manta asfáltica. As mantas asfálticas são produtos impermeabilizantes pré-fabricados, à base de asfalto modificado com polímeros, estruturadas com filme de polietileno, véu de fibra de vidro ou não-tecido de filamentos contínuos de poliéster (Guarizo, 2008).

De acordo com Khode (2019), as membranas de impermeabilização devem atuar como isolantes elétricos para permitir a aplicação de métodos de detecção de falhas baseados em continuidade elétrica, para isso, um aspecto relevante das mantas asfálticas é seu comportamento dielétrico.

2.3 Materiais dielétricos

Os materiais dielétricos são materiais isolantes eletricamente, caracterizados pela ausência de elétrons livres capazes de conduzir corrente elétrica. Quando submetidos a um campo elétrico externo, esses materiais apresentam a capacidade de formar ou alinhar dipolos elétricos, fenômeno conhecido como polarização dielétrica. Essa característica permite que os dielétricos interfiram na distribuição do campo elétrico sem, entretanto, perder suas propriedades isolantes, sendo amplamente empregados em aplicações elétricas e eletrônicas, como capacitores e sistemas de isolamento elétrico (Junior; Rethwisch, 2016).

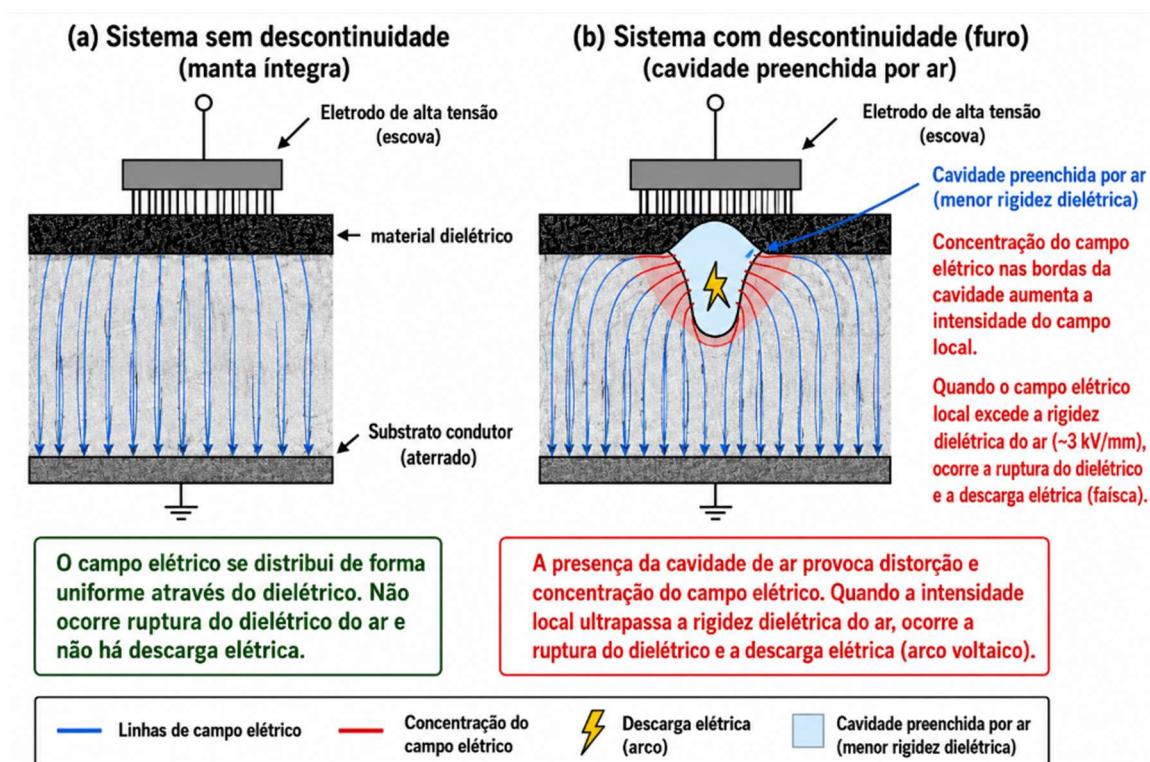
A polarização dielétrica ocorre quando um material isolante é submetido à ação de um campo elétrico externo, provocando o deslocamento ou alinhamento das cargas elétricas presentes em sua estrutura molecular. Em materiais polares, esse fenômeno ocorre pelo alinhamento dos dipolos elétricos permanentes, enquanto nos materiais apolares há a indução de dipolos elétricos em resposta ao campo aplicado. Em ambos os casos, a polarização gera um campo elétrico interno que se opõe parcialmente ao campo externo, reduzindo sua intensidade no interior do material (Halliday; Resnick; Walker, 2016).

Em sistemas submetidos a altas tensões, a polarização dos materiais dielétricos exerce papel fundamental na distribuição do campo elétrico. A polarização resulta do deslocamento relativo entre cargas positivas e negativas presentes no material quando este é submetido a um campo elétrico externo (Kuffel; Zaengl; Kuffel, 2000). Esse fenômeno pode ocorrer por diferentes mecanismos, incluindo a

polarização eletrônica, iônica, dipolar e o acúmulo de cargas nas interfaces entre diferentes materiais dielétricos, e a forma como essa polarização ocorre influencia diretamente a distribuição do campo elétrico no interior do material e, consequentemente, sua capacidade de suportar elevadas tensões sem que ocorra a ruptura dielétrica (Kuffel; Zaengl; Kuffel, 2000).

A distribuição do campo elétrico em sistemas compostos por diferentes materiais dielétricos depende diretamente de suas propriedades elétricas, principalmente da permissividade relativa. Kuffel, Zaengl e Kuffel (2000) destacam que diferenças de permissividade entre materiais podem provocar distorções na distribuição do campo elétrico, especialmente nas regiões de interface. Além disso, a presença de pequenas cavidades preenchidas por ar, decorrentes de descontinuidades no material isolante, pode intensificar o campo elétrico local, tornando essas regiões mais suscetíveis à ocorrência de descargas elétricas. Nessas condições, o aumento localizado da intensidade do campo elétrico pode provocar a ruptura dielétrica do meio isolante quando seu limite de suportabilidade é excedido, como pode ser visto melhor na Figura 1.

Figura 1 - Concentração do campo elétrico e ruptura do dielétrico do ar



Fonte: Adaptado de Kuffel, Zaeng e Kuffel (2000)

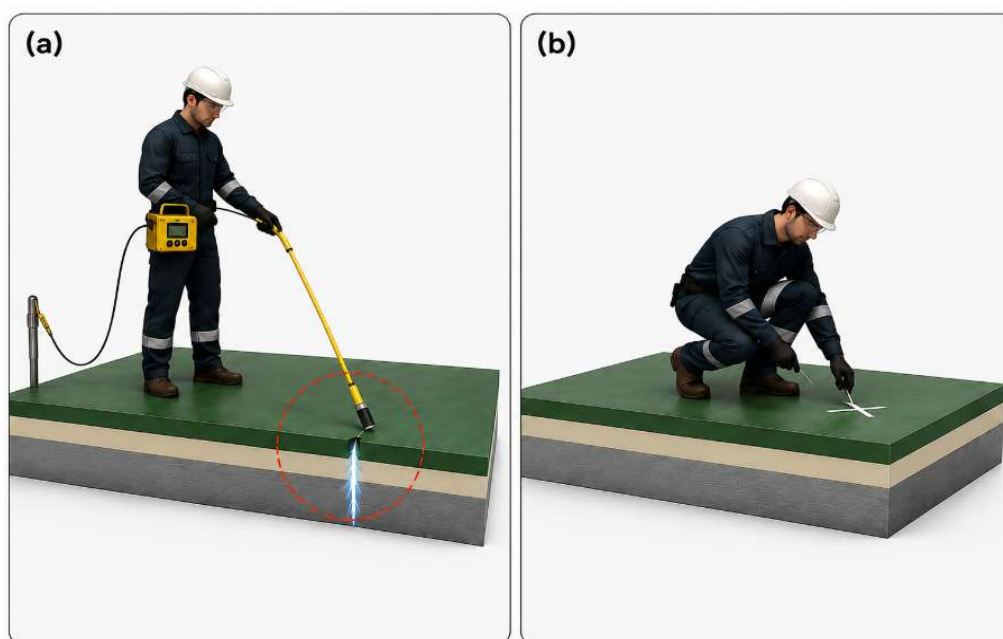
A capacidade de um material dielétrico suportar a aplicação de um campo elétrico sem perder suas propriedades isolantes é conhecida como rigidez dielétrica. Quando o campo elétrico aplicado ultrapassa esse limite crítico, ocorre a ruptura dielétrica do material, permitindo a condução de corrente elétrica através do meio anteriormente isolante. O valor da rigidez dielétrica depende das propriedades do material, da geometria do sistema e das condições ambientais, como pressão, temperatura e umidade (Kuffel; Zaengl; Kuffel, 2000).

2.4 Detecção de falhas por ruptura dielétrica do ar

Um método para a detecção de falhas em sistemas impermeabilizante é detecção de descontinuidade elétrica. De acordo com a norma D4787-13 ASTM (2018), esta técnica descreve a utilização de um equipamento testador de faísca de alta tensão, podendo ser tensão contínua ou pulsada.

A norma NBR16172 (ABNT,2014) define o teste utilizando aparelhos com tensão acima de 5 kV para isolantes com espessuras de mais de 1mm, sendo necessário aterrar devidamente o aparelho e efetuar o ensaio sobre toda a superfície desejada, onde a velocidade máxima de varredura seja de 20 cm/s.

O equipamento aplica uma alta tensão sobre a superfície isolante da manta; caso exista uma descontinuidade como furo ou falha de aplicação (Figura 2.a), o ar presente na lacuna perde sua capacidade isolante, permitindo a passagem de um arco voltaico (faísca) que fecha o circuito elétrico com o aterramento. Após isso, é realizado a marcação no local da falha (Figura 2. b).

Figura 2 - Identificação de falha na manta

Fonte: Adaptado de ASTM D 4787 (2014)

2.5 Técnicas de isolamento elétrico.

Em equipamentos eletrônicos que possuem estágios de potência e circuitos de processamento operando em diferentes níveis de tensão, a comunicação entre esses circuitos geralmente requer técnicas de isolamento galvânico. Esse tipo de isolamento permite a transmissão de sinais entre dois circuitos sem estabelecer uma conexão elétrica direta, aumentando a segurança do sistema, protegendo os circuitos de baixa tensão contra sobretensões e preservando a integridade dos sinais (Würth Elektronik, 2026; Texas Instruments, 2019).

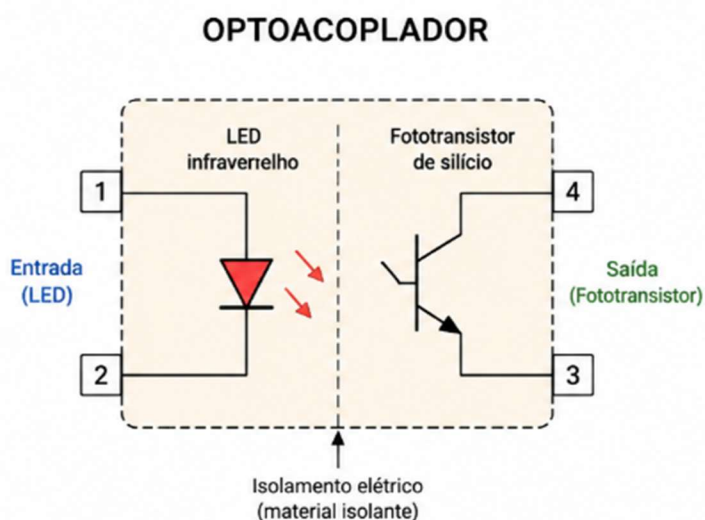
Segundo Rashid (2014), essa isolação pode ser realizada por meio de transformadores de pulso ou optoacopladores, permitindo o acionamento adequado dos dispositivos de potência sem ligação elétrica direta com o circuito de controle. Mean Well Brasil (2026) também cita outras técnicas para isolamento muito utilizadas no meio industrial para atender normas e proteções do usuário. São elas: transformador isolador, fontes DC-DC isoladas e isoladores digitais, onde cada técnica possui características distintas com relação a tensão de isolação, largura de banda e latência.

Dessa forma, técnicas de isolamento elétrico são empregadas para proteger tanto os circuitos eletrônicos quanto os operadores, reduzindo a propagação de surtos elétricos. No presente trabalho, foram empregadas duas técnicas distintas: o isolamento de sinais por optoacoplador e o isolamento da alimentação por uma fonte DC-DC isolada.

2.5.1 Optoacopladores

Entre as técnicas empregadas para o isolamento de sinais em circuitos eletrônicos, destacam-se os optoacopladores. De acordo com Rashid (2014), esses dispositivos são constituídos pela associação de um diodo emissor de luz infravermelha (LED) e um fototransistor de silício encapsulados em um mesmo invólucro, porém separados por um material isolante. Quando o LED é polarizado, a luz emitida incide sobre o fototransistor, fazendo com que o fototransistor altere seu estado de condução em resposta à incidência luminosa, permitindo que o sinal seja transferido para o circuito de saída sem que exista contato elétrico direto entre os dois circuitos, como pode ser visto na figura 3.

Figura 3 - Diagrama interno optoacoplador



Fonte: Adaptado de Rashid (2014)

As características elétricas dos optoacopladores variam conforme o dispositivo empregado, sendo parâmetros como tensão de isolamento, tempo de propagação e velocidade de operação fatores importantes para a seleção do componente. O optoacoplador 6N137, por exemplo, apresenta tensão de isolamento de 5kV entre os circuitos de entrada e saída e tempo de propagação típico da ordem de dezenas de nanossegundos, características que permitem a transmissão de sinais com reduzido atraso entre os estágios isolados. Dessa forma, esse dispositivo é indicado para aplicações que exigem elevada velocidade de resposta associada ao isolamento galvânico (Vishay, 2024).

2.5.2 Fontes DC-DC isoladas

Além do isolamento dos sinais de controle, também é necessário garantir que a alimentação dos circuitos eletrônicos permaneça eletricamente independente do circuito de potência. Para essa finalidade, são empregadas fontes DC-DC isoladas, cuja transferência de energia ocorre por meio de um transformador operando em alta frequência. Segundo Pressman, Billings e Morey (2009) a utilização de transformadores em fontes chaveadas permite a obtenção de uma ou mais tensões de saída eletricamente isoladas a partir de uma única fonte de alimentação. Nesse tipo de conversor, a energia é inicialmente convertida em sinais de alta frequência, transferida magneticamente pelo transformador e posteriormente retificada e filtrada na saída. Como não existe continuidade elétrica entre os enrolamentos primário e secundário, a transferência de energia ocorre sem conexão condutiva direta entre os circuitos.

No presente trabalho, uma fonte DC-DC isolada foi utilizada para alimentar o ESP32. Essa configuração mantém o circuito de processamento digital eletricamente isolado do estágio de alta tensão.

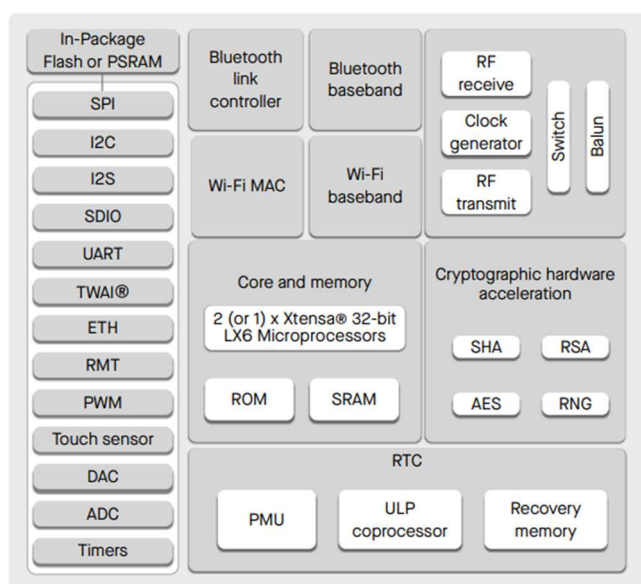
2.6 ESP32

O ESP32 é amplamente adotado na indústria e em projetos acadêmicos devido a seu custo-benefício. O dispositivo oferece alto poder de processamento e conectividade sem fio integrada, além de incluir Wi-Fi e *Bluetooth* no mesmo chip,

juntamente com integração de antenas e filtros, o que reduz o espaço ocupado na placa de circuito impresso e a complexidade do hardware (Espressif, 2026a).

O ESP32 é um sistema em chip (SoC – System on Chip) desenvolvido pela Espressif Systems, projetado para aplicações embarcadas que exigem capacidade de processamento, conectividade sem fio e integração de periféricos em um único dispositivo. O microcontrolador opera em uma faixa de alimentação entre 2,3 V e 3,6 V, sendo recomendado o uso de 3,3 V para garantir sua operação adequada. Além disso, integra diversos recursos de hardware que podem ser vistos na Figura 4, como conversores analógico-digitais (ADC), conversores digital-analógicos (DAC), interfaces de comunicação serial e módulos de conectividade sem fio (Espressif, 2025).

Figura 4 - Diagrama de bloco funcional do ESP



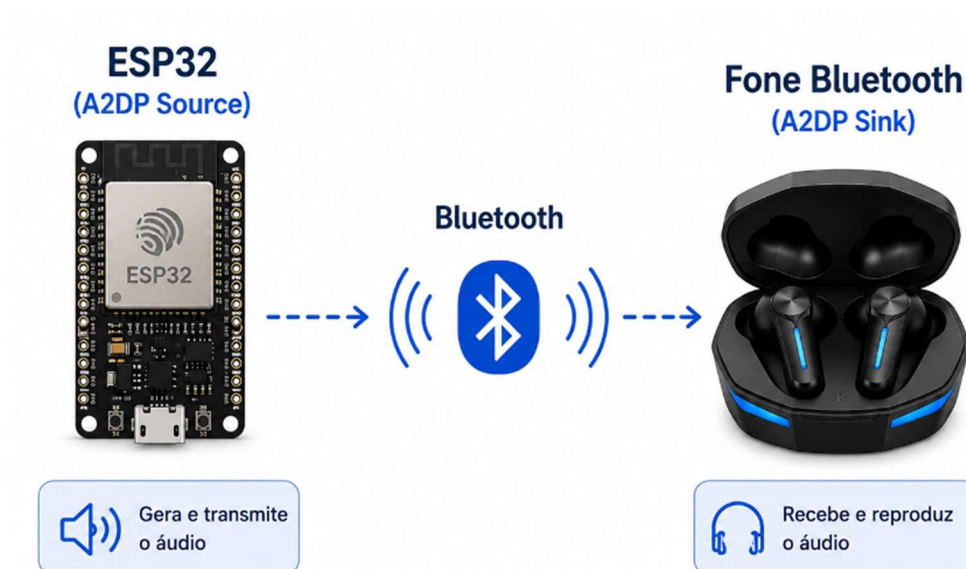
Fonte: Espressif (2025)

O ESP32 também possui um controlador *Bluetooth* integrado do tipo dual-mode, compatível com *Bluetooth* Classic chamado de *Basic Rate / Enhanced Data Rate* (BR/EDR) e *Bluetooth Low Energy* (BLE). Essa característica permite a implementação de aplicações de comunicação sem fio para transferência de dados, monitoramento remoto e transmissão de áudio, sem a necessidade de módulos externos adicionais (Espressif, 2025).

Para aplicações de áudio, o *Bluetooth Classic* disponibiliza o perfil Advanced Audio Distribution Profile (A2DP), responsável pela transmissão de áudio

digital de alta qualidade entre dispositivos. No modelo de uso do A2DP, o dispositivo pode assumir dois papéis distintos: o de *Source* (SRC), quando atua como a fonte que transmite o fluxo de áudio digital, ou o de *Sink* (SNK), quando funciona como o receptor do sinal, como ocorre em fones de ouvido ou caixas de som sem fio, como pode ser visto na Figura 5 (Bluetooth SIG, 2023).

Figura 5 - Conexão ESP32 com fone *Bluetooth*



Fonte: do autor (2026)

Outro periférico dedicado importante do ESP32 é denominado *Pulse Counter* (PCNT), projetado para detectar e contabilizar as bordas de subida e/ou descida de sinais digitais. Cada unidade do PCNT possui dois canais independentes, cada um com uma entrada para o sinal de pulsos e outra para um sinal de controle, permitindo configurar diferentes comportamentos para as bordas detectadas. Além disso, o periférico dispõe de um filtro digital de hardware que possibilita ignorar pulsos de curta duração, reduzindo a influência de ruídos e transitórios indesejados presentes no sinal de entrada. Quando esse filtro é habilitado, todos os pulsos com duração inferior ao tempo configurado são automaticamente descartados, não produzindo qualquer efeito sobre o contador (Espressif, 2026b).

3 METODOLOGIA

O presente trabalho caracteriza-se como uma pesquisa de natureza aplicada, com abordagem qualitativa e quantitativa, de caráter exploratório e experimental. A pesquisa foi desenvolvida por meio de um estudo de caso aplicado ao equipamento Vedadetector, utilizado na detecção de descontinuidades em mantas asfálticas. Inicialmente, foi realizada uma revisão teórica com o objetivo de compreender os princípios de funcionamento do equipamento e os fenômenos físicos envolvidos. Em seguida, procedeu-se à análise prática do equipamento, incluindo a realização de medições elétricas para caracterização dos sinais gerados durante a detecção de falhas. A partir dessas etapas, foram desenvolvidas e testadas soluções para a melhoria do sistema, com validação realizada por meio de testes em bancada.

3.1 Métodos Aplicados

A implementação da melhoria no produto foi baseada no modelo já existente do equipamento Vedadetector. Para isso, foi realizado o estudo mais aprofundado sobre o funcionamento eletrônico e em quais partes dos circuitos poderiam ser reformulados para atender a especificação de maior segurança e confiabilidade dos testes.

Em reuniões com a empresa Lógica E, baseado nos conhecimentos e técnicas já implantadas anteriormente no desenvolvimento do equipamento, foram definidos alguns passos para estudo e aplicação das melhorias.

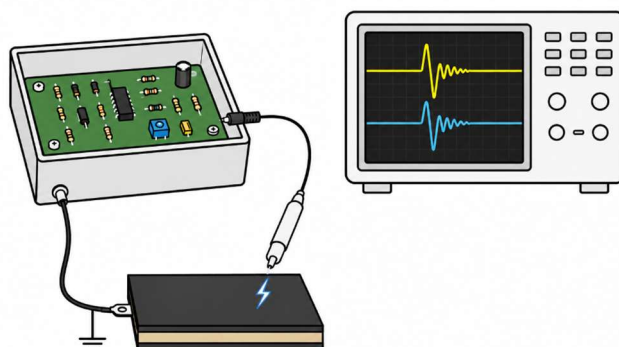
- a) identificar o circuito que faz o reconhecimento do sinal de detecção do rompimento do dielétrico;
- b) caracterizar o sinal elétrico utilizando o osciloscópio, visando obter o período, largura de pulso e nível de tensão;
- c) implementar isolamento elétrico para proteção do operador;
- d) condicionar o sinal para torná-lo digital;
- e) integrar o equipamento com fones de ouvido sem fios.

Durante o desenvolvimento, foram adotados critérios para validação do sistema, incluindo a análise da resposta do circuito aos pulsos detectados, a verificação da eficiência do isolamento elétrico e a avaliação da confiabilidade da transmissão do sinal de áudio. Os resultados obtidos a partir desses testes serviram como base para ajustes e otimizações do sistema proposto.

3.2 Detecção do rompimento do dielétrico e características do sinal

Para identificar o circuito, foi necessário avaliar o diagrama eletrônico do circuito original. O circuito era totalmente analógico, utilizando apenas resistores, diodo e um potenciômetro para fazer a detecção de pulsos e acionar um sinalização sonora. Foi utilizado um equipamento funcional em uma bancada de testes simulando os rompimentos do dielétrico. As medições foram realizadas utilizando um osciloscópio digital, conforme a Figura 6, e os sinais obtidos foram utilizados para determinar parâmetros relevantes para o desenvolvimento da solução proposta.

Figura 6 - Circuito para estudo da caracterização do sinal



Fonte: do autor (2026)

3.3 Condicionamento de sinal

Para viabilizar o processamento digital do sinal proveniente do circuito de detecção, foi necessária reduzir a tensão à um nível que o microcontrolador fosse capaz de realizar a aquisição e o tratamento dos pulsos da ruptura do dielétrico. Além do processamento em tempo real, o sistema deveria possibilitar a transmissão das

informações por meio de comunicação sem fio, permitindo a implementação de um dispositivo remoto de sinalização. Foi feito um estudo de possíveis microcontroladores que atendessem, sendo necessário um microcontrolador com rápido poder de processamento, que possibilitasse uma comunicação sem fio já integrada e que tivesse um ótimo custo-benefício.

3.4 Isolamento elétrico

Para proteção do operador, foram aplicadas duas técnicas para isolamento da alta tensão que o equipamento fornece. A primeira delas foi a utilização de um optoacoplador e em seguida uma fonte isolada, pois em alguns momentos de trabalho com o equipamento, o operador tinha contato direto com componentes energizados que podiam lhe causar choque elétrico. Após a implementação do isolamento, foram realizados ensaios para validar a redução dos níveis de tensão nos pontos acessíveis ao operador.

3.5 Integração do fone de ouvido sem fio

A integração do fone de ouvido sem fio foi realizada com o objetivo de melhorar a percepção da sinalização de detecção de falhas pelo operador em ambientes ruidosos. Para isso, foram pesquisados modelos *Bluetooth* de baixo custo, com boa autonomia de bateria e com tecnologia que ajude a reduzir barulho externo. Para validação do circuito com o fone de ouvido, foi testado a conexão com o microcontrolador e a transmissão de áudio. Após a validação da comunicação, o sistema foi adaptado para transmitir um sinal sonoro sempre que o microcontrolador identificasse um pulso do rompimento do dielétrico.

4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

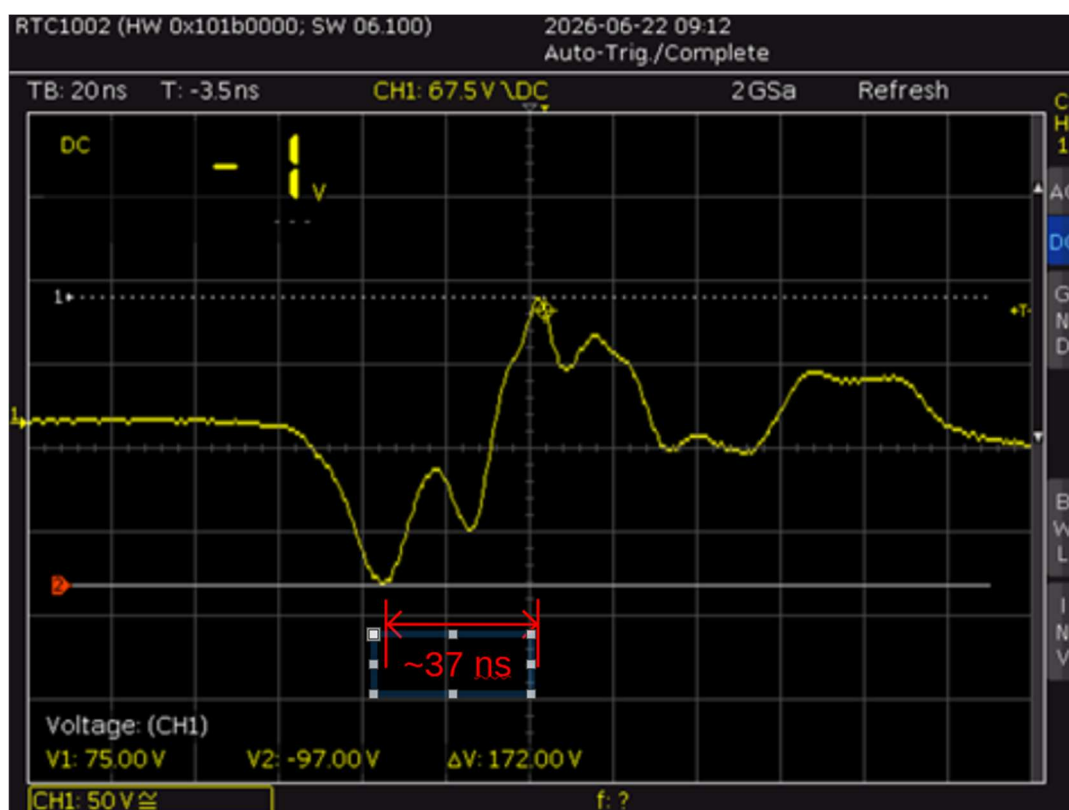
Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos durante o desenvolvimento da proposta de melhoria para o equipamento Vedadetector. Inicialmente são apresentados os resultados referentes à análise do sistema original, seguidos da caracterização dos sinais envolvidos na detecção de falhas em mantas impermeabilizantes. Em seguida são descritas as soluções desenvolvidas para condicionamento de sinal, isolamento elétrico e implementação do sistema digital de detecção.

4.1 Caracterização do sistema original

A primeira etapa do desenvolvimento consistiu na análise do circuito responsável pela detecção de falhas presente no equipamento original. Verificou-se que o sistema utilizava uma arquitetura totalmente analógica composta por resistores, diodos e um potenciômetro, dos quais atuavam na limitação de corrente e na formação de um divisor de tensão utilizado para o acionamento de um sinalizador sonoro.

Durante as medições realizadas em bancada foi observado que o potenciômetro utilizado para ajuste da sensibilidade estava submetido a níveis elevados de tensão, sendo registrados valores de 172 Vpp. Esses picos de tensão ocorrem de forma periódica, com frequência aproximada de 21 Hz, correspondente à taxa de repetição dos pulsos de alta tensão gerados pelo equipamento. A Figura 7 apresenta a forma de onda com alguns picos de alta tensão observados durante a medição.

Figura 7 - Picos de tensão no potenciômetro



Fonte: do autor (2026)

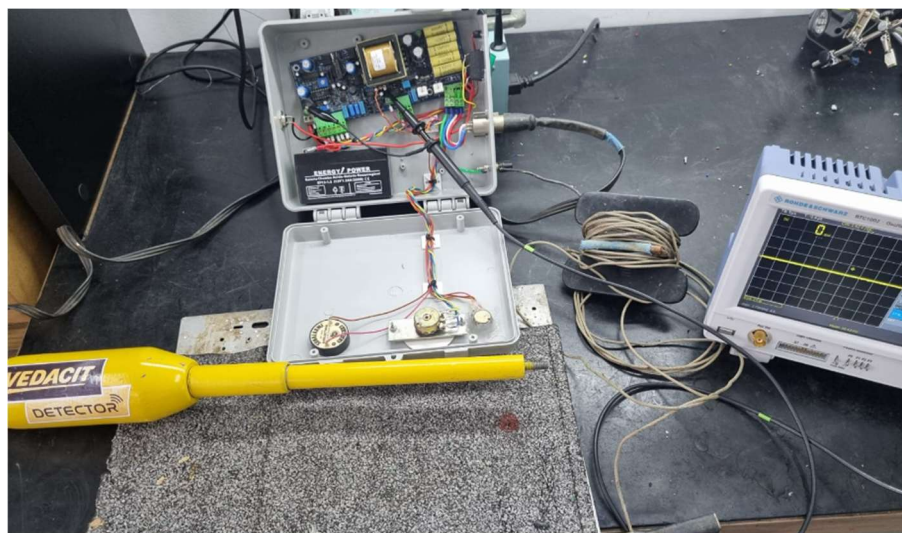
Esse resultado auxilia na compreensão dos relatos de choques elétricos reportados pelos operadores durante a utilização do equipamento, uma vez que o ajuste de sensibilidade exigia contato direto do operador com o potenciômetro que estava submetido a pulsos de alta tensão provenientes do circuito de detecção.

A análise do circuito original também permitiu identificar a ausência de isolamento galvânico entre o estágio de detecção e os elementos manipulados pelo operador, motivando o desenvolvimento de uma nova arquitetura voltada ao aumento da segurança elétrica.

4.2 Caracterização dos pulsos de detecção

Após a análise do circuito original, foram realizadas medições com o auxílio de um osciloscópio para caracterizar os pulsos gerados durante a detecção do rompimento dielétrico. Os ensaios foram realizados em bancada, seguindo a estrutura vista na Figura 8, utilizando amostras de manta impermeabilizante sem falhas e amostras contendo descontinuidades (furos).

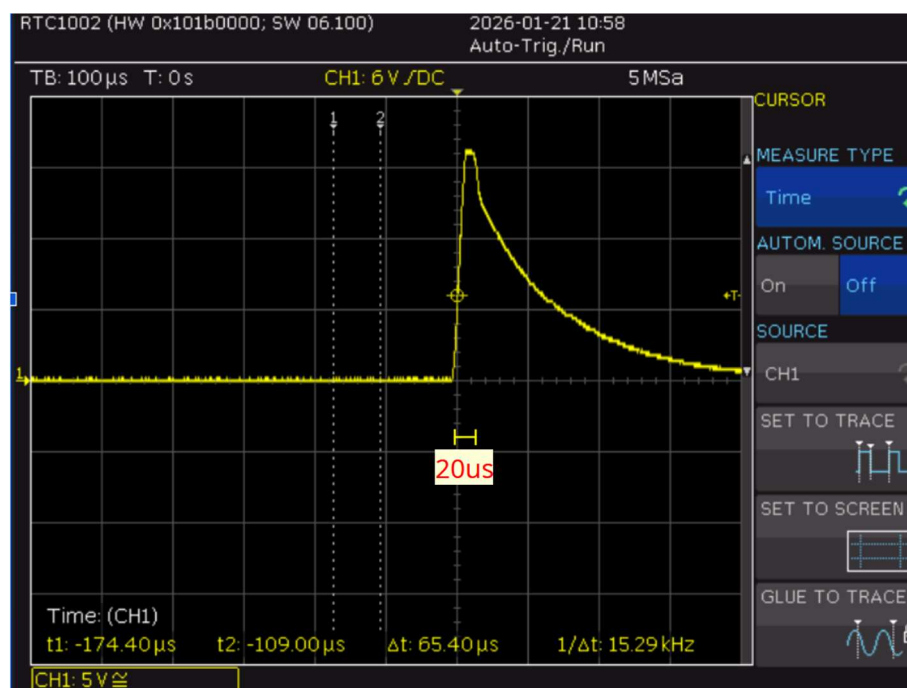
Figura 8 - Equipamento em bancada de teste



Fonte: do autor (2026)

Observou-se que a duração dos pulsos varia de acordo com as condições do material utilizado na impermeabilização. Para mantas com furos menores e aplicação de tensão mínima do equipamento, a menor largura do pulso de detecção ficou em aproximadamente $20\ \mu\text{s}$, como pode ser visto na Figura 9.

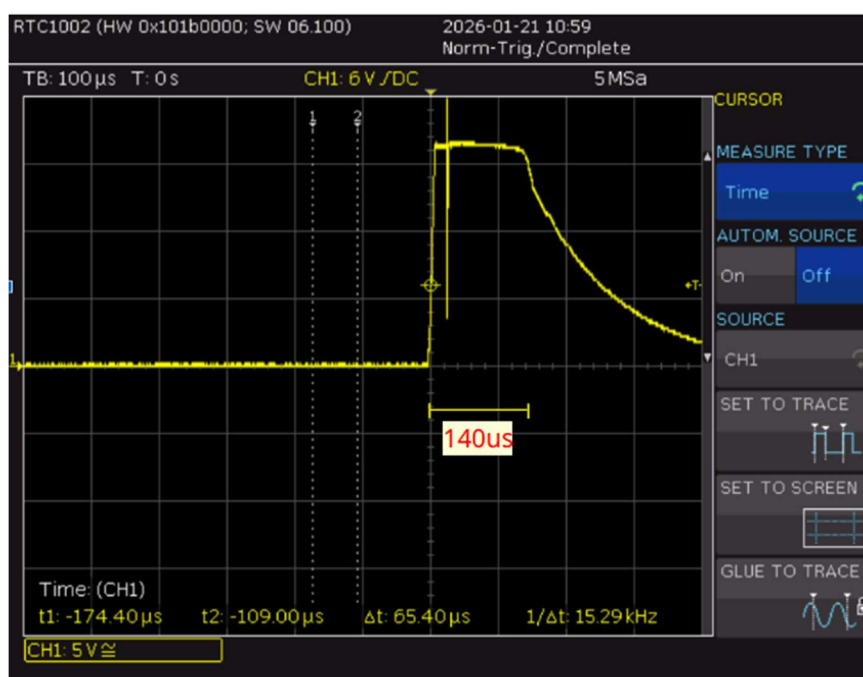
Figura 9 - Largura mínima de pulso de detecção



Fonte: do autor (2026)

Já com furos maiores e máxima tensão, a largura ficou próxima de 140 μs conforme Figura 10.

Figura 10 - Largura máxima de pulso de detecção



Fonte: do autor (2026)

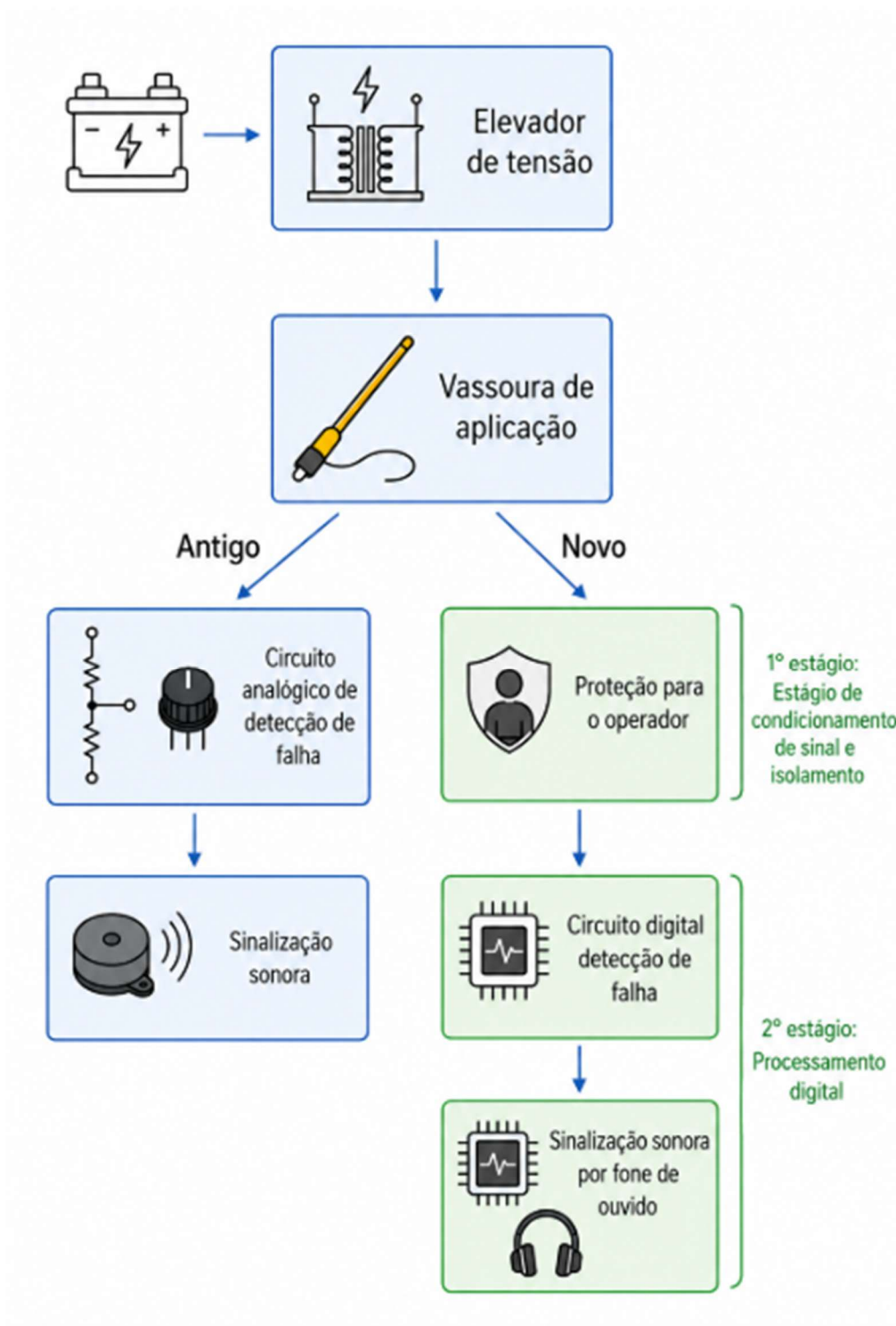
Observou-se ainda que em alguns momentos, há descargas superficiais sobre a manta, que geram diferentes larguras de pulso nos testes em bancada, e que podem variar em função de fatores como tensão aplicada, umidade e características do material testado. Dessa forma, além da detecção da largura do pulso, torna-se necessário definir um valor limiar que permita distinguir entre descargas superficiais e descargas efetivamente associadas a falhas na manta impermeabilizante.

4.3 Desenvolvimento da arquitetura proposta

Com base nos dados obtidos, foi possível propor uma solução de circuito para a detecção dos pulsos gerados pelo equipamento. Ressalta-se que o circuito completo não pode ser apresentado integralmente, em função de restrições relacionadas a segredo industrial. No entanto, a Figura 11 apresenta um diagrama de

blocos, descrevendo as principais etapas e características de como era o sistema antigo e como ficará o sistema novo após os testes em protótipo.

Figura 11 - Diagrama de blocos da estrutura do equipamento



A nova arquitetura foi desenvolvida com três objetivos principais:

- a) aumentar a segurança do operador;
- b) realizar a detecção digital dos pulsos;
- c) permitir sinalização sonora sem fio para o operador.

O sistema proposto passou a ser dividido em dois estágios principais: o estágio de condicionamento e isolamento do sinal e o estágio de processamento digital.

No primeiro estágio, os pulsos provenientes do circuito de alta tensão são limitados e protegidos por dispositivos de proteção contra sobretensão. Em seguida, o sinal é transferido para o estágio digital através de um optoacoplador, responsável por fornecer isolamento elétrico entre o circuito de detecção e o sistema de processamento.

No segundo estágio, o ESP32 realiza a aquisição dos pulsos e a medição de sua largura temporal, utilizando interrupções de entrada digital para garantir a detecção de eventos com duração da ordem de microssegundos.

4.4 Implementação do isolamento elétrico

Uma das principais melhorias propostas neste trabalho foi a implementação de isolamento elétrico entre o circuito de detecção e os elementos acessíveis ao operador. Durante a análise do sistema original foram observados níveis superiores a 172 Vpp no potenciômetro utilizado para ajuste da sensibilidade. Como esse componente precisava ser manipulado durante a operação do equipamento, essa condição representava um potencial risco ao operador.

Com o objetivo de aumentar a segurança do sistema, foi desenvolvida uma nova arquitetura baseada na utilização de isolamento elétrico entre o estágio de detecção e o estágio de processamento. Para essa finalidade foi utilizado um optoacoplador modelo 6N137, responsável por transmitir a informação do pulso detectado ao microcontrolador sem estabelecer conexão elétrica direta entre os circuitos. A escolha do modelo 6N137 foi motivada por algumas de suas características, pois ele possui isolamento elétrico de até 5000 V entre entrada e saída, e além disso, apresenta baixo atraso de propagação na comutação dos estados

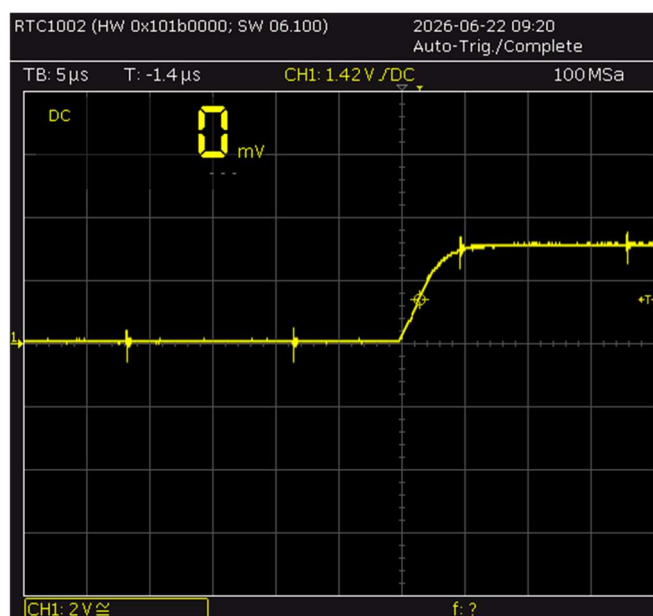
lógicos, com valores inferiores a 100 ns, permitindo a transferência rápida dos pulsos detectados sem comprometer o desempenho do circuito.

Além do optoacoplador, foi utilizada uma fonte DC-DC isolada do modelo URB2405YMD-5WR3 do fabricante HI-LINK para alimentação do circuito digital. Dessa forma, o microcontrolador, o circuito de ajuste de sensibilidade e os demais elementos de interface passaram a operar com um referencial elétrico totalmente isolado da etapa de alta tensão, garantindo segurança do operador e do circuito eletrônico.

Outra modificação importante foi a redefinição da função do potenciômetro de ajuste. No sistema original, esse componente fazia parte do circuito analógico submetido aos pulsos de alta tensão. Na nova arquitetura, o potenciômetro passou a atuar apenas como interface de configuração para o operador, sendo conectado diretamente ao microcontrolador que opera em 3,3 V.

Após a implementação do isolamento, foram realizadas novas medições elétricas, verificando-se que os níveis de tensão presentes no circuito acessível ao operador passaram a permanecer limitados a 3,3 V. O resultado pode ser visto na Figura 12, onde mostra o nível de tensão após o optoacoplador, no instante da detecção de uma descarga elétrica identificada pelo circuito. Dessa forma, foi possível eliminar a exposição direta do usuário aos pulsos de alta tensão do circuito original, aumentando significativamente a segurança ao operar o equipamento.

Figura 12 - Teste de isolamento pós optoacoplador



Fonte: do autor (2026)

4.5 Implementação do sistema digital de detecção

Após a implementação do isolamento elétrico, foi desenvolvido o sistema digital responsável pelo reconhecimento dos pulsos gerados durante a detecção de falhas na manta impermeabilizante.

Para essa aplicação foi selecionado o ESP32-WROOM32, que foi definido em conjunto com a empresa Logica E, pois é um microcontrolador de ampla adoção insutrial, viabilidade econômica e robustez de processamento, com inúmeros periféricos, incluindo WI-FI e *Bluetooth*.

O sinal proveniente do estágio de isolamento é aplicado diretamente a uma entrada digital do ESP32, operando em níveis compatíveis com a lógica de 3,3 V. O módulo PCNT (*Pulse Counter*) do ESP32 foi utilizado para detectar o início do pulso e a interrupção GPIO (*General Purpose Input/Output*) para determinar o término. A duração do pulso é obtida pela diferença entre os tempos registrados de início e fim. Além da identificação das bordas de interesse, o periférico permitiu a utilização de um filtro digital de hardware configurado para rejeitar pulsos inferiores a 20 μ s, reduzindo a influência de ruídos gerados pelo sistema de alta tensão. Esse valor de 20 μ s foi definido devido aos resultados observados durante os testes de detecção, que tinha uma a faixa de 20 μ s a 140 μ s.

Diferentemente do sistema analógico original, o potenciômetro passou a ser utilizado para alterar o limiar de largura de pulso utilizado pelo algoritmo de decisão. Essa alteração mostrou-se necessária devido às descargas superficiais que podem ocorrer devido a variação de umidade na manta, e que geram uma alteração na largura dos pulsos. Dessa forma, o operador sempre precisa fazer um ajuste de sensibilidade no próprio ambiente de teste de forma visual.

Para validar o algoritmo, foi simulado pulsos entre 20 e 140 μ s de duração com um gerador de função. Dessa forma foi possível observar se o ESP32 conseguia fazer a leitura dos pulsos de maneira correta. Na Tabela 1, para cada duração de pulso, é apresentada a média de 20 amostras lidas.

Tabela 1- Resultado das medidas de largura de pulso

Duração do pulso (μs)	Valor lido pelo algoritmo (μs)	Erro de medida (%)
20	20,6	3,00
40	40,3	0,75
60	60,2	0,33
80	80,3	0,37
100	100,3	0,30
120	120,1	0,08

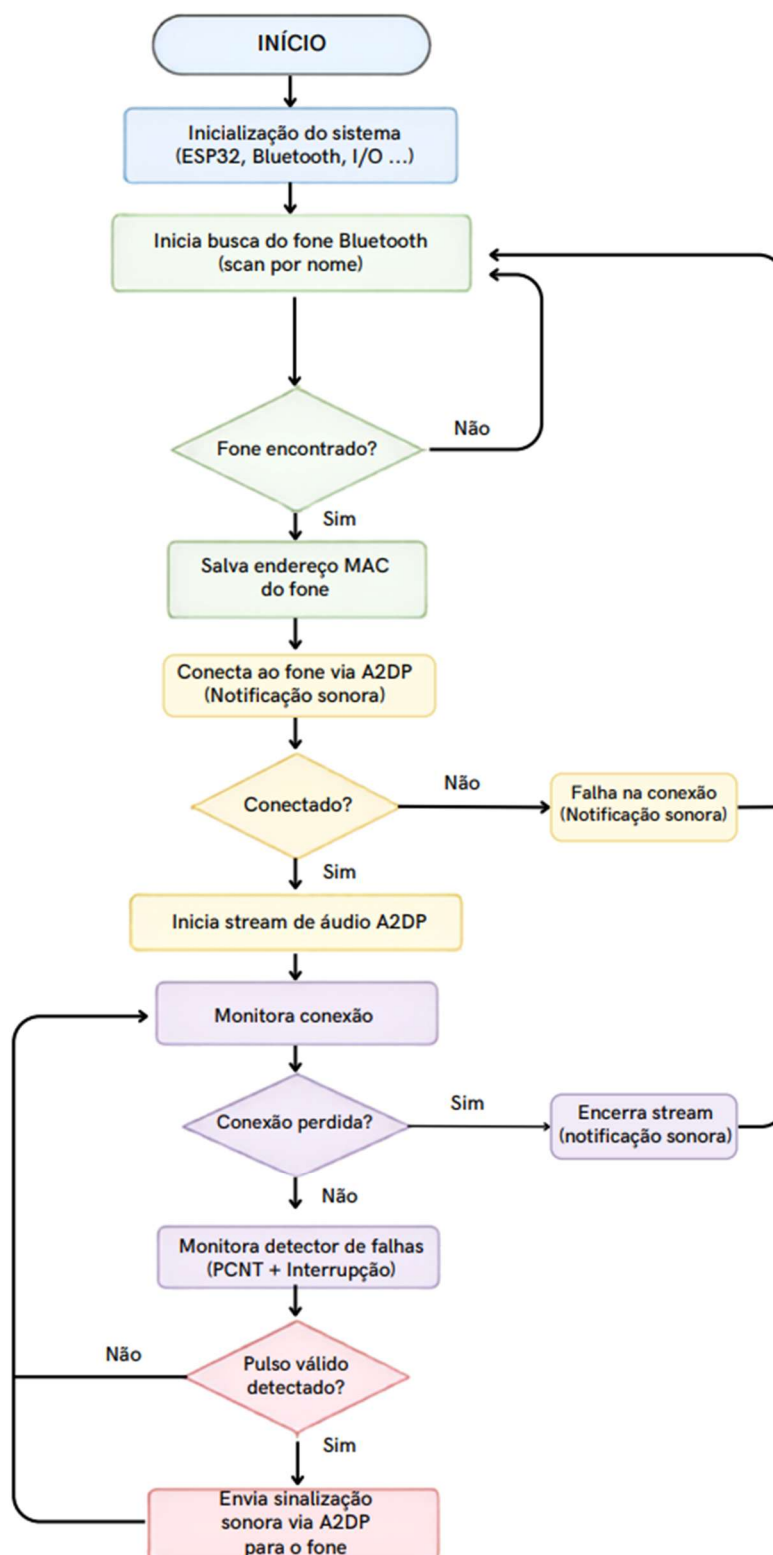
Fonte: do autor (2026)

4.6 Integração do fone de ouvido sem fio

Após a implementação do sistema digital de detecção, foi desenvolvida a comunicação sem fio entre o equipamento e um fone de ouvido Bluetooth utilizando o protocolo A2DP (Advanced Audio Distribution Profile). O modelo de fone escolhido foi o Lenovo GM2 pro, por ele ser um modelo intra-auricular e duração de bateria de 5h com apenas 1h de carga.

Após a escolha do modelo de fone, foi iniciado a programação do ESP32 para fazer a conexão com o fone. Na Figura 13 é apresentado o fluxograma do código.

Figura 13 - Fluxograma do código do ESP32



Fonte: do autor (2026)

Como pode ser visto no fluxograma da figura 13, inicialmente, o ESP32 faz a inicialização de todos os periféricos utilizados, em seguida realiza uma busca pelos dispositivos *Bluetooth* disponíveis e compara os nomes encontrados com o dispositivo

previamente definido. Após localizar o fone de ouvido, seu endereço MAC é armazenado e é iniciado o processo de conexão. Uma vez estabelecida a conexão, o firmware inicia o fluxo de transmissão de áudio e passa a monitorar continuamente o estado da conexão *Bluetooth*. Caso a conexão seja perdida, o sistema interrompe a transmissão e retorna automaticamente ao modo de busca, realizando uma nova tentativa de conexão sem intervenção do operador. Para notificar o operador, o próprio fone emite um sinal sonoro quando faz a conexão e desconexão com o dispositivo fonte. Paralelamente, o microcontrolador monitora os pulsos provenientes do circuito de detecção de falhas. Quando um pulso válido é identificado pelo algoritmo de decisão, o ESP32 transmite um sinal sonoro ao fone de ouvido por meio do perfil A2DP, permitindo que o operador receba a indicação da detecção da falha de forma audível e com intensidade regulável, o que permite trabalhar em ambientes com maior nível de barulho.

Os testes realizados demonstraram que o sistema foi capaz de localizar automaticamente o fone de ouvido desejado. Após a localização do fone, foi feito o teste para estabelecer a conexão *Bluetooth* e realizar a reconexão em casos de perda de enlace. Na Figura 14 é possível ver que o sistema conseguiu recuperar a conexão após o religamento do fone de ouvido.

Figura 14 - Log de DEBUG do código do ESP32

```

I (2297) BT_SCAN: Iniciando descoberta...
I (2297) BT_SCAN: Scan Bluetooth iniciado
I (14697) BT_SCAN: Nome=联想thinkplus-GM2 pro RSSI=-72
I (14697) BT_SCAN: =====
I (14697) BT_SCAN: FONE ENCONTRADO
I (14707) BT_SCAN: Nome: 联想thinkplus-GM2 pro
I (14707) BT_SCAN: MAC:
I (14717) BT_SCAN: 41:42:FF:D9:BD:92
I (14717) BT_SCAN: Parando scan...
I (14727) BT_SCAN: Inicializando A2DP...
I (15757) BT_SCAN: Conectando ao headset...
I (15757) BT_SCAN: esp_a2d_source_connect = ESP_OK
I (15757) BT_SCAN: Headset localizado com sucesso
I (15757) BT_SCAN: MAC final:
I (15767) BT_SCAN: 41:42:FF:D9:BD:92
W (15767) BT_BT: A2DP Enable with AVRC
I (15807) BT_SCAN: CONNECTING
I (19187) BT_SCAN: A2DP CONNECTION STATE = 2
I (19187) BT_SCAN: CONNECTED
I (19187) BT_SCAN: Iniciando stream A2DP
I (22927) BT_SCAN: A2DP CONNECTION STATE = 0
I (22937) BT_SCAN: DISCONNECTED
W (22937) BT_APPL: Media task Scheduled after Suspend
W (22957) BT_HCI: hcif mode change: hdl 0x80, mode 0, intv 0, status 0x24
I (23297) BT_SCAN: Tentando reconectar...
I (23297) BT_SCAN: Procurando headset...
I (23297) BT_SCAN: Scan Bluetooth iniciado
I (26067) BT_SCAN: Nome=联想thinkplus-GM2 pro RSSI=-68
I (26067) BT_SCAN: =====
I (26067) BT_SCAN: FONE ENCONTRADO
I (26067) BT_SCAN: Nome: 联想thinkplus-GM2 pro
I (26077) BT_SCAN: MAC:
I (26077) BT_SCAN: 41:42:FF:D9:BD:92
I (26077) BT_SCAN: Parando scan...
I (26087) BT_SCAN: Inicializando A2DP...
I (27087) BT_SCAN: Conectando ao headset...
I (27087) BT_SCAN: esp_a2d_source_connect = ESP_OK
I (27087) BT_SCAN: Conectando ao headset...
I (27087) BT_SCAN: Headset localizado com sucesso
I (27087) BT_SCAN: MAC final:
I (27097) BT_SCAN: 41:42:FF:D9:BD:92
I (27107) BT_SCAN: A2DP CONNECTION STATE = 1
I (27107) BT_SCAN: CONNECTING
I (31587) BT_SCAN: A2DP EVENT = 8
W (31657) BT_APPL: new conn_srvc id:18, app_id:0
I (31657) BT_SCAN: A2DP CONNECTION STATE = 2
I (31657) BT_SCAN: CONNECTED
I (31657) BT_SCAN: Iniciando stream A2DP

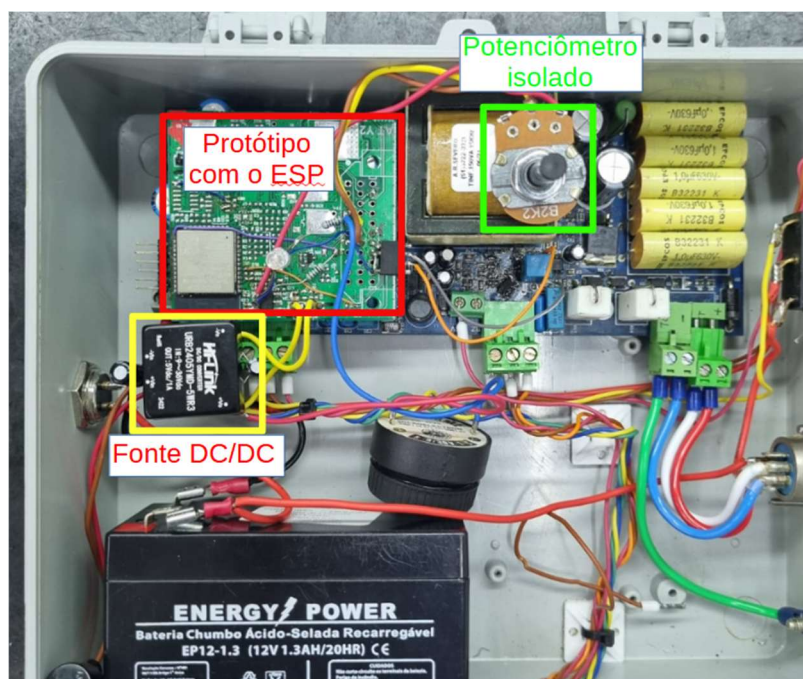
```

Fonte: do autor (2026)

4.7 Testes em bancada do circuito adaptado com *bluetooth*

Após a validação dos pulsos simulados e o teste de conexão *bluetooth*, o protótipo foi adaptado ao equipamento original para ser realizado os testes de leitura do sinal real. A Figura 15 mostra a placa protótipo adaptada ao equipamento em fase de testes.

Figura 15 - Adaptação do protótipo no equipamento



Fonte: do autor (2026)

A figura 16 mostra o *setup* montado em bancada para realizar o teste completo, desde a detecção do furo na manta até a sinalização sonora via fone de ouvido *Bluetooth*.

Figura 16 - Teste final em bancada



Fonte: do autor (2026)

Os ensaios consistiram na aplicação de diferentes níveis de tensão sobre a manta impermeabilizante, permitindo a geração de descargas superficiais e de descargas provenientes do rompimento dielétrico em furos existentes na manta. Durante os testes, o potenciômetro foi ajustado para o equipamento poder sinalizar apenas os eventos correspondentes ao rompimento do dielétrico. Esse procedimento foi realizado de forma empírica, por meio da observação visual das faíscas geradas durante o ensaio e da verificação da sinalização emitida pelo sistema, repetindo-se o ajuste até que as descargas superficiais deixassem de ser indicadas e apenas os pulsos associados às falhas fossem reconhecidos.

Além da validação da detecção, foi realizada a comparação da percepção do aviso sonoro utilizado no equipamento original e o sistema de sinalização por fone de ouvido *Bluetooth*. O ensaio consistiu na realização de testes práticos com três operadores, os quais avaliaram a facilidade de percepção da sinalização em um ambiente ruidoso. Em todos os casos, foi observado que o uso do fone de ouvido proporcionou melhor percepção do aviso sonoro, reduzindo a influência dos ruídos presentes no ambiente de trabalho e facilitando a identificação dos eventos de detecção por estar acoplado ao ouvido.

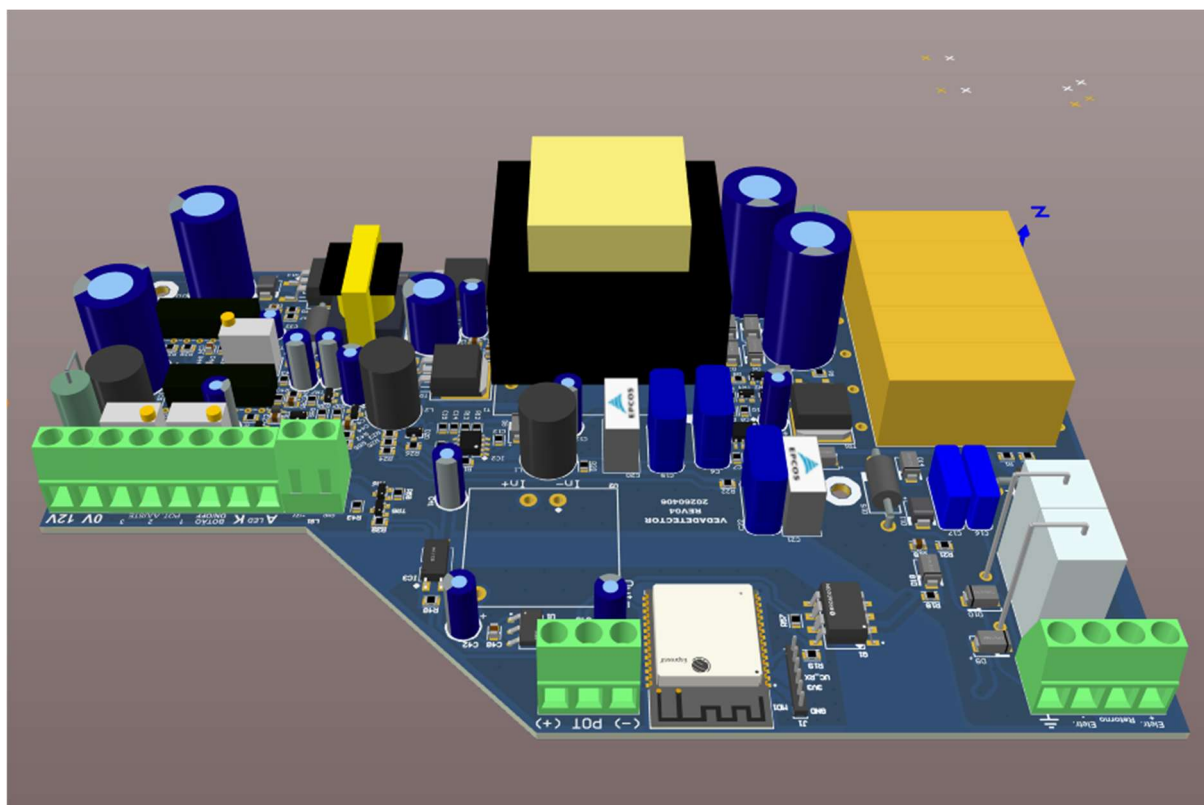
Os testes realizados em bancada demonstraram que o sistema digital foi capaz de reconhecer corretamente os pulsos gerados e permitiu o ajuste de sensibilidade para sinalizar, por meio do fone de ouvido, a detecção de furos na manta impermeabilizante. Durante os ensaios, observou-se que, em algumas situações específicas, o ESP32 deixou de reconhecer determinados pulsos de forma esporádica, embora o rompimento dielétrico pudesse ser visualizado pela ocorrência da faísca. Entretanto, essa limitação não comprometeu o funcionamento do sistema, uma vez que o desempenho obtido mostrou-se adequado para a validação do conceito e para a continuidade do desenvolvimento da solução proposta.

Embora tenham sido observadas algumas perdas de eventos onde não houve a sinalização sonora, o desempenho obtido mostrou-se adequado para validação do conceito e para continuidade do desenvolvimento da solução proposta.

4.8 Desenvolvimento do layout da placa de circuito impresso

Após a validação dos circuitos desenvolvidos em bancada, foi elaborado um novo layout de PCI para o equipamento Vedadetector. O desenvolvimento foi realizado a partir da placa original do equipamento, incorporando as modificações propostas neste trabalho, incluindo o estágio de isolamento elétrico e o sistema digital de detecção baseado no ESP32. A Figura 16 apresenta a visualização tridimensional da nova PCI desenvolvida.

Figura 17 - Layout 3D da nova placa



Fonte: do autor (2026)

O objetivo desta etapa foi consolidar em uma única placa as alterações validadas durante a fase de prototipagem, servindo como base para futuras etapas de fabricação, montagem e testes integrados do sistema.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo estudar o equipamento Vedadetector e desenvolver melhorias eletrônicas voltadas ao aumento da segurança operacional e da confiabilidade na detecção de falhas em mantas impermeabilizantes. A partir da análise do circuito original, foi possível identificar pontos críticos relacionados à exposição do operador a tensões elevadas e às limitações do sistema analógico de detecção. Com base nos resultados obtidos durante a caracterização dos sinais, foi desenvolvida uma nova arquitetura composta por estágio de isolamento elétrico e sistema digital de processamento baseado no microcontrolador ESP32.

Os resultados experimentais demonstraram que a implementação do isolamento elétrico eliminou o contato direto do operador aos pulsos de alta tensão presentes no circuito original, além disso, o algoritmo desenvolvido foi capaz de realizar a medição da largura dos pulsos e permitir o ajuste de sensibilidade por meio de um valor limiar configurável, possibilitando o ajuste fino do equipamento para diferentes condições de testes de aplicação. Também houve uma melhoria significativa na sinalização sonora do equipamento por meio da utilização de um fone de ouvido sem fio. Durante os ensaios realizados, verificou-se que a nova solução permitiu uma melhor percepção do aviso de detecção, reduzindo a influência dos ruídos presentes no ambiente de trabalho e aumentando a confiabilidade da identificação das falhas pelo operador.

Durante os testes realizados, verificou-se que todos os requisitos propostos foram atendidos e que o sistema apresentou funcionamento adequado nas condições avaliadas. Observou-se, entretanto, que em alguns momentos específicos durante o ajuste de sensibilidade, o ESP32 não conseguiu identificar determinados pulsos de forma esporádica, embora o faiscamento pudesse ser observado visualmente na malha. Contudo, essa limitação pontual não compromete o funcionamento geral do equipamento, nem invalida os resultados obtidos, sendo considerada aceitável dentro do contexto de operação do sistema.

Dessa forma, conclui-se que os objetivos propostos foram atingidos, demonstrando a viabilidade técnica da solução desenvolvida para aumento da segurança operacional e da confiabilidade da detecção de falhas. Os resultados

obtidos também estabelecem uma base sólida para futuros desenvolvimentos e aprimoramentos do equipamento Vedadetector.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Este trabalho teve como objetivo o estudo e a melhoria do equipamento Vedadetector, com foco no aumento da segurança operacional e na confiabilidade da detecção de falhas em mantas impermeabilizantes. Ao longo do desenvolvimento, algumas melhorias foram percebidas como necessárias, porém não foram implementadas por não fazerem parte do escopo inicial do trabalho, sendo então propostas como sugestões para desenvolvimentos futuros. As sugestões seriam:

- a) Fabricar e validar a placa de circuito impresso desenvolvida, garantindo o correto funcionamento do sistema em uma versão final totalmente integrada.
- b) Implementar um carregador integrado para o fone de ouvido sem fio juntamente com o carregamento do equipamento, evitando que o fone esteja descarregado no início dos testes em campo.
- c) Implementar um sistema de mapeamento integrado ao equipamento, capaz de registrar e mapear os pontos de detecção de falhas na manta impermeabilizante.
- d) Investigar técnicas avançadas de processamento dos sinais de detecção, com o intuito de automatizar o ajuste de sensibilidade e aumentar a robustez do sistema frente a interferências do ambiente, para que não ocorram perdas ocasionais de detecção de falha.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **D4787-13: Standard Practice for Continuity Verification of Liquid or Sheet Linings Applied to Concrete Substrates**. ASTM International, West Conshohocken, PA, ASTM, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9574: impermeabilização – execução**. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9575: Impermeabilização – Seleção e projeto**. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16172: Revestimentos anticorrosivos - Determinação de descontinuidades em revestimentos anticorrosivos aplicados sobre substratos metálicos**. Rio de Janeiro, ABNT, 2014.

BLUETOOTH SIG. **Advanced Audio Distribution Profile (A2DP) Specification**. Version 1.3.2. 2019. Disponível em: <https://www.bluetooth.com/Specifications/Profiles-Overview/>. Acesso em: 22 jun. 2026.

ESPRESSIF. **ESP32 Series Datasheet**. 2025. Disponível em: https://documentation.espressif.com/esp32_datasheet_en.pdf. Acesso em: 20 jun. 2026.

ESPRESSIF. **ESP32 Technical Reference Manual**. 2026a. Disponível em: https://documentation.espressif.com/esp32_technical_reference_manual_en.pdf. Acesso em: 04 jul. 2026.

ESPRESSIF. **ESP32 Um microcontrolador repleto de recursos com conectividade Wi-Fi e Bluetooth® integradas para uma ampla gama de aplicações**. 2026b. Disponível em: <https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32>. Acesso em: 22 jun. 2026

GUARIZO, Ednilson A. **Impermeabilização Flexível**. 2008. 59f. Monografia (Bacharel em Engenharia Civil) – Universidade São Francisco, Itatiba, 2008

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. *Fundamentos de Física: eletromagnetismo*. Tradução de Ronaldo Sérgio de Biasi. Revisão técnica de Ronaldo Sérgio de Biasi. v. 3. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

JUNIOR, William D. C.; RETHWISCH, David G. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. Tradução de Sergio Murilo Stamile Soares. Revisão técnica de Álvaro Meneguzzi *et al.* 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

KHODE, Harshal S. **Advanced Integrity Testing For Roofing And Water Proofing Membranes**. American Journal of Engineering Research, v. 8, n. 7, p. 200–209,

2019. Disponível em: <https://www.ajer.org/papers/Vol-8-issue-7/W0807200209.pdf>. Acesso em: 06 jun. 2026.

KUFFEL, E.; ZAENGL, W. S.; KUFFEL, J. **High Voltage Engineering: Fundamentals**. 2. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000.

MEAN WELL BRASIL. **Isolamento Galvânico em Eletrônica: Princípios e Aplicações**. Disponível em: [https://blog.meanwellbrasil.com.br/isolamento-galvanico-em-eletronica-principios-e-aplicacoes/#Seguranca do usuario e protecao contra choque](https://blog.meanwellbrasil.com.br/isolamento-galvanico-em-eletronica-principios-e-aplicacoes/#Seguranca%20do%20usuario%20e%20protecao%20contra%20choque). Acesso em: 21 jun. 2026.

PRESSMAN, Abraham I.; BILLINGS, Keith; MOREY, Taylor. **Switching Power Supply Design**. 3. ed. McGraw-Hill, 2009.

RASHID, Muhammad H. **Eletrônica de potência: circuitos, dispositivos e aplicações**. Tradução de Leonardo Abramowicz. Revisão técnica de Carlos Marcelo de Oliveira Stein. 4. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2014.

RIGHI, Geovane V. **Dissertação de Mestrado - Estudo dos Sistemas de Impermeabilização: Patologias, Prevenções e Correções** – Análise de Casos. 2009. 95 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2009

SILVA, Celine M da; JUNIOR, Talvanes L. S.; HOLANDA, Erika. P. T. SISTEMAS DE IMPERMEABILIZAÇÃO NA CONSTRUÇÃO CIVIL: CARACTERIZAÇÃO, IMPORTÂNCIA E MÉTODOS DE EXECUÇÃO. **Caderno De Graduação - Ciências Exatas E Tecnológicas** – Alagoas. mai. 2019. Disponível em: <https://periodicos.set.edu.br/cdgexatas/article/view/6803/3397>. Acesso em: 30 mar. 2026.

TEXAS INSTRUMENTS. **Optocouplers and Silicon-based Galvanic Isolation Technology – How Do They Work?**. Dallas: Texas Instruments, 2019. Disponível em: <https://www.ti.com/lit/ta/sszt391/sszt391.pdf>. Acesso em: 04 jul. 2026.

VEDACIT. **Manual técnico de impermeabilização de estruturas**. 2010 .6° Edição. Disponível em: <https://pt.slideshare.net/slideshow/impermeabilizacao-vedacit/68003872>. Acesso em: 04 jun. 2026.

VEDACIT. **Vedacit e Lógica-e: Teste eletrônico de estanqueidade**. c2026. Disponível em: <https://vedacit.com.br/para-voce/blog/mundo-vedacit/vedacit-e-logica-e-criam-o-primeiro-teste-eletronico-de-estanqueidade>. Acesso em: 13 mar. 2026.

VERÇOZA, Ênio J. **Patologia das Edificações**. Porto Alegre, Editora Sagra, 1991.

VISHAY INTERTECHNOLOGY. **6N137 High Speed Optocoupler**. 2024. Disponível em: https://www.vishay.com/docs/84732/6n137_vo2601_vo2611.pdf. Acesso em: 21 jun. 2026.

WÜRTH ELEKTRONIK. **ANP151 | Mastering Galvanic Isolation: Ensuring Safety in High-Power Electronics with Würth Elektronik Products.** 2026 Disponível em: https://www.we-online.com/components/media/o896744v410%20ANP151_EN.pdf. Acesso em: 04 jul. 2026.