

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

EDUARDO PASCOALI NODARI

**MONTAGEM E VALIDAÇÃO DE UM SISTEMA DE RECARGA DE VEÍCULOS
ELÉTRICOS MODO 3**

JOINVILLE

2025

EDUARDO PASCOALI NODARI

**MONTAGEM E VALIDAÇÃO DE UM SISTEMA DE RECARGA DE VEÍCULOS
ELÉTRICOS MODO 3**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista pelo Centro de Ciências Tecnológicas - CCT, da Universidade do Estado de Santa Catarina - Udesc.

Orientador: Alessandro Luiz Batschauer

JOINVILLE

2025

EDUARDO PASCOALI NODARI

**MONTAGEM E VALIDAÇÃO DE UM SISTEMA DE RECARGA DE VEÍCULOS
ELÉTRICOS MODO 3**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como requisito parcial para obtenção do grau de
Engenheiro Eletricista pelo Centro de Ciências
Tecnológicas - CCT, da Universidade do Estado
de Santa Catarina - Udesc.

Orientador: Alessandro Luiz Batschauer

BANCA EXAMINADORA:

Alessandro Luiz Batschauer, Dr. Eng.
UDESC

Membros:

Alessandro Luiz Batschauer, Dr. Eng.
UDESC

Jhon Brajhan Benites Quispe, Dr. Eng.
UDESC

Tiago Luis Riechel, Me. Comp.
UFPEL

Joinville, 08 de dezembro de 2025

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, aos meus pais, Luis e Rejane, pelo apoio incondicional ao longo de toda esta jornada. Foram eles que, com dedicação, paciência e incentivo constante, me ajudaram a chegar até aqui e me ensinaram o valor da perseverança.

Aos professores, orientador e à UDESC, deixo meu sincero reconhecimento pela excelência no ensino e pela formação que recebi durante o curso de Engenharia. Cada disciplina, orientação e desafio contribuíram diretamente para meu crescimento profissional e pessoal.

Aos meus amigos, agradeço pela presença, pelas conversas, pelas ideias e pelas sugestões que me ajudaram a encontrar soluções para muitos dos problemas enfrentados ao longo deste trabalho e da graduação.

Um agradecimento especial à minha namorada, Helena, por todo o apoio, compreensão e paciência durante os momentos mais intensos do curso. Sua companhia e incentivo foram fundamentais para que eu concluísse esta etapa, guiando-me sempre para um caminho cada vez melhor.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para esta conquista, deixo minha gratidão.

RESUMO

A crescente adoção de veículos elétricos tem ampliado a necessidade de infraestrutura de recarga que seja segura, normatizada e capaz de fornecer informações operacionais em tempo real. Nesse contexto, a norma ABNT NBR IEC 61851-1 estabelece os requisitos técnicos e funcionais para sistemas de recarga, incluindo aspectos de segurança elétrica, comunicação entre o veículo e a estação e critérios de desempenho. Este trabalho tem como objetivo desenvolver, implementar e validar um protótipo funcional de estação de recarga de modo 3, com ênfase na interpretação e execução dos testes previstos na IEC 61851-1, bem como na integração de recursos de Internet das Coisas (IoT) para monitoramento avançado do processo de carregamento. O projeto compreende desde a análise detalhada dos requisitos normativos até a construção física do sistema, abrangendo o circuito de controle piloto (CP), detecção de estados, supervisão do aterramento, controle da contatora e mecanismos de segurança. A comunicação bidirecional com o veículo foi implementada conforme as curvas de sinalização do CP especificadas pela norma, permitindo identificar estados do ciclo de recarga, falhas e condições anormais. Para complementar a avaliação técnica, foram desenvolvidos recursos *IoT* capazes de coletar, registrar e transmitir variáveis elétricas e operacionais como tensão, corrente, potência, fator de potência e eventos de proteção para um servidor remoto, possibilitando o monitoramento em tempo real do comportamento do veículo durante a recarga e a verificação contínua da conformidade funcional da estação. Os testes práticos incluíram a validação dos estados normativos do CP, detecção de falha de aterramento, interrupção segura da carga, análises dinâmicas de comportamento sob diferentes condições e comparação dos resultados com os critérios da IEC 61851-1. Como resultado, obteve-se uma estação de recarga didática e funcional, capaz de atender aos requisitos técnicos da norma e equipada com diagnóstico remoto via *IoT*. A principal contribuição deste trabalho consiste na demonstração prática de como aplicar e validar os testes da IEC 61851-1 em uma estação de recarga real, ao mesmo tempo em que se explora o potencial das tecnologias IoT para ampliar a segurança, o monitoramento e a confiabilidade do processo de recarga contribuindo para o desenvolvimento de soluções inteligentes e sustentáveis para a mobilidade elétrica.

Palavras-chave: Carregadores Veiculares. Veículos Elétricos. Internet das Coisas.

ABSTRACT

The increasing adoption of electric vehicles has intensified the demand for charging infrastructure that is safe, standardized, and capable of providing real-time operational data. In this context, the ABNT NBR IEC 61851-1 standard defines the technical and functional requirements for electric vehicle charging systems, including safety conditions, communication between the vehicle and the charging station, and performance criteria. This work aims to develop, implement, and validate a functional Mode 3 charging station prototype with a particular focus on interpreting and performing the tests defined in IEC 61851-1, while integrating Internet of Things (IoT) resources for advanced monitoring of the charging process. The project encompasses a detailed analysis of regulatory requirements, the design of the control pilot (CP) interface, ground monitoring, contactor control, and safety mechanisms. The bidirectional communication with the vehicle was implemented according to the CP signaling levels established by the standard, enabling identification of charging states, failures, and abnormal conditions. To enhance technical evaluation, IoT features were incorporated to collect, log, and transmit electrical and operational variables such as voltage, current, CP signal frequency, power, power factor, and protection events to a remote server. This enabled real-time monitoring of vehicle behavior during charging and continuous verification of the station's compliance with IEC 61851-1. Practical tests included validation of normative CP states, ground fault detection, safe disconnection, dynamic response analysis, and comparison of results against the requirements of the standard. The outcome is a functional and didactic charging station prototype compliant with IEC 61851-1 and equipped with IoT-based remote diagnostics. The main contribution of this work lies in the practical demonstration of how to apply and validate IEC 61851-1 tests in a real charging station while exploring the potential of IoT technologies to enhance safety, monitoring, and reliability contributing to the development of intelligent and sustainable solutions for electric mobility.

Keywords: Charging stations. Electric Vehicles. Internet of Things.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Diferentes modelos de veículos elétricos - Parte 1.	18
Figura 2 – Diferentes modelos de veículos elétricos - Parte 2.	18
Figura 3 – Carregamento <i>Off-board</i> vs <i>On-board</i>	19
Figura 4 – Conector Tipo 1 e conector CCS1.	23
Figura 5 – Conector SAEJ1772 e conector CCS1.	24
Figura 6 – Conector GB/T CA trifásico e conector GB/T CC.	24
Figura 7 – Conector CHAdeMO.	25
Figura 8 – Conector Tesla.	25
Figura 9 – Imagem de um modelo de carregador emergencial.	26
Figura 10 – Imagem de um modelo de carregador monofásico portátil.	27
Figura 11 – Imagem do carregador <i>Wallbox</i> instalado.	28
Figura 12 – Imagem do carregador instalado na UDESC.	29
Figura 13 – Valor Máximo de Corrente x Ciclo de Trabalho.	34
Figura 14 – Circuito típico do controle de piloto.	36
Figura 15 – Circuito do Pino PP.	37
Figura 16 – Resistor de codificação da corrente do Pino PP.	38
Figura 17 – Fonte linear para implementação da placa de controle.	40
Figura 18 – Fonte linear.	42
Figura 19 – Circuito do pino piloto no Proteus.	44
Figura 20 – Circuito de medição de tensão da rede no Proteus.	44
Figura 21 – Placa de circuito impresso 3D.	45
Figura 22 – Placa de circuito impresso 3D com regiões funcionais destacadas.	46
Figura 23 – Layout do circuito impresso com separação das malhas de aterramento.	46
Figura 24 – Pino piloto.	47
Figura 26 – Circuito de monitoramento da tensão V_a	47
Figura 25 – Subdivisão do circuito da função piloto em blocos conceituais.	48
Figura 27 – Circuito de geração do <i>PWM</i> simulado.	50
Figura 28 – Resultado da geração do <i>PWM</i> simulado.	50
Figura 29 – Resultado da geração do <i>PWM</i> experimental - Parte 1.	51
Figura 30 – Resultado da geração do <i>PWM</i> experimental - Parte 2.	52
Figura 31 – Circuito do pino piloto simulado.	52
Figura 32 – Retificador de precisão de meia onda simulado.	53
Figura 33 – Simulação da estação não conectada.	55
Figura 34 – Resultado experimental da estação não conectada.	56
Figura 35 – Estação não conectada.	57
Figura 36 – Simulação da estação conectada e veículo indisponível.	58
Figura 37 – Resultado experimental da estação conectada e veículo indisponível.	59

Figura 38 – Estação conectada e veículo indisponível.	59
Figura 39 – Simulação da estação conectada e veículo disponível.	60
Figura 40 – Resultado experimental da estação conectada e veículo disponível.	61
Figura 41 – Estação conectada e veículo disponível.	62
Figura 42 – Simulação da estação conectada, VE disponível e necessitando ventilação.	62
Figura 43 – Resultados experimentais da estação e VE conectados e VE necessitando ventilação.	63
Figura 44 – Resultados experimentais da estação e VE conectados e VE necessitando ventilação.	64
Figura 45 – Resultado experimental da estação Não disponível.	65
Figura 46 – Circuito geral de rede simulado.	66
Figura 47 – Divisor de tensão para leitura da rede simulado.	67
Figura 48 – Retificador de precisão simulado.	68
Figura 49 – Destaques do retificador de precisão de onda completa.	69
Figura 50 – Filtro simulado.	70
Figura 51 – Resultado retificador simulado.	71
Figura 52 – Resultado experimental do retificador - parte 1.	72
Figura 53 – Resultado experimental do retificador - parte 2.	73
Figura 54 – Oscilador controlado por tensão de referência.	73
Figura 55 – Oscilador controlado por tensão simulado.	74
Figura 56 – VCO estágio 1.	75
Figura 57 – VCO estágio 2.	76
Figura 58 – VCO estágio 3.	76
Figura 59 – Resultado simulado VCO estágio 3.	77
Figura 60 – Resultado experimental VCO estágio 3.	78
Figura 61 – Oscilador controlado por tensão em blocos.	78
Figura 62 – Optoacoplador simulado.	80
Figura 63 – Resultado experimental do optoacoplador.	81
Figura 64 – Sensor de corrente SCT-013.	82
Figura 65 – Placa auxiliar de condicionamento do sinal do SCT-013 instalada no quadro.	83
Figura 66 – Fluxograma da razão cíclica de acordo com a corrente máxima.	85
Figura 67 – Montagem interna do quadro de comando da estação de recarga.	89
Figura 68 – Vista frontal da estação de recarga com sinalização luminosa.	90
Figura 69 – <i>Dashboard</i> TagoIO, operação sem carga conectada.	91
Figura 70 – <i>Dashboard</i> TagoIO, operação com carga de 1200 W conectada.	92
Figura 71 – Osciloscópio Hantek 6022BE.	93
Figura 72 – Software de leitura de dados Hantek.	94
Figura 73 – Osciloscópio Tektronix TDS2024.	95
Figura 74 – Placa elaborada após as correções.	96

Figura 75 – Teste entre estação e <i>CDS</i>	98
Figura 76 – <i>CDS</i> com o conector Tipo 2.	98
Figura 77 – Teste entre estação e <i>CDS</i> com conector tipo 2.	99
Figura 78 – Resultado do teste de transição entre os estados A, B e C.	100
Figura 79 – <i>Test Case</i> do curto-circuito entre o PP e o PE.	101
Figura 80 – <i>Test Case</i> da interrupção do PP.	102
Figura 81 – Resultado do <i>Test Case</i> do curto-circuito entre o PP e o PE.	103
Figura 82 – Resultado do <i>Test Case</i> da interrupção do pino CP.	104
Figura 83 – <i>Test Case</i> da energização - parte 1.	105
Figura 84 – <i>Test Case</i> da energização - parte 2.	105
Figura 85 – Resultado do teste de transição entre os estados A, B e C.	106
Figura 86 – Proteus do sensor de corrente.	120

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
BEV	<i>Battery Electric Vehicle</i> - Veículo Elétrico a Bateria
VE	<i>Electric Vehicle</i> - Veículo Elétrico
FCEV	<i>Fuel Cell Electric Vehicle</i> - Veículo Elétrico a Célula de Combustível
HEV	<i>Hybrid Electric Vehicle</i> - Veículo Elétrico Híbrido
IEC	<i>International Eletrotechnical Comission</i> - Comissão Internacional de Eletrotécnica
NBR	Norma Brasileira
NDU	Norma de Distribuição Unificada
PHEV	<i>Plug-in Hybrid Electric Vehicle</i> - Veículo Elétrico Híbrido <i>Plug In</i>
PWM	Modulação por Largura de Pulso
UDESC	Universidade do Estado de Santa Catarina
EVSE	<i>Electric Vehicle Supply Equipment</i> - Estação de Recarga
CP	<i>Control Pilot</i> - Controle Piloto

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Unidade de Corrente Elétrica
mA	Unidade de Corrente Elétrica em Miliampere
D	Razão Cíclica
V	Unidade de Tensão Elétrica
kV	Unidade de Tensão Elétrica em Quilovolt
°C	Graus Celsius

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	MOTIVAÇÃO	14
1.2	PROPOSTA	15
1.2.1	Objetivo Geral	15
1.2.2	Objetivo Específicos	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	CLASSIFICAÇÃO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS	17
2.1.1	Veículos Totalmente Elétricos	17
2.1.2	Veículo Elétrico Híbrido (HEV)	17
2.1.3	Veículo Elétrico Híbrido <i>Plug-in</i> (PHEV)	17
2.2	MODOS DE CARREGAMENTO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS	19
2.2.1	Carregadores <i>off-board</i>	19
2.2.2	Carregadores <i>On-board</i> (OBC)	19
2.3	MÉTODOS DE RECARGA	20
2.3.1	Modo 1	20
2.3.2	Modo 2	20
2.3.3	Modo 3	20
2.3.4	Modo 4	20
2.4	TIPOS DE RECARGA	21
2.4.1	Recarga Lenta	21
2.4.2	Recarga Semirrápida	21
2.4.3	Recarga Rápida	21
2.4.4	Recarga Ultrarrápida	21
2.5	MODELOS DE CONECTORES	23
2.5.1	Conector tipo 1 (SAE J1772)	23
2.5.2	Conector CCS 1	23
2.5.3	Conector tipo 2 (IEC 62196)	23
2.5.4	Conector CCS 2	24
2.5.5	Conector GB/T 20234	24
2.5.6	Conector CHAdeMO	24
2.5.7	Conector Tesla	25
2.6	TIPOS DE CARREGADORES	26
2.6.1	Carregador de emergência	26
2.6.2	Carregador Portátil	26
2.6.3	Carregador <i>Wallbox</i>	27

2.6.4	Carregador Comercial	28
2.7	DISPOSIÇÕES PARA A INSTALAÇÃO DO CARREGADOR <i>WALLBOX</i> .	29
2.8	TRANSMISSÃO DE DADOS	30
2.8.1	Protocolo <i>HTTP</i> e Comunicação com o TagoIO	31
2.8.2	TagoIO como Plataforma IoT para Monitoramento Remoto	31
2.9	COMUNICAÇÃO VIA <i>CONTROL PILOT</i> (CP)	32
2.9.1	Funções da estação de recarga	33
2.9.2	Estados do Pino Piloto	35
2.9.3	Circuito Típico do Controle de Piloto e Funcionamento	35
2.9.4	Pino de Proximidade (PP)	37
3	DESENVOLVIMENTO	39
3.1	CONTINUIDADE DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO	39
3.2	FONTE DE ALIMENTAÇÃO	39
3.2.1	Funcionamento da Fonte de Alimentação	41
3.3	ESTRUTURA FUNCIONAL DA PLACA DE CONTROLE	42
3.3.1	Placa de Circuito Impresso	43
3.3.1.1	<i>Topologias</i>	43
3.3.2	Pino Piloto	46
3.3.2.1	<i>Geração de PWM para o Pino Piloto</i>	48
3.3.2.2	<i>Resultados do Circuito PWM</i>	49
3.3.2.3	<i>Emulação da carga V_a</i>	52
3.3.2.4	<i>Medição da Tensão V_a</i>	53
3.3.2.5	<i>Resultados do Pino Piloto</i>	54
3.3.2.5.1	Estação Não Conectada	55
3.3.2.5.2	Estação Conectada e VE Indisponível	57
3.3.2.5.3	Estação Conectada e VE Disponível	60
3.3.2.5.4	Estação Conectada, VE Disponível e Necessitando Ventilação	61
3.3.2.5.5	Estação Não Disponível	64
3.3.2.5.6	Situações de Erro	64
3.3.3	Leitura da Tensão da Rede	65
3.3.4	Divisor de Tensão	66
3.3.5	Retificador de Precisão	68
3.3.6	Cálculos do Filtro	70
3.3.7	Resultados do Retificador	71
3.3.8	Oscilador Controlado por Tensão	73
3.3.8.1	<i>OCT Estágio 1</i>	74
3.3.8.2	<i>OCT Estágio 2</i>	75

3.3.8.3	<i>OCT Estágio 3</i>	76
3.3.9	Resultados do Oscilador Controlado por Tensão (OCT)	78
3.3.9.1	<i>Cálculos do Optoacoplador</i>	79
3.3.10	Lógica do Contator	81
3.4	AQUISIÇÃO DE CORRENTE COM O SENSOR SCT-013	82
3.5	<i>LÓGICA DO SOFTWARE</i>	83
3.5.1	Aquisição e Processamento dos Sinais	84
3.5.2	Razão Cíclica	84
3.5.3	Geração e controle do sinal <i>PWM</i>	84
3.5.4	Comunicação <i>wi-fi</i> e telemetria	86
3.5.5	Visualização local dos estados	86
3.6	QUADRO DE COMANDO	86
3.6.1	Lógica da potência do carregador	86
3.6.2	Montagem do quadro de comando	87
3.7	COMUNICAÇÃO COM A TAGOIO	91
4	RESULTADOS	93
4.1	AQUISIÇÃO DE DADOS EXPERIMENTAIS INICIAIS	93
4.1.1	Aquisição de Dados Experimentais com Osciloscópio Tektronix TDS2024C	94
4.1.2	Resultado	95
4.2	TESTES	96
4.2.1	Testes com carga resistiva	96
4.2.2	Testes iniciais com o sistema <i>CDS Charging Discovery System</i>	97
4.2.3	Testes Realizados com o <i>Charging Discovery System (CDS)</i>	97
4.2.3.1	<i>Primeiro teste — Transição entre os estados A, B e C</i>	99
4.2.3.2	<i>Segundo e terceiro testes — Ensaios de curto-circuito e interrupção do pino CP</i>	99
4.2.3.2.1	Curto-circuito no pino CP.	100
4.2.3.2.2	Interrupção do pino CP.	100
4.2.3.3	<i>Quarto teste — Teste de Energização (Estado D)</i>	101
5	CONCLUSÃO	107
	REFERÊNCIAS	109
	ANEXO A – CÓDIGO DESENVOLVIDO DO TRABALHO	111
	Anexo A – Código Desenvolvido do Trabalho	111
	ANEXO B – LISTA DE MATERIAIS UTILIZADOS PARA MONTA- GEM DA ESTAÇÃO DE RECARGA	119
	ANEXO C – CONFECÇÃO DA PLACA DO SENSOR DE CORRENTE	120

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo contém a motivação para este trabalho, mostrando a contextualização do tema, a proposta de modo geral e os objetivos que esperam ser alcançados com o desenvolvimento do projeto de estação de recarga.

1.1 MOTIVAÇÃO

Com o avanço acelerado das tecnologias limpas e das políticas globais de descarbonização, a mobilidade elétrica deixou de representar uma tendência futura e consolidou-se como parte fundamental da modernização dos Sistemas Elétricos de Potência. No Brasil, as projeções da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) indicam que a frota nacional poderá atingir 129 milhões de veículos até 2050, dos quais metade será composta por modelos híbridos e cerca de 9,2% por veículos totalmente elétricos aproximadamente 11,9 milhões de unidades (Brasil. Ministério da Economia; GIZ, 2023). Nesse contexto, os veículos elétricos assumem um papel cada vez mais relevante, não apenas como alternativa aos combustíveis fósseis, mas também como elementos integrados ao sistema elétrico, capazes de interagir com redes inteligentes e contribuir para o uso eficiente de fontes renováveis.

À medida que essa frota cresce, as estações de recarga se tornam componentes estratégicos para garantir a segurança, a interoperabilidade e o desempenho do processo de carregamento. A expansão de fontes renováveis, como solar e eólica, intensifica ainda mais essa necessidade, uma vez que sua natureza intermitente exige que o processo de recarga ocorra de forma controlada e em conformidade com padrões técnicos rigorosos. Nesse cenário, a norma ABNT NBR IEC 61851-1 apresenta-se como uma referência indispensável, pois estabelece os requisitos para a comunicação entre o veículo elétrico VE e a estação de recarga, define a lógica de estados controle de piloto (CP) e especifica os critérios mínimos para o acionamento da carga e a proteção dos usuários. (ABNT, 2021)

Apesar da crescente relevância da mobilidade elétrica, observa-se que muitos trabalhos acadêmicos abordam de forma pontual aspectos específicos do carregamento de veículos elétricos, como a análise normativa ou a simulação de estados de operação. Entretanto, abordagens que integrem a implementação prática do circuito do pino piloto, a construção de um protótipo funcional de estação de recarga e a incorporação de mecanismos de monitoramento remoto ainda representam um desafio relevante de projeto. Essa perspectiva constituiu a principal motivação deste trabalho.

Iniciativas relacionadas a esse tema podem ser encontradas na literatura, como o dispositivo emulador de veículo elétrico desenvolvido por (Liston, Raul, 2024), voltado à realização de testes em estações de recarga com base nas normas NBR IEC 61851 e NBR 17019. Contudo, o presente trabalho diferencia-se ao concentrar-se no desenvolvimento de uma estação de recarga do tipo *wallbox*, abordando desde a geração e detecção do sinal PWM do pino piloto, a identificação dos estados A, B, C e D, até o acionamento seguro da contatora e a integração com

sistemas de medição e Internet das Coisas *IoT*, permitindo uma visão mais abrangente e aplicada dos desafios envolvidos.

Desenvolver um *wallbox* em conformidade com os padrões normativos não apenas reforça o domínio teórico dos princípios de comunicação e segurança envolvidos no processo de carregamento, mas também possibilita a exploração de desafios reais da engenharia elétrica, como a correta geração e detecção do sinal PWM, a identificação dos estados A, B, C e D, o acionamento seguro da contatora e a integração com sistemas de medição e plataformas de Internet das Coisas *IoT*.

Este Trabalho de Conclusão de Curso apresenta o desenvolvimento de um protótipo de estação de recarga em conformidade com a ABNT NBR IEC 61851-1, incorporando recursos de monitoramento remoto que permitem acompanhar, em tempo real, as grandezas elétricas e o comportamento do circuito piloto. Com isso, busca-se aproximar teoria e aplicação, evidenciando os desafios técnicos na interface entre o VE e a estação de recarga, além de contribuir para a construção de soluções nacionais em infraestrutura de carregamento, alinhadas às transformações do setor energético e ao avanço da mobilidade sustentável.

1.2 PROPOSTA

Com o crescimento gradual da frota de veículos elétricos no Brasil, torna-se essencial garantir a disponibilidade de pontos de recarga em diferentes cenários, desde residências até rodovias. Para atender a essa necessidade de forma eficiente e segura, este Trabalho de Conclusão de Curso propõe o desenvolvimento de um sistema de recarga baseado no modo 3, conforme os requisitos estabelecidos pela norma ABNT NBR IEC 61851-1. Além da conformidade técnica, o projeto integra tecnologias de Internet das Coisas para a coleta e visualização remota dos dados de carregamento, permitindo o monitoramento em tempo real do processo de recarga. Dessa forma, busca-se oferecer uma solução inteligente, segura e alinhada com os padrões regulatórios, contribuindo para a expansão da mobilidade elétrica e a modernização do sistema elétrico nacional. Neste capítulo, serão definidos os objetivos da pesquisa que orientará o estudo.

1.2.1 Objetivo Geral

Analisar as topologias, normas e proteções de um carregador para VE modo 3 em corrente alternada, aplicar proteções de segurança para a continuação de um projeto de carregador modo 3 com integração de recursos de IoT para monitoramento e visualização de dados em tempo real.

1.2.2 Objetivo Específicos

- Analisar os modos de recarga disponíveis no mercado;
- Analisar as normas vigentes relativas aos sistemas de recarga;
- Analisar os sistemas de proteção necessários para um sistema de recarga;

- Reconstruir um protótipo de um sistema de recarga modo 3 aplicando as proteções pertinentes;
- Projetar o sistema de medição de potência e energia;
- Prover os dados do carregamento de forma online.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados os diversos modelos de carregadores elétricos, características de veículos elétricos, a variedade de conectores disponíveis e as normas brasileiras que regem a construção de uma estação de recarga para veículos elétricos no Brasil.

2.1 CLASSIFICAÇÃO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS

É classificado veículo elétrico (VE) qualquer veículo movido por um motor elétrico onde a corrente elétrica é fornecida por um sistema de armazenamento de energia recarregável, destinado principalmente para ser utilizado em vias públicas (ABNT, 2021).

2.1.1 Veículos Totalmente Elétricos

São veículos que operam exclusivamente com motores elétricos alimentados seja por bateria, seja por célula de combustível.

- **BEV:** São veículos compostos exclusivamente por um motor elétrico alimentado por um banco de baterias responsável pelo armazenamento de energia. Além disso, o motor possui capacidade de realizar a recuperação de energia durante o processo de frenagem (CARRILLO, 2022).
- **FCEV:** Utilizam uma célula de combustível para gerar energia elétrica e alimentar o motor responsável pela tração. Essa célula eletroquímica consome combustível e oxigênio para produzir eletricidade, sendo que, atualmente, as células de hidrogênio representam a tecnologia mais difundida e estudada (CARRILLO, 2022).

2.1.2 Veículo Elétrico Híbrido (HEV)

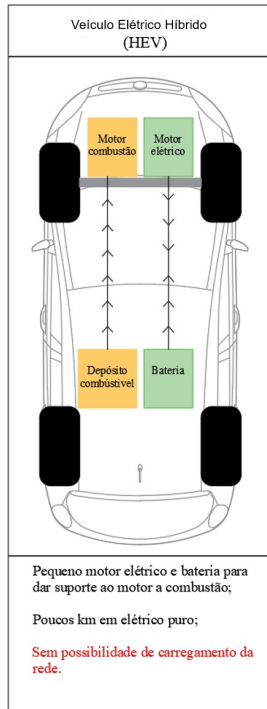
Esses veículos possuem um banco de baterias e um motor elétrico. Alguns também têm um motor de combustão interna, usado para acionar as rodas ou para recarregar as baterias (CARRILLO, 2022).

2.1.3 Veículo Elétrico Híbrido *Plug-in* (PHEV)

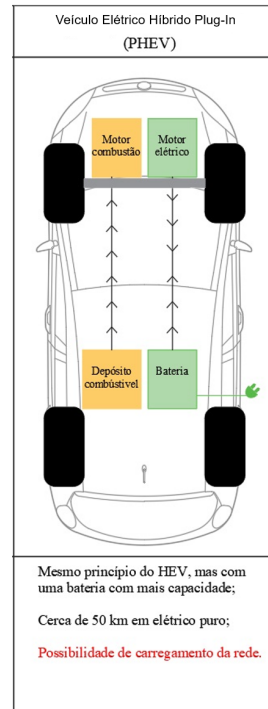
A principal distinção entre o PHEV e o HEV reside na capacidade do PHEV de recarregar suas baterias externamente (CARRILLO, 2022).

É possível observar nas Figuras 1 e 2 de maneira simplificada o funcionamento das opções apresentadas de VE.

Figura 1 – Diferentes modelos de veículos elétricos - Parte 1.



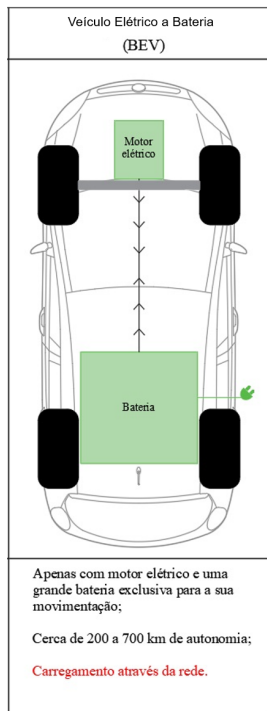
(a) Modelo de veículo com motor a combustão utilizado para tracionar o veículo e carregar a bateria para acionamento do motor elétrico



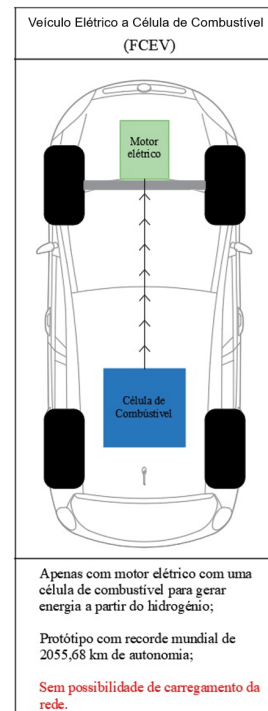
(b) Modelo de veículo com motor a combustão utilizado para tracionar o veículo e a bateria é carregada na rede para acionamento do motor elétrico

Fonte: Adaptado de (CACHÃO, 2023)

Figura 2 – Diferentes modelos de veículos elétricos - Parte 2.



(c) Modelo de veículo apenas com motor elétrico e a bateria é carregada na rede



(d) Modelo de veículo apenas com motor elétrico e com célula de combustível para acionamento do motor

Fonte: Adaptado de (CACHÃO, 2023)

2.2 MODOS DE CARREGAMENTO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS

Fundamentalmente os carregadores de veículos elétricos podem ser divididos em carregadores *off-board* e carregadores *on-board* (OBC).

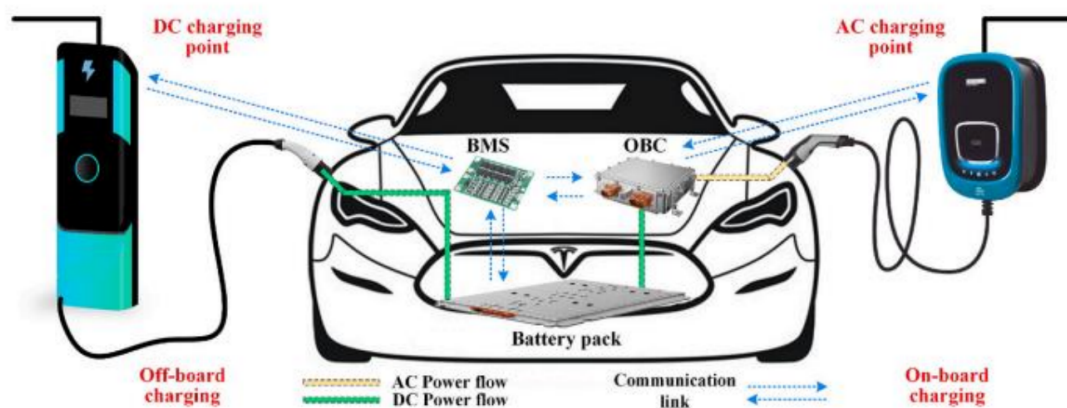
2.2.1 Carregadores *off-board*

Os carregadores *off-board* são infraestruturas de carregamento instaladas fora do veículo e têm a função de realizar o condicionamento da energia proveniente da rede elétrica. Dependendo da arquitetura da estação, o carregador *off-board* pode converter a energia em corrente alternada CA da rede em corrente contínua CC para alimentar diretamente o sistema de baterias, como ocorre nos carregadores rápidos em CC, ou pode fornecer energia em corrente alternada ao veículo, caso em que a conversão para corrente contínua é realizada pelo carregador *on-board* (OBC) antes de chegar às baterias. Os carregadores *off-board* são maiores e têm uma maior potência associada quando comparados com os carregadores *on-board*. Isto acontece porque estes carregadores *off-board* não estão sujeitos a restrição de espaço e peso, porém são mais caros e complexos (ANTUNES, 2023).

2.2.2 Carregadores *On-board* (OBC)

Os carregadores *on-board* encontram-se dentro do veículo e permitem converter a energia CA, proveniente de uma fonte CA, seja esta a própria rede, ou um carregador *off-board* CA como uma *wallbox*, em energia CC para carregar a bateria (ANTUNES, 2023). Este tipo de carregador, *off-board*, pode ser visualizado no lado esquerdo da Figura 3 e no lado direito o carregamento *on-board*.

Figura 3 – Carregamento *Off-board* vs *On-board*.



Fonte: (ANTUNES, 2023)

2.3 MÉTODOS DE RECARGA

Atualmente os modos de recarga são subdivididos em Modo 1, Modo 2, Modo 3 e Modo 4.

2.3.1 Modo 1

O modo de recarga 1 é a opção mais simples de recarga, onde a conexão do VE se dá através de uma tomada doméstica normal ou tomada industrial com ligação de terra adequada. Por não oferecer as condições de segurança adequadas estabelecidas em vários países, este modo de recarga é amplamente desencorajado e inclusive proibido em diversos países (Energisa, 2021).

2.3.2 Modo 2

O modo de recarga 2 é a opção em que a alimentação do VE se dá através de uma tomada doméstica normal ou tomada industrial com ligação de terra adequada, porém neste modo a conexão consiste em um arranjo com um dispositivo localizado entre a rede de alimentação e a entrada do VE, chamado de *In-Cable Control and Protection Device* (IC-CPD). Este dispositivo compõe as proteções necessárias e, também, o circuito de controle de piloto, responsável por realizar a comunicação entre o VE e a estação de recarga, sua especificação se dá através da IEC 62752 (Energisa, 2021).

2.3.3 Modo 3

O modo de recarga 3 é caracterizado pela ligação do veículo à estação de recarga por meio de um cabo apropriado, projetado para otimizar as condições de recarga e prevenir eventuais problemas ou picos de consumo na instalação elétrica. Esse modo oferece um tempo de recarga menor quando comparado aos modos 1 e 2. As estações de recarga utilizadas no modo 3, normalmente instaladas em paredes ou estruturas semelhantes, permitem a entrega de maior potência e incorporam os dispositivos de proteção, comando e controle necessários para uma operação segura. Em função da potência fornecida, essas estações podem ser classificadas como de recarga lenta, semirrápida, rápida ou ultrarrápida (Energisa, 2021).

2.3.4 Modo 4

É um modo de recarga tipicamente em corrente contínua que permite tempos de recarga muito curtos. Como o equipamento de recarga está fora do veículo é possível disponibilizar uma potência muito superior à que os carregadores internos dos veículos tipicamente permitem, conseguindo-se os menores tempos de recarga (Energisa, 2021). Na Tabela 1 há características extras referente aos modos de carregamento.

2.4 TIPOS DE RECARGA

Os tipos de recargas de veículos elétricos são clasificados de acordo com o tempo necessário para recarregar a bateria e a potência de recarga (Energisa, 2021).

2.4.1 Recarga Lenta

Considera-se de carga lenta os eletropostos que fornecem potências de 3,7 kW e 7,4 kW, mais indicadas para aplicações residenciais, em que o veículo elétrico carrega durante a noite. O tempo de carga pode variar de 4 horas a 8 horas, considerando a carga total de um veículo com uma bateria de 30 kW de armazenamento, o que representa uma autonomia de 150 km (Brasil. Ministério da Economia; GIZ, 2023).

2.4.2 Recarga Semirrápida

Este tipo de recarga caracteriza-se pela duração, que varia de 1 hora a 4 horas. A potência da estação gira em torno de 22 kW. Normalmente este tipo de recarga pode ser encontrada em *shopping centers*, supermercados, restaurantes e estacionamentos. Sendo possível carregar parcialmente o veículo enquanto está nesses ambientes (Energisa, 2021).

2.4.3 Recarga Rápida

Esse tipo de carregador, com 50 kW de potência, está mais associado a estabelecimentos em beira de rodovias, como postos de combustíveis e conveniências, pois oferece a possibilidade de carregar 70% da bateria em 30 minutos, carregando a bateria de 10% a 80%, e uma hora para atingir 100% do carregamento (Neocharge, 2021). Assim que atinge 80% da capacidade máxima de carga, o *status* passa de recarga rápida para semirrápida, com o objetivo de preservar a vida útil da bateria (Brasil. Ministério da Economia; GIZ, 2023).

2.4.4 Recarga Ultrarrápida

É a classificação que inclui todos os demais equipamentos que carregam de forma mais veloz do que a recarga rápida. Não há um limite de potência e, quanto mais potência a estação tiver, mais rápida é a recarga do veículo. Geralmente têm potência de 150 kW, sendo ideais para locais onde os clientes fazem pausas extremamente curtas, como em paradas de viagens. Os carregadores para veículos da montadora Tesla são de 250 kW e alguns chegam a 350 kW (Brasil. Ministério da Economia; GIZ, 2023).

Um resumo dos tipos de recarga pode ser observado na Tabela 2, tempo de carregamento e investimento médio para aquisição destes carregadores.

Tabela 1 – Modos de Recarga do VE

MODO 1	<ul style="list-style-type: none"> • Conexão com plugues e cabos à rede; • Sem função piloto–comando; • Máximo 16A, 250V / 480V (monofásico / trifásico); • Proibido e descontinuado por muitos países e montadoras; • Condutor terra.
MODO 2	<ul style="list-style-type: none"> • Conexão com plugues e cabos com a rede; • Com função piloto–comando; • Carregador <i>on-board</i>; • Máximo 32A, 250V / 480V (monofásico / trifásico); • Sistema de proteção das pessoas contra choques elétricos (DDR).
MODO 3	<ul style="list-style-type: none"> • Conexão permanente do VE à rede de alimentação em corrente alternada utilizando SAVE; • Requer caixa de parede ou similar contendo proteções e circuitos de comando; • Máximo 32A / 63A, 250V / 480V (monofásico / trifásico); • Potências típicas: 3,7 kW / 7 kW (monofásico) e 11 kW / 22 kW / 43 kW (trifásico).
MODO 4	<ul style="list-style-type: none"> • Permite alimentação do VE em corrente alternada ou contínua; • Utiliza carregador externo; • Função piloto estendida a dispositivos conectados permanentemente à alimentação.

Fonte: Adaptado de (EQUATORIAL, 2022)

Tabela 2 – Investimento médio na aquisição do carregador.

Tipo de eletroposto	Tempo de carregamento	Investimento médio
Recarga lenta	100% da bateria entre 4 h e 10 h	R\$ 1,5 mil a R\$ 3 mil
Recarga semirrápida	100% da bateria em 2 h	R\$ 7 mil a R\$ 50 mil
Recarga rápida	80% da bateria em 30 min	R\$ 90 mil a R\$ 150 mil
Recarga ultrarrápida	100% da bateria em 15 min	R\$ 350 mil a R\$ 500 mil

Fonte: Adaptado de Brasil. Ministério da Economia; GIZ, 2023

2.5 MODELOS DE CONECTORES

2.5.1 Conector tipo 1 (SAE J1772)

Este conector foi projetado para carregamento em rede monofásica com corrente alternada, e permite o carregamento em potência até 7,4 kW (230 V, 32 A), dependendo do carregador e da capacidade da rede. O conector tipo 1 é muito utilizado na região asiática e norte-americana, é considerado tanto um conector CA de carga lenta, uma vez que possibilita o carregamento em potência de 3,7 kW, quanto CA de carga rápida com potência até 7,4 kW (Neocharge, 2021).

2.5.2 Conector CCS 1

Para o carregamento rápido em corrente contínua, a tomada Tipo 1 ganha dois grandes pinos tornando o conector em um sistema de carregamento combinado CCS. Esta é uma tentativa dos fabricantes de unificar os padrões de carga CA e CC. Assim, o padrão combinado Tipo 1 passa a se chamar CCS1 e suporta recarga em uma potência até 350 kW (Neocharge, 2021).

É possível observar os dois tipos de conectores apresentados na Figura 4.

Figura 4 – Conector Tipo 1 e conector CCS1.



Fonte: (EV-Institute, 2022)

2.5.3 Conector tipo 2 (IEC 62196)

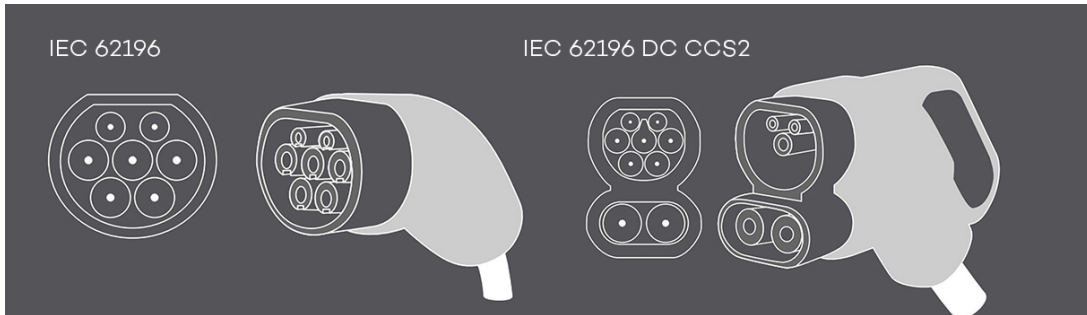
Este conector é projetado para carregamento em rede trifásica com corrente alternada, e geralmente é chamado de conector *Mennekes*. O conector possui fios adicionais e suporta a recarga em potência até 22 kW (400 V, 32 A). A distribuição dos pinos é similar ao conector Tipo 1, mas no caso, dois pinos são adicionados e correspondem às fases extras necessárias para o carregamento trifásico (Neocharge, 2021).

Por conta da rede trifásica e do conector Tipo 2 permitirem maior capacidade de energia, esse conector recarrega o veículo mais rápido se comparado ao Tipo 1. O conector pode ser considerado tanto um conector CA de carga lenta até 3,7 kW, quanto CA de carga rápida até 22 kW (Neocharge, 2021). É possível observar os dois tipos de conectores apresentados na Figura 5.

2.5.4 Conector CCS 2

Assim como o conector Tipo 1, para o carregamento rápido em corrente contínua adiciona-se dois grandes pinos ao conector e este passa a ser conhecido como CCS Tipo 2 ou CCS2, suportando recarga também em potência até 350 kW (Neocharge, 2021).

Figura 5 – Conector SAEJ1772 e conector CCS1.

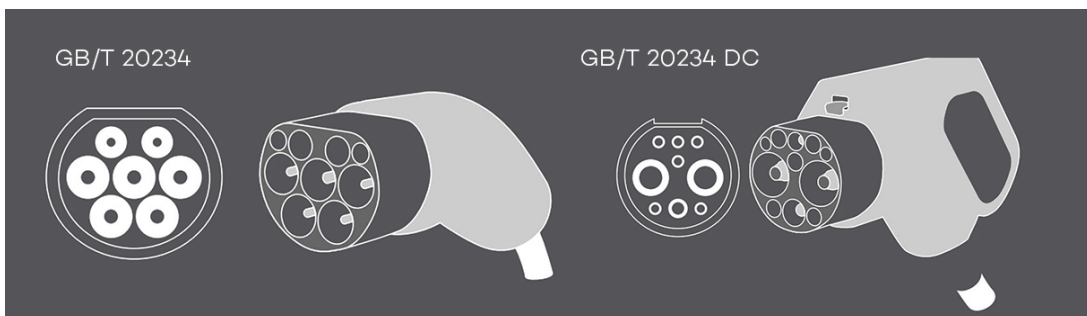


Fonte: (EV-Institute, 2022)

2.5.5 Conector GB/T 20234

Semelhante ao Tipo 2 este conector é projetado para atender as normas de carregamento em corrente alternada da China, com potência até 22 kW (400 V, 32 A) a partir de uma rede trifásica. O formato também é muito parecido com o conector Tipo 2, porém não são compatíveis fisicamente. O conector GB/T 20234 CC é o padrão chinês de carga rápida em corrente contínua que suporta potência até 250 kW (Neocharge, 2021). É possível observar os dois tipos de conectores apresentados na Figura 6.

Figura 6 – Conector GB/T CA trifásico e conector GB/T CC.



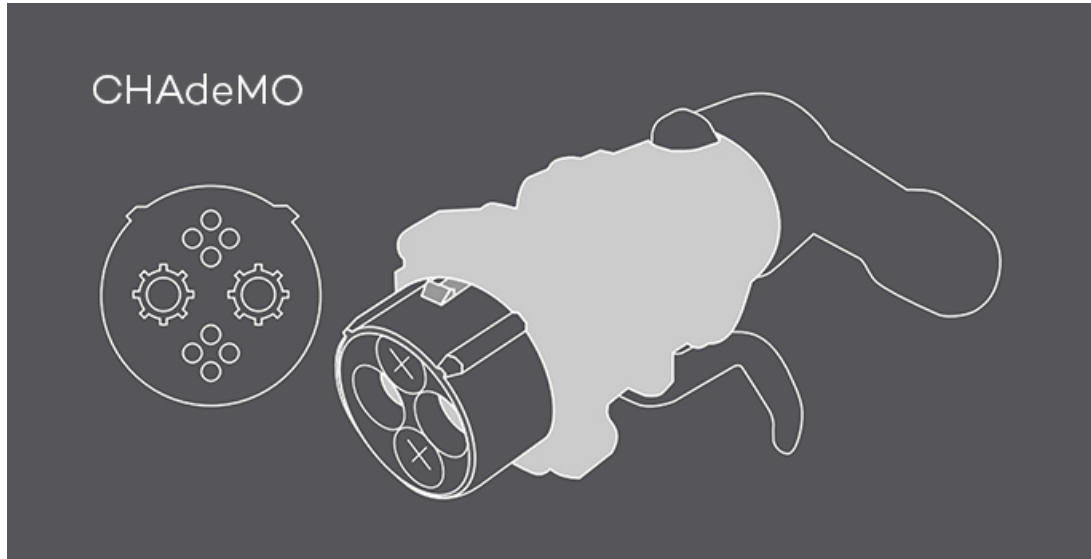
Fonte: (EV-Institute, 2022)

2.5.6 Conector CHAdeMO

CHAdeMO é a abreviação de “*Charge deMove*” e este sistema de carregamento rápido em corrente contínua foi desenvolvido no Japão. O conector suporta elevadas capacidades de carregamento, de forma a permitir carregamento bidirecional. Normalmente, este conector

fornece energia em uma potência de até 100 kW, porém especificações revisadas permitem até 400 kW (1000 V, 400 A) (Neocharge, 2021). É possível observar o conector na Figura 7.

Figura 7 – Conector CHAdeMO.

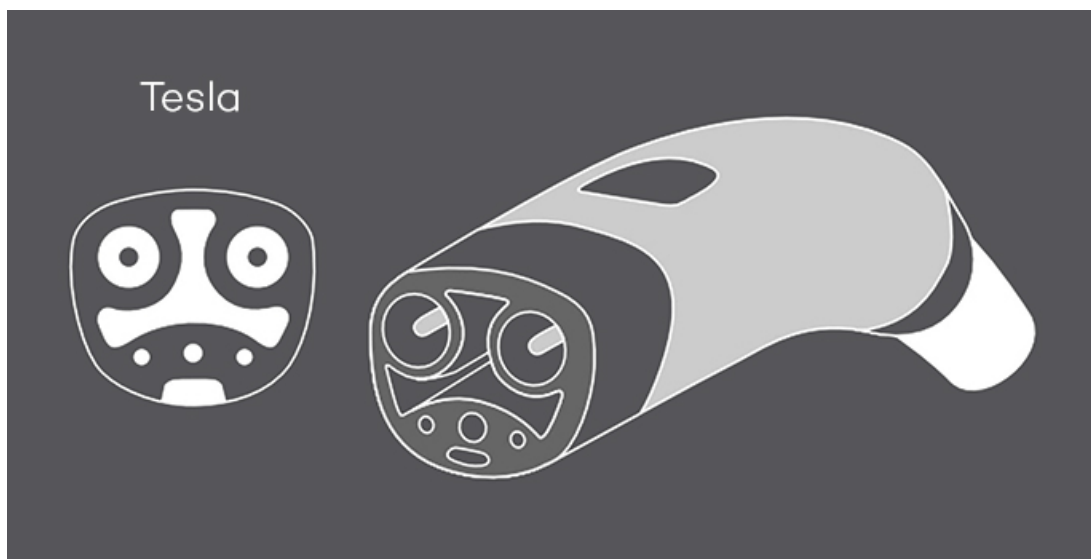


Fonte: (EV-Institute, 2022)

2.5.7 Conector Tesla

A Tesla tem seu próprio padrão de conector de carregamento, projetado para carregar veículos tanto em CC quanto CA utilizando o mesmo conector. O conector da Tesla possui 2 pinos para sinal e 3 pinos para alimentação e suporta cargas de até 150 kW, porém para os “Tesla Superchargers” apenas os veículos da marca conseguem realizar a recarga (Neocharge, 2021). O conector pode ser observado na Figura 8.

Figura 8 – Conector Tesla.



Fonte: (EV-Institute, 2022)

2.6 TIPOS DE CARREGADORES

Neste tópico são abordados os tipos de carregadores que são possíveis de utilizar, sendo o modelo portátil, o modelo comercial, e o mais utilizado, o *Wallbox*.

2.6.1 Carregador de emergência

O carregador que acompanha o veículo já no momento da compra e que permite carregar o veículo em tomadas comuns de 10 A. Como o próprio nome sugere, podem ser usados em situações não previstas onde não são encontrados carregadores ou tomadas mais potentes. Apesar da conveniência, sua baixa potência implica em menor velocidade de recarga das baterias.

Geralmente, com uma corrente máxima de 8 A ou 10 A, o carregador portátil fornece uma potência máxima de cerca de 2 kW em 220 V ou 1 kW em 110 V. Em um veículo com uma bateria de 40 kW, por exemplo, uma carga completa levaria 20 horas ou 40 horas, é realmente muito lenta se comparada com outros tipos de carregadores (Neocharge, 2021). Este carregador pode ser visto na Figura 9.

Figura 9 – Imagem de um modelo de carregador emergencial.



Fonte: Neocharge, 2021

2.6.2 Carregador Portátil

Os carregadores portáteis são muito parecidos com os carregadores de emergência, sendo a principal diferença a potência de carregamento. Enquanto os de emergência ficam limitados a 10 A com 1 fase, os carregadores portáteis podem fornecer até 32 A e em até 3 fases, multiplicando por 10 a potência máxima fornecida, reduzindo drasticamente o tempo de recarga das baterias. A potência máxima de carga é de 22 kW em 380 V (trifásico), mas também

existem modelos monofásicos de 7 kW (220 V) ou ainda os modelos de 3,7 kW (16 A em 220 V) (Neocharge, 2021). O carregador portátil monofásico pode ser observado na Figura 10.

Figura 10 – Imagem de um modelo de carregador monofásico portátil.



Fonte: Neocharge, 2021

2.6.3 Carregador *Wallbox*

Assim como os carregadores portáteis, os carregadores *Wallbox* são significativamente mais rápidos que os emergenciais. Em aplicações residenciais monofásicas, esses equipamentos são normalmente alimentados em 220 V, operando com correntes de 16 A ou 32 A, o que resulta em potências típicas de aproximadamente 3,7 kW e 7,4 kW, respectivamente. Já em instalações trifásicas de 380 V, utilizando as mesmas correntes por fase (16 A ou 32 A), a potência de recarga pode alcançar, de forma aproximada, 11 kW e 22 kW, reduzindo significativamente o tempo necessário para carregar o veículo. Além disso, os carregadores *Wallbox* incorporam sistemas de proteção mais robustos do que os modelos portáteis e utilizam uma instalação elétrica dedicada, garantindo maior segurança para as pessoas, para o equipamento e para o imóvel (Neocharge, 2021). O carregador pode ser observado na Figura 11.

O *Wallbox* pode ser instalado tanto na parede como em totens e é encontrado na potência de 3,7 kW até 22 kW utilizando corrente alternada para carregar o veículo, levando cerca de 2 horas a 12 horas para completar totalmente a capacidade de uma bateria de 40 kW (Neocharge, 2021).

Figura 11 – Imagem do carregador *Wallbox* instalado.



Fonte: Neocharge, 2021

2.6.4 Carregador Comercial

Carregadores comerciais frequentemente possuem mais de uma saída para o carregamento, possibilitando carregar mais de um veículo ao mesmo tempo, o que é ideal para estabelecimentos comerciais e condomínios, por exemplo, onde o uso tende a ser compartilhado. São inteligentes, permitem monitoramento e controle, têm alta confiabilidade e robustez, enquanto realizam a carga também em corrente alternada.

O carregador pode ser encontrado no mercado com o nome de estação de recarga ou carregador *parking*. As potências típicas desses equipamentos variam de 3,7 kW a 22 kW em instalações residenciais ou comerciais, podendo chegar a cerca de 40 kW em modelos com duas saídas. Nesses sistemas de recarga em corrente alternada, os valores de 16 A ou 32 A referem-se exclusivamente à corrente fornecida pela rede elétrica ao carregador. A conversão e o controle da corrente de carga da bateria são realizados pelo carregador *on-board* do veículo, que pode operar com correntes significativamente superiores às da alimentação da rede, dependendo da arquitetura interna do veículo e da potência disponível. Um exemplo prático é o carregador instalado na UDESC, que consome aproximadamente 91 A e é capaz de fornecer correntes da ordem de 150 A à bateria. A estação da UDESC pode ser observada na Figura 12.

Figura 12 – Imagem do carregador instalado na UDESC.



Fonte: UDESC, 2025

2.7 DISPOSIÇÕES PARA A INSTALAÇÃO DO CARREGADOR WALLBOX

A instalação de estações de recarga do tipo *Wallbox* deve atender aos requisitos estabelecidos pela ABNT NBR 5410:2004, com as devidas complementações e atualizações apresentadas pela norma brasileira de instalação de carregadores de veículos elétricos (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2022), norma que trata especificamente da infraestrutura elétrica para recarga de veículos elétricos.

Um dos principais requisitos dessa norma refere-se à proteção por corrente diferencial-residual (DR). Conforme a Seção 5.1.1.3, cada ponto de conexão em corrente alternada deve ser protegido individualmente por um dispositivo DR com corrente nominal residual igual ou inferior a 30 mA. Este dispositivo pode estar instalado no quadro de distribuição da instalação elétrica fixa ou integrado à estação de recarga. Ressalta-se que o DR não pode ser compartilhado com outros circuitos.

Além disso, conforme a Seção 5.4.2.1.101 da NBR 17019, todos os pontos de conexão localizados em ambientes com afluência de público devem ser protegidos contra sobretensões transitórias, mediante a instalação de Dispositivos de Proteção contra Surtos (DPS), aplicados individualmente ou por grupo, conforme a avaliação técnica da instalação.

Com relação aos tipos de DR permitidos, a Seção 6.3.3.2 da norma estabelece critérios específicos conforme o modo de recarga:

- Para os modos 1 e 2, devem ser utilizados dispositivos do tipo A, com corrente nominal residual de até 30 mA. A utilização de dispositivos do tipo CA não é permitida, pois estes não detectam falhas em corrente contínua.
- Para o modo 3, que é o foco deste trabalho, é necessária proteção contra corrente de falta em corrente contínua. Essa proteção pode ser implementada por uma das seguintes configurações:
 1. Utilização de dispositivo DR do tipo B;
 2. Utilização do DR tipo A em conjunto com um sensor de corrente diferencial-residual contínua, conforme a *IEC 62955*;
 3. Utilização do DR tipo F em conjunto com sensor de corrente contínua, conforme a *IEC 62955*.

Essas exigências têm como objetivo garantir a segurança dos usuários e a integridade dos equipamentos frente às possíveis falhas que envolvam correntes residuais em corrente contínua, as quais podem surgir durante o processo de carregamento do veículo.

2.8 TRANSMISSÃO DE DADOS

A fim de possibilitar o monitoramento remoto dos parâmetros elétricos da estação de recarga, tais como tensão, corrente, potência, estado do controle de piloto (CP) e eventos operacionais, foi adotada uma solução de comunicação baseada no protocolo *HTTP*, utilizando a plataforma *IoT* TagoIO como destino dos dados. Essa abordagem permite que as informações coletadas pelo microcontrolador ESP32 sejam enviadas periodicamente a um servidor remoto, garantindo registro contínuo, visualização gráfica e análise de desempenho do sistema em tempo real.

Diferentemente de soluções que dependem de comunicação local ou atualizações manuais, a integração via *HTTP* possibilita que qualquer dispositivo conectado à Internet acesse os dados em tempo real, sem a necessidade de infraestrutura externa adicional. Nesse contexto, a utilização do protocolo *HTTPS* garante um nível elevado de segurança, uma vez que emprega criptografia TLS/SSL para proteger a confidencialidade, a integridade e a autenticidade das informações transmitidas entre o ESP32 e a plataforma.

A plataforma utilizada oferece suporte a *dashboards* personalizados, armazenamento em nuvem e ferramentas analíticas, o que torna o sistema escalável e adequado para aplicações de monitoramento industrial e de estações de recarga.

2.8.1 Protocolo *HTTP* e Comunicação com o TagoIO

O Protocolo de Transferência de Hipertexto (*HTTP*) foi adotado neste projeto como o principal meio de comunicação entre a estação de recarga e o servidor remoto responsável pelo monitoramento. O *HTTP*, amplamente utilizado na web, opera segundo o modelo cliente-servidor, no qual o ESP32 atua como cliente, enviando requisições ao servidor da plataforma TagoIO. A transmissão ocorre por meio de mensagens estruturadas em formato JSON utilizando o método POST, que permite o envio periódico de dados, como tensão, corrente, potência e eventos operacionais.

O formato JSON (*JavaScript Object Notation*) é uma estrutura leve de representação de dados baseada em pares *chave:valor*, amplamente utilizada em aplicações web e IoT devido à sua simplicidade e compatibilidade com diferentes linguagens de programação. No contexto deste projeto, o JSON organiza as medições do sistema de forma padronizada, permitindo que o servidor interprete facilmente os valores transmitidos. Já o método POST é um dos verbos do protocolo *HTTP* e é empregado para o envio de dados do cliente ao servidor no corpo da requisição. Essa abordagem é adequada para operações que envolvem atualização, criação ou registro de informações, como o envio periódico das grandezas monitoradas pela estação de recarga.

Por ser um protocolo sem estado, cada requisição *HTTP* é tratada de maneira independente, o que simplifica o fluxo de comunicação e reduz a carga de processamento no microcontrolador, já que não há necessidade de manter conexões persistentes ou sessões. Essa característica torna o *HTTP* particularmente adequado para aplicações de IoT que realizam transmissões cíclicas, como o monitoramento de uma estação de recarga em operação. A autenticação ocorre por meio de um token exclusivo fornecido pela TagoIO, garantindo que apenas dispositivos autorizados enviem dados ao servidor. A abordagem adotada elimina a necessidade de servidores locais ou infraestrutura adicional, ao mesmo tempo em que garante elevada compatibilidade com diferentes sistemas e facilita a futura expansão ou integração com outros serviços em nuvem.

2.8.2 TagoIO como Plataforma IoT para Monitoramento Remoto

A plataforma TagoIO foi utilizada como ferramenta central para o armazenamento, visualização e análise dos dados operacionais da estação de recarga. Por meio de sua API *HTTP*, os valores enviados pelo ESP32 são registrados automaticamente na nuvem, onde podem ser organizados em *dashboards* configuráveis que apresentam gráficos, indicadores numéricos e painéis de análise em tempo real. Essa estrutura permite observar o comportamento elétrico da estação durante o processo de recarga, oferecendo informações como variações de tensão,

consumo de corrente, potência entregue ao veículo e estados de funcionamento da lógica de controle definida pela norma IEC 61851-1.

O uso da TagoIO tornou possível monitorar remotamente o desempenho do protótipo sem a necessidade de infraestrutura adicional, além de permitir a criação de um histórico detalhado de medições para auditoria, validação normativa e testes comparativos. A plataforma também facilita a identificação de anomalias ou interrupções no processo de recarga, contribuindo para o aumento da confiabilidade do sistema. Com essa solução, o protótipo integra tecnologias de comunicação IoT a uma aplicação prática na área de mobilidade elétrica, reforçando a proposta de desenvolver uma estação de recarga inteligente, conectada e alinhada às necessidades atuais de monitoramento remoto.

2.9 COMUNICAÇÃO VIA *CONTROL PILOT* (CP)

A comunicação entre a Estação de Recarga (EVSE) e o veículo elétrico (VE), no modo 3 da norma ABNT NBR IEC 61851-1, ocorre por meio do condutor denominado *Control Pilot* (CP). Esse circuito desempenha um papel central na segurança, no controle do fornecimento de energia e na interoperabilidade entre diferentes veículos e estações de recarga. Por meio de níveis de tensão e impedâncias padronizadas, estabelece-se um canal de comunicação analógico simples, porém extremamente confiável, que garante que a energização do cabo ocorra somente em condições seguras.

A norma define que a EVSE gera no CP um sinal de onda quadrada de 1 kHz com amplitude de ± 12 V. Esse sinal é enviado ao veículo, que altera sua forma conforme seu estado interno, introduzindo resistores e circuitos de detecção. Assim, a EVSE consegue interpretar o estado operacional do sistema analisando as tensões resultantes no pino CP.

Os principais estados definidos pela norma podem ser identificados a partir da tensão medida no CP, conforme a Tabela 3. Esses estados representam desde a simples presença do veículo conectado a EVSE até a autorização para o início do carregamento.

Além da identificação dos estados lógicos, o pino CP incorpora o mecanismo de codificação da corrente máxima permitida pela EVSE. Isso é feito por meio de um resistor conectado entre o condutor de proteção (PE) e o CP no interior da estação. A resistência informa ao veículo o limite de corrente disponível; por exemplo, um resistor de 1,3 k Ω corresponde à capacidade de fornecer até 32 A. Esse método, amplamente utilizado e padronizado, evita a necessidade de protocolos digitais complexos, mantendo a robustez e a interoperabilidade do sistema.

O CP também atua como um intertravamento de segurança obrigatório. A energização somente é permitida após o reconhecimento da conexão física, a análise do estado lógico do veículo e a verificação da integridade do aterramento. O sistema deve monitorar continuamente o valor do CP e detectar anomalias, como interrupções do terra, desconexões súbitas ou tensões fora dos limites especificados. Quando qualquer irregularidade é identificada, a EVSE deve interromper imediatamente o fornecimento de energia, prevenindo choques elétricos, falhas de

Tabela 3 – Estados do pino CP conforme a tensão medida, segundo a IEC 61851-1.

Tensão no CP	Estado Interpretado
+12 V	EVSE disponível, nenhum veículo conectado
+9 V	Veículo conectado fisicamente, mas não pronto
+6 V	Veículo pronto para iniciar o carregamento
+3 V	Solicitação de ventilação ou condição de alerta
0 V ou valores negativos	Falha, desconexão ou erro grave

Fonte: Autor, (2025).

Tabela 4 – Valor máximo de corrente por ciclo de trabalho.

Ciclo de trabalho (D)	Corrente máxima	Unidade
Menor que 3%	0	A
Entre 3% e 7%	Comunicação Digital	–
Entre 7% e 8%	0	A
Entre 8% e 10%	6	A
Entre 10% e 85%	$D \cdot 0,6$	A
Entre 85% e 96%	$(D-64) \cdot 2,5$	A
Entre 96% e 97%	80	A
Mais de 97%	0	A

Fonte: Adaptado de (ABNT, 2021).

isolamento e situações de risco.

Por padronizar tanto os níveis de sinal quanto os mecanismos de segurança, a comunicação via CP garante a interoperabilidade entre veículos e estações de diferentes fabricantes. Qualquer veículo compatível com as normas IEC 61851-1 e IEC 61851-22 pode ser carregado em qualquer EVSE que implemente o mesmo padrão, contribuindo significativamente para a expansão segura e universal da infraestrutura de carregamento em corrente alternada.

2.9.1 Funções da estação de recarga

A principal função da estação de recarga, por meio da modulação por largura de pulsos (PWM), é informar ao VE qual a corrente máxima disponível para ser drenada da rede durante o processo de recarga (ABNT, 2021).

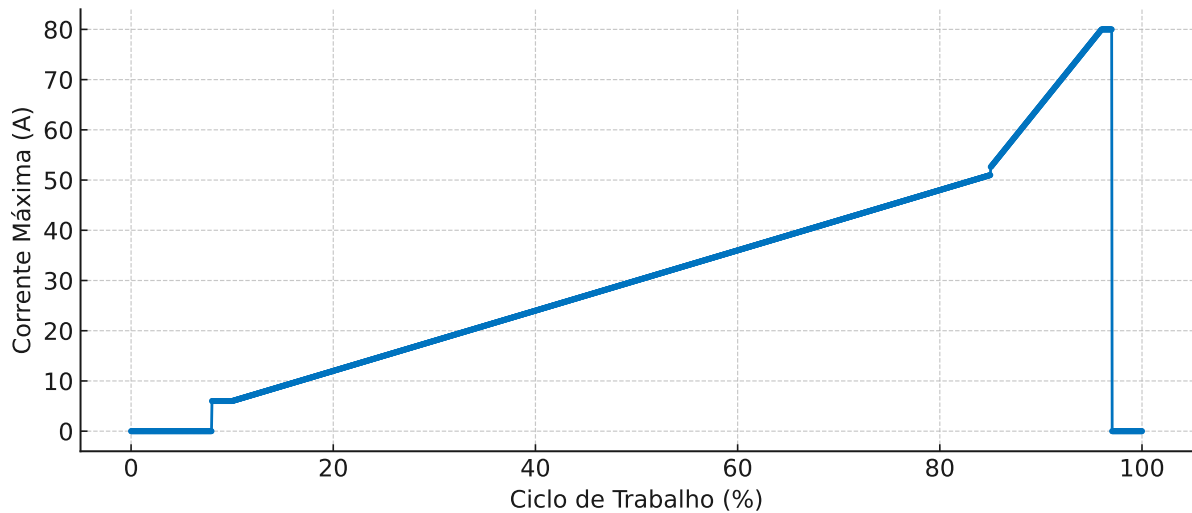
A relação entre o ciclo de trabalho do sinal PWM e a corrente máxima permitida é apresentada na Tabela 4. Para ciclos inferiores a 3% ou superiores a 97%, a corrente máxima disponível é nula. No intervalo entre 3% e 7%, o valor da corrente é definido exclusivamente por uma comunicação digital adicional, obrigatória apenas para o modo 4 de carregamento; assim, no modo 3, a corrente também permanece igual a zero nessa faixa (ABNT, 2021).

Entre 7% e 8%, a norma igualmente estabelece corrente máxima igual a zero, isolando completamente a faixa destinada à comunicação digital. A partir desse ponto, para ciclos de 8% a 10%, o valor máximo permitido é fixado em 6 A. Já entre 10% e 85%, a corrente máxima passa a ser determinada pela equação apresentada na Tabela 4, resultando na inclinação de reta

observada na Figura 13.

Para ciclos de trabalho entre 85% e 96%, a corrente segue uma segunda equação também descrita na Tabela 4, apresentando uma inclinação mais acentuada em comparação com a faixa anterior, como ilustrado na Figura 13. Por fim, para o intervalo de 96% a 97%, a corrente máxima atinge 80 A, que representa o maior valor permitido para carregamento em modo 3 (ABNT, 2021).

Figura 13 – Valor Máximo de Corrente x Ciclo de Trabalho.



Fonte: UDESC, 2025

Além disso, quando o ciclo de trabalho é igual a 0%, o sinal PWM assume um valor fixo de -12 V, indicando falha na estação de recarga, a qual necessita de intervenção ou reparo. De forma análoga, para ciclo de trabalho igual a 100%, o PWM permanece constante, indicando que a estação de recarga não está disponível para fornecer energia ao VE (ABNT, 2021).

Tendo o correto funcionamento das funções do VE no controle de piloto, os possíveis estados da tensão V_a são apresentados na Tabela 5. Os estados A, B, C e D de índice 1 possuem a mesma faixa de tensão V_a dos respectivos estados de índice 2; entretanto, diferenciam-se pelo fato de a estação de recarga estar apta ou não a liberar energia.

Em outras palavras, enquanto a corrente ainda não está disponível, o PWM permanece em 100 %, mantendo V_a em nível contínuo. Quando a estação está apta a liberar corrente, o ciclo de trabalho passa a ser ajustado de acordo com o valor máximo permitido, refletindo no pino piloto a condição operacional correspondente.

Tabela 5 – Estados possíveis da tensão V_a no pino piloto

Tensão (V_a)	Uni.	Conectados	VE pronto	Ventilação	Estação pronta	Ciclo	Uni.	Estado
11 a 13	V	Não	-	-	Não	100	%	A1
11 a 13	V	Não	-	-	Sim	3 a 97	%	A2
8 a 10	V	Sim	Não	Não	Não	100	%	B1
8 a 10	V	Sim	Não	Não	Sim	3 a 97	%	B2
5 a 7	V	Sim	Sim	Não	Não	100	%	C1
5 a 7	V	Sim	Sim	Não	Sim	3 a 97	%	C2
2 a 4	V	Sim	Sim	Sim	Não	100	%	D1
2 a 4	V	Sim	Sim	Sim	Sim	3 a 97	%	D2
-1 a 1	V	-	-	-	-	-	%	E
-12	V	-	-	-	Não	0	%	F

Fonte: Adaptado de (ABNT, 2021)

2.9.2 Estados do Pino Piloto

Tendo o funcionamento correto das funções do VE por meio do pino piloto, os estados possíveis da tensão V_a são apresentados na Tabela 6. Os estados A, B, C e D de índice 1 apresentam os mesmos valores de tensão V_a de seus respectivos estados de índice 2. Contudo, diferenciam-se quanto à disponibilidade de corrente fornecida ao VE. Enquanto o consumo de corrente ainda não estiver liberado pela estação de recarga, o sinal de controle permanece com ciclo de trabalho de 100%, mantendo V_a constante. Após a liberação de corrente pelo equipamento, o ciclo de trabalho do sinal PWM passa a representar a corrente máxima disponível ao VE, conforme especificado pela norma IEC 61851-1.

Tabela 6 – Tempo máximo de subida e descida (10% a 90%) do sinal CP conforme IEC 61851-1

Estado	Descrição	t_{subida} (máx.)	$t_{descida}$ (máx.)	Unidade
B	Veículo conectado	≤ 10	≤ 13	μs
C	Ventilação necessária	≤ 7	≤ 13	μs
D	Ventilação ativa	≤ 5	≤ 13	μs

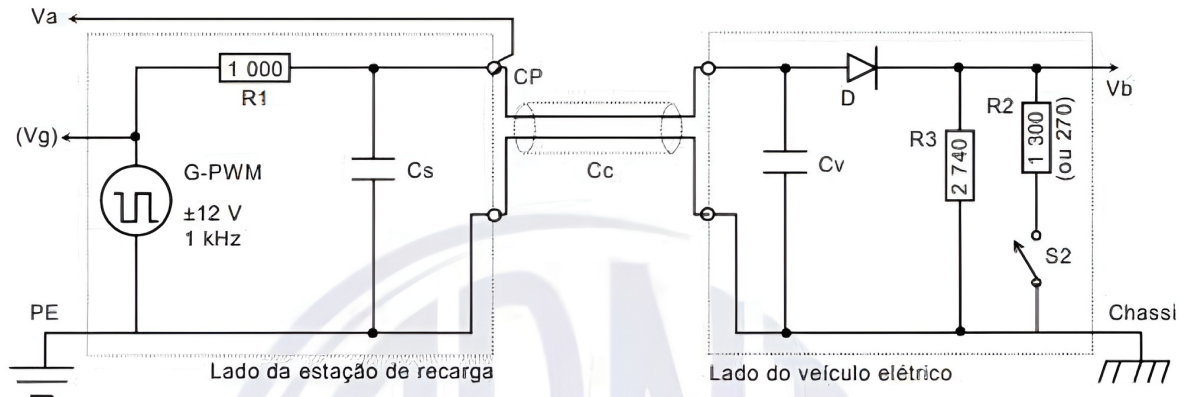
Fonte: Adaptado de IEC 61851-1, (2021)

Dessa forma, o processo de recarga ocorre efetivamente apenas nos estados C2 e D2. Além disso, no estado D2, o VE pode interromper o processo de recarga a qualquer momento, caso a ventilação necessária não esteja disponível ou seja interrompida durante o carregamento.

2.9.3 Circuito Típico do Controle de Piloto e Funcionamento

A Figura 14 apresenta o circuito típico do sistema de comunicação entre a estação de recarga e o veículo elétrico conforme definido pela ABNT NBR 17019 (2021) e IEC 61851-1. Esse arranjo estabelece a base elétrica necessária para que o veículo identifique as condições de disponibilidade da estação, verifique a segurança do aterramento e informe à infraestrutura sua capacidade de corrente.

Figura 14 – Circuito típico do controle de piloto.



Fonte: ABNT, 2021

No lado da estação, o sinal CP é gerado por uma fonte PWM de ± 12 V a 1 kHz, aplicada ao terminal CP por meio do resistor R1, que limita a corrente e garante conformidade com os valores normativos. Além disso, o capacitor Cs fornece um caminho capacitivo de referência que ajuda na estabilização do sinal e no correto reconhecimento das transições de estado.

Do lado do veículo elétrico, a norma define uma série de componentes que alteram a impedância vista pela estação, permitindo que ela determine o estado do processo de recarga. O resistor R2 é responsável por representar o estado B (veículo conectado), enquanto o resistor R3 indica o estado C (veículo conectado com ventilação necessária). O diodo D estabelece assimetria no sinal PWM, possibilitando que a estação diferencie o estado D quando a ventilação ativa é exigida. O capacitor Cv contribui para o amortecimento de transições e redução de ruído.

A Tabela 7 apresenta os valores mínimos, máximos e nominais desses componentes conforme a IEC 61851-1. A padronização desses elementos garante interoperabilidade entre estações e veículos de diferentes fabricantes, assegurando que o ciclo de carregamento ocorra de forma segura e previsível.

Tabela 7 – Valores máximos e mínimos dos componentes para o circuito típico

Componente	Símbolo	Valor mínimo	Valor nominal	Valor máximo	Unidade
Resistor	R1	970	1000	1030	Ω
Capacitor	Cs	300	–	1600	pF
Capacitor	Cv	–	–	2400	pF
Diodo (queda de tensão)	D	0,55	0,7	0,85	V
Resistor	R3	2658	2740	2822	Ω
Resistor	R2	1261	1300	1339	Ω
Resistor	R_vent	261,9	270	278,1	Ω

Fonte: Adaptado de IEC 61851-1 (2021)

Em operação, a estação interpreta o valor de tensão resultante no terminal CP para determinar o estado da conexão (A, B, C ou D). Quando o veículo fecha o circuito por meio

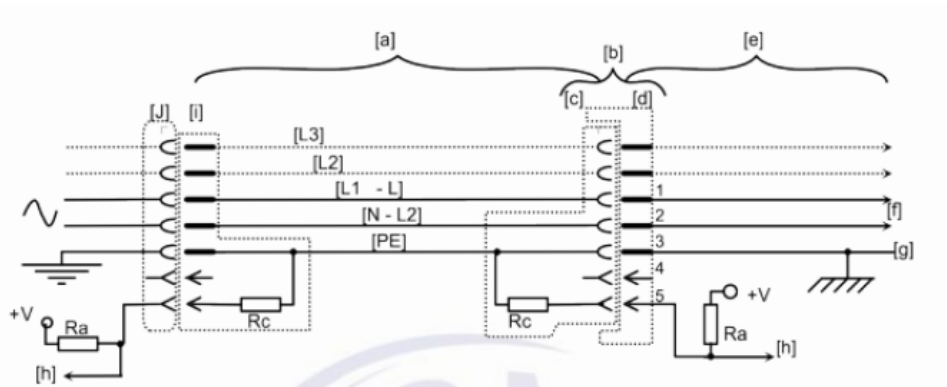
de R2 ou R3, modifica-se a amplitude do sinal *PWM*, permitindo que a estação identifique se o veículo está presente, se está pronto para carregar ou se necessita de ventilação adicional. Somente após essa validação a estação libera a energia para o lado AC por meio da contatora interna.

Esse circuito constitui o núcleo da comunicação EVSE-VE e atua como elemento de segurança, prevenindo energização acidental dos cabos e garantindo que apenas veículos aptos recebam energia.

2.9.4 Pino de Proximidade (PP)

Além do sinal de controle transmitido pelo pino CP, a norma IEC 61851-1 define o uso do pino de proximidade (PP), cuja função é garantir a segurança elétrica antes mesmo do início do processo de carregamento. Diferentemente do CP, que estabelece a comunicação dinâmica entre o veículo elétrico e a estação de recarga, o PP opera de forma passiva, por meio de um divisor resistivo incorporado ao conector do cabo de carregamento. O circuito do pino PP pode ser observado na Figura 15

Figura 15 – Circuito do Pino PP.



Fonte: ABNT, 2021

O valor resistivo, observado na Figura 16, presente no PP permite que a estação identifique automaticamente a capacidade de corrente máxima do cabo utilizado, evitando sobrecorrentes e garantindo que o carregamento ocorra dentro dos limites especificados pelo fabricante. Além disso, o PP também detecta a presença física do conector no veículo, impedindo o acionamento da contatora enquanto o conector não estiver devidamente encaixado.

Figura 16 – Resistor de codificação da corrente do Pino PP.

Corrente admissível do cabo de recarga para VE	Resistência nominal do Rc Tolerância $\pm 3\%$ ^c	Características nominais mínimas de dissipação dos resistores ^{a, b}
(A)	(Ω)	(W)
	Condição de erro ^d ou desconexão do plugue	
13	1 500	0,5
20	680	0,5
32	220	1

Fonte: Adaptado de ABNT, 2021

Essa detecção resistiva contribui diretamente para a segurança operacional do sistema, evitando energização inadvertida do conector e possibilitando que diferentes cabos sejam utilizados com níveis adequados de proteção. Em conjunto com o CP, o pino de proximidade forma o mecanismo completo de sinalização definido pela IEC 61851-1, assegurando a interoperabilidade e a integridade do processo de recarga.

3 DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo, são apresentadas as formas construtivas da placa de controle, a fonte de alimentação da placa de controle e o quadro de comando.

3.1 CONTINUIDADE DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Este Trabalho de Conclusão de Curso constitui uma extensão direta do projeto desenvolvido anteriormente por Alessandro Negherbon (JUNIOR, 2023), cujo foco principal foi a concepção e implementação da lógica de funcionamento do circuito responsável pela comunicação do pino piloto (CP), conforme os requisitos da norma IEC 61851-1. No trabalho base, o autor desenvolveu toda a estratégia de controle do sinal PWM, a interpretação dos estados A, B, C e D, além do projeto esquemático eletrônico que compunha a placa de controle. A versão original da placa havia sido implementada em dois *layers*, contendo toda a circuitaria necessária para a leitura e geração do pino piloto.

A partir dessa base consolidada, o presente trabalho dá continuidade ao desenvolvimento, ampliando significativamente o escopo da solução. Inicialmente, o layout da placa de controle foi reprojetoado para um único *layer*, mantendo integralmente a lógica concebida por Alessandro, mas adaptando seu arranjo físico para facilitar o processo de fabricação e montagem. Além disso, novas funcionalidades foram incorporadas, incluindo: a utilização de fontes de alimentação dedicadas à placa, o sistema de aquisição e processamento da corrente drenada pela carga em uma das fases, a implementação de comunicação wi-fi para envio de dados a um servidor remoto, a criação da lógica de potência responsável pelo acionamento do sistema de recarga, e a montagem física do painel elétrico da estação.

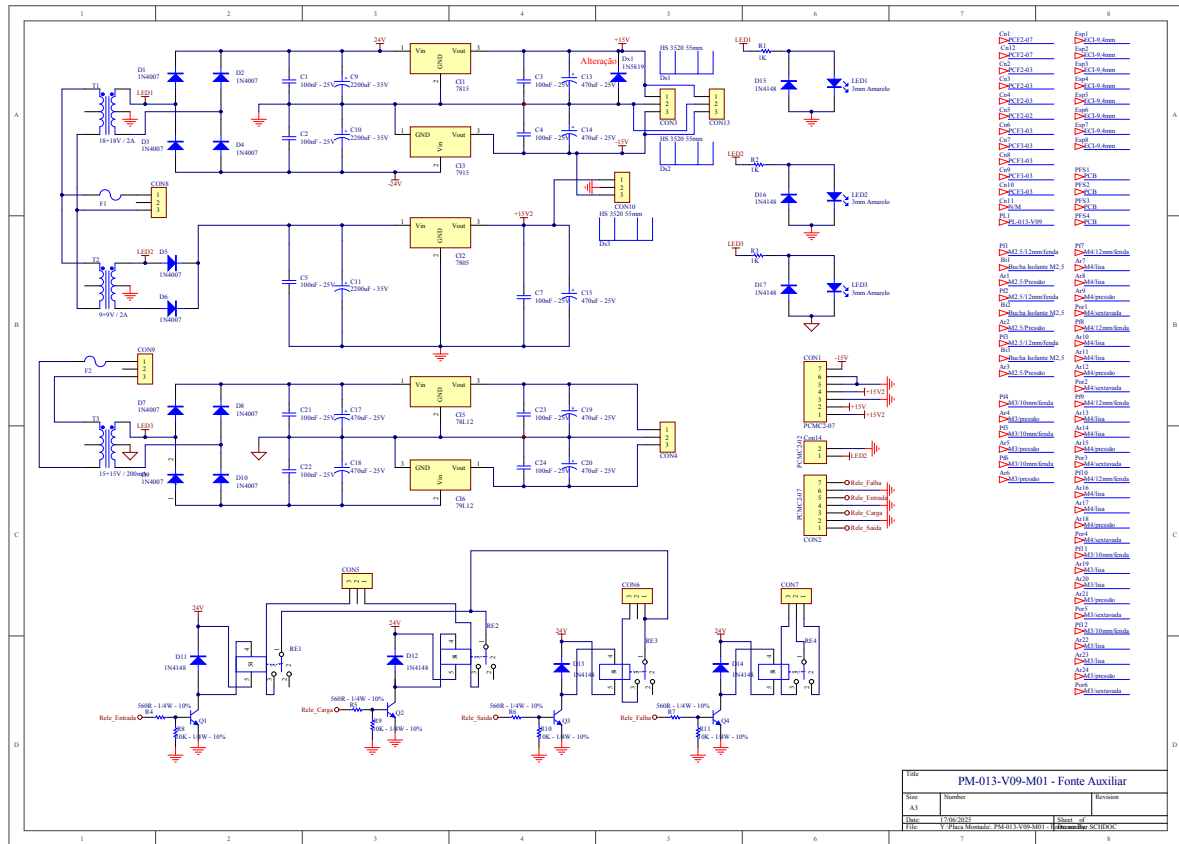
Por fim, esta continuidade inclui também a realização de testes avançados de conformidade e interoperabilidade utilizando o sistema profissional *Charging Discovery System (CDS)*, permitindo avaliar o comportamento do protótipo em condições semelhantes às de uma estação de recarga comercial. Dessa forma, o presente TCC não apenas complementa, mas expande o trabalho anterior, evoluindo o protótipo para um modelo funcional mais completo e alinhado às práticas de engenharia voltadas à infraestrutura de recarga de veículos elétricos.

3.2 FONTE DE ALIMENTAÇÃO

A fonte de alimentação é um dos elementos essenciais para o funcionamento da estação de recarga de veículos elétricos, sendo responsável por fornecer as tensões contínuas necessárias para os circuitos de controle, acionamento e comunicação.

Nesta etapa do projeto, são utilizadas placas de fonte de alimentação prontas, disponibilizadas por meio de uma parceria entre a UDESC e a empresa *Supplier*. Essas placas, ao serem integradas aos projetos desenvolvidos no ambiente universitário, contribuem diretamente para a

Figura 17 – Fonte linear para implementação da placa de controle.



3.2.1 Funcionamento da Fonte de Alimentação

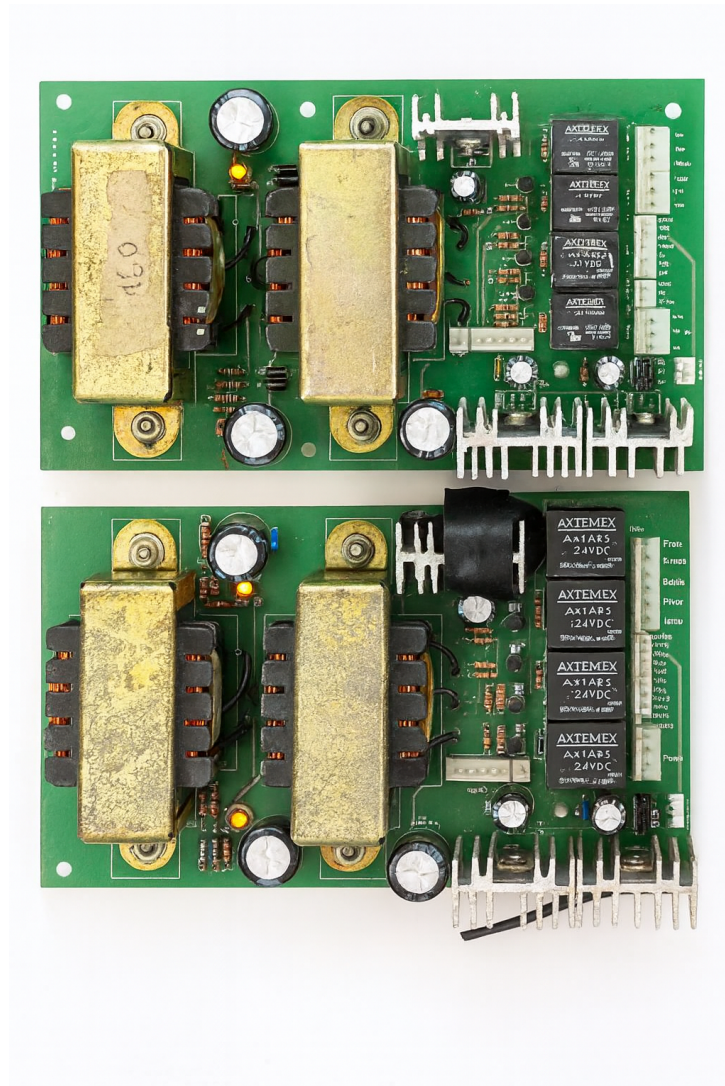
O funcionamento da fonte de alimentação ocorre por meio de uma sequência de estágios clássicos em topologia linear, que converte a tensão alternada da rede elétrica em tensões contínuas e estáveis, utilizadas pelos circuitos internos da estação de recarga.

O processo pode ser descrito em quatro etapas principais:

1. **Transformação:** a entrada da fonte recebe tensão alternada da rede em 220 V, que é reduzida a níveis adequados por transformadores com secundários de 18 V e 9 V. Esses valores são escolhidos por serem compatíveis com os reguladores lineares utilizados nas etapas seguintes.
2. **Retificação:** após a transformação, a tensão alternada passa por um circuito retificador de onda completa com diodos do tipo 1N4007. Este circuito converte a tensão CA em uma forma pulsante de tensão CC.
3. **Filtragem:** a saída retificada é então filtrada por capacitores eletrolíticos de alta capacitância, que suavizam a tensão e reduzem a ondulação. Capacitores cerâmicos adicionais são utilizados para atenuar ruídos de alta frequência.
4. **Regulação de tensão:** a tensão filtrada serve como entrada para os circuitos reguladores baseados em *CI*s do tipo 78XX (como 7815 e 7805), que estabilizam a tensão de saída em 15 V e 5 V, respectivamente. Esses reguladores mantêm a tensão constante, mesmo diante de variações moderadas na carga ou na tensão de entrada.

Além disso, a placa incorpora relés de proteção e *LEDs* indicadores de operação, permitindo a sinalização visual do status da fonte. A presença de dissipadores metálicos garante a dissipação térmica dos reguladores, evitando o sobreaquecimento durante a operação contínua. Para este projeto, utilizou-se duas fontes lineares devido à necessidade de isolamento entre os dois lados da placa de controle, as placas das fontes podem ser vistas na Figura 18.

Figura 18 – Fonte linear.



Fonte: Autor, 2025

3.3 ESTRUTURA FUNCIONAL DA PLACA DE CONTROLE

A arquitetura da placa de controle desenvolvida para a estação de recarga modo 3 é projetada com base em dois blocos funcionais distintos, de modo a organizar melhor os objetivos de operação e facilitar o processo de implementação e validação.

O primeiro bloco diz respeito ao controle do sinal piloto, responsável por estabelecer a comunicação entre o VE e a estação de recarga. Esse circuito realiza a geração e a leitura do sinal de controle, permitindo a identificação do status de conexão do veículo, a autorização da carga e a sinalização de condições anormais, conforme estabelecido na norma ABNT NBR IEC 61851-22.

O segundo bloco destina-se à medição da tensão da rede elétrica, que permite acompanhar, em tempo real, a tensão da fase de alimentação. A leitura é feita de forma isolada e condicionada, permitindo ao sistema monitorar variações na rede e adotar medidas corretivas em caso de

desvios que comprometam a segurança do processo de recarga.

3.3.1 Placa de Circuito Impresso

A placa de circuito impresso foi projetada no *software* Proteus a partir do diagrama esquemático completo do sistema de controle da estação de recarga modo 3. Durante o processo de desenvolvimento, ajustes foram realizados no roteamento e na distribuição dos componentes, com o objetivo de garantir a separação adequada entre os blocos funcionais, minimizar interferências e facilitar futuras etapas de testes e manutenção. A Figura 21 apresenta a visualização tridimensional utilizada como referência para o posicionamento dos elementos e para a organização geral da arquitetura eletrônica.

A estrutura da placa é organizada em dois blocos principais, seguindo diretamente a lógica funcional exigida pelo sistema. O primeiro bloco, destacado na Figura 19, corresponde ao circuito responsável pelo processamento do *signal piloto*. Esse conjunto inclui a geração do sinal PWM, os estágios de condicionamento analógico e os elementos de leitura das impedâncias normativas. A correta implementação desse módulo é fundamental para o cumprimento da norma ABNT NBR IEC 61851-1, pois é por meio dele que ocorre a comunicação entre o VE e a estação de recarga, permitindo identificar estados operacionais e autorizar ou bloquear o fornecimento de energia.

O segundo bloco, ilustrado na Figura 20, é dedicado à medição da tensão da rede elétrica. Esse circuito desempenha a função de reduzir, isolar e condicionar o valor da fase de alimentação para níveis adequados ao microcontrolador. O estágio inclui divisor resistivo, proteção contra surtos, retificação e filtragem, de modo que o sinal resultante possa ser utilizado pelo sistema de controle para monitoramento contínuo da rede. Essa informação é essencial para a atuação segura da estação, especialmente em cenários de subtensão, sobretensão ou falhas de alimentação.

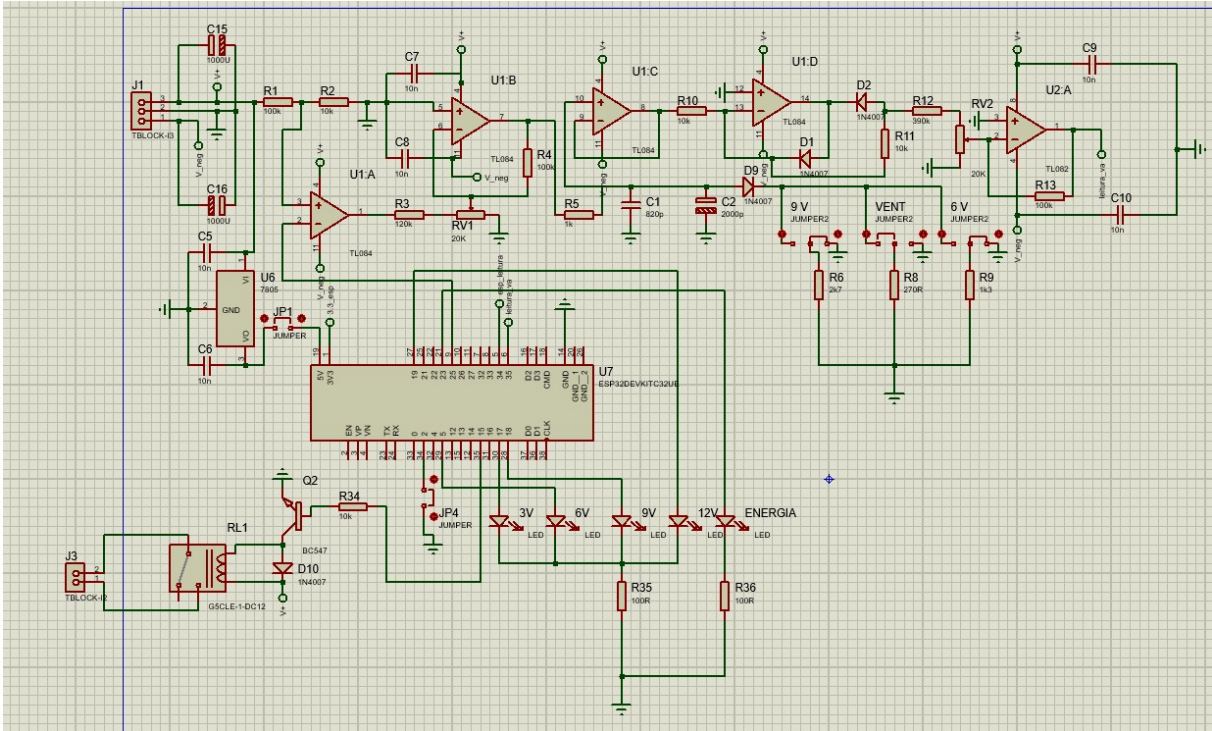
As Figuras 19 e 20 evidenciam os dois subsistemas eletrônicos implementados na PCB, servindo como referência visual para o detalhamento apresentado nas subseções seguintes, onde cada estágio do circuito é analisado individualmente.

3.3.1.1 Topologias

A Figura 22 destaca a divisão interna dos circuitos implementados na placa, sendo cada região identificada por uma cor distinta, com o objetivo de facilitar a compreensão dos blocos funcionais. Cada área representa um estágio essencial do funcionamento eletrônico da estação de recarga, conforme descrito a seguir:

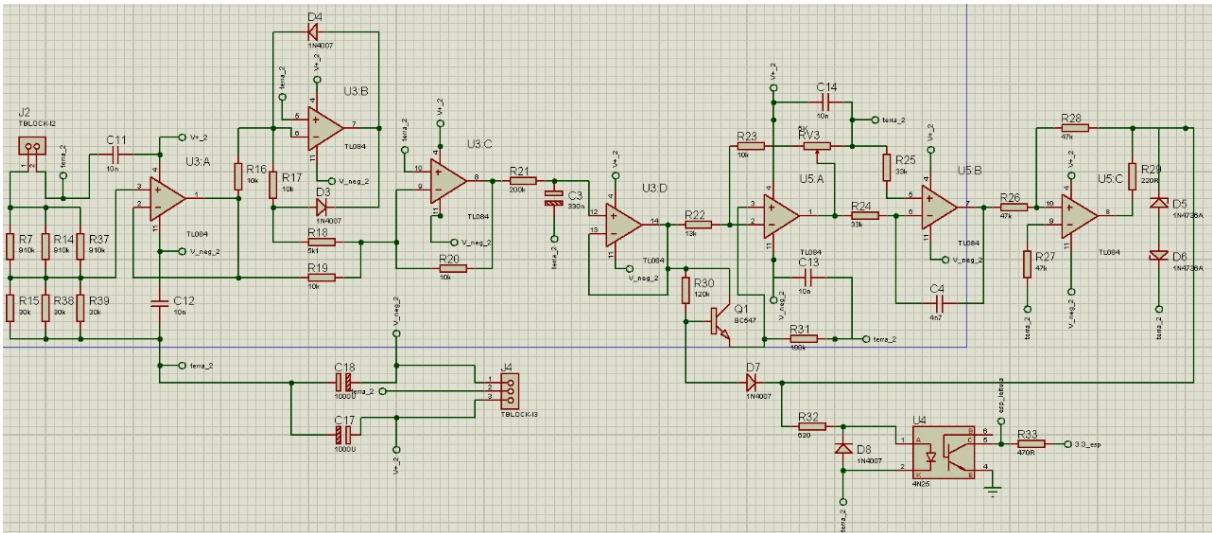
- **Vermelho:** capacitores eletrolíticos de 1000 μF , responsáveis pelo filtro da fonte dedicada aos circuitos integrados TL084, garantindo a estabilidade das tensões de alimentação.
- **Amarelo:** circuito de medição da tensão V_a , incluindo os capacitores de 47 nF utilizados para filtragem e estabilização do sinal retificado.

Figura 19 – Circuito do pino piloto no Proteus.



Fonte: Autor, 2025

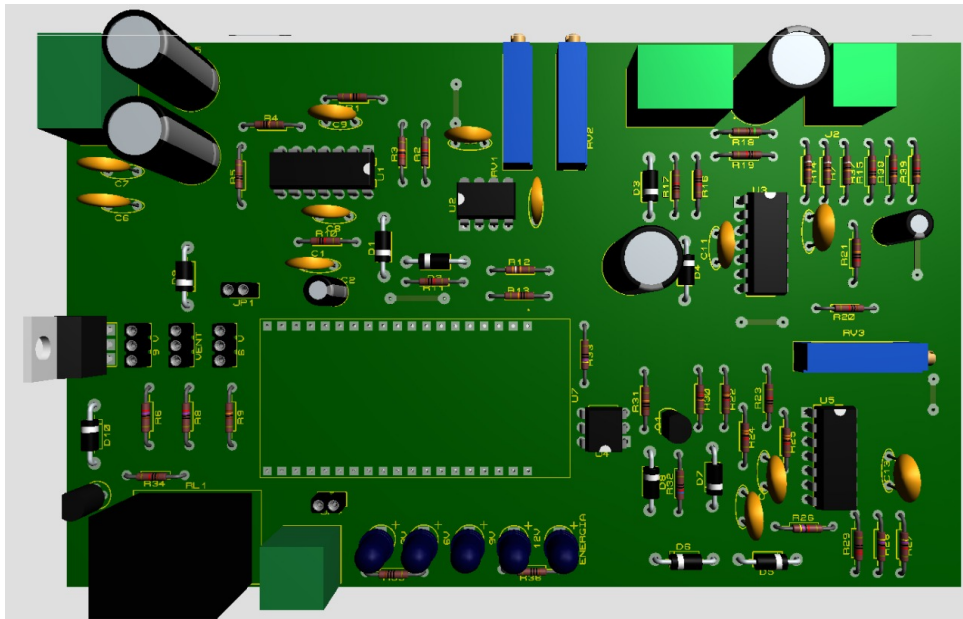
Figura 20 – Circuito de medição de tensão da rede no Proteus.



Fonte: Autor, 2025

- **Roxo:** resistores e jumpers destinados a simular os estados operacionais definidos pela IEC 61851-1 durante o processo de recarga.
- **Verde:** circuito de acionamento do relé, responsável pelo chaveamento da energia fornecida ao veículo.
- **Branco:** conjunto de LEDs responsáveis pela indicação dos estados de operação da

Figura 21 – Placa de circuito impresso 3D.



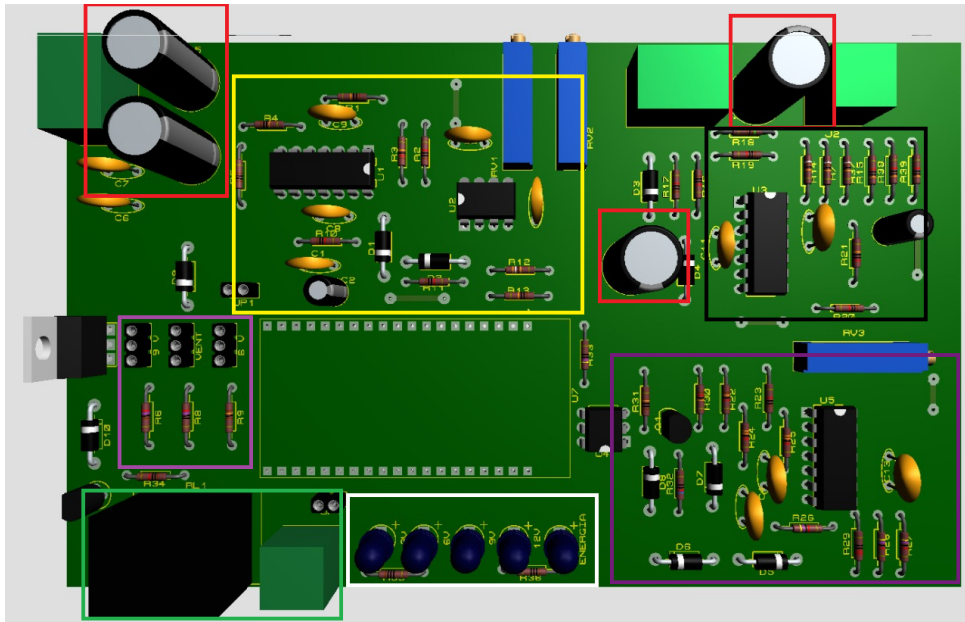
Fonte: Autor, 2025

estação, além do jumper que determina a disponibilidade do fornecimento de energia ao VE. O *LED* mais próximo do réle indica uma tensão no pino V_a de 3 V, em sequência o *LED* de 6 V, 9 V, 12 V e por fim o *LED* de acionamento do relé.

- **Preto:** circuito de retificação da tensão senoidal proveniente da rede elétrica.
- **Rosa:** oscilador controlado por tensão (OCT), conectado ao optoacoplador utilizado para promover o isolamento galvânico entre o sistema de medição da rede e o microcontrolador.
- **Azul:** potenciômetros utilizados no ajuste fino dos circuitos analógicos, em especial nas etapas relacionadas ao OCT e ao condicionamento do sinal piloto.
- **Não destacados:** componentes adicionais, como o regulador de tensão responsável pela alimentação independente do microcontrolador, os bornes de entrada e saída, os conectores de entrada da rede e o optoacoplador que realiza a interface entre as duas malhas de aterramento da placa.

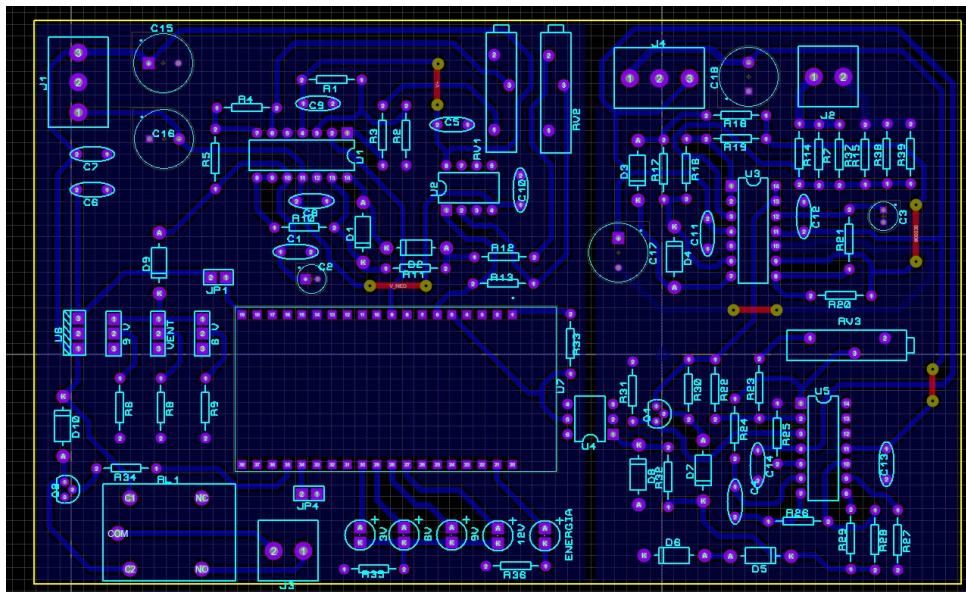
Em relação às referências de aterramento, considerando que a proposta do circuito envolve a medição da tensão da rede de forma isolada, foram adotadas duas malhas de terra distintas para garantir a separação galvânica necessária. Como ilustrado na Figura 23, há uma malha de terra localizada à esquerda do optoacoplador, correspondente ao circuito de medição da rede, e outra à direita, destinada aos circuitos relacionados ao sinal piloto.

Figura 22 – Placa de circuito impresso 3D com regiões funcionais destacadas.



Fonte: Autor, 2025

Figura 23 – Layout do circuito impresso com separação das malhas de aterramento.

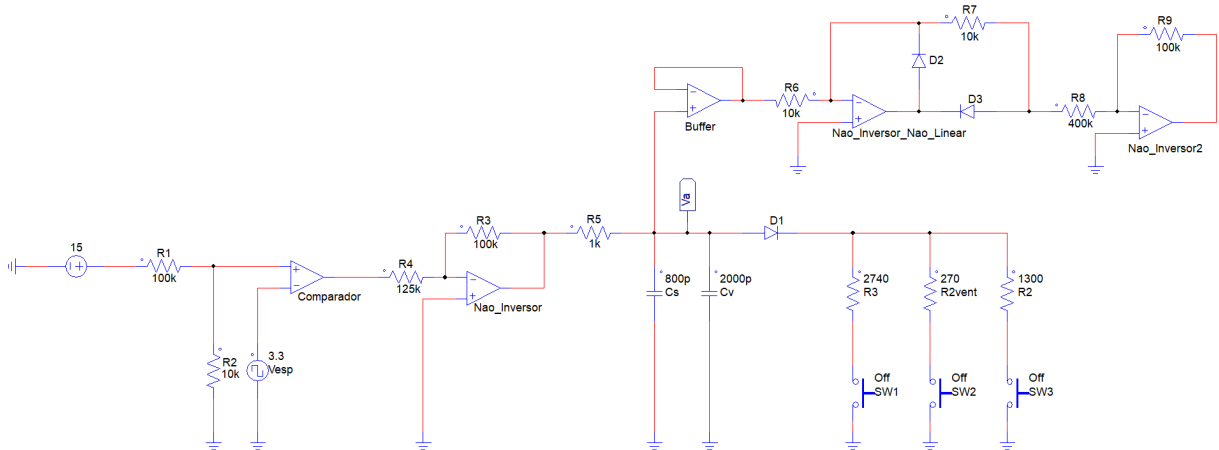


Fonte: Autor, 2025

3.3.2 Pino Piloto

A Figura 24 apresenta uma visão abrangente do circuito responsável pela implementação da função piloto. Para uma compreensão sistemática do seu funcionamento, o arranjo pode ser organizado em três blocos conceituais principais, devidamente destacados nas subfiguras.

Figura 24 – Pino piloto.

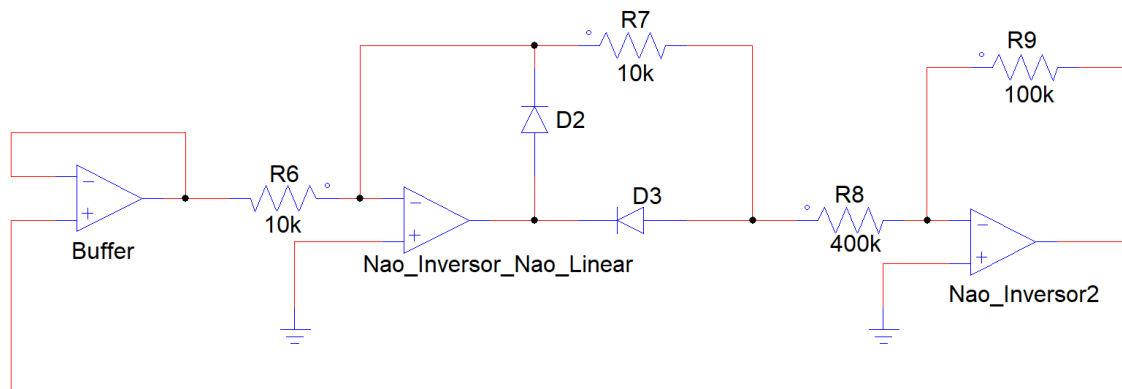


Fonte: Autor, 2025

O primeiro bloco, ilustrado na Figura 25a, corresponde ao estágio destinado à geração do sinal em onda quadrada. Ele é responsável por estabelecer a comunicação elétrica inicial entre o equipamento de abastecimento e o VE, definindo a forma básica do PWM enviado ao pino piloto.

Na sequência, o segundo bloco, mostrado nas Figura 25b, reúne os elementos que efetivamente moldam o comportamento do sinal piloto. Esse conjunto integra os componentes necessários para garantir que o sinal produzido atenda às condições e aos estados definidos pela norma IEC 61851-1, incluindo filtragem, conformação, limitação e inserção das impedâncias normativas.

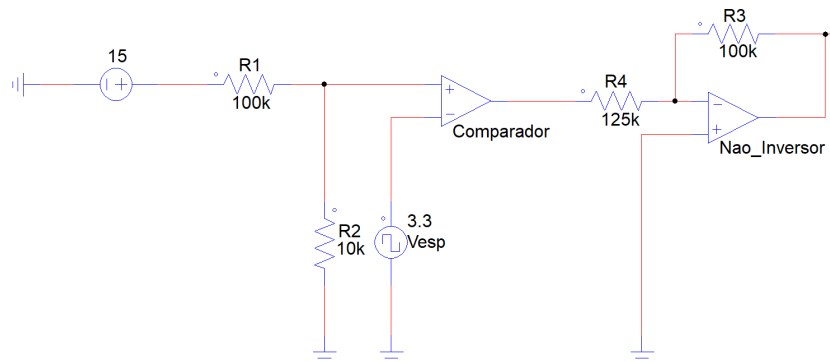
Por fim, o terceiro bloco, apresentado na Figura 26, refere-se ao circuito de monitoramento da tensão V_a . Sua função é fornecer ao sistema de controle as informações necessárias para a identificação correta do estado operacional da interface de recarga, permitindo determinar se o veículo está conectado, pronto para carga, em processo de ventilação forçada ou em condição de falha.

Figura 26 – Circuito de monitoramento da tensão V_a .

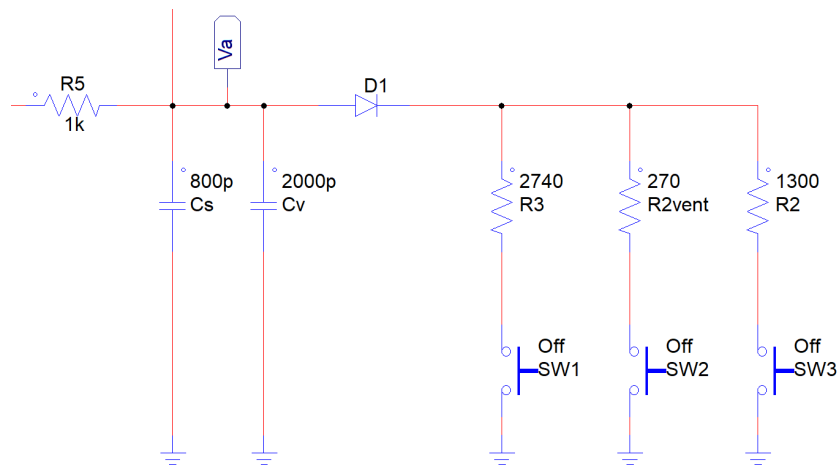
Fonte: Autor, 2025

Figura 25 – Subdivisão do circuito da função piloto em blocos conceituais.

(a) Geração do sinal de onda quadrada.



(b) Emulação do pino piloto.



Fonte: Autor, 2025

3.3.2.1 Geração de PWM para o Pino Piloto

A geração da onda quadrada de 1 kHz, necessária para a comunicação entre o VE e a estação de recarga via pino piloto, é implementada com o próprio microcontrolador principal do sistema, visando à economia de componentes.

O dispositivo utilizado é o *ESP-WROOM-32* com *wi-fi*, que possui capacidade de gerar sinais *PWM* em suas portas digitais, com amplitude de 3,3 V. No entanto, conforme exigido pela norma ABNT NBR IEC 61851-22, o sinal de controle deve possuir amplitude de 12 V, o que demanda um circuito adicional para amplificação.

Para isso, adotou-se um amplificador operacional configurado como comparador. O sinal *PWM* gerado pelo *ESP32* é aplicado na entrada inversora do comparador. A entrada não-inversora recebe uma tensão de referência, proveniente de um divisor resistivo alimentado pela fonte de 15 V do sistema. A tensão de referência é calculada conforme a Equação 1:

$$V_+ = \frac{V_{\text{alimentação}} \cdot R_1}{R_1 + R_2} = \frac{15 \cdot 10\text{k}\Omega}{100\text{k}\Omega + 10\text{k}\Omega} = 1,36\text{ V} \quad (1)$$

Dessa forma:

- Quando o sinal do *ESP32* está em nível alto (3,3 V), o comparador satura em -15 V ;
- Quando o sinal está em nível baixo (0 V), o comparador satura em 15 V .

Para adequar a amplitude desse sinal aos níveis exigidos pelo pino piloto, utilizou-se um estágio inversor com ganho ajustado por resistores:

$$V_{\text{saida2}} = -\frac{V_{\text{comparador}} \cdot R_3}{R_4} \quad (2)$$

Com os valores:

$$R_3 = 100\text{k}\Omega, \quad R_4 = 125\text{k}\Omega \quad (3)$$

$$V_{\text{saida2}} = -\frac{15 \cdot 100\text{k}\Omega}{125\text{k}\Omega} = -12\text{ V} \quad (4)$$

- Quando $V_{\text{comparador}} = -15\text{ V}$:

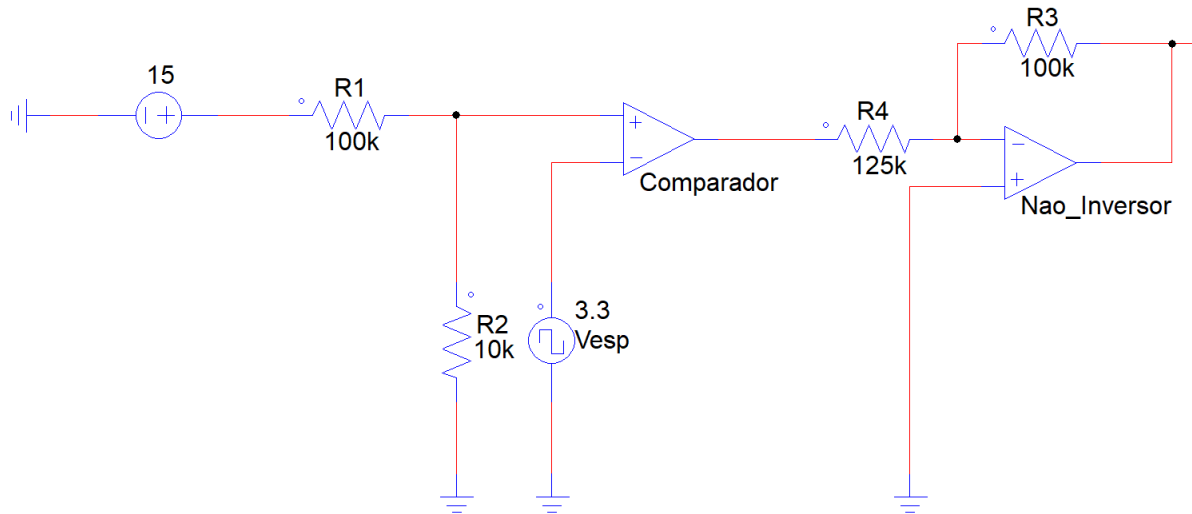
$$V_{\text{saida2}} = -\frac{-15 \cdot 100\text{k}\Omega}{125\text{k}\Omega} = 12\text{ V} \quad (5)$$

Dessa forma, o circuito fornece um sinal de onda quadrada simétrica entre -12 V e 12 V , com frequência de 1 kHz , compatível com o padrão exigido para o canal de controle do pino piloto.

3.3.2.2 Resultados do Circuito PWM

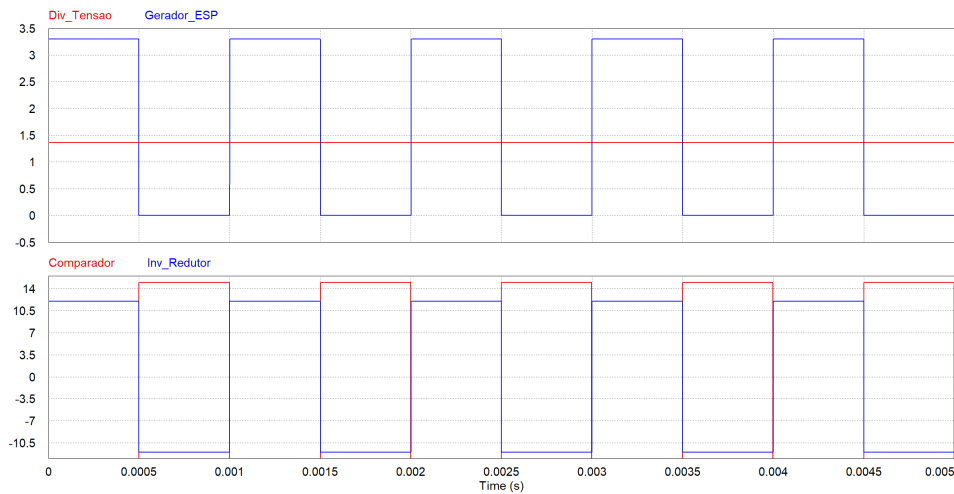
A simulação da topologia observada na Figura 27 proposta para a geração do sinal *PWM* apresentou resultados coerentes com os valores teóricos previamente estimados. Conforme ilustrado na Figura 28, tanto os níveis de tensão quanto a frequência do sinal quadrado confirmam o funcionamento da solução adotada. Nos ensaios experimentais, o circuito também apresentou desempenho consistente, produzindo uma onda quadrada simétrica entre -12 V e 12 V , utilizada na comunicação entre a estação de recarga e o VE por meio do condutor piloto.

Figura 27 – Circuito de geração do *PWM* simulado.



Fonte: Autor, 2025

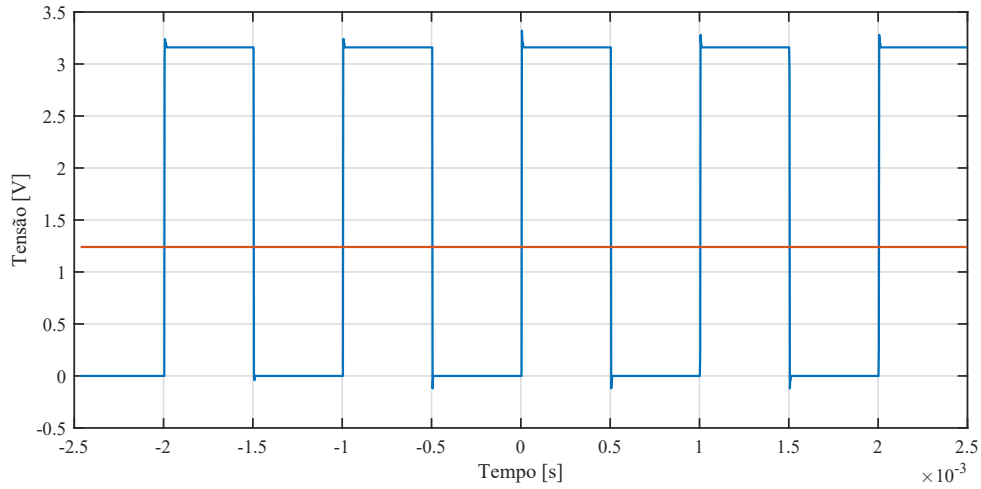
Figura 28 – Resultado da geração do *PWM* simulado.



Fonte: Autor, 2025

Durante as medições realizadas, são observadas pequenas distorções decorrentes de ruídos introduzidos durante a comutação do sinal gerado pelo microcontrolador ESP32, especialmente nas regiões de transição das bordas superior e inferior da onda. Em função desses efeitos, a amplitude pico a pico registrada apresentou um valor ligeiramente inferior ao nominal, conforme mostrado na Figura 29, que indica uma amplitude de 3,28 V em comparação aos 3,3 V esperados.

Figura 29 – Resultado da geração do *PWM* experimental - Parte 1.



O erro percentual entre os valores experimental e teórico é calculado segundo a Equação 6:

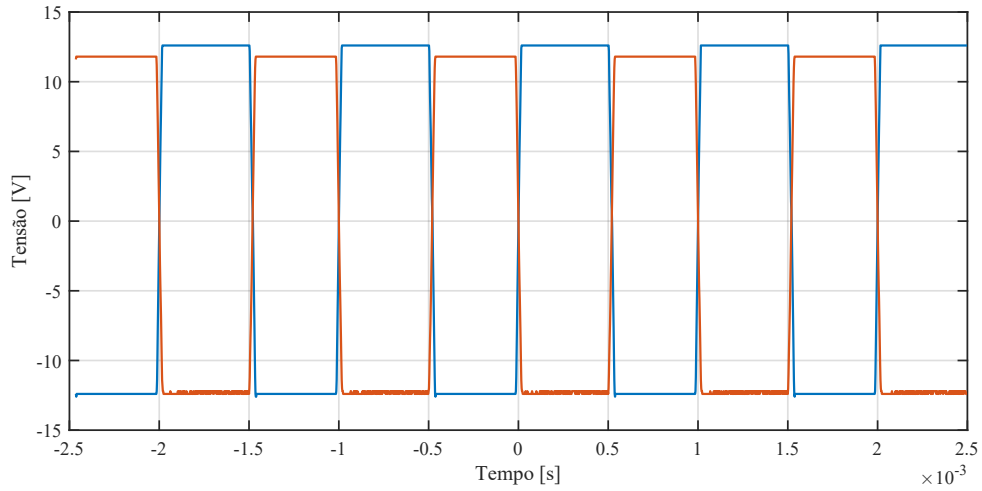
$$\text{Erro}\% = \frac{3,28 - 3,3}{3,3} \times 100 = -0,61\% \quad (6)$$

Apesar dessa pequena discrepância, a operação do circuito não é comprometida. Isso se deve ao emprego de um amplificador operacional configurado como comparador, cujo princípio de funcionamento reduz a influência de ruídos de baixa amplitude, uma vez que sua saída depende exclusivamente da relação entre as tensões aplicadas às entradas. Dessa forma, a comutação permaneceu estável entre os níveis de saturação, preservando a integridade do controle fornecido ao pino piloto.

Com o objetivo de aprimorar o ajuste da amplitude após o estágio inversor, é incorporado ao projeto um potenciômetro de 10kΩ em série com um resistor fixo de 120kΩ, substituindo o valor teórico de 125kΩ inicialmente considerado. Essa combinação permite uma variação total de resistência entre 120kΩ e 130kΩ, possibilitando o ajuste fino do ganho do amplificador por meio da calibração do potenciômetro.

Após o procedimento de calibração, obteve-se um sinal de saída com amplitude de 24 V_{pp}, correspondente à variação entre -12 V e 12 V, conforme estabelecido pela norma IEC 61851-1. A Figura 30 apresenta o sinal final visualizado no osciloscópio, onde o sinal em vermelho é o sinal de saída do amplificador inversor e o sinal azul a a saída do comparador, já devidamente ajustado e com simetria assegurada.

Figura 30 – Resultado da geração do *PWM* experimental - Parte 2.

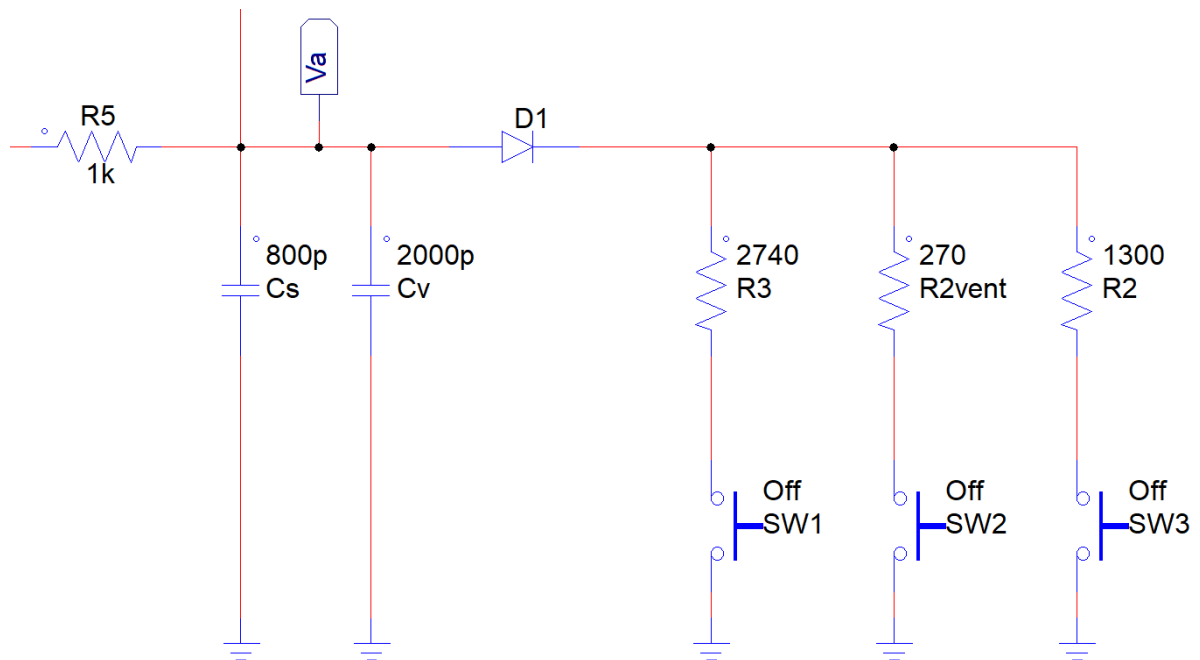


Fonte: Autor, 2025

3.3.2.3 Emulação da carga V_a

Os componentes essenciais deste estágio correspondem diretamente à implementação dos requisitos estabelecidos pela norma, conforme ilustrado na Figura 31. Nesse arranjo, a comutação dos resistores R_2 , R_3 e R_{2_vent} altera o valor efetivo do divisor de tensão, controlando assim a tensão V_a observada no controle piloto.

Figura 31 – Circuito do pino piloto simulado.



Fonte: Autor, 2025

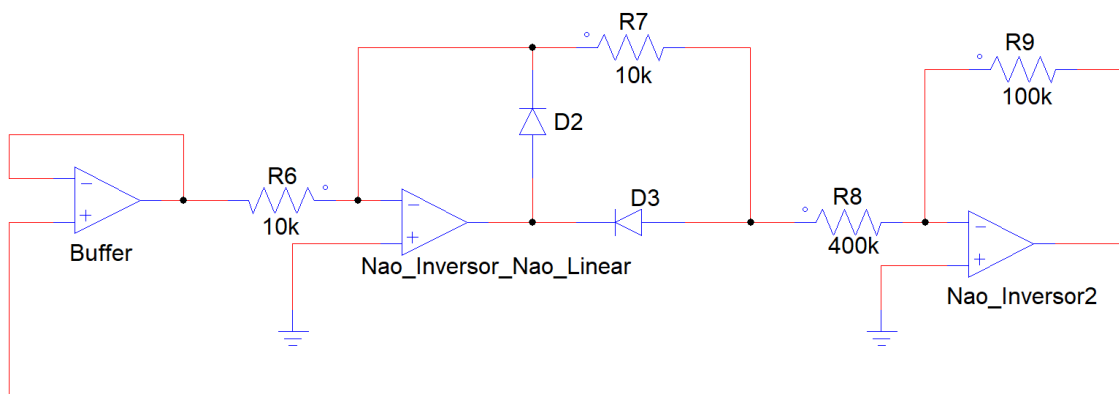
Em um sistema real de carregamento veicular, o resistor R_3 permanece permanentemente conectado ao circuito, uma vez que sua função é indicar à estação de recarga a presença física do

VE. Contudo, para fins de simulação e desenvolvimento do protótipo, optou-se pela inclusão de uma chave dedicada para permitir a emulação da condição de ausência de conexão entre o veículo e a infraestrutura de recarga, possibilitando a reprodução dos diferentes estados operacionais definidos pela norma.

3.3.2.4 Medição da Tensão V_a

Para a medição da tensão V_a , adotou-se a utilização de um retificador de precisão de meia onda, uma vez que o interesse recai exclusivamente sobre a componente positiva do sinal *PWM*. Inicialmente, conforme ilustrado na Figura 32, utiliza-se um estágio de buffer destinado ao acoplamento adequado entre o circuito principal e o bloco de medição. Em seguida, o sinal é encaminhado ao retificador de precisão, cujo comportamento depende da polarização dos diodos D_2 e D_3 .

Figura 32 – Retificador de precisão de meia onda simulado.



Fonte: Autor, 2025

Quando a tensão de entrada é positiva, o diodo D_2 encontra-se reversamente polarizado, enquanto D_3 conduz. Nessa condição, o amplificador operacional opera como inversor, resultando em:

$$V_{\text{out}} = -\frac{V_{\text{in}} \cdot 10\text{k}\Omega}{10\text{k}\Omega} \quad (7)$$

$$V_{\text{out}} = -V_{\text{in}}. \quad (8)$$

Assim, a saída corresponde à versão invertida da região positiva da onda quadrada. Para a componente negativa, o diodo D_2 torna-se diretamente polarizado e D_3 é bloqueado, estabelecendo um caminho de realimentação que mantém a saída em:

$$V_{\text{out}} = 0. \quad (9)$$

Ao final desse estágio, obtém-se exclusivamente a parcela positiva da tensão V_a , variando entre -12 V e 0 V conforme o estado do sistema de recarga.

Para possibilitar a leitura deste sinal pelo conversor analógico-digital (ADC) do ESP32, é necessário adequá-lo à faixa de 0 V a $3,3\text{ V}$. Para isso, o terceiro estágio consiste em um amplificador inversor que converte novamente o sinal para positivo e ajusta seu nível, de modo que sua máxima tensão seja dada por:

$$V_{\text{ESP}} = - \left(-12 \cdot \frac{100\text{ k}\Omega}{400\text{ k}\Omega} \right) \quad (10)$$

$$V_{\text{ESP}} = 3\text{ V}. \quad (11)$$

Assim, uma leitura de 3 V no ADC corresponde a uma tensão real de 12 V em V_a , sendo a conversão realizada no *software* por meio da multiplicação do valor obtido pelo ADC por um fator igual a 4, conforme detalhado na Tabela 8.

Tabela 8 – Correspondência entre a tensão V_a e a leitura do ADC do ESP32.

Estado (IEC 61851-1)	Descrição do Sistema	Tensão V_a (V)	Leitura ADC (V)
A	Sem veículo conectado	12	3,00
B	Veículo conectado (sem carga)	9	2,25
C	Veículo conectado e carregando	6	1,50
D	Veículo conectado com ventilação requerida	3	0,75
E/F	Falha, falta ou desconexão	0	0

Como a tensão medida não permanece constante e depende do ciclo de trabalho aplicado ao sinal piloto, emprega-se uma média móvel para suavizar as flutuações e estimar adequadamente o valor representativo do sistema.

3.3.2.5 Resultados do Pino Piloto

Para complementar o processo de calibração descrito anteriormente, é incorporado um segundo potenciômetro à placa de circuito impresso, destinado ao ajuste fino do sinal aplicado à entrada analógica (ADC) do ESP32. Esse ajuste é necessário para assegurar que a tensão convertida permaneça dentro da faixa operacional do microcontrolador, limitada entre 0 V e $3,3\text{ V}$.

O circuito de calibração é implementado utilizando um potenciômetro de $20\text{ k}\Omega$ em série com um resistor fixo de $390\text{ k}\Omega$, permitindo que a resistência total varie entre $390\text{ k}\Omega$ e $410\text{ k}\Omega$. Essa variação reproduz o valor teórico de $400\text{ k}\Omega$ previsto no projeto e possibilita o controle preciso do ganho do estágio inversor responsável pelo condicionamento do sinal derivado da tensão V_a .

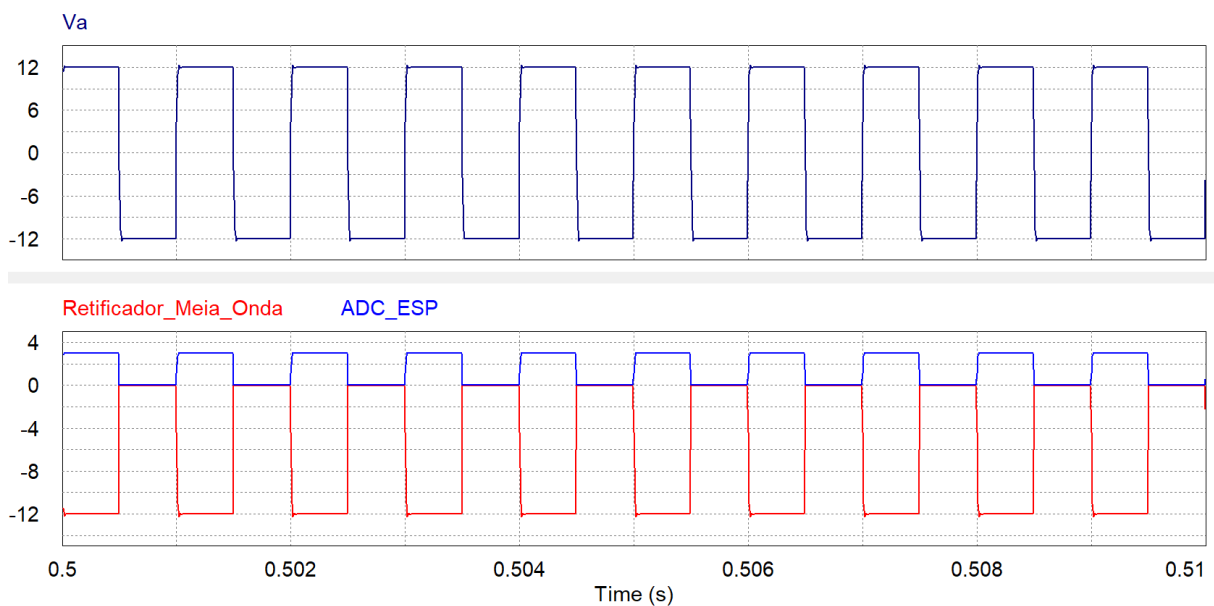
Após a confecção da placa e a conclusão do processo de calibração, são realizados ensaios práticos para validar o comportamento do circuito piloto em relação aos parâmetros

estabelecidos. Os resultados obtidos são apresentados nas subseções seguintes e correspondem aos estados definidos pelas normas ABNT NBR IEC 61851-1 e ABNT NBR IEC 61851-22.

3.3.2.5.1 Estação Não Conectada

Segundo a norma, a tensão V_a para o estado em que o VE não está conectado deve estar entre 11 V e 13 V. A simulação da topologia desenvolvida apresentou um valor exato de 12 V na saída do pino piloto, como mostrado na Figura 33. Esse valor está dentro do intervalo aceitável e demonstra coerência com o comportamento teórico esperado.

Figura 33 – Simulação da estação não conectada.



Fonte: Autor, 2025

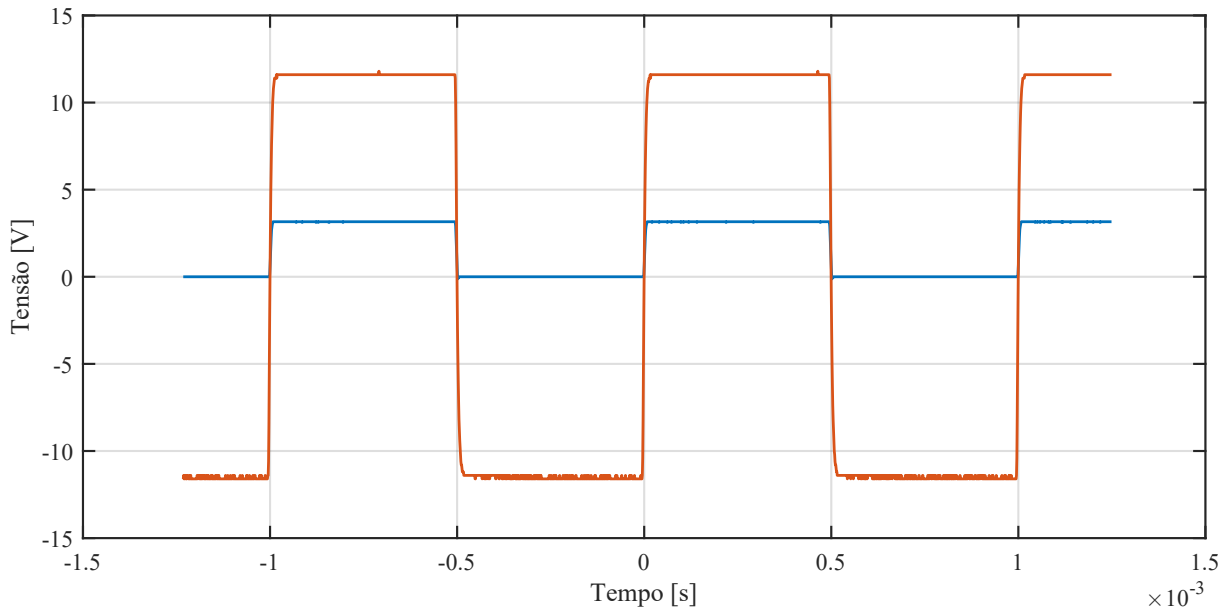
Considerando a cadeia de condicionamento de sinal, o valor correspondente lido pela entrada analógica do microcontrolador deve ser de 3,0 V, devido à divisão de ganho aplicada. Esse valor é obtido tanto na simulação quanto na prática.

No ensaio prático, representado na Figura 34, observou-se uma leve variação na tensão V_a , resultando em uma leitura de 11,6 V. O erro percentual calculado é:

$$\text{Erro}\% = \frac{12,0 - 11,6}{12,0} \cdot 100 = 3,3\% \quad (12)$$

Essa variação é considerada aceitável, uma vez que pode ser atribuída à flutuação da tensão fornecida pela fonte de bancada no momento da medição.

Figura 34 – Resultado experimental da estação não conectada.



Fonte: Autor, 2025

Na mesma figura, destaca-se o valor obtido após a retificação de meia onda, onde a tensão medida é de 11,4 V, apresentando um erro de:

$$\text{Erro}\% = \frac{12,0 - 11,4}{12,0} \cdot 100 = 5,0\% \quad (13)$$

Esse pequeno desvio pode ser atribuído à tolerância dos resistores empregados na rede de ganho do circuito de retificação.

A leitura da tensão final na entrada do ADC do *ESP32*, evidenciada na Figura 34, é de 2,96 V. O erro percentual em relação ao valor ideal de 3,0 V é calculado como:

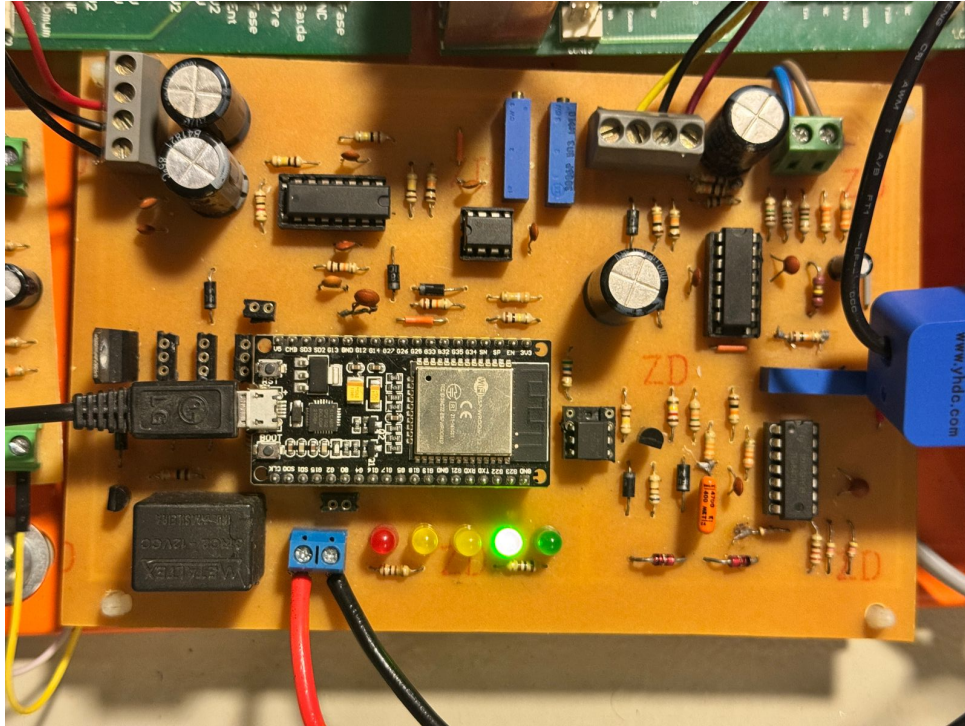
$$\text{Erro}\% = \frac{3 - 2,96}{3} \cdot 100 = 1,33\% \quad (14)$$

Esse resultado é satisfatório, especialmente considerando que a tensão V_a real no momento da aquisição estava em torno de 11,8 V.

Além dos níveis de tensão, são analisados os tempos de subida e descida da onda quadrada associada ao pino piloto. Embora a norma não imponha restrições para esses parâmetros no estado de desconexão, são realizados registros para fins de verificação. Os tempos medidos são de 6,7 μs para a subida e 7,9 μs para a descida.

Finalmente, a Figura 35 apresenta a sinalização prática no circuito impresso, em que o *led* mais a direita se mantém desligado, indicando que o relé de potência não está ativado, conforme esperado para o estado A.

Figura 35 – Estação não conectada.



Fonte: Autor, 2025

3.3.2.5.2 Estação Conectada e VE Indisponível

A análise dos demais estados do circuito piloto segue a mesma metodologia empregada para o Estado A, uma vez que a estrutura do circuito permanece inalterada, diferenciando-se apenas pelo chaveamento dos resistores que modificam o divisor de tensão. Dessa forma, a principal fonte de erro experimental tende a ser semelhante entre os estados avaliados.

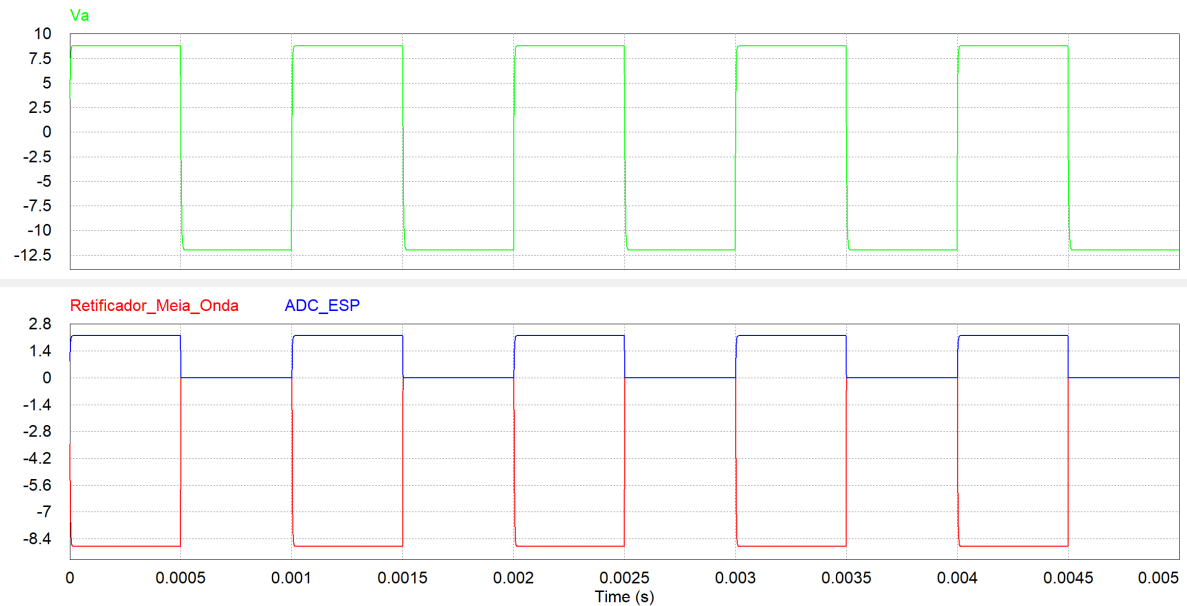
No caso do Estado B, correspondente ao cenário em que o veículo está conectado, porém ainda não habilitado para iniciar o processo de recarga, realiza-se o chaveamento do resistor de 2,74 k Ω . A partir desse valor, a tensão teórica esperada para V_a é de 9 V. Conforme ilustrado na Figura 36, tanto a simulação quanto o valor calculado para a leitura do ADC (2,25 V) apresentaram boa concordância.

Experimentalmente, observou-se uma tensão de 8,6 V para V_a . O erro percentual associado é dado por:

$$\text{Erro}\% = \frac{9 - 8,6}{9} \times 100 = 4,44\%. \quad (15)$$

Esse aumento relativo no erro era esperado, visto que pequenas variações absolutas têm um maior impacto percentual em tensões menores. Ainda assim, o valor absoluto permaneceu em apenas 0,4 V, o que pode ser atribuído à variação natural da fonte de alimentação. Raciocínio semelhante aplica-se à tensão após o retificador de meia onda, cuja diferença absoluta manteve-se em aproximadamente 0,2 V, compatível com a tolerância dos componentes utilizados.

Figura 36 – Simulação da estação conectada e veículo indisponível.



Fonte: Autor, 2025

No que se refere à leitura do ADC do *ESP32*, o valor experimental obtido é de 2,20 V. O erro correspondente é:

$$\text{Erro\%} = \frac{2,25 - 2,20}{2,25} \times 100 = 2,22\%. \quad (16)$$

Esse erro é considerado reduzido e não compromete a interpretação correta do estado pelo microcontrolador.

Como o Estado B representa uma conexão efetiva entre a estação de recarga e o veículo, procede-se também à verificação dos tempos de subida e descida do sinal *PWM*, uma vez que esses parâmetros são normativamente especificados. Na Figura 37, com base em resultados experimentais obteve-se um tempo de subida de 6,7 μs , em comparação ao limite máximo de 10 μs .

Para o tempo de descida, obteve-se 7,9 μs , frente ao limite máximo de 13 μs .

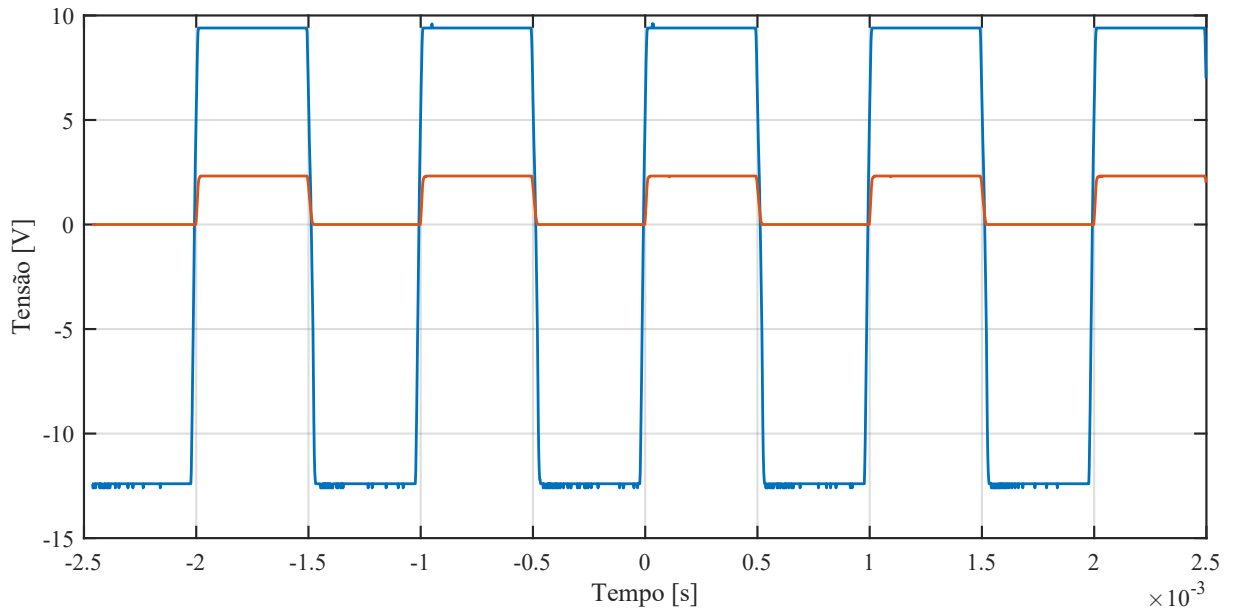
Assim, a taxa de descida permanece igualmente superior à requerida, assegurando conformidade com a norma.

A leitura registrada no monitor serial é de 8,17 V, enquanto a medição pelo osciloscópio do ponto V_a indicou 8,6 V. O erro relativo é:

$$\text{Diferença\%} = \frac{8,6 - 8,17}{8,6} \times 100 = 5,00\%. \quad (17)$$

Apesar dessas variações, o funcionamento geral do circuito permanece plenamente satisfatório. A faixa normativa para o Estado B situa-se entre 8 V e 10 V, e os valores obtidos

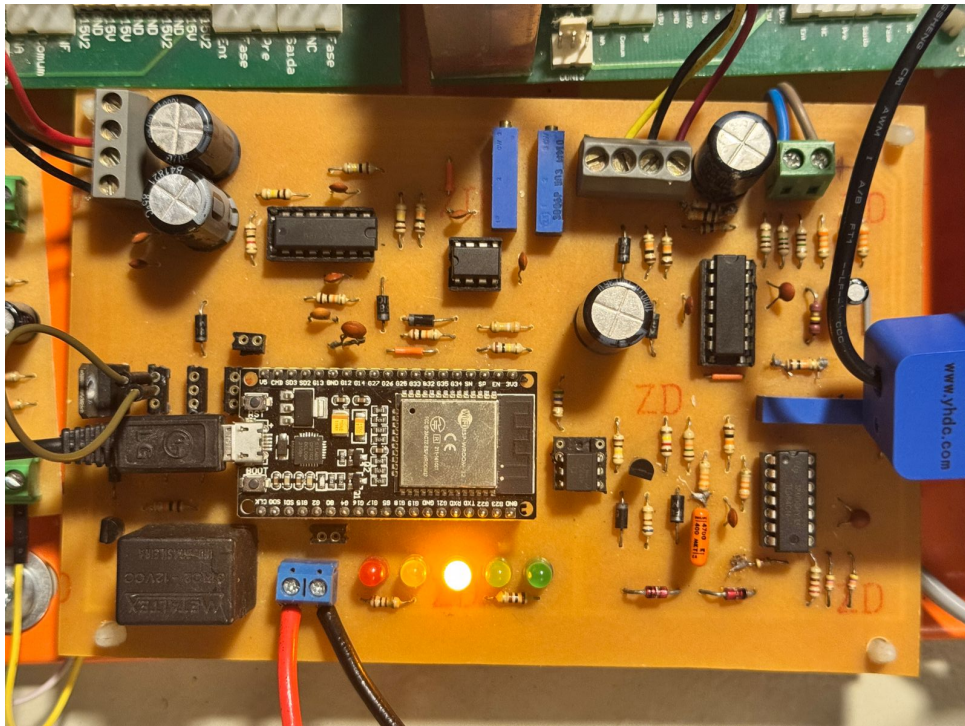
Figura 37 – Resultado experimental da estação conectada e veículo indisponível.



Fonte: Autor, 2025

permanecem dentro desse intervalo. Conseqüentemente, o *led* correspondente ao Estado B é acionado corretamente, enquanto o *led* indicativo de fluxo de energia permanece desligado, conforme o esperado.

Figura 38 – Estação conectada e veículo indisponível.

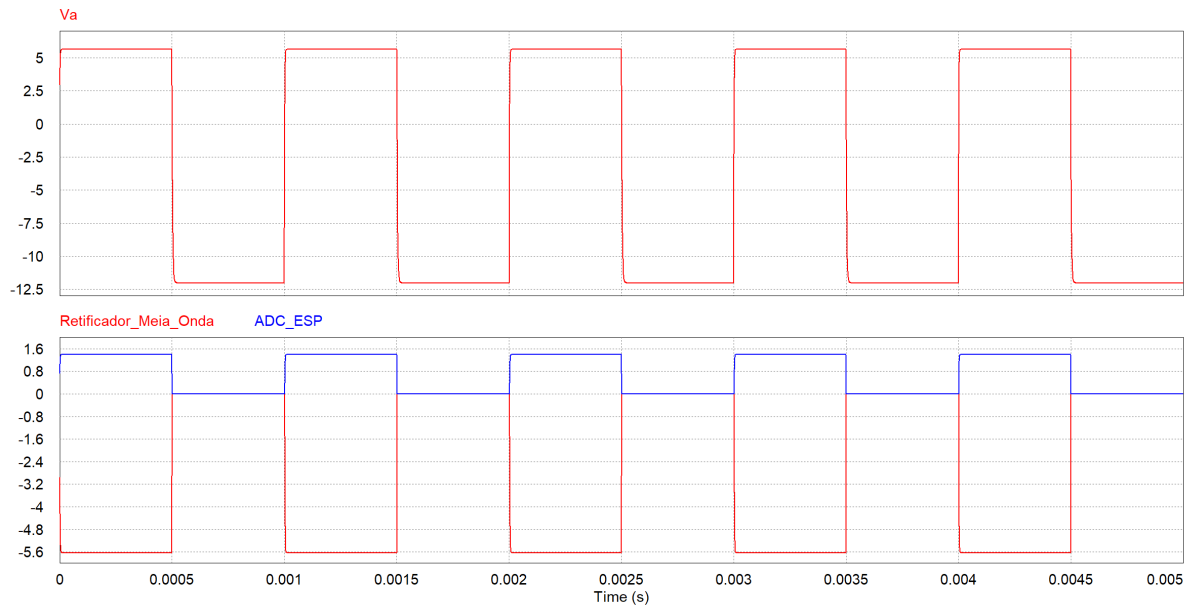


Fonte: Autor, 2025

3.3.2.5.3 Estação Conectada e VE Disponível

Neste estágio, o chaveamento do resistor de $1,3\text{ k}\Omega$ reduz a tensão V_a para aproximadamente 6 V . Após retificação, o sinal se mantém em 6 V , porém invertido, e o valor lido pelo microcontrolador deve ser em torno de $1,5\text{ V}$, como mostrado na Figura 39.

Figura 39 – Simulação da estação conectada e veículo disponível.



Fonte: Autor, 2025

A medição prática apresentou $5,80\text{ V}$ para V_a , resultando em:

$$\text{Erro}\% = \frac{6,0 - 5,8}{6,0} \cdot 100 = 3,33\% \quad (18)$$

A tensão lida na porta ADC é de $1,42\text{ V}$, com erro percentual:

$$\text{Erro}\% = \frac{1,50 - 1,42}{1,50} \cdot 100 = 5,33\% \quad (19)$$

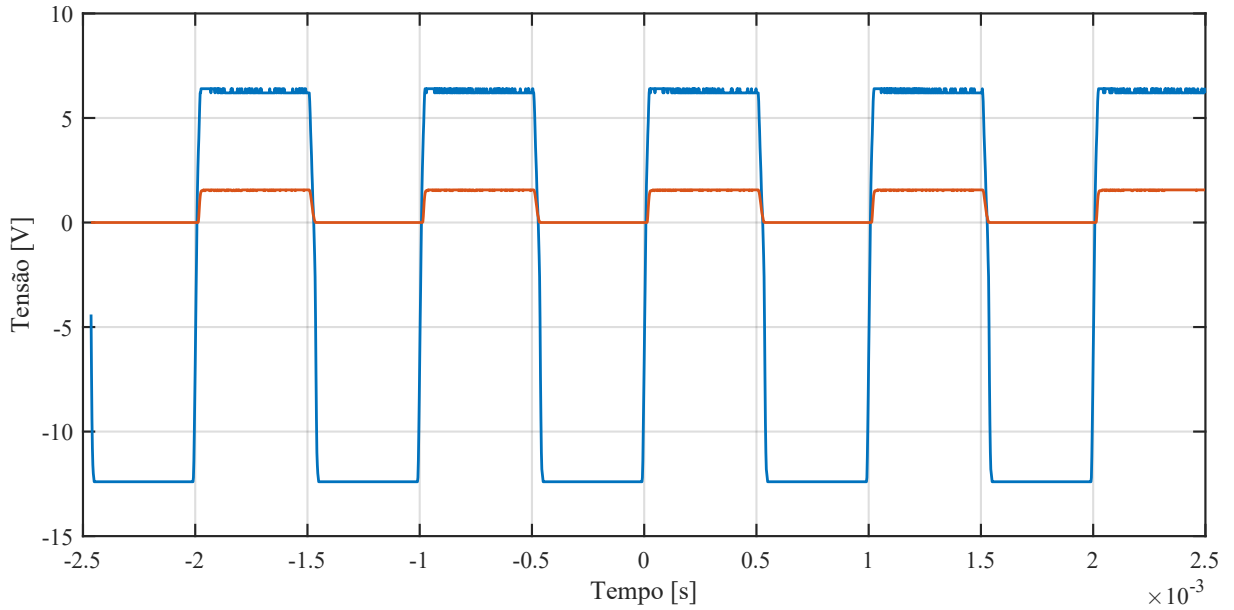
Apesar de ligeiramente superior aos estados anteriores, o erro permanece dentro dos limites aceitáveis para o sistema.

Segundo a norma, o tempo de subida para este estado deve ser inferior a $7\text{ }\mu\text{s}$. O resultado obtido é de $6,7\text{ }\mu\text{s}$:

$$\text{Diferença}\% = \frac{7,0 - 6,7}{7,0} \cdot 100 = 4,28\% \quad (20)$$

Para o tempo de descida, o limite é $13\text{ }\mu\text{s}$, e o valor medido é de $7,9\text{ }\mu\text{s}$:

Figura 40 – Resultado experimental da estação conectada e veículo disponível.



Fonte: Autor, 2025

$$\text{Diferença}\% = \frac{13,0 - 7,9}{13,0} \cdot 100 = 39,23\% \quad (21)$$

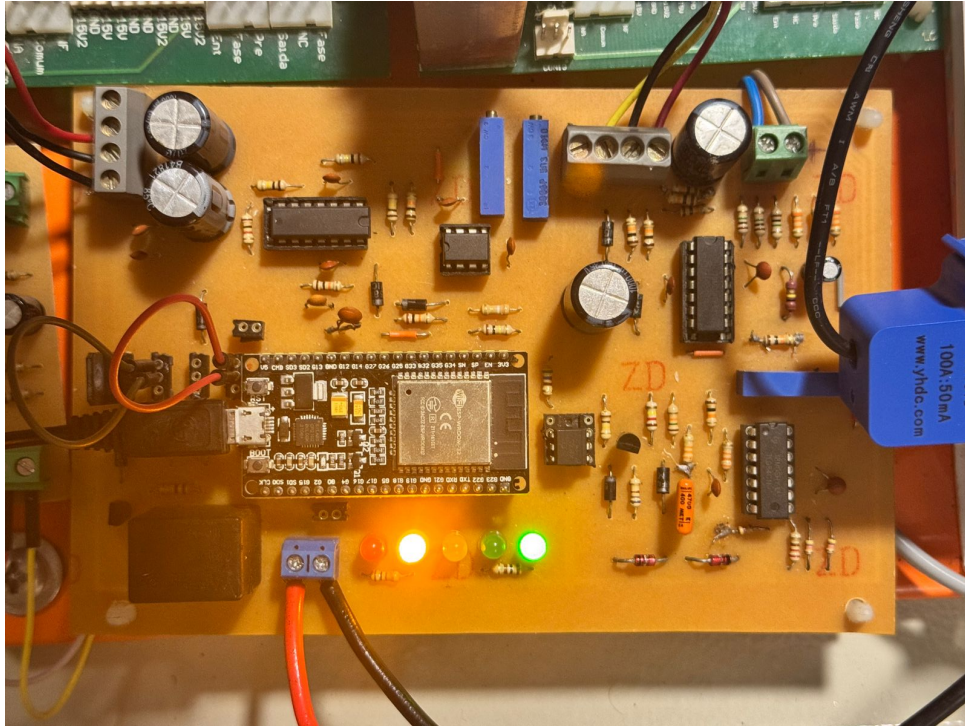
Ambos os tempos estão dentro das exigências normativas.

Na Figura 40, observou-se uma leitura de 5,9 V, dentro da faixa permitida de 5 V a 7 V. A Figura 41 mostra a indicação visual correspondente: *led* 6 V (estado C) aceso e *led* verde de relé ativado, indicando o início do processo de recarga.

3.3.2.5.4 Estação Conectada, VE Disponível e Necessitando Ventilação

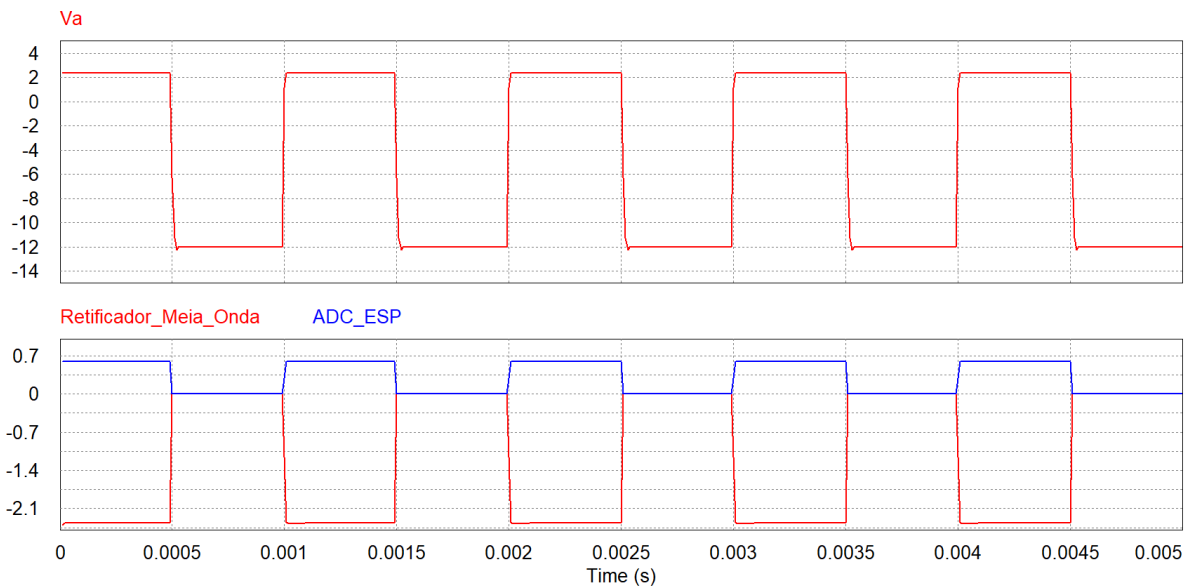
No estado correspondente ao VE com necessidade de ventilação externa enquanto carrega (Estado D), o sistema de controle do VE deixa de acionar o resistor de 1300 Ω e passa a comutar o resistor de 270 Ω , conforme previsto pela norma. Esse estado indica que o processo de recarga pode prosseguir, desde que haja ventilação adequada; caso o superaquecimento persista, o próprio veículo poderá interromper a recarga para a proteção do sistema.

Figura 41 – Estação conectada e veículo disponível.



Fonte: Autor, 2025

Figura 42 – Simulação da estação conectada, VE disponível e necessitando ventilação.



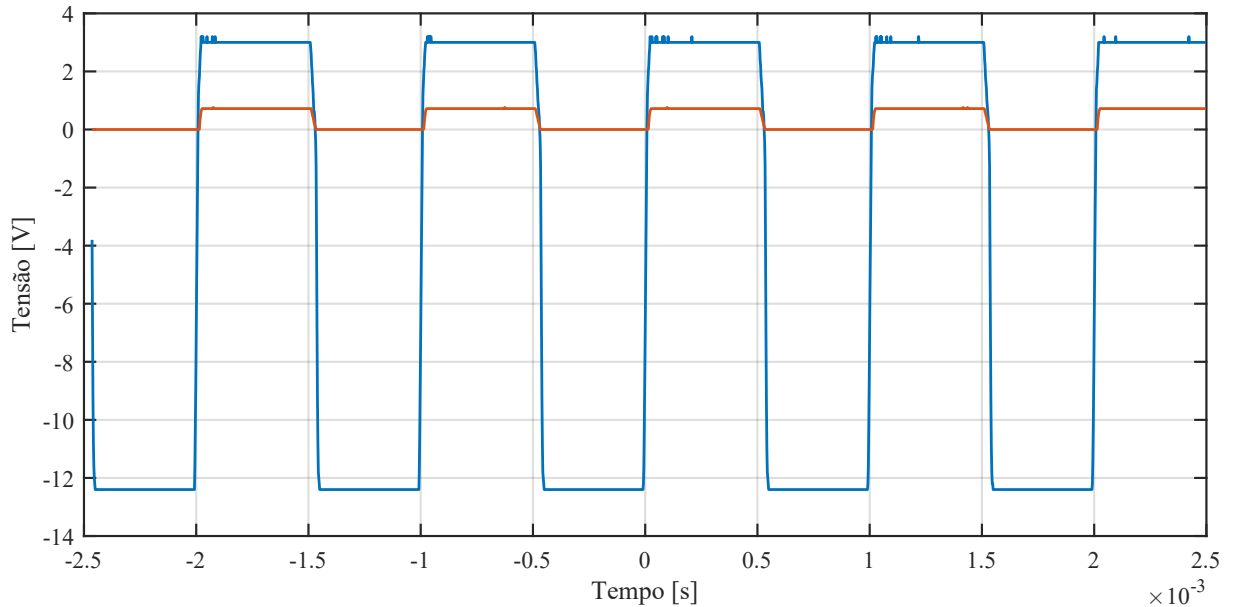
Fonte: Autor, 2025

Com a inserção do resistor de $270\ \Omega$ no divisor de tensão, a simulação apresentada na Figura 42 indicou uma tensão V_a de 2,4 V, resultando em uma tensão de 0,6 V na entrada do ADC do *ESP32*, em conformidade com a Tabela 6.

Nos ensaios experimentais, observou-se uma tensão de 3 V para V_a . Após o estágio do retificador de meia onda, obteve-se um valor de 2,80 V, este resultado pode ser observado na

Figura 43. A diferença de 0,2 V em relação ao valor ideal já havia sido identificada nos estágios anteriores e é atribuída à tolerância dos resistores utilizados no retificador.

Figura 43 – Resultados experimentais da estação e VE conectados e VE necessitando ventilação.



Fonte: Autor, 2025

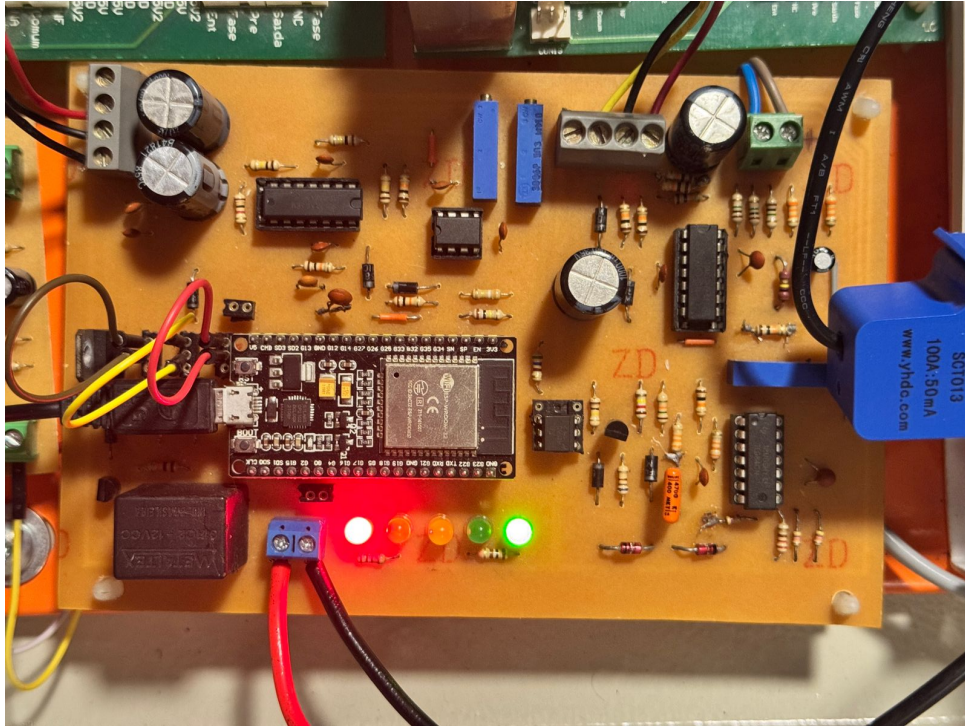
A leitura fornecida pelo ADC do *ESP32* é de 0,55 V, inferior aos 0,75 V previstos teoricamente. Essa discrepância resulta tanto da imprecisão do retificador de meia onda quanto da variação do resistor de 270 Ω , cujos efeitos tornam-se mais significativos em níveis de tensão reduzidos. Mesmo assim, a leitura permaneceu dentro da faixa limite estabelecida pela norma, não comprometendo o reconhecimento correto do estado.

O tempo de subida do sinal para o Estado D, é de 1,326 μs , em relação ao limite normativo de 5 μs . Esse resultado demonstra que o circuito continua operando com ampla margem em relação às exigências normativas, mantendo proporção semelhante à observada nos estados anteriores. Para o tempo de descida, foi obtido 3,2 μs atendendo plenamente aos requisitos estabelecidos.

A visualização dos dados no monitor serial confirmou que a tensão V_a permaneceu próxima ao limite inferior da faixa especificada para o Estado D, mantendo-se, no entanto, dentro do intervalo permitido. A Figura 44 apresenta o acionamento simultâneo do primeiro *led* e do último *led*, representando o Estado D e indicando o processo de recarga ativo, evidenciando a correta interpretação do estado pelo circuito.

Caso as condições de ventilação não sejam atendidas, o sistema de controle do veículo interromperá o carregamento, desativará o resistor de 270 Ω e retornará ao Estado B, como ilustrado anteriormente na Figura 35. Ressalta-se que a norma não estabelece um tempo máximo entre a indicação de necessidade de ventilação e a restauração das condições térmicas, cabendo aos fabricantes de veículos definir esse comportamento.

Figura 44 – Resultados experimentais da estação e VE conectados e VE necessitando ventilação.



Fonte: Autor, 2025

3.3.2.5.5 Estação Não Disponível

Para simular a condição temporária em que a estação de recarga se encontra indisponível, é implementada a leitura de uma porta digital no *ESP32*, configurada via *software* com um resistor *pull-up* interno. A detecção da indisponibilidade é feita mediante o acionamento de um botão externo ou o fechamento de um *jumper* entre essa porta e o terra.

Nessa configuração, o microcontrolador interpreta o sinal como nível lógico baixo, o que indica a impossibilidade de fornecimento de energia ao VE. Apesar do sistema se encontrar no estágio C (estação conectada e veículo disponível), o relé de acionamento permanece desativado, como evidenciado pela ausência de energização da bobina do contator e pelo *led* indicador correspondente.

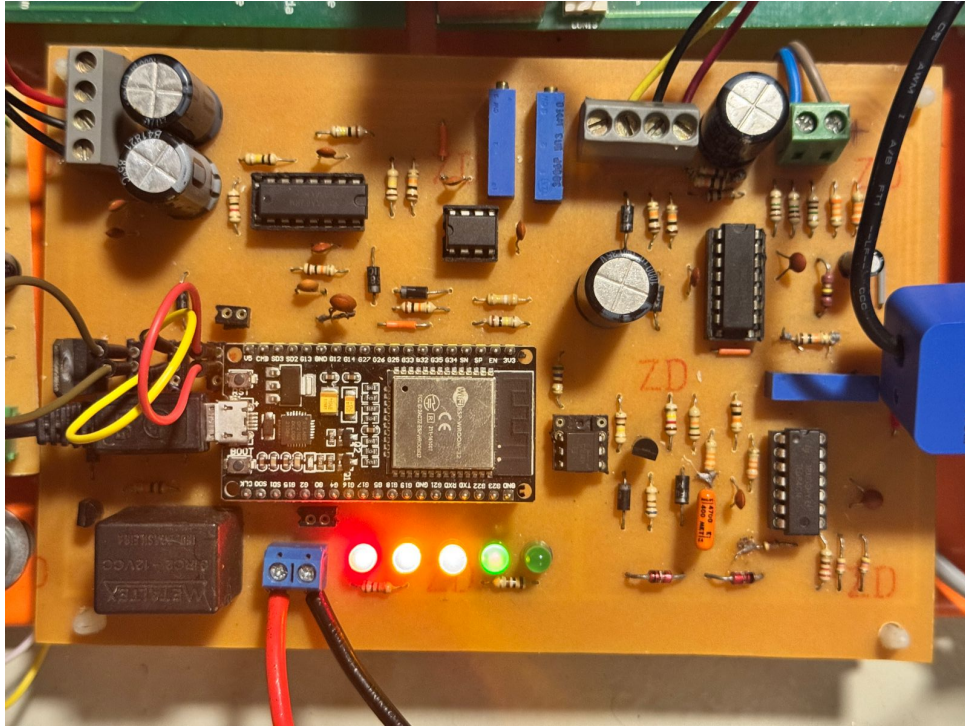
Segundo a norma, nesta condição o ciclo de trabalho do sinal *PWM* deve permanecer em 100%. A tensão resultante no ponto V_a é constante, com valor médio de 12 V, uma vez que o comparador está permanentemente conduzindo com nível alto.

3.3.2.5.6 Situações de Erro

As situações de falha operacional previstas pela norma incluem os estados E e F, os quais são emulados no sistema para a validação do comportamento da estação.

No estado F, associado a uma falha da estação de recarga, a tensão no ponto V_a deve ser mantida constantemente em -12 V. Para simular esse estado, é inserida uma corrente acima do

Figura 45 – Resultado experimental da estação Não disponível.



Fonte: Autor, 2025

limite permitido de 81 A no *software* de controle, forçando o ciclo de trabalho do *PWM* a 0%. Nessa condição, o nível de saída do microcontrolador permanece abaixo da tensão de referência do comparador, produzindo uma saída negativa contínua.

No caso do estado E, caracterizado por um curto-circuito entre o cabo piloto e o condutor de proteção, a tensão V_a atinge 0 V. Tal condição também é simulada, e a leitura contínua do valor de V_a pelo *ESP32* permite a identificação imediata da anomalia. Assim que esse valor é detectado, o relé de saída é desativado automaticamente, interrompendo o processo de recarga por uma medida de segurança.

3.3.3 Leitura da Tensão da Rede

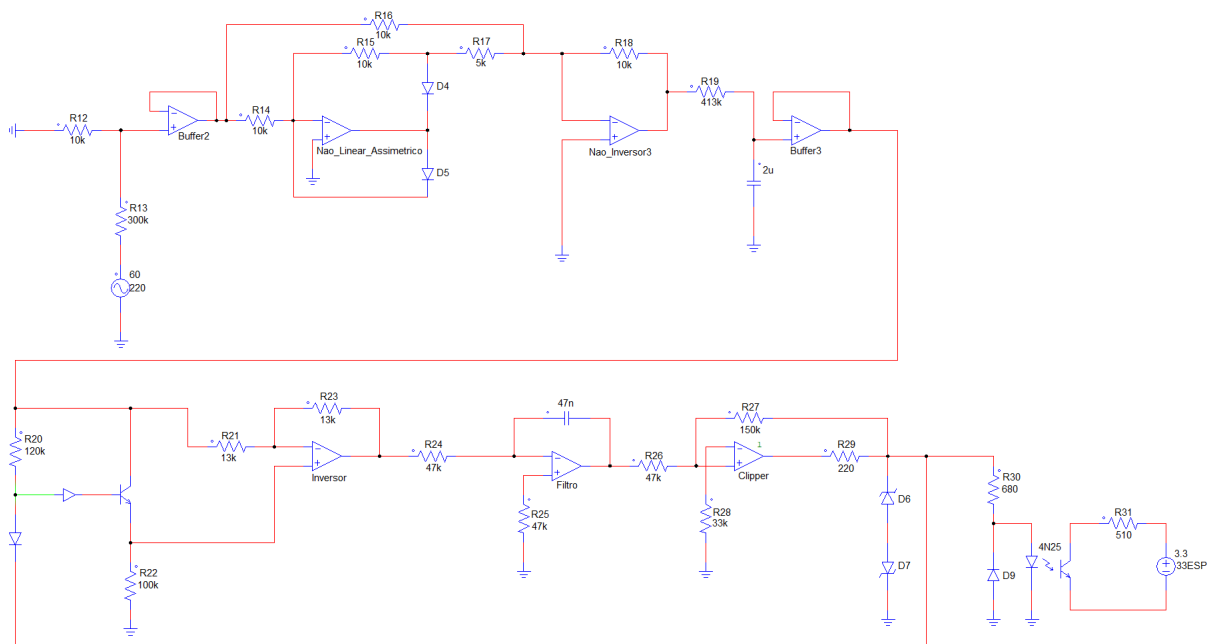
Embora a norma (ABNT, 2021) não especifique como requisito obrigatório o monitoramento contínuo da tensão da rede para estações de recarga em modo 3, a inclusão dessa funcionalidade torna o sistema substancialmente mais seguro e confiável. A supervisão permanente da tensão permite que o processo de recarga seja interrompido automaticamente quando forem identificadas variações superiores a 20% ou inferiores a 20% em relação ao valor nominal, evitando danos que possam ocorrer devido a perturbações externas ou oscilações ocasionadas pela própria demanda do VE.

Com o intuito de impedir que distúrbios provenientes da rede afetem o desempenho dos demais blocos eletrônicos, especialmente o microcontrolador, a leitura da tensão é realizada com isolamento galvânico. Assim, o circuito de medição opera com uma referência independente

daquela utilizada pela função piloto e pelos demais elementos de controle, assegurando maior imunidade a ruídos e estabilidade no processamento dos sinais adquiridos. Neste trabalho, considera-se a rede trifásica como equilibrada, o que torna dispensável a medição individual das demais fases. Assim, a avaliação é realizada a partir da tensão de uma única fase, tomando-a como referência para generalizar o comportamento das três fases do sistema.

A Figura 46 apresenta uma visão geral da topologia elaborada para a leitura e supervisão da tensão da rede elétrica. O circuito é constituído por um divisor resistivo que reduz a amplitude da tensão de entrada para níveis compatíveis com o processamento eletrônico. Em seguida, um retificador de precisão com filtragem capacitiva converte a tensão alternada em uma grandeza contínua proporcional ao valor eficaz da tensão da rede. Essa tensão contínua é aplicada a um oscilador controlado por tensão (VCO), que a transforma em um sinal pulsado cuja frequência varia conforme a magnitude da tensão monitorada. Por fim, o sinal gerado pelo VCO é isolado por meio de um optoacoplador, permitindo sua transferência segura ao microcontrolador, que interpreta o comportamento da rede a partir da frequência dos pulsos recebidos.

Figura 46 – Circuito geral de rede simulado.



Fonte: Autor, 2025

Essa abordagem possibilita que a programação do *ESP32* realize o monitoramento contínuo da tensão, identificando variações de tensão com base em limites previamente definidos para a operação segura. Dessa forma, o sistema mantém o veículo protegido contra condições anormais da rede e assegura a confiabilidade do processo de recarga.

3.3.4 Divisor de Tensão

A primeira etapa do circuito de medição da tensão da rede de alimentação consiste em um divisor resistivo, conforme ilustrado na Figura 47, utilizado para reduzir a tensão da fase

medida a um nível compatível com o restante do circuito. A tensão de entrada considerada é a tensão de pico da rede trifásica, assumindo um valor nominal de:

$$V_{\text{pico}} = 311,13 \text{ V} \quad (22)$$

O objetivo do projeto é obter uma tensão máxima de aproximadamente 10 V sobre o resistor de 10 kΩ, valor adequado para a próxima etapa (retificação e filtragem). A relação do divisor é descrita por:

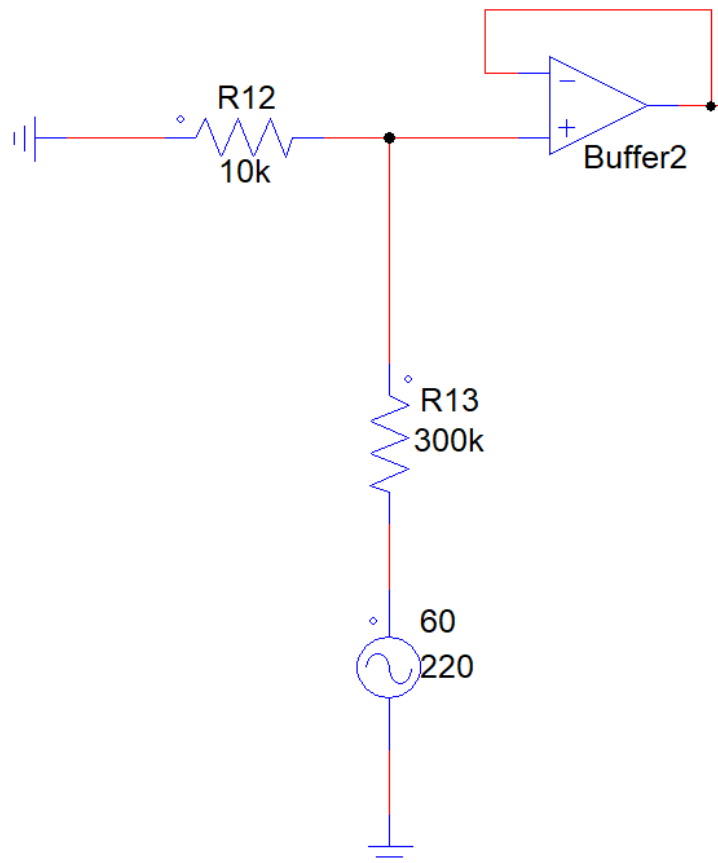
$$V_{R1,\text{pico}} = V_{\text{pico}} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (23)$$

Substituindo pelos valores utilizados no projeto:

$$V_{R1,\text{pico}} = 311 \cdot \frac{10000}{303333 + 10000} = 9,92 \text{ V} \quad (24)$$

Portanto, o valor de referência utilizado no circuito de medição corresponde a aproximadamente 10 V.

Figura 47 – Divisor de tensão para leitura da rede simulado.



Com base nessa tensão de referência, os limites de variação admissíveis para que o processo de recarga permaneça ativo são:

$$\text{Limite Superior (+ 20\%): } V_+ = 9,92 \cdot 1,2 = 11,90 \text{ V} \quad (25)$$

$$\text{Limite Inferior (- 20\%): } V_- = 9,92 \cdot 0,8 = 7,94 \text{ V} \quad (26)$$

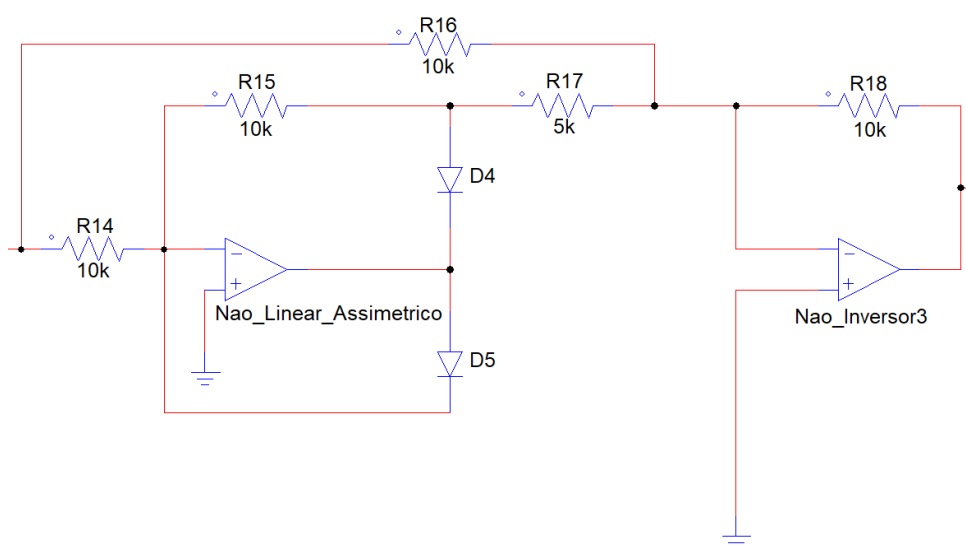
Finalmente, para realizar o acoplamento com o estágio seguinte e evitar o carregamento do divisor, utiliza-se um amplificador operacional em configuração *buffer*, garantindo alta impedância de entrada e baixa impedância de saída.

3.3.5 Retificador de Precisão

Para garantir maior precisão na leitura especialmente devido ao baixo nível de tensão presente na saída do *buffer* optou-se por substituir o retificador de onda completa convencional por uma topologia baseada em amplificadores operacionais. Essa abordagem permite reduzir o erro introduzido pelos diodos, mantendo a fidelidade da forma de onda retificada.

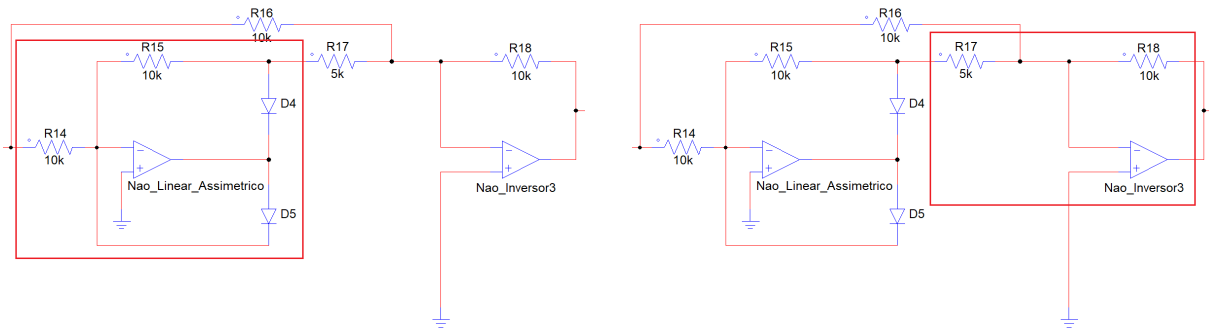
A Figura 48 apresenta o circuito completo do retificador de onda completa, o qual pode ser dividido em duas etapas principais: um retificador de meia onda de precisão e um amplificador somador. A Figura 49a destaca a etapa de retificação de meia onda, cuja topologia é semelhante ao circuito utilizado na medição da tensão V_a no módulo do pino piloto.

Figura 48 – Retificador de precisão simulado.



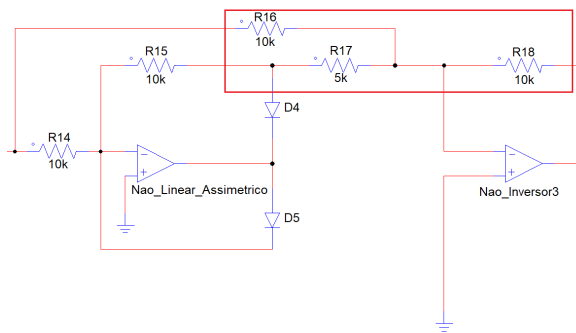
Fonte: Autor, 2025

Figura 49 – Destaques do retificador de precisão de onda completa.



(a) Retificador de meia onda.

(b) Amplificador de meia onda.



(c) Amplificador somador.

Fonte: Autor, 2025

Na primeira etapa, o retificador de meia onda produz a componente positiva do sinal, com ganho igual a -1 devido à configuração inversora empregada. Essa saída é aplicada ao amplificador inversor destacado na Figura 49b, cujo ganho é determinado pela razão entre os resistores:

$$V_{\text{out}} = -\frac{10k}{5k}V_{\text{in}} \quad (27)$$

$$V_{\text{out}} = -2V_{\text{in}} \quad (28)$$

Dessa forma, a componente positiva do sinal recebe um ganho total de -2 . Em seguida, o amplificador somador, ilustrado na Figura 49c, combina essa parcela ampliada com a versão invertida do sinal original presente no braço superior do circuito, o resultado é a reconstrução da forma de onda retificada em sua totalidade. Para a aplicação em questão, considerando os níveis de tensão envolvidos, espera-se uma tensão de pico próxima de $10,03\text{ V}$ na saída do retificador de onda completa.

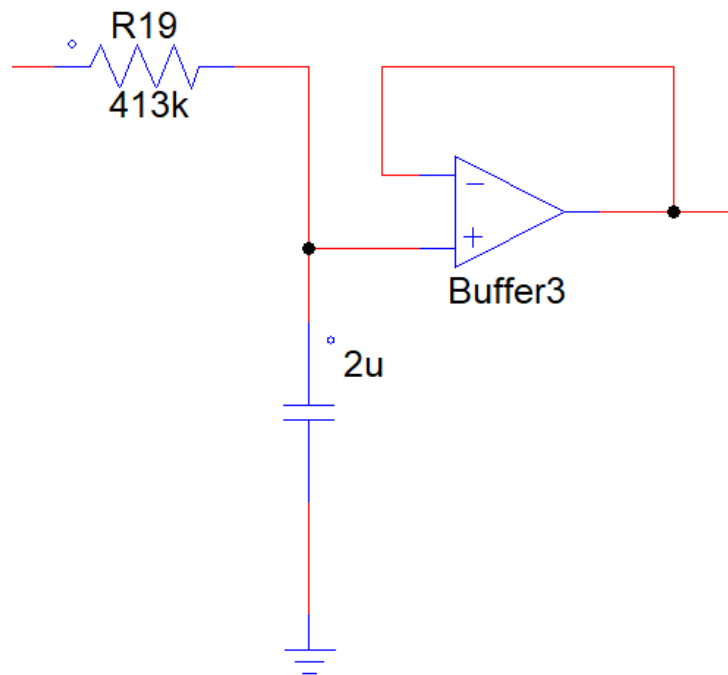
3.3.6 Cálculos do Filtro

Após o estágio de retificação, torna-se necessário obter uma tensão contínua proporcional ao valor eficaz da tensão da rede. Para isso, utiliza-se um filtro RC capaz de suavizar a forma de onda retificada. A tensão média V_{med} pode ser estimada por meio da Equação 29, utilizando o valor de pico obtido no retificador e o fator de aproximação aplicável à retificação de onda completa:

$$V_{med} = \frac{V_{pico}}{\sqrt{2}} \cdot 0,9 = \frac{10,03}{\sqrt{2}} \cdot 0,9 \approx 6,31 \text{ V.} \quad (29)$$

O sinal resultante do filtro RC é aplicado a um amplificador operacional configurado como *buffer*, mostrado na Figura 50. Essa etapa é necessária para garantir o casamento de impedâncias, uma vez que o oscilador controlado por tensão (VCO) possui baixa impedância de entrada e exige um sinal estável para operar adequadamente.

Figura 50 – Filtro simulado.



Fonte: Autor, 2025

Para o dimensionamento do filtro, considerou-se uma ondulação de tensão máxima de 0,1 V, frequência de 60 Hz e o uso de um capacitor de 2 μ F. A resistência necessária é determinada pela relação:

$$V_{\text{ripple}} = \frac{V_{\text{pico}}}{2 \cdot f \cdot C \cdot R}, \quad (30)$$

$$0,1 = \frac{9,92}{2 \cdot 60 \cdot 2 \cdot 10^{-6} \cdot R}, \quad (31)$$

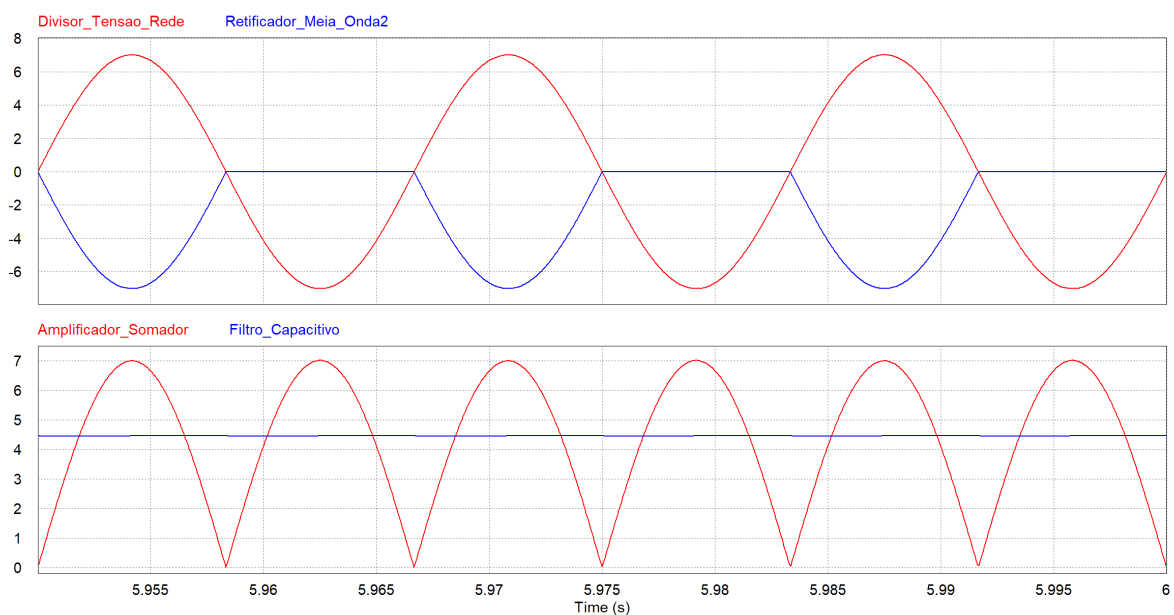
$$R = \frac{9,92}{2 \cdot 60 \cdot 2 \cdot 10^{-6} \cdot 0,1} = 413 \text{ k}\Omega. \quad (32)$$

Assim, a escolha do resistor de 413 kΩ em conjunto com o capacitor de 2 μF assegura uma ondulação de tensão suficientemente baixa para a operação do VCO e, conseqüentemente, para o monitoramento da tensão da rede.

3.3.7 Resultados do Retificador

A análise do retificador de precisão é realizada inicialmente por meio de simulações, cujos resultados estão representados na Figura 51. A Figura 51 apresenta duas visualizações sobrepostas dos sinais envolvidos no processo de retificação. No gráfico superior, o sinal senoidal proveniente do divisor resistivo é comparado com o sinal retificado de meia onda, permitindo observar a atuação do estágio retificador. Já o gráfico inferior mostra a forma de onda obtida após o amplificador somador e a tensão filtrada pelo capacitor, evidenciando o efeito de suavização e a formação da componente contínua necessária para a etapa seguinte do sistema.

Figura 51 – Resultado retificador simulado.

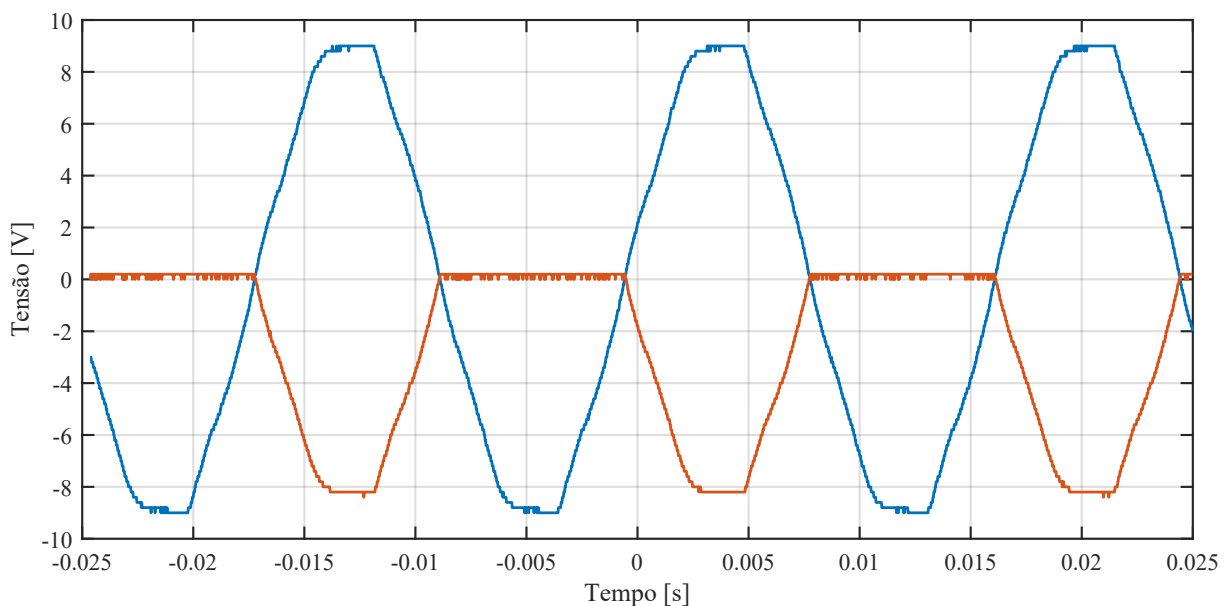


Fonte: Autor, 2025

Os resultados obtidos na simulação demonstraram total compatibilidade com os valores teóricos previamente estimados. A forma de onda gerada após o processo de retificação apresentou o comportamento esperado, validando a eficácia do arranjo implementado e evidenciando o correto funcionamento das etapas de polarização dos diodos, amplificação e recomposição.

Para a etapa experimental, o circuito é submetido a uma tensão de entrada correspondente à metade daquela utilizada na simulação, com o objetivo de verificar a proporcionalidade da resposta. A Figura 52 apresenta a saída do estágio de meia onda, sobreposta ao sinal de entrada. Observa-se uma leve distorção no semiciclo não condutivo, associada ao *offset* intrínseco do amplificador operacional, efeito que se torna mais evidente quando o diodo permanece bloqueado.

Figura 52 – Resultado experimental do retificador - parte 1.



Fonte: Autor, 2025

Na sequência, a Figura 53 ilustra o sinal obtido na saída do amplificador somador. O resultado confirma a retificação completa da forma de onda, com frequência dobrada em relação à entrada e amplitude coerente com o valor de pico aplicado, indicando que as etapas de inversão, ganho e soma são adequadamente implementadas.

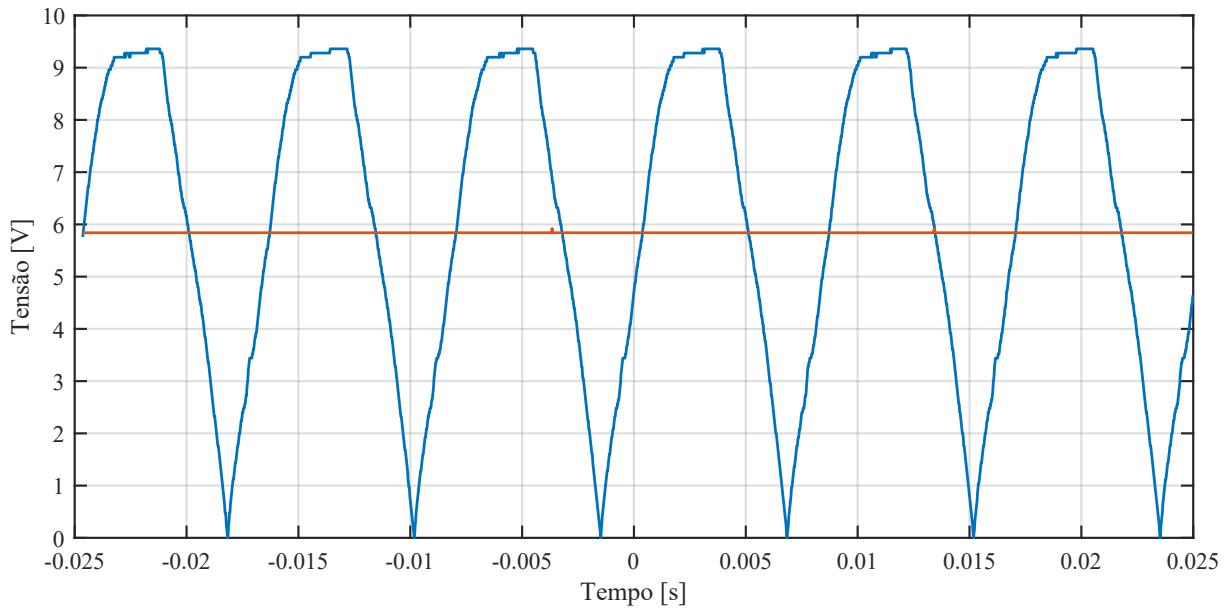
A avaliação quantitativa da forma de onda retificada é realizada mediante o cálculo do valor médio:

$$V_{\text{med}} = \frac{V_{\text{pico}} \cdot 0,9}{\sqrt{2}} = \frac{5,04 \cdot 0,9}{\sqrt{2}} = 3,21 \text{ V.} \quad (33)$$

Experimentalmente, obteve-se o valor de 3,22 V, apresentando excelente concordância com o cálculo teórico. O erro percentual determinado é:

$$\text{Erro}\% = \frac{3,22 - 3,21}{3,21} \cdot 100 = 0,3\%. \quad (34)$$

Figura 53 – Resultado experimental do retificador - parte 2.



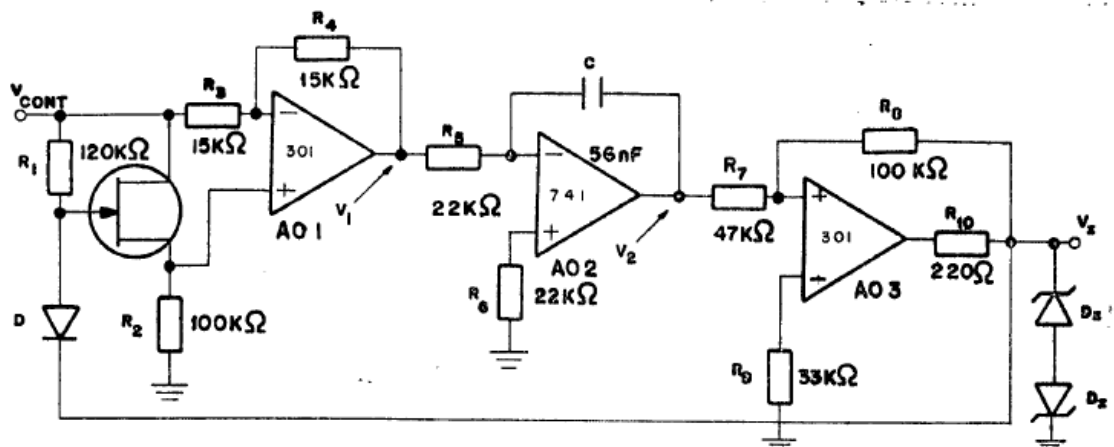
Fonte: Autor, 2025

O pequeno desvio observado reforça a precisão da topologia adotada e demonstra que o retificador apresenta desempenho adequado para a leitura da tensão da rede, atendendo satisfatoriamente aos requisitos de estabilidade e confiabilidade necessários ao sistema de monitoramento.

3.3.8 Oscilador Controlado por Tensão

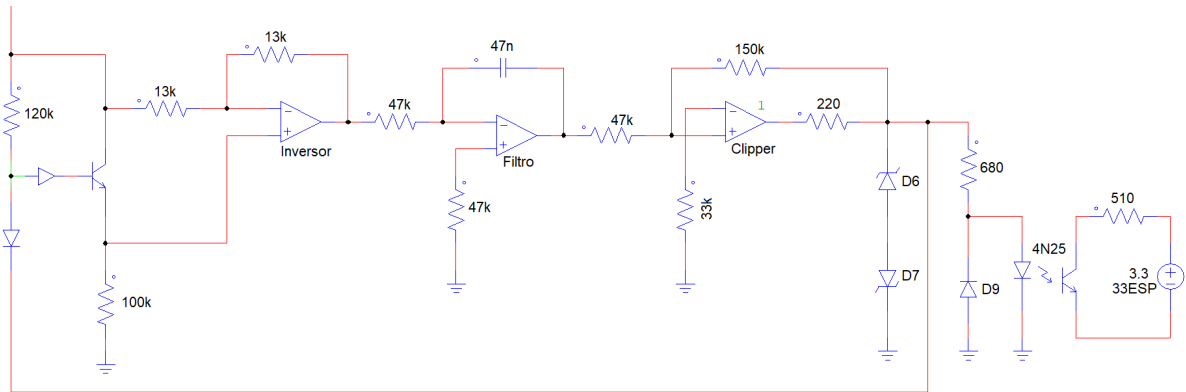
O oscilador controlado por tensão (OCT) desenvolvido neste projeto teve como base a topologia apresentada por Abreu (ABREU, 1981), originalmente empregada em outra aplicação, mas que se mostrou adequada para os objetivos deste trabalho. A Figura 54 ilustra o circuito base utilizado e a Figura 55 ilustra o circuito implementado.

Figura 54 – Oscilador controlado por tensão de referência.



Fonte: Eulógio Chagas de Abreu, 1981

Figura 55 – Oscilador controlado por tensão simulado.



Fonte: Autor, 2025

De modo geral, o OCT recebe uma tensão contínua na entrada e gera na saída uma onda quadrada cuja frequência é proporcional ao valor da tensão de entrada. A amplitude da onda quadrada é limitada por dois diodos *zener* conectados em série, que fixam os níveis de tensão máximos e mínimos.

Para fins de análise, o OCT pode ser dividido em três estágios funcionais.

3.3.8.1 OCT Estágio 1

O primeiro estágio atua como um amplificador chaveado, conforme ilustrado na Figura 56, com ganho positivo ou negativo, dependendo da condução do transistor *NPN*. O comportamento da chave eletrônica é controlado pelo sinal de realimentação proveniente da saída do circuito.

Quando a tensão de saída é positiva, o diodo conduz e polariza a base do transistor, fazendo com que ele entre em condução. Nessa situação, o ganho do amplificador operacional é calculado como:

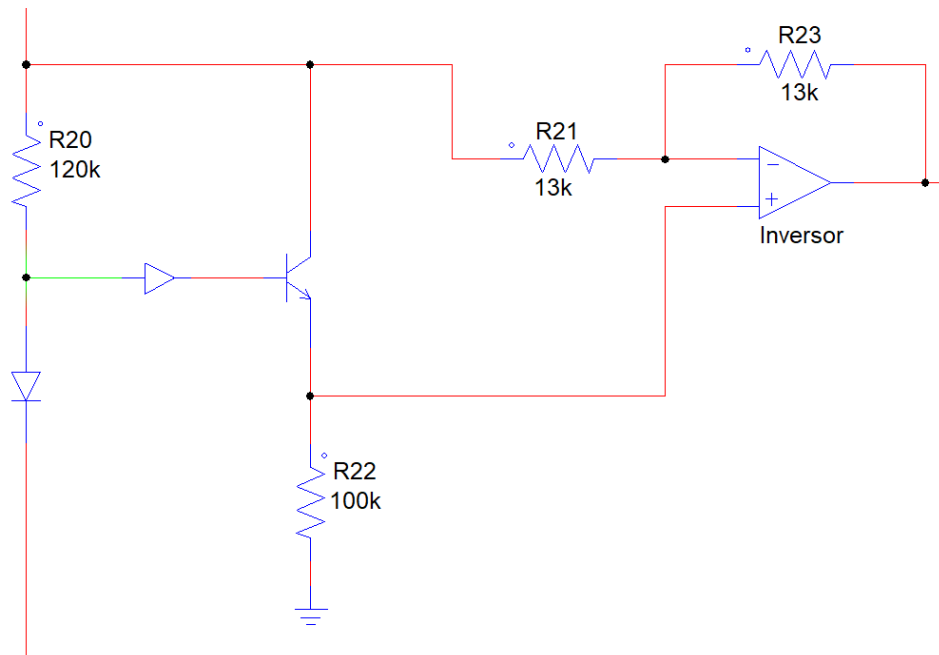
$$V_{\text{out}} = -V_{\text{in}} \cdot \frac{13k}{13k} + V_{\text{in}} \cdot \left(1 + \frac{13k}{13k}\right) = -V_{\text{in}} + 2V_{\text{in}} = +V_{\text{in}} \quad (35)$$

Quando a tensão de saída torna-se negativa, o diodo é bloqueado, e o transistor entra em corte. Assim, a chave eletrônica está aberta e o ganho do estágio é:

$$V_{\text{out}} = -V_{\text{in}} + 2V_{\text{in}} = +V_{\text{in}} = +V_{\text{in}} \quad (36)$$

Quando a tensão de saída do OCT torna-se negativa, o diodo permanece reversamente polarizado, impedindo a condução de corrente. Nessa condição, o transistor permanece bloqueado, uma vez que sua tensão de base é mantida em zero. Assim, o primeiro estágio opera como um amplificador inversor simples, cuja tensão de saída é dada por:

Figura 56 – VCO estágio 1.



Fonte: Autor, 2025

$$V_{\text{out}} = -\frac{V_{\text{in}} \cdot R21}{R20} \quad (37)$$

Substituindo-se os valores dos resistores:

$$V_{\text{out}} = -\frac{V_{\text{in}} \cdot 13000}{13000} \quad (38)$$

obtem-se:

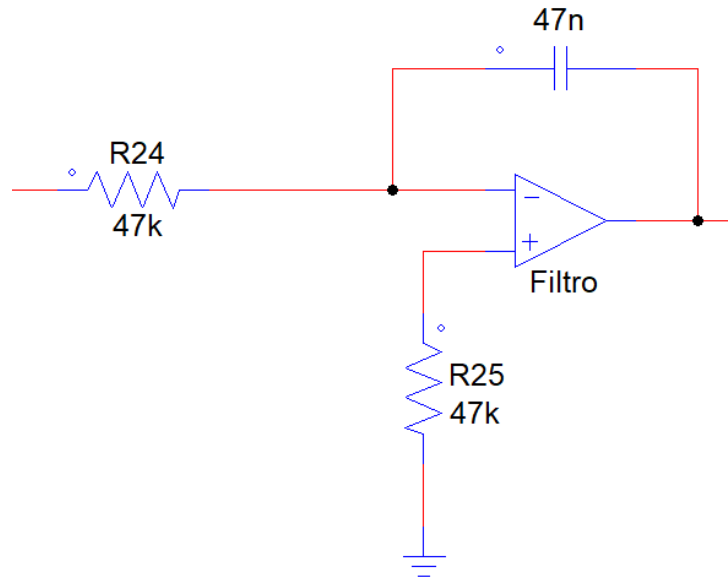
$$V_{\text{out}} = -V_{\text{in}} \quad (39)$$

Portanto, nessa situação, o amplificador apresenta ganho unitário com inversão de fase. Como a chave comuta em uma frequência praticamente fixa, a alternância entre os dois estados do estágio gera uma onda quadrada cuja amplitude corresponde a duas vezes o valor de V_{in} medido na saída do primeiro estágio do OCT.

3.3.8.2 OCT Estágio 2

O segundo estágio consiste em um integrador, conforme ilustrado na Figura 57, cuja entrada é a onda quadrada gerada no estágio anterior. Esse estágio converte a forma de onda quadrada em uma onda triangular, que é utilizada como sinal de comparação no estágio seguinte.

Figura 57 – VCO estágio 2.

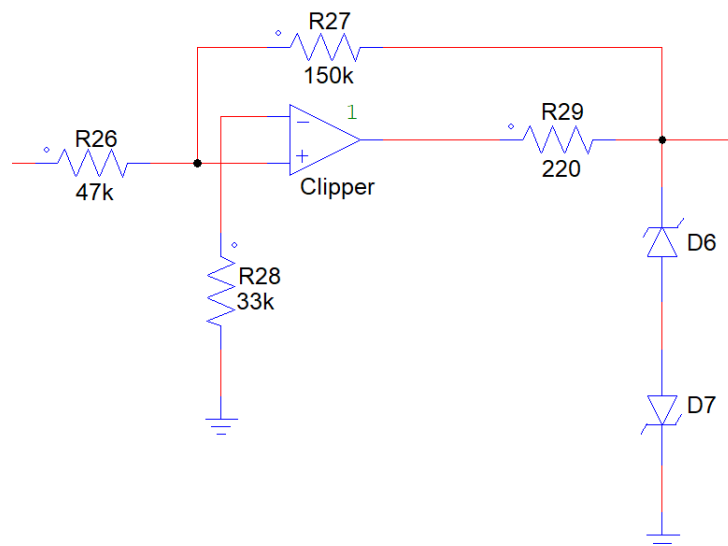


Fonte: Autor, 2025

3.3.8.3 OCT Estágio 3

O terceiro estágio é um comparador com histerese, conforme ilustrado na Figura 58. Esse comparador opera fora da região linear devido à realimentação positiva proveniente do estágio de saída. Os níveis de comutação são determinados por um divisor resistivo composto por resistores de 47 k Ω e 150 k Ω . Desta forma:

Figura 58 – VCO estágio 3.



Fonte: Autor, 2025

$$V_{\text{comp}} = -\frac{V_Z \cdot 47000}{150000} \quad (40)$$

O que resulta em:

$$V_{\text{comp}} = -0,313 \cdot V_Z \quad (41)$$

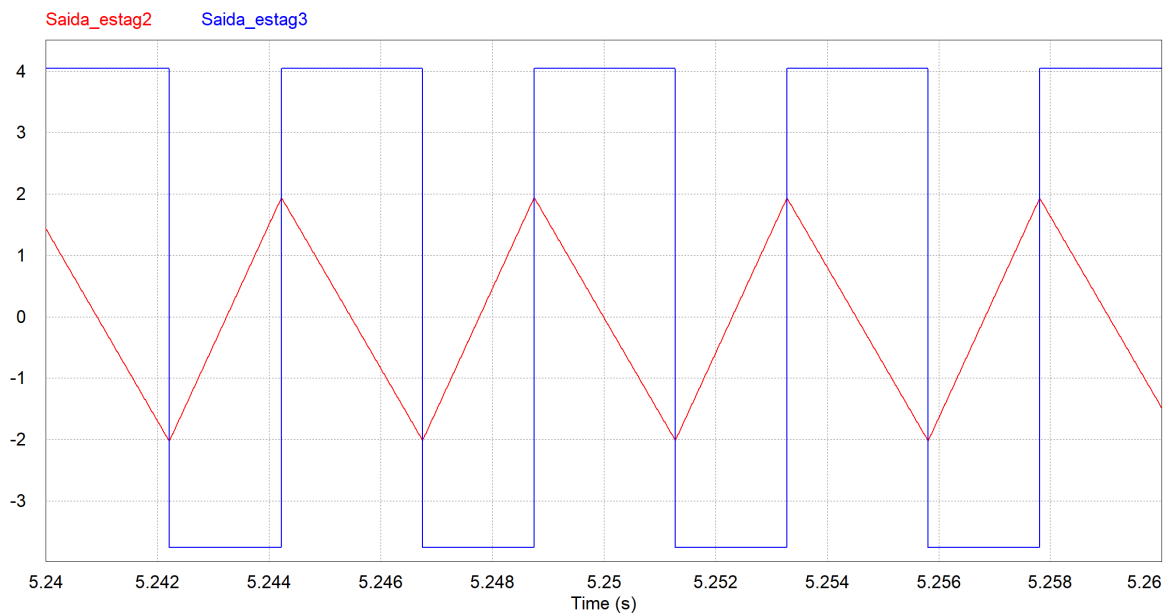
Considerando a tensão de referência $V_Z = 7,5 \text{ V}$, obtém-se:

$$V_{\text{comp}} = -2,35 \text{ V} \quad (42)$$

Dessa forma, quando a saída do integrador atinge aproximadamente 2,35 V, o comparador altera seu estado, comutando de $+V_Z$ para $-V_Z$. Esse comportamento é coerente tanto com a simulação apresentada na Figura 59 quanto com o resultado experimental mostrado na Figura 60.

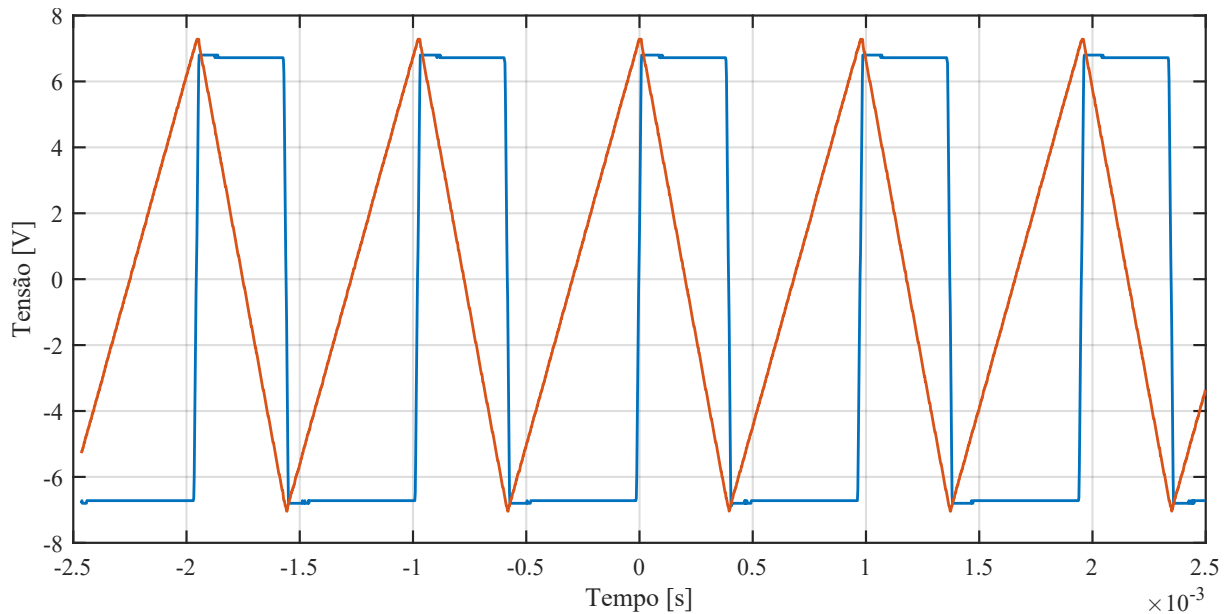
Nota-se que o valor máximo da saída do segundo estágio corresponde corretamente ao valor mínimo do terceiro estágio, conforme previsto pela Equação 41.

Figura 59 – Resultado simulado VCO estágio 3.



Fonte: Autor, 2025

Figura 60 – Resultado experimental VCO estágio 3.

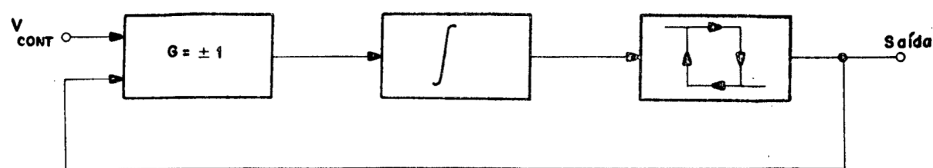


Fonte: Autor, 2025

3.3.9 Resultados do Oscilador Controlado por Tensão (OCT)

A avaliação do oscilador controlado por tensão possibilitou examinar o comportamento dinâmico do circuito e verificar sua conformidade com o modelo teórico. A Figura 61 apresenta uma visão geral das formas de onda das etapas internas do OCT, evidenciando a atuação integrada do amplificador chaveado, do integrador e do comparador com histerese.

Figura 61 – Oscilador controlado por tensão em blocos.



Fonte: ABREU, 1981

A frequência teórica de oscilação para a tensão média obtida no circuito de leitura da rede pode ser calculada por:

$$f = \frac{R_8 \cdot V_{in}}{4 \cdot R_7 \cdot R_5 \cdot C \cdot V_z} \quad (43)$$

Substituindo os valores empregados no protótipo:

$$f = \frac{150k \cdot 6,38}{4 \cdot 47k \cdot 47k \cdot 47n \cdot (6,8 + 0,7)} = 307,25 \text{ Hz.} \quad (44)$$

Os diodos *zener* utilizados apresentam tensão nominal de 6,8 V, valor compatível com as necessidades do circuito. Dessa forma, o nível de saturação do comparador é definido pela soma entre a queda direta do diodo (0,7 V) e a tensão de ruptura do *zener*, resultando em um valor aproximado de 7,5 V.

Com base nesses parâmetros, a expectativa inicial era de que a relação entre a tensão de entrada e a frequência oscilada se mantivesse linear, conforme previsto nas simulações. Entretanto, a análise experimental demonstrou que o circuito apresenta tendência à saturação para tensões mais elevadas, desviando do comportamento linear teórico.

Para adequar o sistema à operação prática, optou-se por realizar a calibração diretamente em torno da tensão nominal de 220 V, condição mais relevante para o funcionamento da estação de recarga. Nessa faixa, os dados experimentais apresentaram menor dispersão e melhor reprodutibilidade, embora ainda demonstrassem desvios significativos em relação ao modelo teórico. Assim, tornou-se necessário empregar um ajuste matemático que representasse com maior fidelidade a resposta real do OCT.

A regressão polinomial aplicada aos dados experimentais resultou na seguinte expressão:

$$\text{freq}(V) = -0,003V^2 + 1,7649V - 138,04. \quad (45)$$

O coeficiente quadrático, embora pequeno, melhora significativamente o ajuste nas extremidades, onde a curva tende à estabilização. O coeficiente de determinação obtido é:

$$R^2 = 0,9984,$$

o que demonstra a elevada qualidade da aproximação.

A partir da equação ajustada, determinaram-se os limites de operação para variações de $\pm 20\%$ em torno da tensão nominal de 220 V:

$$\text{freq}_+ = -0,003(220 \cdot 1,2)^2 + 1,7649(220 \cdot 1,2) - 138,04 = 118,81 \text{ Hz}, \quad (46)$$

$$\text{freq}_- = -0,003(220 \cdot 0,8)^2 + 1,7649(220 \cdot 0,8) - 138,04 = 79,65 \text{ Hz}. \quad (47)$$

Assim, ao incorporar a Equação 45 diretamente no *firmware* do microcontrolador, torna-se possível compensar a não linearidade experimental do OCT, permitindo que o sistema opere dentro das especificações estabelecidas e assegurando a confiabilidade do monitoramento da tensão da rede.

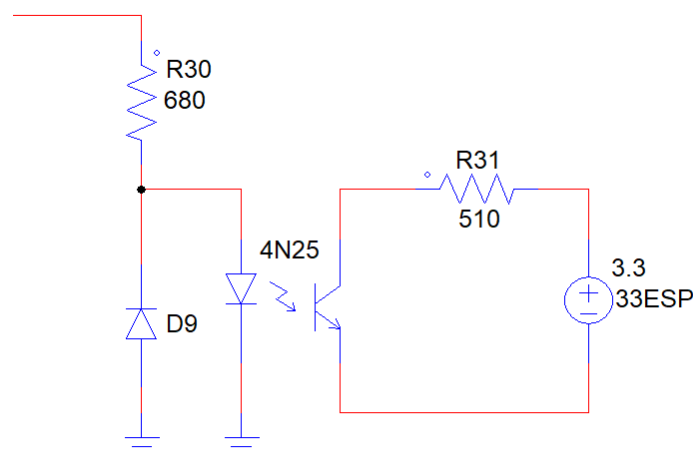
3.3.9.1 Cálculos do Optoacoplador

Neste estágio do circuito de medição da rede, ocorre a isolamento galvânica entre os dois domínios do sistema: de um lado, o circuito de medição da rede, com sua própria referência

de terra; do outro, o circuito da função piloto, com uma referência distinta. Essa separação é garantida pela atuação do optoacoplador.

Conforme ilustrado na Figura 62, o optoacoplador está localizado na saída do oscilador controlado por tensão (OCT). Assim, a frequência de chaveamento na saída do optoacoplador corresponde à frequência gerada pelo OCT, permitindo que se determine a tensão da rede a partir da medição da frequência de forma isolada, utilizando a relação apresentada na Equação 43.

Figura 62 – Optoacoplador simulado.



Fonte: Autor, 2025

O componente selecionado é o 4N25, um optoacoplador com fototransistor, que atende aos requisitos de isolamento do projeto, suportando até 7500 V de pico em corrente alternada com frequência de 60 Hz.

A queda de tensão típica no *led* interno do optoacoplador, com corrente de 10 mA, é de aproximadamente 1,15 V. Assim, o valor do resistor limitador de corrente pode ser determinado por:

$$R = \frac{7,5 - 1,15}{10 \cdot 10^{-3}} = 635 \, \Omega \quad (48)$$

é adotado o valor comercial mais próximo, 680 Ω . Para proteger o optoacoplador contra tensão reversa uma vez que o sinal proveniente do OCT varia entre $-7,5$ V e $7,5$ V é inserido um diodo de roda livre em antiparalelo com o *led* interno.

A relação de corrente de entrada e saída do 4N25 (CTR *Current Transfer Ratio*) é de aproximadamente 70 %, resultando em:

$$I_{in} = \frac{7,5 - 1,15}{680} = 9,3 \, \text{mA} \quad (49)$$

$$I_{out} = 9,3 \cdot 0,7 = 6,5 \, \text{mA} \quad (50)$$

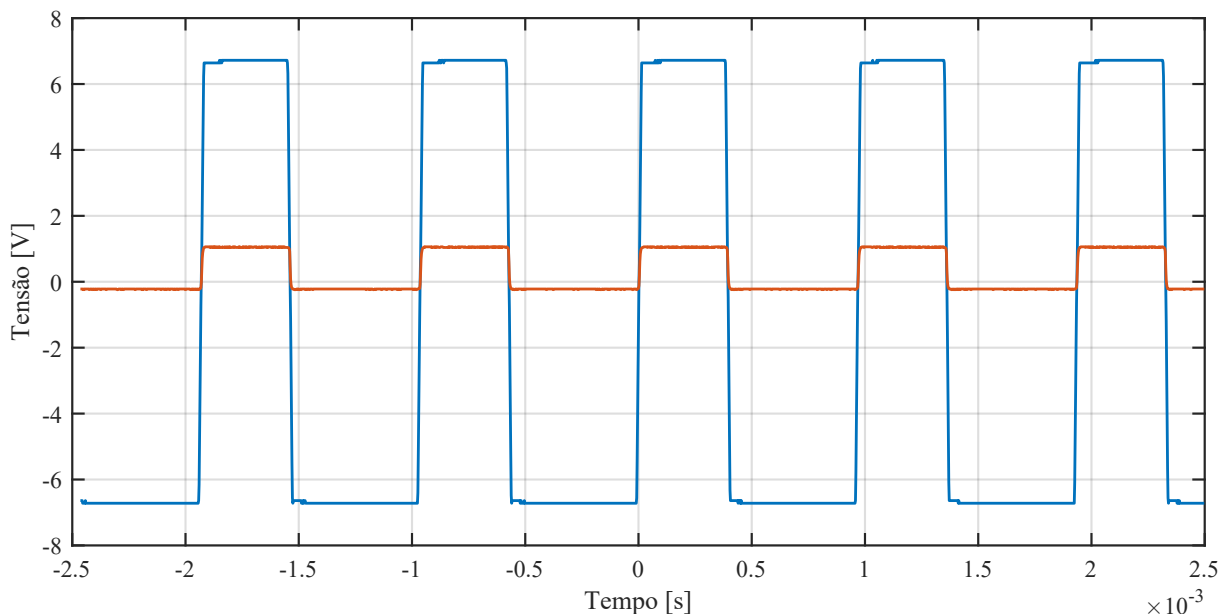
Para realizar a leitura da frequência pela porta digital do *ESP32*, é desejável que praticamente toda a tensão esteja no resistor *pull-up*, garantindo níveis lógicos compatíveis com os da alimentação de 3,3 V. Assim, o valor do resistor de carga é definido por:

$$R = \frac{3,3}{6,5 \cdot 10^{-3}} = 508 \, \Omega \quad (51)$$

Adotou-se o valor comercial de 510 Ω .

A forma de onda na saída do optoacoplador pode ser observada na Figura 63, com frequência idêntica à saída do OCT, apresentando uma queda de tensão de aproximadamente 1,2 V, referente à condução do *led* interno, e uma tensão mínima de 0,7 V, devida ao diodo de roda livre.

Figura 63 – Resultado experimental do optoacoplador.



Fonte: Autor, 2025

3.3.10 Lógica do Contator

Para realizar o acionamento do contator e iniciar, de fato, a liberação de energia ao VE quando a rede estiver operando dentro dos parâmetros normais, é utilizado um relé controlado por uma das portas digitais do *ESP32*.

Quando o *ESP32* envia nível lógico alto à base do transistor, este entra em saturação, permitindo o fluxo de corrente entre o coletor e o emissor. Dessa forma, a bobina do relé, previamente energizada com a tensão de 15 V proveniente da fonte do sistema, é acionada e comuta seus contatos, permitindo o acionamento do contator principal responsável por liberar a energia para o processo de recarga.

Para proteger o transistor e demais componentes do circuito contra sobretensões causadas pela comutação da bobina do relé (fenômeno conhecido como *flyback*), é adicionado um diodo de

roda livre em paralelo com a bobina, polarizado inversamente em relação à tensão de alimentação. Este diodo garante a dissipação segura da energia armazenada no campo magnético da bobina no momento da desativação do relé.

3.4 AQUISIÇÃO DE CORRENTE COM O SENSOR SCT-013

A aquisição da corrente elétrica da carga é realizada por meio do transformador de corrente não invasivo SCT-013 em uma das três fases, visto na Figura 64, é amplamente utilizado em aplicações de monitoramento energético devido à sua praticidade, segurança e isolamento galvânico. O SCT-013 fornece um sinal proporcional à corrente medida, que necessita de condicionamento antes de ser digitalizado pelo microcontrolador.

Figura 64 – Sensor de corrente SCT-013.

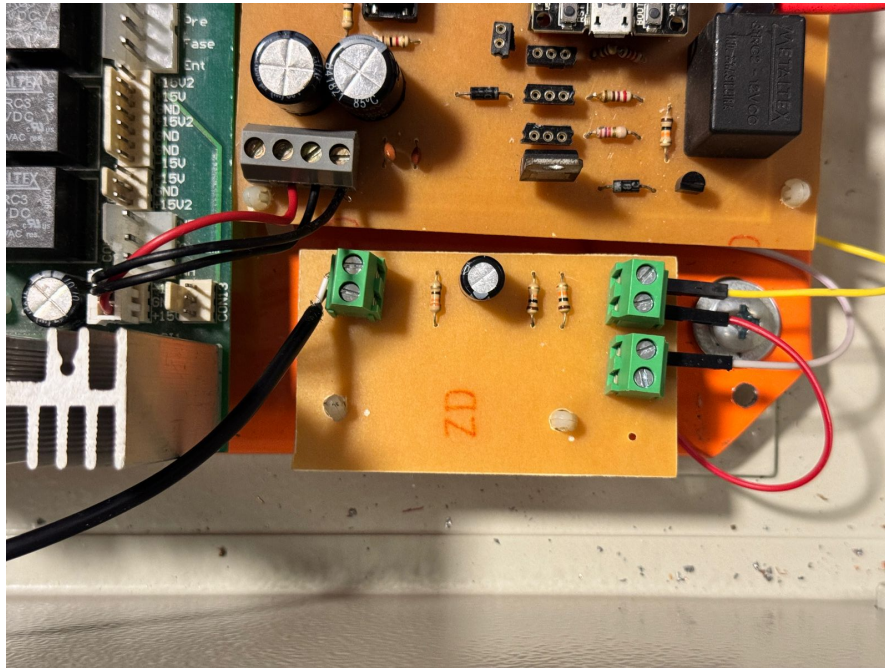


Fonte: Autor, 2025

Para essa finalidade, desenvolveu-se uma placa auxiliar dedicada exclusivamente ao condicionamento do sinal do SCT-013, responsável por realizar a retificação, filtragem e ajuste de nível do sinal analógico. Essa placa, ilustrada na Figura 65, é projetada para ser compacta e instalada diretamente no quadro de comando, próxima ao microcontrolador. Sua função é transformar o sinal CA derivado do transformador de corrente em um sinal analógico proporcional ao valor RMS, adequado para leitura pelo conversor A/D do ESP32.

O circuito implementado inclui um divisor resistivo composto por dois resistores de $10\text{ k}\Omega$, responsável por recentralizar o sinal em um nível seguro para o ADC, e um resistor de carga de $330\ \Omega$ utilizado para converter a corrente induzida pelo SCT-013 em uma pequena tensão CA. Em seguida, um capacitor de filtragem realiza a suavização do sinal retificado, produzindo um valor proporcional à corrente eficaz. Esse arranjo possibilita medir correntes de até aproximadamente 40 A, mantendo boa estabilidade e imunidade a ruídos.

Figura 65 – Placa auxiliar de condicionamento do sinal do SCT-013 instalada no quadro.



Fonte: Autor, 2025

A Figura 86 apresenta o *layout* da placa de circuito impresso utilizada para o condicionamento do sinal. O projeto é desenvolvido no *software* Proteus, assegurando trilhas curtas, aterramento adequado e separação entre os caminhos de entrada e saída. Essa topologia reduz as interferências eletromagnéticas provenientes dos cabos de potência presentes no interior do quadro, garantindo medições mais consistentes.

3.5 LÓGICA DO SOFTWARE

O *firmware* desenvolvido para o microcontrolador *ESP32-DevKitC V4* integra as funções de aquisição de variáveis elétricas, geração do sinal do pino piloto, supervisão das condições de recarga e comunicação remota com a plataforma TagoIO. A programação é realizada em C/C++ utilizando a IDE Arduino, explorando os recursos nativos do ESP32, como módulos ADC, PWM via LEDC, tarefas assíncronas, contadores de alta resolução e comunicação *wi-fi*. Para garantir modularidade e estabilidade, o *software* é organizado em seções funcionais que tratam da aquisição, processamento, controle e telemetria, mantendo conformidade com os requisitos da IEC 61851-1.

A inicialização configura os periféricos essenciais: conversores analógico-digitais, canais *PWM*, pinos digitais, interface serial e conexão *wi-fi*. Em seguida, o *loop* principal executa ciclos regulares de leitura, filtragem, atualização de estado e acionamento das saídas, utilizando uma lógica semelhante a uma máquina de estados, que permite identificar com precisão os estados A, B, C e D do pino piloto por meio da leitura da tensão V_a .

3.5.1 Aquisição e Processamento dos Sinais

As grandezas elétricas utilizadas pelo *firmware* incluem a tensão V_a , a frequência da rede e a corrente consumida pelo veículo. A leitura de V_a é realizada pelo ADC interno utilizando uma média móvel composta por 1000 amostras espaçadas em $2\ \mu\text{s}$, totalizando aproximadamente 2 ms por ciclo. Esse intervalo compreende dois períodos completos do *PWM* de 1 kHz, assegurando que o valor final seja representativo dos picos do sinal. Após a filtragem, o valor obtido é comparado com as faixas normativas que caracterizam os estados definidos pela IEC 61851-1.

A frequência da rede é calculada a partir do tempo entre bordas consecutivas do sinal proveniente do optoacoplador, permitindo determinar o período e, conseqüentemente, a frequência instantânea. A leitura da corrente é realizada com o sensor SCT013, processada pela biblioteca EmonLib calibrada para o resistor *burden* utilizado no circuito.

3.5.2 Razão Cíclica

O cálculo do ciclo de trabalho é realizado com base na Tabela 5, considerando o valor máximo de corrente definido no código-fonte conforme as características da instalação onde a estação de recarga será utilizada. Dessa forma, o ciclo de trabalho aplicado ao sinal piloto é determinado automaticamente pelo *firmware*, seguindo a lógica apresentada no fluxograma da Figura 66.

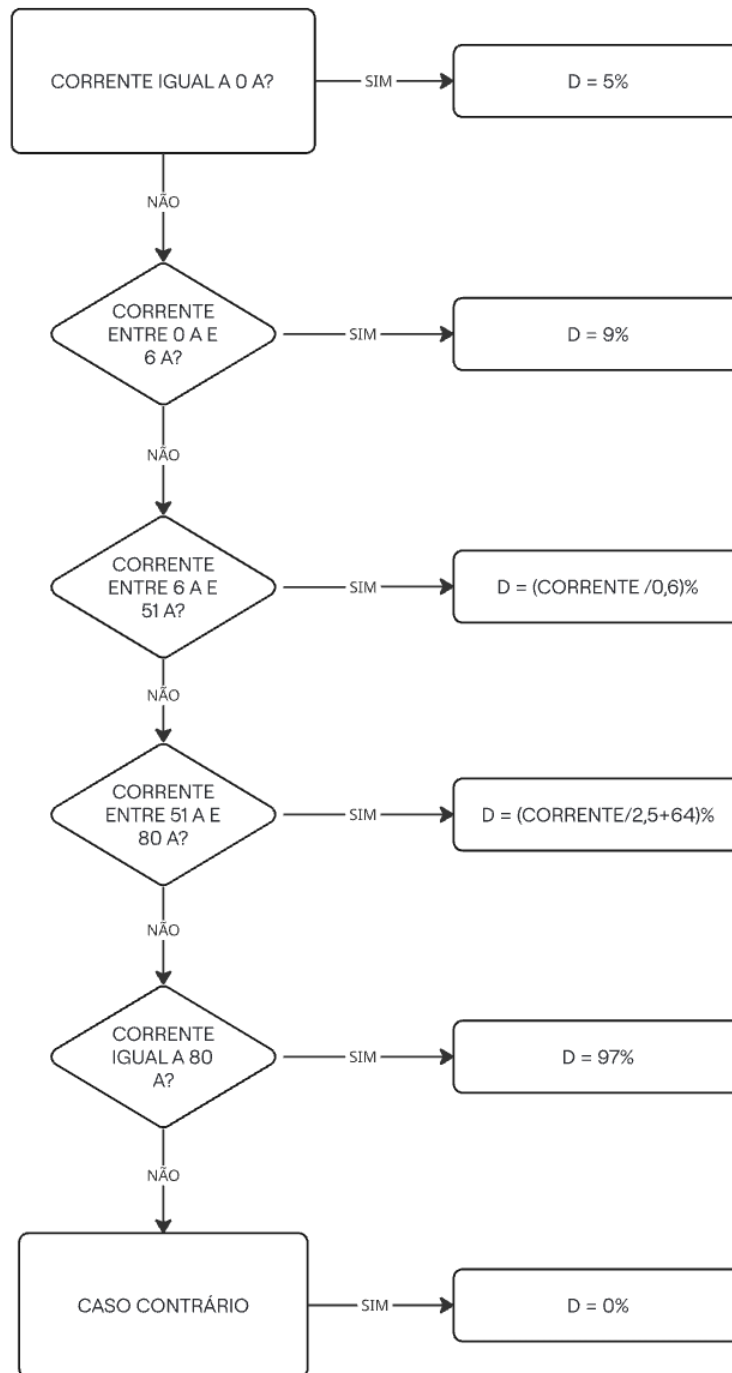
3.5.3 Geração e controle do sinal *PWM*

O ciclo de trabalho do sinal *PWM* é definido automaticamente de acordo com a corrente máxima permitida na instalação, previamente configurada no *firmware*. O módulo *LEDC* do ESP32 é responsável pela geração do *PWM* a 1 kHz, utilizando resolução de 8 *bits*, o que assegura tempos de subida e descida adequados às exigências da norma IEC 61851-1 e contribui para a redução de ruídos no estágio analógico de condicionamento.

Quando a estação dispõe de energia para carregamento, o *PWM* assume o ciclo de trabalho correspondente à corrente configurada. Na ausência de energia, o *firmware* força o *duty cycle* para 100 %, mantendo o pino piloto em nível alto contínuo. Em caso de falha, o *duty cycle* é reduzido para 0 %, resultando em aproximadamente $-12\ \text{V}$ na linha do pino piloto, caracterizando explicitamente uma condição de erro.

O acionamento do relé de potência ocorre somente quando três condições são simultaneamente atendidas:

Figura 66 – Fluxograma da razão cíclica de acordo com a corrente máxima.



Fonte: Autor, 2025

1. a rede elétrica encontra-se dentro dos limites aceitáveis;
2. o *PWM* está sendo gerado corretamente pelo ESP32.
3. a tensão V_a indica estado C ou D;

3.5.4 Comunicação *wi-fi* e telemetria

A interface *wi-fi* do ESP32 é configurada em modo *station*. Durante a inicialização, o *firmware* estabelece a conexão e, ao longo da operação, uma rotina de monitoramento verifica periodicamente o estado da rede, realizando tentativas automáticas de reconexão quando necessário. Essa abordagem permite que a estação continue operando mesmo durante interrupções de comunicação.

A telemetria é enviada à plataforma TagoIO por meio de requisições HTTP contendo informações como V_a filtrada, corrente eficaz, frequência da rede, tensão estimada, razão cíclica do *PWM* e estado operacional. O envio ocorre de forma assíncrona, sem bloquear a execução das tarefas principais do *firmware*.

3.5.5 Visualização local dos estados

A visualização das variáveis pode ser feita pelo monitor serial da IDE Arduino, que exibe valores como V_a , corrente, tensão estimada e *duty cycle*. Além disso, LEDs instalados na placa indicam visualmente os estados normativos do pino piloto (12 V, 9 V, 6 V e 3 V), assim como o acionamento do relé, auxiliando na calibração e nos testes experimentais da estação de recarga.

3.6 QUADRO DE COMANDO

O quadro de comando desempenha um papel central no funcionamento da estação de recarga, pois concentra os dispositivos responsáveis pela proteção, seccionamento e acionamento da carga. Além de organizar eletricamente os elementos de potência, este conjunto assegura que a energia seja fornecida ao VE de maneira controlada e em conformidade com os requisitos estabelecidos pelas normas. A correta disposição dos dispositivos, bem como a lógica de intertravamento entre proteção e controle, contribui para a segurança operacional da estação e para o funcionamento adequado do circuito piloto.

Neste item, são apresentados os princípios de funcionamento da lógica de potência do carregador, a hierarquia de proteção adotada e os critérios utilizados na montagem física do quadro. Também são discutidos aspectos relacionados à interação entre a eletrônica de controle e os dispositivos eletromecânicos, destacando-se o papel da contatora, do interruptor diferencial residual, dos DPS e dos demais elementos que compõem o sistema.

3.6.1 Lógica da potência do carregador

A lógica de potência da estação de recarga é projetada de forma a garantir segurança, seletividade e conformidade com as normas ABNT NBR 5410, que estabelece as condições para instalações elétricas de baixa tensão e ABNT NBR 17019, a qual define os requisitos específicos para estações de recarga de veículos elétricos.

Os quatro Dispositivos de Proteção contra Surtos (DPS) do tipo II, instalados nas três fases e no neutro, são responsáveis pela drenagem de sobretensões transitórias decorrentes de distúrbios na rede elétrica ou de descargas atmosféricas indiretas. A sua posição inicial na cadeia garante que os demais dispositivos não sejam submetidos a tais transitórios.

O Interruptor Diferencial Residual (IDR), instalado imediatamente após os DPS, proporciona proteção contra correntes de fuga à terra, evitando riscos de choque elétrico e atendendo às exigências específicas para pontos de recarga. Sua posição garante que os surtos drenados pelos DPS não provoquem disparos indevidos.

O disjuntor tripolar, além de atuar como dispositivo de proteção contra sobrecorrente, também permite o seccionamento do circuito, garantindo segurança operacional e viabilizando manutenções.

Por fim, a contatora é responsável pelo chaveamento do fornecimento de energia à estação de recarga. Seu acionamento é controlado pelo microcontrolador da placa eletrônica desenvolvida, o qual somente autoriza a energização quando as seguintes condições são simultaneamente atendidas:

- tensão da rede dentro dos limites estabelecidos;
- estados válidos da função piloto (modos C ou D propostos pela IEC 61851-1);
- ausência de falhas nos circuitos de controle.

Essa lógica garante que o fornecimento de energia ao VE ocorra exclusivamente em condições seguras, evitando riscos de sobrecorrente, tensões inadequadas e falhas na comunicação da função piloto.

3.6.2 Montagem do quadro de comando

A montagem física do quadro de comando é realizada em conformidade com as diretrizes da ABNT NBR 5410, garantindo a correta segregação dos condutores, a acessibilidade dos dispositivos de proteção e a identificação clara de todos os componentes. O quadro é responsável por seccionar, proteger e comandar o fornecimento de energia ao ponto de recarga, sendo composto pelos seguintes elementos principais:

- **Disjuntor tripolar:** atua como dispositivo de proteção contra sobrecorrentes (sobrecarga e curto-circuito) e permite o seccionamento manual da alimentação da estação.
- **4 DPS's do tipo II:** instalados nas três fases e no neutro, asseguram proteção contra sobretensões transitórias oriundas de manobras na rede elétrica ou de descargas atmosféricas.
- **Interruptor Diferencial Residual (IDR):** instalado após os DPS, proporciona proteção contra correntes de fuga à terra, reduzindo os riscos de choque elétrico.

- **Contatora:** responsável pelo chaveamento da alimentação do ponto de recarga, atuando sob o comando da placa eletrônica desenvolvida.
- **Barramentos de neutro e terra:** dimensionados segundo a corrente nominal do sistema, garantindo conexões adequadas para todos os dispositivos.

A disposição dos dispositivos no quadro obedeceu à sequência recomendada para instalações de baixa tensão:

Rede → DPS → IDR → Disjuntor → Contatora.

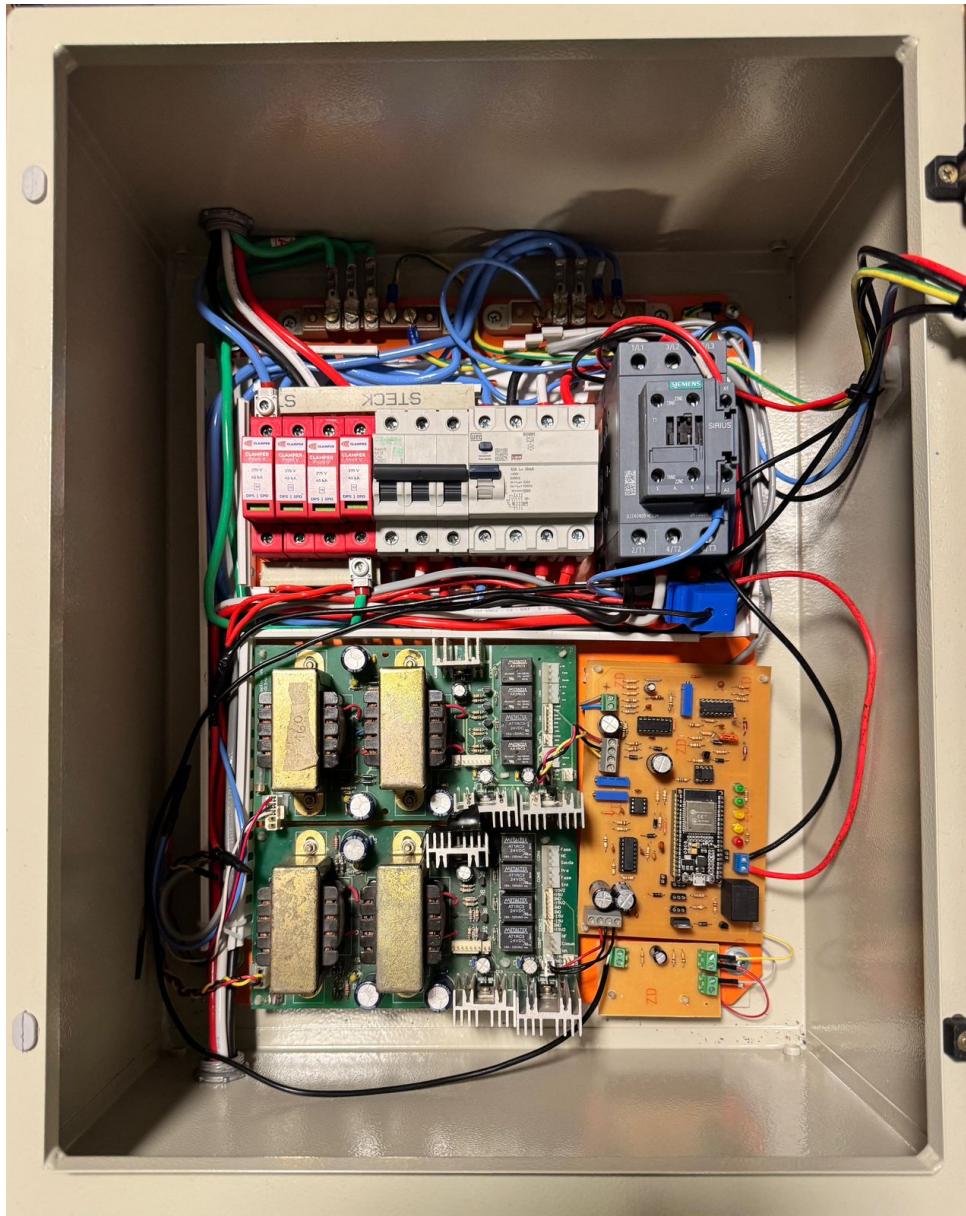
Essa organização assegura a seletividade de proteção, a correta atuação do interruptor diferencial, mesmo na presença de surtos, e reduz a propagação de transitórios para os circuitos eletrônicos sensíveis. Além disso, todos os dispositivos de proteção, seccionamento e comando foram selecionados considerando uma carga trifásica de 380 V e potência de até 22 kW ou uma carga trifásica de 220 V e potência de 11 kW, garantindo que cada componente opere com ampla margem de segurança. Dessa forma, os elementos instalados encontram-se sobredimensionados para a aplicação prática, elevando a confiabilidade, a durabilidade e a robustez do sistema de recarga. Além dos aspectos normativos, considerou-se a separação física entre condutores de potência e condutores de sinal provenientes da placa eletrônica, minimizando interferências eletromagnéticas e facilitando futuras manutenções. Todos os cabos são dimensionados considerando a corrente nominal da estação de recarga, o método de instalação e os fatores de correção térmica.

Outro ponto crítico é a instalação do sistema de aterramento do quadro. Conforme a ABNT NBR 5410 e NBR 17019, todos os DPS tipo II devem estar conectados ao barramento de terra com impedância inferior a 10Ω , garantindo rápida condução das sobretensões para o sistema de proteção.

A Figura 67 apresenta a montagem interna do quadro, evidenciando a organização dos dispositivos de proteção, cabeamento e integração com a placa eletrônica responsável pela lógica de comando.

A face externa do quadro conta com sinalização luminosa para indicar o estado operacional da estação de recarga. A iluminação em verde indica que o quadro está energizado e apto ao funcionamento, enquanto a iluminação em vermelho indica que o sistema encontra-se fornecendo energia ao veículo (modo de recarga ativa), além disso a botoeira de segurança é utilizada em série antes do sinal do relé para o desacionamento do sinal para a contatora. A Figura 68 apresenta a disposição dos sinalizadores na tampa do quadro.

Figura 67 – Montagem interna do quadro de comando da estação de recarga.



Fonte: Autor, 2025

Figura 68 – Vista frontal da estação de recarga com sinalização luminosa.



Fonte: Autor, 2025

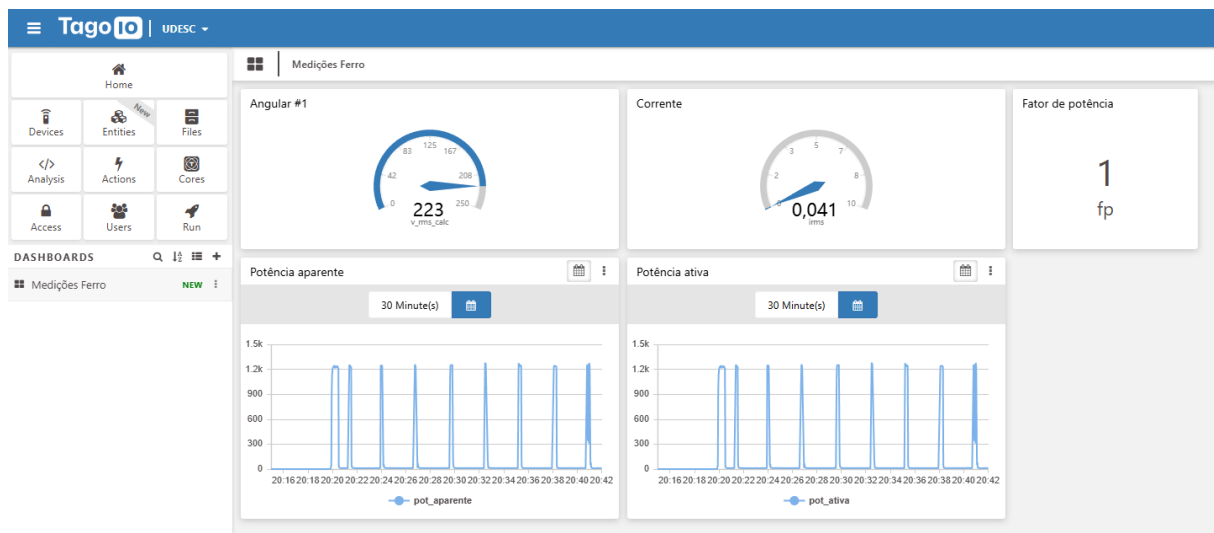
3.7 COMUNICAÇÃO COM A TAGOIO

A etapa de comunicação e aquisição de dados da estação de recarga é implementada utilizando o microcontrolador ESP32, responsável por coletar os valores de tensão, corrente e potência em tempo real e transmiti-los para a plataforma TagoIO por meio do protocolo HTTP. Após o processamento local dos sinais provenientes do circuito piloto, do oscilador controlado por tensão e do sensor de corrente, os dados são organizados em um pacote JSON e enviados a cada ciclo de medição, garantindo a atualização contínua do sistema de monitoramento.

A transmissão ocorre sempre que o módulo *wi-fi* está conectado, sendo automaticamente retomada em caso de perda de conexão, graças à rotina de reconexão implementada no *firmware*. A plataforma TagoIO é escolhida devido à sua interface amigável, ao suporte nativo para *dashboards* customizáveis e à compatibilidade direta com dispositivos IoT. Uma vez recebidos, os dados são armazenados e exibidos em gráficos históricos, indicadores numéricos e medidores analógicos, permitindo ao usuário acompanhar a operação da estação de forma dinâmica.

A Figura 69 apresenta o painel de monitoramento para a condição em que não há carga conectada ao ponto de recarga. Observa-se que a corrente medida permanece próxima de 0 A, enquanto as potências ativa e aparente assumem valores mínimos, como esperado para essa condição de operação. A tensão RMS proveniente do módulo de medição mantém-se estável, caracterizando o funcionamento correto do circuito de aquisição mesmo em regime sem carga.

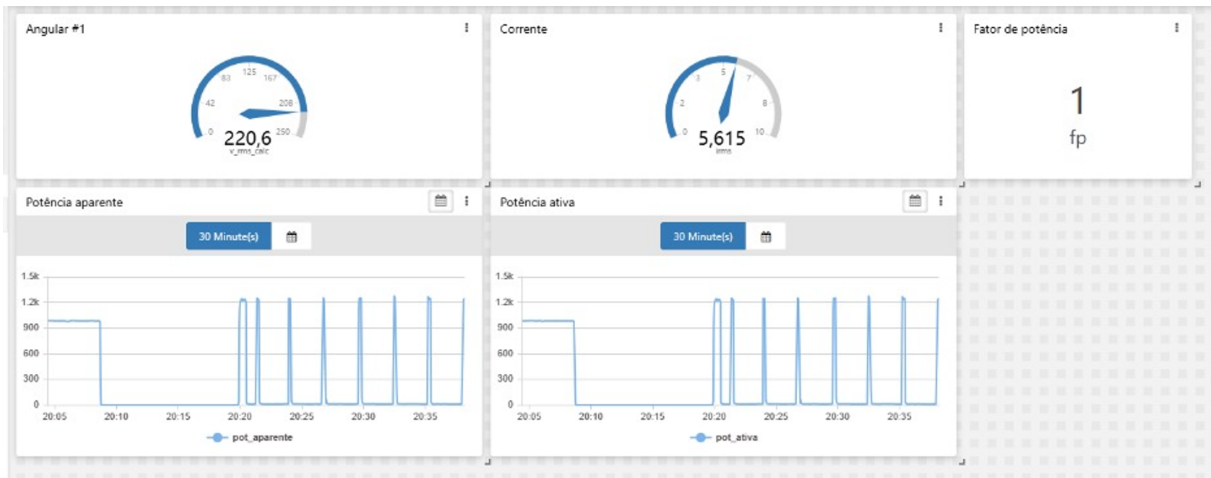
Figura 69 – *Dashboard* TagoIO, operação sem carga conectada.



Fonte: Autor, 2025

A Figura 70 apresenta o comportamento do sistema quando um ferro de passar roupas de 1200 W é conectado à estação. A corrente eficaz sobe para aproximadamente 5,6 A, valor condizente com a potência especificada para operação em 220 V. Além disso, observa-se o aumento proporcional das potências ativa e aparente nos gráficos históricos, validando não apenas o funcionamento do sensor de corrente e do algoritmo de cálculo de potência, mas também a correta transmissão dos dados à plataforma.

Figura 70 – Dashboard TagoIO, operação com carga de 1200 W conectada.



Fonte: Autor, 2025

Os resultados obtidos confirmam a eficácia da arquitetura de comunicação implementada, permitindo o monitoramento contínuo da tensão da rede, da corrente consumida, da potência ativa, da potência aparente e do fator de potência. A interface TagoIO demonstrou-se uma ferramenta robusta para o acompanhamento da operação da estação de recarga, fornecendo ao usuário informações confiáveis e de fácil interpretação, essenciais para a validação experimental do sistema.

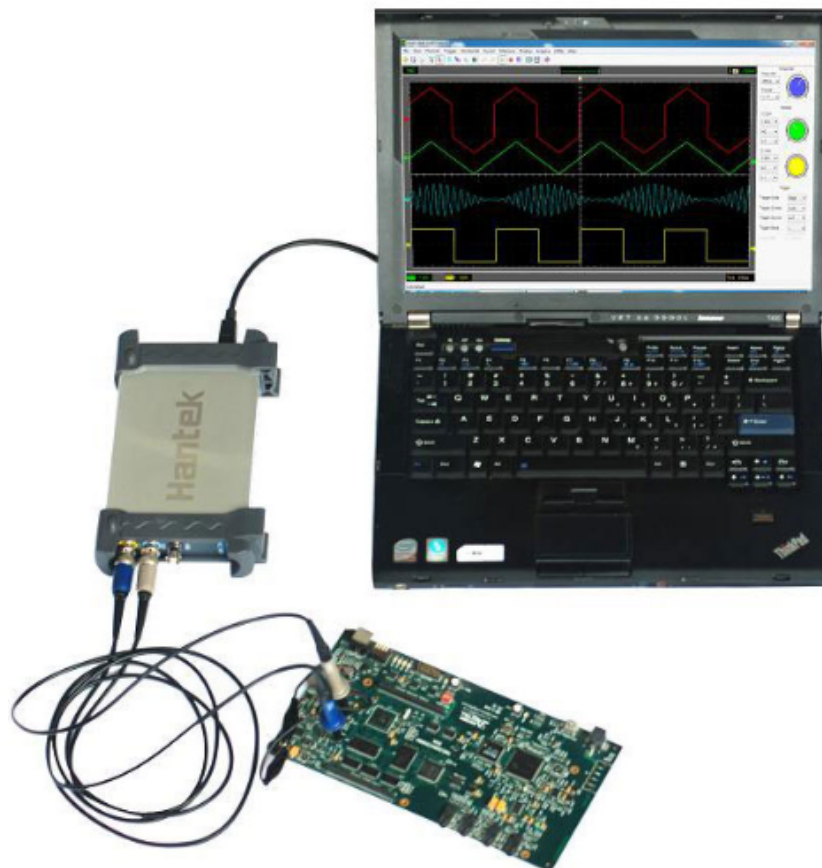
4 RESULTADOS

4.1 AQUISIÇÃO DE DADOS EXPERIMENTAIS INICIAIS

Para a obtenção e validação prática dos sinais elétricos produzidos pelos circuitos desenvolvidos neste trabalho, empregou-se o osciloscópio digital *USB* Hantek 6022BE, escolhido devido ao seu baixo custo, portabilidade e ampla utilização em ambientes acadêmicos. O equipamento possibilitou a análise detalhada das formas de onda relacionadas ao pino piloto, ao oscilador controlado por tensão (OCT), à tensão retificada da rede elétrica e às medições de tempo exigidas pela norma IEC 61851-1.

A Figura 71 apresenta o modelo utilizado nos ensaios. O Hantek 6022BE possui dois canais, largura de banda de 20 MHz e taxa de amostragem de até 0,048 GSa/s, sendo alimentado e conectado ao computador através de interface *USB*, o que reforça sua praticidade em aplicações de desenvolvimento e prototipagem.

Figura 71 – Osciloscópio Hantek 6022BE.

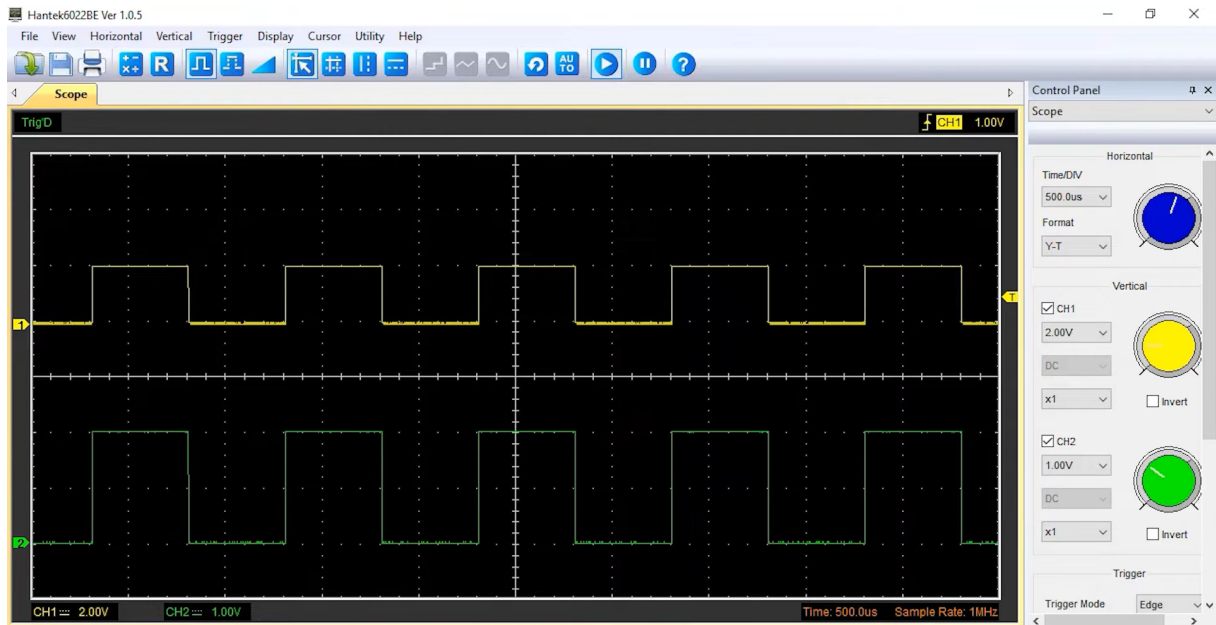


Fonte: (Qingdao Hantek Electronic Co., Ltd., 2020)

Por meio do *software* proprietário da Hantek, exibido na Figura 72, é possível realizar medições em tempo real, ajustar cursores para verificação dos tempos de subida e descida do sinal piloto, capturar formas de onda e exportar arquivos no formato *CSV* para análise computacional

posterior. A capacidade de registrar e armazenar dados experimentais foi essencial para avaliar a conformidade dos sinais com os requisitos normativos, incluindo a amplitude do sinal CP em cada estado operacional (A, B, C e D), o comportamento dinâmico da modulação PWM, o ciclo ativo correspondente à corrente disponível e a verificação da frequência gerada pelo OCT, utilizada como referência indireta para estimar a tensão eficaz da rede elétrica.

Figura 72 – Software de leitura de dados Hantek.



Fonte: (Qingdao Hantek Electronic Co., Ltd., 2020)

A utilização do osciloscópio Hantek 6022BE permitiu que todos os ensaios fossem conduzidos em ambiente doméstico, sem a necessidade de acesso a laboratórios especializados. Essa característica demonstrou a viabilidade da execução de projetos acadêmicos com ferramentas acessíveis, mantendo a confiabilidade dos resultados e permitindo a validação prática dos circuitos desenvolvidos ao longo do trabalho.

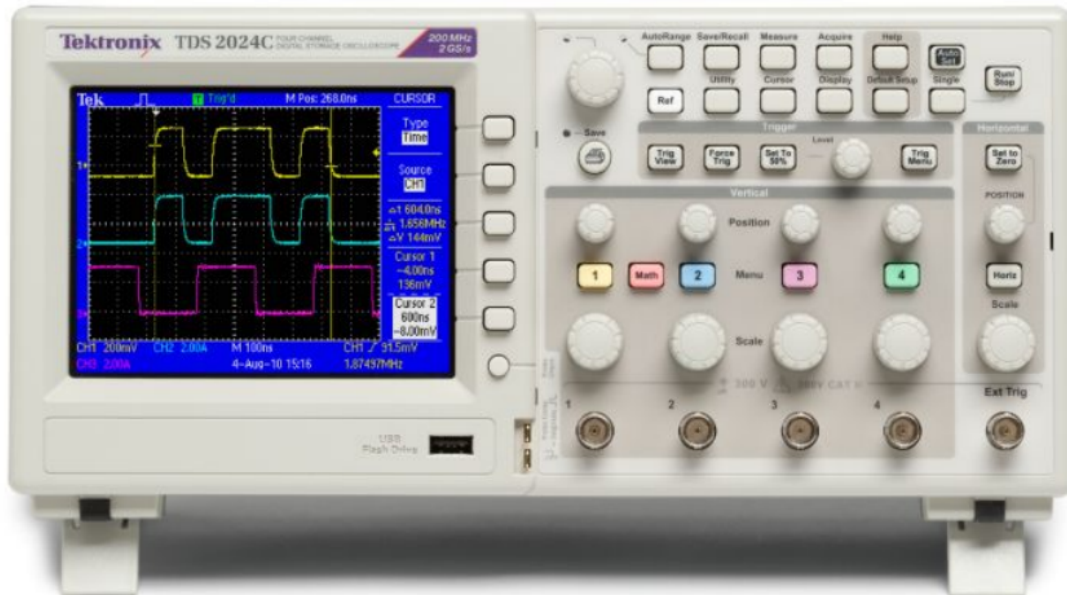
4.1.1 Aquisição de Dados Experimentais com Osciloscópio Tektronix TDS2024C

Embora o Hantek 6022BE tenha sido adequado para os ensaios preliminares e para a validação inicial dos sinais produzidos pelos circuitos, a análise final apresentada neste trabalho foi realizada utilizando o osciloscópio digital Tektronix TDS2024C, um equipamento de maior desempenho e precisão, amplamente empregado em ambientes industriais e laboratórios de pesquisa. Esse modelo possui largura de banda de 200 MHz e taxa de amostragem de até 2 GS/s, características que permitem a captura fiel de sinais transitórios e de alta velocidade, fundamentais para a análise rigorosa dos circuitos estudados.

A Figura 73 apresenta o osciloscópio utilizado nos ensaios definitivos. Sua alta taxa de amostragem e maior largura de banda, quando comparadas às do Hantek 6022BE, possibilitaram avaliar com precisão aspectos essenciais para a conformidade com a IEC 61851-1, como os

tempos de subida inferiores a $10 \mu\text{s}$, a forma de onda do pino piloto, o comportamento dinâmico do PWM e as transições do oscilador controlado por tensão (OCT).

Figura 73 – Osciloscópio Tektronix TDS2024.



Fonte: (Tektronix, Inc., 2019)

Além disso, o Tektronix TDS2024C permite a exportação direta das formas de onda para arquivos CSV, que foram posteriormente processados em MATLAB para geração dos gráficos e análises apresentados neste trabalho. Dessa forma, todos os resultados experimentais expostos nas seções seguintes incluindo a verificação do ciclo de trabalho, a análise da tensão V_a , a validação do OCT e a estimativa da tensão da rede foram obtidos com base em medições de alta resolução e confiabilidade.

Os dados capturados com esse equipamento constituem a base experimental das avaliações finais apresentadas neste TCC, garantindo precisão metrológica e assegurando a reprodutibilidade dos resultados obtidos.

4.1.2 Resultado

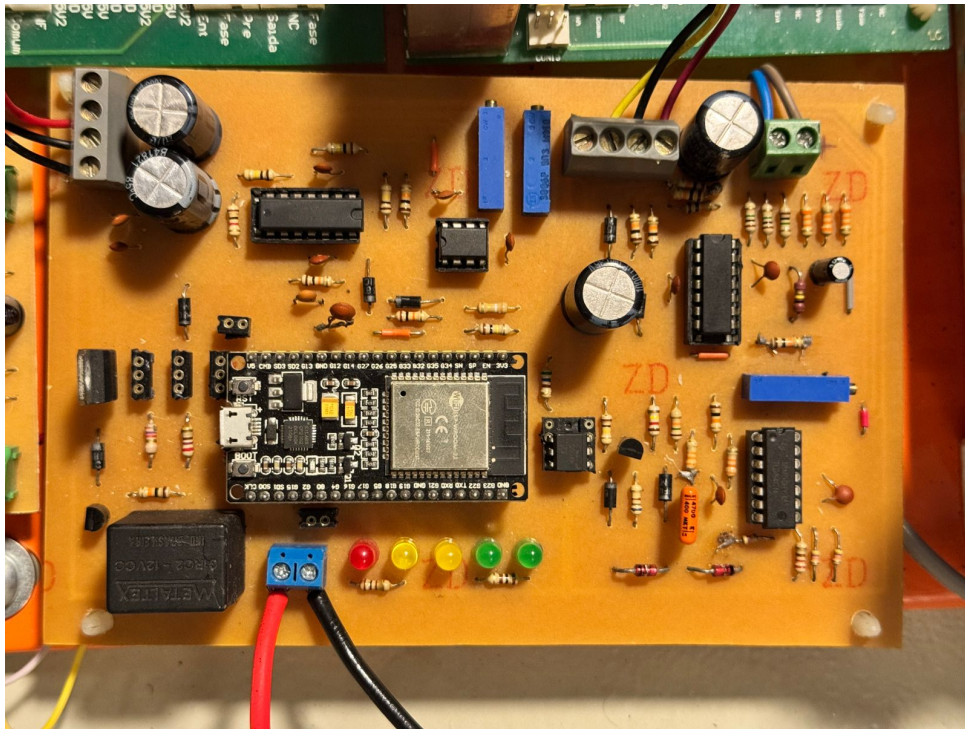
Durante a fabricação da placa, algumas modificações foram necessárias em relação ao esquemático de referência. Dentre os ajustes realizados, as correções incluíram o recálculo de capacitores indisponíveis, mantendo-se o mesmo valor de ondulação especificado, a substituição de resistores por equivalentes comerciais e a correção manual de conexões ausentes, resultantes do fato de o software considerar uma placa com furos metalizados.

Um problema adicional identificado durante a montagem esteve relacionado aos circuitos integrados TL084 inicialmente adquiridos. Todos os dispositivos testados apresentaram um *slew rate* experimental de aproximadamente $0,5 \text{ V}/\mu\text{s}$, valor substancialmente inferior ao especificado

no *datasheet* ($13 \text{ V}/\mu\text{s}$). Dada a repetição do comportamento, há fortes indícios de que se tratava de um lote falsificado, comprometendo o desempenho dos circuitos analógicos sensíveis à taxa de variação de tensão.

Após todas as substituições e correções necessárias, obteve-se a versão final da placa, utilizada em todos os testes apresentados neste trabalho, conforme ilustrado na Figura 74.

Figura 74 – Placa elaborada após as correções.



Fonte: Autor, 2025

4.2 TESTES

4.2.1 Testes com carga resistiva

Os primeiros ensaios funcionais do sistema foram realizados utilizando uma carga puramente resistiva, com o objetivo de validar o acionamento do relé, a integridade do circuito de potência e o comportamento geral da estação de recarga sob condições reais. Para esse teste foi empregado um ferro de passar roupa de aproximadamente 1200 W, operando em sistema monofásico a 220 V. A escolha dessa carga permitiu verificar a resposta da estação sem a necessidade de um VE.

Embora o projeto final da estação de recarga seja trifásico, os testes foram conduzidos em ambiente monofásico devido à disponibilidade local. Essa limitação não prejudicou a validação, pois o controle principal é realizado pelo circuito de comando, e o acionamento da energia para o veículo depende exclusivamente da atuação do relé e da respectiva contatora. Assim, mesmo operando com apenas uma fase, foi possível avaliar adequadamente o comportamento da lógica de supervisão prevista pela IEC 61851-1.

Durante o ensaio observou-se que, ao atingir as condições de segurança definidas pela norma, o relé foi acionado corretamente, comutando a contatora e permitindo o fornecimento de energia à carga. A leitura da corrente via sensor SCT013 foi estável e compatível com o consumo esperado do aquecedor resistivo. A tensão V_a e o ciclo de trabalho do PWM permaneceram dentro dos limites normativos durante todas as etapas. Dessa forma, os testes com carga resistiva confirmaram a operação correta da lógica de energização e desligamento seguro, bem como a transmissão dos dados para a plataforma TagoIO durante o ensaio.

4.2.2 Testes iniciais com o sistema *CDS Charging Discovery System*

Para a etapa seguinte, buscou-se validar a interoperabilidade da estação de recarga desenvolvida com um equipamento profissional de ensaio, o *Charging Discovery System (CDS)*, empregado para simular os diferentes estados de um veículo elétrico (VE) conforme definido pela norma IEC 61851-1, conforme ilustrado na Figura 75. O objetivo principal foi verificar o comportamento do circuito do pino piloto, a correta transição entre os estados A, B, C e D, bem como o acionamento da contatora sob condições controladas de teste.

Entretanto, algumas limitações foram identificadas durante a realização dos ensaios. O modelo da placa inicial de controle baseado na norma ABNT IEC 61851 adotado neste trabalho integra, em uma única placa, tanto a lógica de simulação do veículo elétrico quanto o circuito característico de uma estação de recarga, o que difere da arquitetura real, na qual esses sistemas são fisicamente independentes. Dessa forma, como o *CDS* não estabelece comunicação direta com a placa de controle desenvolvida, o módulo responsável pelo acionamento da contatora não recebeu o sinal esperado proveniente do pino piloto gerado pelo hardware da estação. Como consequência, embora a presença de tensão trifásica tenha sido corretamente identificada no ambiente de testes, não houve circulação de corrente.

Com o intuito de contornar essa limitação, foi utilizado o *software Charging Discover*, da *KeySight*, que permite simular eletronicamente os estados operacionais do carregamento. Apesar disso, mesmo com a correta leitura das tensões trifásicas dentro do software, não houve circulação de corrente, pois o equipamento não reconheceu o sinal externo necessário para habilitar a carga. Em termos práticos, o *CDS* aguardava um sinal de comunicação entre o *CDS* e a placa de controle para autorizar o acionamento da contatora, e não o sinal gerado pelo *software*.

4.2.3 Testes Realizados com o *Charging Discovery System (CDS)*

Após a validação inicial do funcionamento do circuito do pino piloto, procedeu-se à configuração do sistema para integração direta com o *CDS*. Para isso, a placa de controle teve o módulo interno de emulação dos estados do VE desabilitado, permitindo que o *CDS* assumisse totalmente essa função. Além disso, substituiu-se o conector tripolar pelo conector Tipo 2, conforme ilustrado na Figura 76.

Figura 75 – Teste entre estação e CDS.



Fonte: Autor, 2025

Figura 76 – CDS com o conector Tipo 2.



Fonte: Autor, 2025

Com a nova configuração, foram realizados quatro testes principais, seguindo diretrizes

Figura 77 – Teste entre estação e CDS com conector tipo 2.



Fonte: Autor, 2025

da norma IEC 61851-1 e verificando a interoperabilidade entre a estação de recarga e o CDS.

4.2.3.1 Primeiro teste — Transição entre os estados A, B e C

O primeiro ensaio consistiu em forçar sequencialmente os estados A, B e C por meio do CDS, avaliando a resposta da estação de recarga e a correta atuação da contatora responsável pela energização do banco de resistores trifásico de 120 Ω por fase.

A Figura 85 apresenta o resultado obtido, evidenciando a coerência entre as transições da tensão V_a , a habilitação da corrente e a energização da carga. O teste confirmou que há comunicação adequada entre o CDS e a estação de recarga, validando o comportamento básico do sistema.

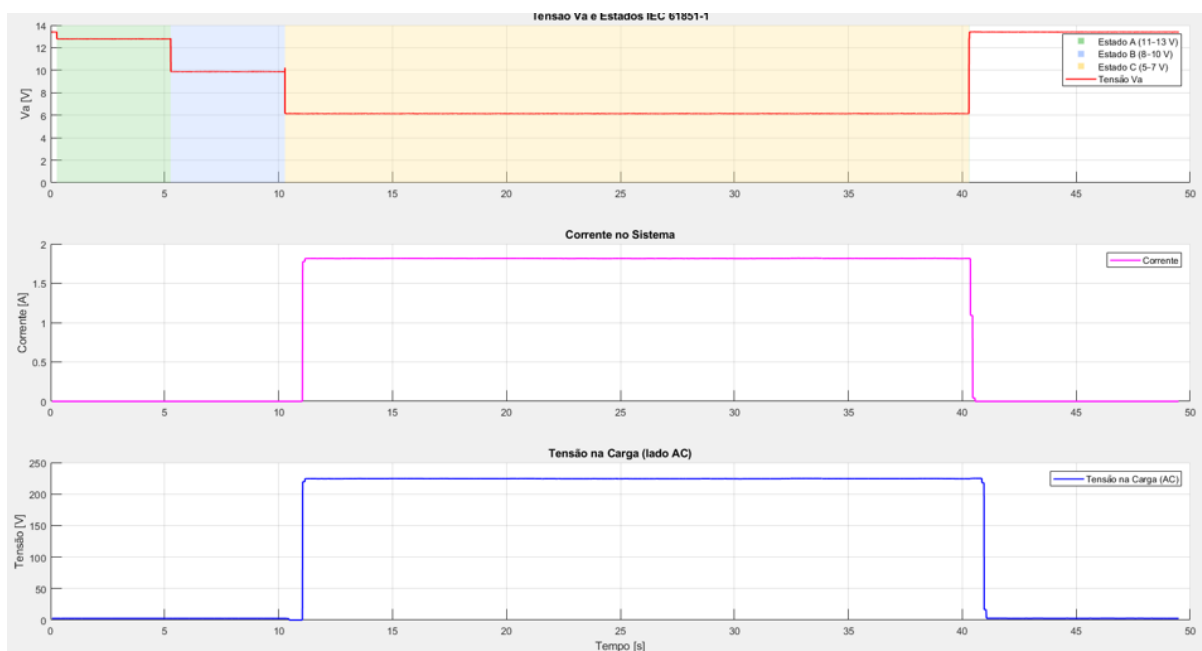
4.2.3.2 Segundo e terceiro testes — Ensaio de curto-circuito e interrupção do pino CP

Os ensaios de falha aplicados ao condutor CP seguem os requisitos estabelecidos pela IEC 61851-1, que define limites específicos de tempo para desligamento do sistema a fim de garantir a segurança do usuário e do veículo elétrico durante o processo de carregamento.

Conforme a norma, o equipamento deve responder às seguintes condições:

- Curto-circuito entre o pino-piloto e o condutor de proteção (PE): o sistema de alimentação deve interromper a carga em até 3 s;

Figura 78 – Resultado do teste de transição entre os estados A, B e C.



Fonte: Autor, 2025

- Abertura ou descontinuidade do pino-piloto: o desligamento deve ocorrer em, no máximo, 100 ms.

Ambos os ensaios, que podem ser observados nas Figuras 79 e 80 foram realizados seguindo a mesma metodologia: o sistema iniciou o processo de recarga normalmente, atingindo o estado de carregamento estável, e a falha foi inserida durante a condução do teste, permitindo avaliar a resposta dinâmica da estação.

4.2.3.2.1 Curto-circuito no pino CP.

Ao curto-circuitar o condutor CP com o terminal de proteção, observou-se que o sistema interrompeu a alimentação em um tempo inferior a 3 s, observado na Figura 81, atendendo ao limite normativo. Assim, este ensaio foi classificado como aprovado.

4.2.3.2.2 Interrupção do pino CP.

No ensaio de abertura do condutor CP, o tempo registrado para a desativação da carga foi de aproximadamente 600 ms, valor significativamente superior ao limite de 100 ms previsto na IEC 61851-1. Esse desempenho, observado na Figura 82, resultou em não conformidade para esta condição de falha.

Figura 79 – Test Case do curto-circuito entre o PP e o PE.

1	Step Inicialização - Alteração Manual do Pino CP
	<input checked="" type="checkbox"/> io.ManualControl = 8;
2	Step Inicialização - VE Desconectado (Estado A)
	<input checked="" type="checkbox"/> io.SetCPState("A");
	<input checked="" type="checkbox"/> io.IsCPState("A2");
	<input checked="" type="checkbox"/> (meas.EVSE_CP_U < 11);
3	Step Inicialização - VE Desconectado (Estado A) - Verificação Corrente/Tensão para carga
	<input checked="" type="checkbox"/> ((meas.I_1_RMS < 0.1) AND (meas.I_2_RMS < 0.1) AND (meas.I_3_RMS < 0.1))
	<input checked="" type="checkbox"/> ((meas.U_1_RMS > 50) OR (meas.U_2_RMS > 50) OR (meas.U_3_RMS > 50))
4	Step Inicialização - VE Conectado (Estado B)
	<input checked="" type="checkbox"/> io.SetCPState("B");
	<input checked="" type="checkbox"/> io.IsCPState("B1") OR io.IsCPState("B2");
	<input checked="" type="checkbox"/> ((meas.EVSE_CP_U < 8) OR (time.IsElapsed(5)))
5	Step Inicialização - VE Conectado (Estado B) - Verificação Corrente/Tensão para carga
	<input checked="" type="checkbox"/> ((meas.I_1_RMS < 0.1) AND (meas.I_2_RMS < 0.1) AND (meas.I_3_RMS < 0.1))
	<input checked="" type="checkbox"/> ((meas.U_1_RMS > 50) OR (meas.U_2_RMS > 50) OR (meas.U_3_RMS > 50))
6	Step Energização - VE Carregando (Estado C)
	<input checked="" type="checkbox"/> io.SetCPState("C");
	<input checked="" type="checkbox"/> time.CreateReference("Timer_Energiza");
	<input checked="" type="checkbox"/> io.IsCPState("C2");
	<input checked="" type="checkbox"/> ((meas.EVSE_CP_U < 5) OR (time.IsElapsed(5)))
7	Step Verificação de Alimentação - Tensão e Corrente nos Bornes
	<input checked="" type="checkbox"/> ((meas.U_L1_ACTIVE == 1) AND (meas.U_L2_ACTIVE == 1) AND (meas.U_L3_ACTIVE == 1) AND (time.GetElapsed("Timer_Energiza") < 3))
	<input checked="" type="checkbox"/> ((meas.I_L1_ACTIVE == 0) OR (meas.I_L2_ACTIVE == 0) OR (meas.I_L3_ACTIVE == 0) AND (time.GetElapsed("Timer_Energiza") > 3))
8	Step Criação de tempo de carga
	<input checked="" type="checkbox"/> time.CreateReference("Timer_Carga");
9	Loop table Name
	<input checked="" type="checkbox"/> (((meas.U_L1_ACTIVE == 0) OR (meas.U_L2_ACTIVE == 0) OR (meas.U_L3_ACTIVE == 0)) OR (time.GetElapsed("Timer_Carga") > 10))
9.1	Step Aquisição de Dados
	<input checked="" type="checkbox"/> io.Log("Tensão Bornes Energizado", meas.U_1_RMS);
	<input checked="" type="checkbox"/> io.Log("Tensão Bornes Energizado", meas.U_2_RMS);
	<input checked="" type="checkbox"/> io.Log("Tensão Bornes Energizado", meas.U_3_RMS);
	<input checked="" type="checkbox"/> io.Log("Corrente Bornes Energizado", meas.I_1_RMS);
	<input checked="" type="checkbox"/> io.Log("Corrente Bornes Energizado", meas.I_2_RMS);
	<input checked="" type="checkbox"/> io.Log("Corrente Bornes Energizado", meas.I_3_RMS);
	<input checked="" type="checkbox"/> time.IsElapsed(0.5);
10	Step Falha - Curto
	<input checked="" type="checkbox"/> io.SetCPShort(true);
	<input checked="" type="checkbox"/> time.CreateReference("Timer_Short");
11	Step Verificar o comportamento resposta da Estação
	<input checked="" type="checkbox"/> (meas.U_L1_ACTIVE == 0) AND (meas.U_L2_ACTIVE == 0) AND (meas.U_L3_ACTIVE == 0) AND ((meas.I_L1_ACTIVE == 0) AND (meas.I_L2_ACTIVE == 0) AND (meas.I_L3_ACTIVE == 0))
	<input checked="" type="checkbox"/> time.GetElapsed("Timer_Short") > 3;
12	Step Aquisição de Dados
	<input checked="" type="checkbox"/> io.Log("Tempo de desconexão resposta ao curto:", time.GetElapsed("Timer_Short"));
	<input checked="" type="checkbox"/> time.IsElapsed(5);

Fonte: Autor, 2025

4.2.3.3 Quarto teste — Teste de Energização (Estado D)

O teste de energização e desenergização associado ao Estado D tem como objetivo verificar o atendimento aos requisitos obrigatórios de segurança previstos na IEC 61851-1. Esse ensaio é o único que opera especificamente com a condição de “ventilação necessária”, representando situações em que o veículo elétrico requer circulação forçada de ar durante o processo de carregamento. A finalidade é avaliar se a estação de recarga apresenta qualquer alteração de comportamento quando conectada a um VE que demanda ventilação ativa.

No procedimento, observado nas Figuras 83 e 84, a estação foi submetida à interrupção súbita do sinal correspondente ao Estado D, condição na qual o sistema deve cessar o fornecimento de energia à carga em um tempo máximo de 100 ms, a fim de garantir segurança operacional.

Os resultados obtidos mostraram que o tempo de desligamento permaneceu muito próximo ao resultado do teste anterior de 600 ms, valor significativamente acima do limite esta-

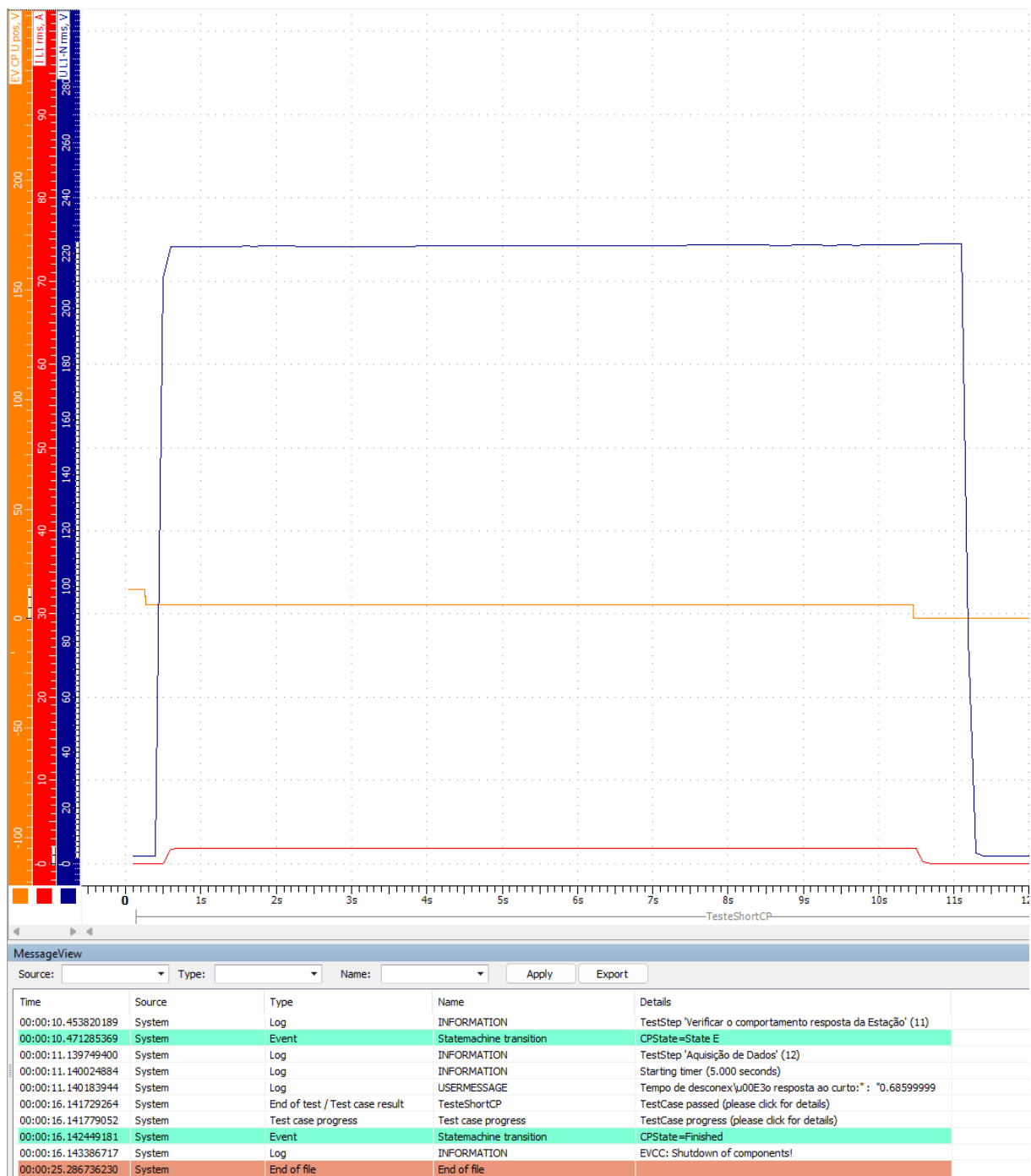
Figura 80 – Test Case da interrupção do PP.

1	Step Inicialização - Alteração Manual do Pino CP
	<input checked="" type="checkbox"/> io.ManualControl = 8;
2	Step Inicialização - VE Desconectado (Estado A)
	<input checked="" type="checkbox"/> io.SetCPState("A");
	<input checked="" type="checkbox"/> io.IsCPState("A2");
	<input checked="" type="checkbox"/> (meas.EVSE_CP_U < 11);
3	Step Inicialização - VE Desconectado (Estado A) - Verificação Corrente/Tensão para carga
	<input checked="" type="checkbox"/> ((meas.I_1_RMS < 0.1) AND (meas.I_2_RMS < 0.1) AND (meas.I_3_RMS < 0.1))
	<input checked="" type="checkbox"/> ((meas.U_1_RMS > 50) OR (meas.U_2_RMS > 50) OR (meas.U_3_RMS > 50))
4	Step Inicialização - VE Conectado (Estado B)
	<input checked="" type="checkbox"/> io.SetCPState("B");
	<input checked="" type="checkbox"/> io.IsCPState("B2") OR io.IsCPState("B2*");
	<input checked="" type="checkbox"/> ((meas.EVSE_CP_U < 8) OR (time.IsElapsed(5)))
5	Step Inicialização - VE Conectado (Estado B) - Verificação Corrente/Tensão para carga
	<input checked="" type="checkbox"/> ((meas.I_1_RMS < 0.1) AND (meas.I_2_RMS < 0.1) AND (meas.I_3_RMS < 0.1))
	<input checked="" type="checkbox"/> ((meas.U_1_RMS > 50) OR (meas.U_2_RMS > 50) OR (meas.U_3_RMS > 50))
6	Step Energização - VE Carregando (Estado C)
	<input checked="" type="checkbox"/> io.SetCPState("C");
	<input checked="" type="checkbox"/> time.CreateReference("Timer_Energiza");
	<input checked="" type="checkbox"/> io.IsCPState("C2");
	<input checked="" type="checkbox"/> ((meas.EVSE_CP_U < 5) OR (time.IsElapsed(5)))
7	Step Verificação de Alimentação - Tensão e Corrente nos Bornes
	<input checked="" type="checkbox"/> ((meas.U_L1_ACTIVE == 1) AND (meas.U_L2_ACTIVE == 1) AND (meas.U_L3_ACTIVE == 1)) AND (time.GetElapsed("Timer_Energiza") < 3)
	<input checked="" type="checkbox"/> (((meas.U_L1_ACTIVE == 0) OR (meas.U_L2_ACTIVE == 0) OR (meas.U_L3_ACTIVE == 0)) AND (time.GetElapsed("Timer_Energiza") > 3))
8	Step Criação de tempo de carga
	<input checked="" type="checkbox"/> time.CreateReference("Timer_Carga");
9	Loop table Name
	<input checked="" type="checkbox"/> ((meas.U_L1_ACTIVE == 0) OR (meas.U_L2_ACTIVE == 0) OR (meas.U_L3_ACTIVE == 0)) OR (time.GetElapsed("Timer_Carga") > 10)
9.1	Step Aquisição de Dados
	<input checked="" type="checkbox"/> io.Log("Tensão Bornes Energizado", meas.U_1_RMS);
	<input checked="" type="checkbox"/> io.Log("Tensão Bornes Energizado", meas.U_2_RMS);
	<input checked="" type="checkbox"/> io.Log("Tensão Bornes Energizado", meas.U_3_RMS);
	<input checked="" type="checkbox"/> io.Log("Corrente Bornes Energizado", meas.I_1_RMS);
	<input checked="" type="checkbox"/> io.Log("Corrente Bornes Energizado", meas.I_2_RMS);
	<input checked="" type="checkbox"/> io.Log("Corrente Bornes Energizado", meas.I_3_RMS);
	<input checked="" type="checkbox"/> time.IsElapsed(0.5);
10	Step Falha - Desconexão
	<input checked="" type="checkbox"/> io.SetCPInterrupt(true);
	<input checked="" type="checkbox"/> time.CreateReference("Timer_CP");
11	Step Verificar o comportamento resposta da Estação
	<input checked="" type="checkbox"/> (meas.U_L1_ACTIVE == 0) AND (meas.U_L2_ACTIVE == 0) AND (meas.U_L3_ACTIVE == 0) AND ((meas.I_L1_ACTIVE == 0) AND (meas.I_L2_ACTIVE == 0) AND (meas.I_L3_ACTIVE == 0))
	<input checked="" type="checkbox"/> (time.GetElapsed("Timer_CP") > 0.100);
12	Step Aquisição de Dados
	<input checked="" type="checkbox"/> io.Log("Tempo de desconexão CP:", time.GetElapsed("Timer_CP"));
	<input checked="" type="checkbox"/> time.IsElapsed(5);

Fonte: Autor, 2025

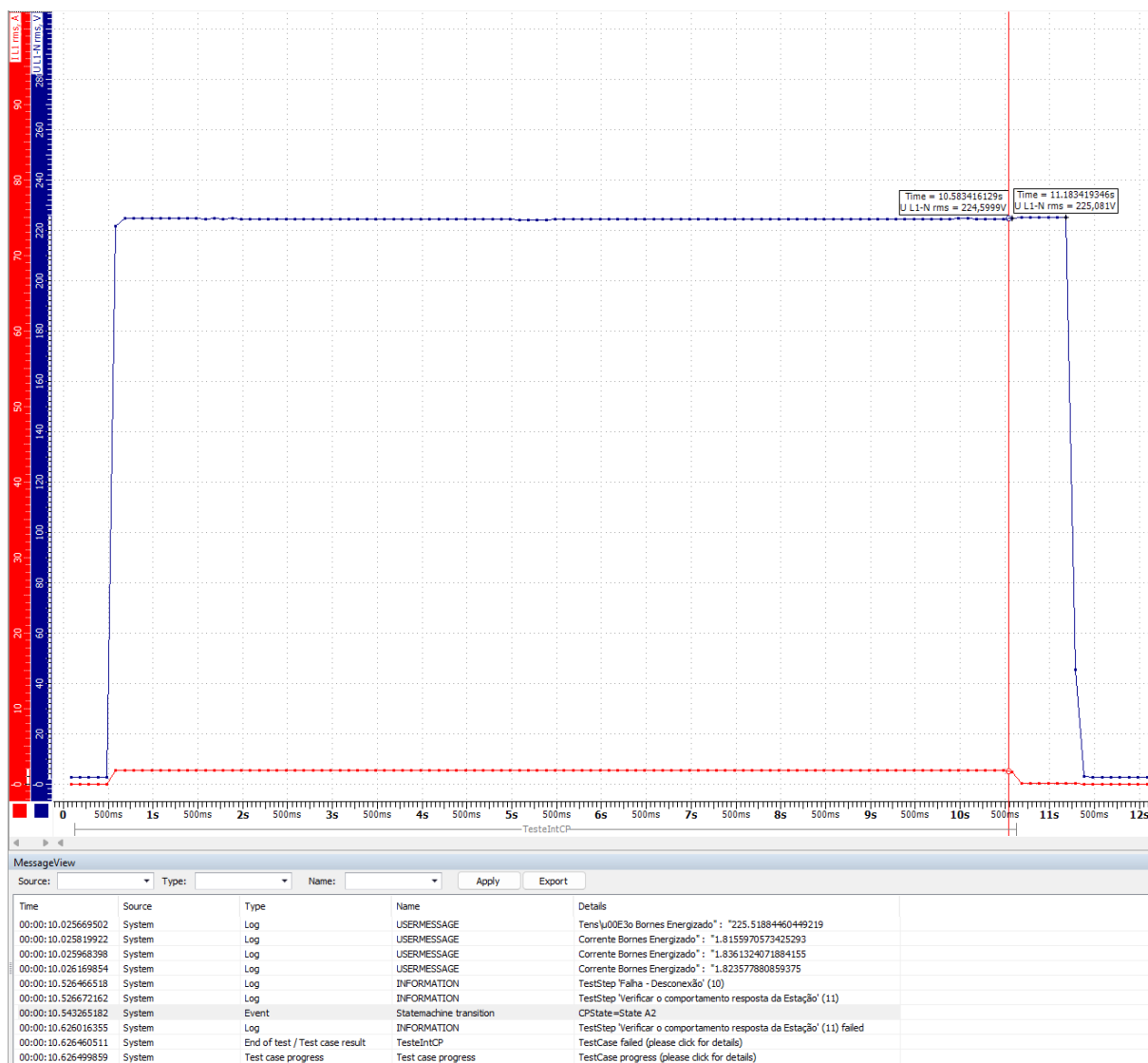
belecido pela norma. Assim, o equipamento foi novamente classificado como reprovado neste ensaio.

Figura 81 – Resultado do *Test Case* do curto-circuito entre o PP e o PE.



Fonte: Autor, 2025

Figura 82 – Resultado do *Test Case* da interrupção do pino CP.



Fonte: Autor, 2025

Figura 83 – Test Case da energização - parte 1.

1	Step Inicialização - Alteração Manual do Pino CP io.ManualControl = 8;
2	Step Inicialização - VE Desconectado (Estado A) io.SetCPState("A"); io.IsCPState("A2"); (meas.EVSE_CP_U < 11);
3	Step Inicialização - VE Desconectado (Estado A) - Verificação Corrente/Tensão para carga (meas.I_1_RMS < 0.1) AND (meas.I_2_RMS < 0.1) AND (meas.I_3_RMS < 0.1) (meas.U_1_RMS > 50) OR (meas.U_2_RMS > 50) OR (meas.U_3_RMS > 50)
4	Step Inicialização - VE Conectado (Estado B) io.SetCPState("B"); io.IsCPState("B1") OR io.IsCPState("B2"); (meas.EVSE_CP_U < 8) OR (time.IsElapsed(5));
5	Step Inicialização - VE Conectado (Estado B) - Verificação Corrente/Tensão para carga (meas.I_1_RMS < 0.1) AND (meas.I_2_RMS < 0.1) AND (meas.I_3_RMS < 0.1) (meas.U_1_RMS > 50) OR (meas.U_2_RMS > 50) OR (meas.U_3_RMS > 50)
6	Step Energização - VE Carregando (Estado D) io.SetCPState("D"); time.CreateReference("Timer_Energiza"); io.IsCPState("D2"); (meas.EVSE_CP_U < 2) OR (time.IsElapsed(3));
7	Step Verificação de Alimentação - Tensão e Corrente nos Bornes ((meas.U_L1_ACTIVE == 1) AND (meas.U_L2_ACTIVE == 1) AND (meas.U_L3_ACTIVE == 1) AND (time.GetElapsed("Timer_Energiza") < 3)) ((meas.I_L1_ACTIVE == 0) OR (meas.I_L2_ACTIVE == 0) OR (meas.I_L3_ACTIVE == 0) AND (time.GetElapsed("Timer_Energiza") > 3))
8	Step Criação de tempo de carga time.CreateReference("Timer_Carga");

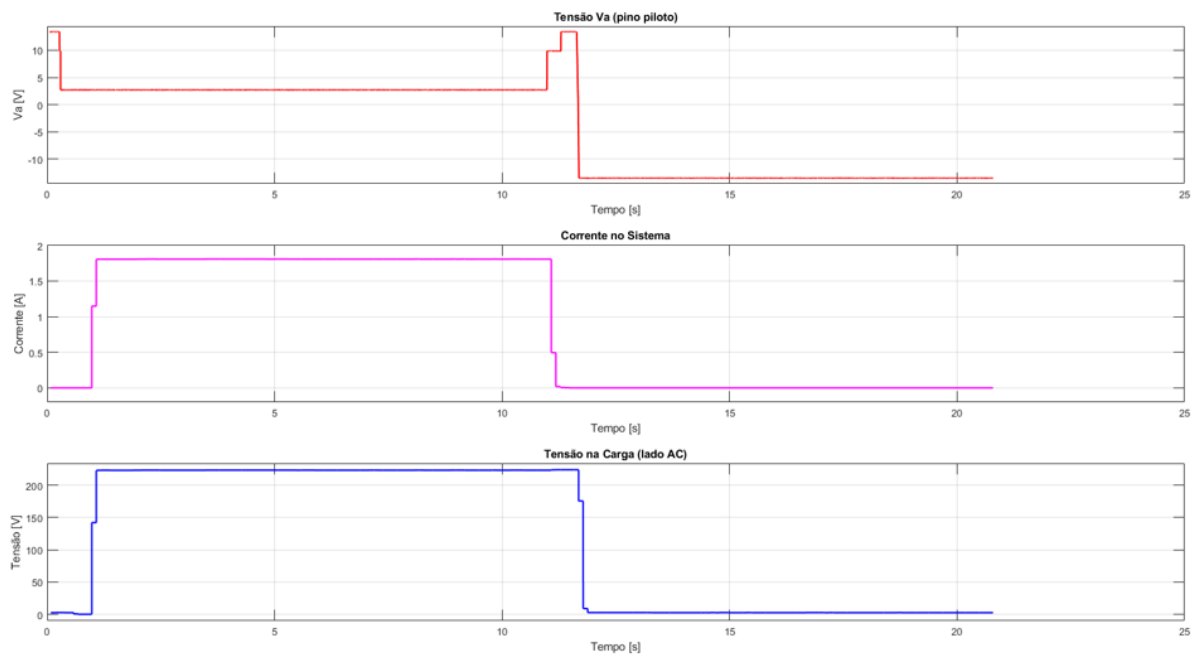
Fonte: Autor, 2025

Figura 84 – Test Case da energização - parte 2.

9	Loop table Name (((meas.U_L1_ACTIVE == 0) OR (meas.U_L2_ACTIVE == 0) OR (meas.U_L3_ACTIVE == 0) OR (time.GetElapsed("Timer_Carga") > 10))
9.1	Step Aquisição de Dados io.Log("Tensão Bornes Energizado", meas.U_1_RMS); io.Log("Tensão Bornes Energizado", meas.U_2_RMS); io.Log("Tensão Bornes Energizado", meas.U_3_RMS); io.Log("Corrente Bornes Energizado", meas.I_1_RMS); io.Log("Corrente Bornes Energizado", meas.I_2_RMS); io.Log("Corrente Bornes Energizado", meas.I_3_RMS); time.IsElapsed(0.5);
10	Step Finalização - VE Retorna ao estado de Conexão (Estado B) io.SetCPState("B"); time.CreateReference("Timer_Comando_Desenergiza"); (io.IsCPState("B2") AND ((meas.I_1_RMS < 0.1) AND (meas.I_2_RMS < 0.1) AND (meas.I_3_RMS < 0.1))); (meas.EVSE_CP_U < 8) OR (time.IsElapsed(5));
11	Step VE Conectado (Estado B) - Verificação Corrente/Tensão na carga time.CreateReference("Timer_Desenergiza"); io.Log("Tensão Bornes Desenergizado", meas.U_1_RMS); io.Log("Tensão Bornes Desenergizado", meas.U_2_RMS); io.Log("Tensão Bornes Desenergizado", meas.U_3_RMS); io.Log("Corrente Bornes Desenergizado", meas.I_1_RMS); io.Log("Corrente Bornes Desenergizado", meas.I_2_RMS); io.Log("Corrente Bornes Desenergizado", meas.I_3_RMS); io.Log("Tempo Desenergização", time.GetElapsed("Timer_Comando_Desenergiza")); (meas.U_1 < 50) AND (meas.U_2 < 50) AND (meas.U_3 < 50) AND (time.GetElapsed("Timer_Desenergiza") < 0.100) (meas.U_1 > 50) OR (meas.U_2 > 50) OR (meas.U_3 > 50) AND (time.GetElapsed("Timer_Desenergiza") > 0.100)
12	Step Finalização - VE Desconectado (Estado A) io.SetCPState("A"); io.IsCPState("A2"); (meas.EVSE_CP_U < 11);

Fonte: Autor, 2025

Figura 85 – Resultado do teste de transição entre os estados A, B e C.



Fonte: Autor, 2025

5 CONCLUSÃO

A mobilidade elétrica representa uma tendência irreversível no cenário global, e, conseqüentemente, seu estudo vem se tornando cada vez mais recorrente no meio acadêmico. Os veículos elétricos, impulsionados por avanços tecnológicos e preocupações ambientais, vêm conquistando gradualmente seu espaço como uma alternativa segura, eficiente e sustentável ao transporte convencional. Nesse contexto, o aprofundamento em pesquisas relacionadas a esta temática torna-se essencial tanto para a disseminação do conhecimento quanto para o desenvolvimento de soluções práticas.

O presente trabalho teve como objetivo principal o desenvolvimento de uma estação de recarga para veículos elétricos no modo 3, conforme diretrizes da norma ABNT NBR IEC 61851-1. Com isso, buscou-se abordar desde os fundamentos da função piloto até a implementação prática de um sistema de controle baseado em microcontrolador, integrando medições de grandezas elétricas, a atuação de relés e indicadores visuais de estado. A construção do protótipo viabilizou não apenas a validação das diretrizes normativas, mas também proporcionou uma base sólida para futuras aplicações e estudos acadêmicos.

Dentre os resultados obtidos, destaca-se que todas as etapas do circuito funcionaram conforme o esperado, respeitando os parâmetros estabelecidos pela norma. A única exceção foi o oscilador controlado por tensão (OCT), que não apresentou a linearidade desejada; no entanto, essa limitação foi contornada com o uso de regressão logística via software, sem comprometer a operação do sistema, além de não se tratar do foco principal do projeto.

Durante a execução do projeto, identificaram-se também oportunidades de melhoria, como a necessidade de otimização do *layout* da placa de circuito impresso. Algumas trilhas foram dispostas com espaçamento reduzido, o que dificultou o processo de soldagem e ocasionou problemas de funcionamento, inclusive danos à placa. Portanto, destaca-se a importância do aprimoramento no posicionamento dos componentes e no dimensionamento das trilhas para trabalhos futuros.

Como continuidade deste trabalho, sugere-se a confecção de um invólucro mecânico para abrigar o sistema de forma segura e organizada, e a implementação de recursos voltados à experiência do usuário. A integração do microcontrolador com um aplicativo móvel, por exemplo, permitiria não apenas o monitoramento remoto dos parâmetros de recarga, mas também a configuração de funções adicionais, como o agendamento do início do carregamento em horários fora do pico de consumo, favorecendo a eficiência energética e a economia do usuário, analisar uma melhor fonte de alimentação para a placa de controle e para o ESP32.

Além dessas melhorias, recomenda-se que os próximos desenvolvimentos ampliem o escopo de validação do protótipo, incluindo a implementação e verificação do circuito de detecção de aterramento, bem como a medição individual das três tensões e das três correntes do sistema trifásico. Também se destaca a necessidade de realizar uma análise completa para buscar a aprovação da estação em todos os testes pertinentes conforme a norma ABNT NBR

IEC 61851-1. Por fim, sugere-se a realização de testes finais com um VE real, assegurando a interoperabilidade da estação e confirmando seu desempenho em condições práticas de operação.

REFERÊNCIAS

- ABNT. **Sistema de recarga condutiva para veículos elétricos**. [S.l.], 2021. Citado 5 vezes nas páginas 14, 17, 33, 34 e 65.
- ABREU, Eulógio Chagas de. **Inversor trifásico com frequência variável a transistor de potência**. 1981. Accessed: 2025-11-20. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/76789>>. Citado na página 73.
- ANTUNES, José Miguel Da Silva Torres. **Carregadores de Baterias off-Board de Veículos Elétricos**. Dissertação (Mestrado) — Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2023. Disponível em: <<https://repositorium.uminho.pt/server/api/core/bitstreams/b5272d9c-434d-4cde-b7e5-9d9a10e2d447/content>>. Citado na página 19.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 17019:2022 — Instalações elétricas de veículos elétricos: requisitos gerais**. 2022. Accessed: 2025-11-20. Disponível em: <<https://www.abntcatalogo.com.br>>. Citado na página 29.
- Brasil. Ministério da Economia; GIZ. **Eletropostos: Instalação de Equipamentos de Recarga para Grandes Demandas**. [S.l.]: PROCOBRE – Instituto Brasileiro do Cobre, 2023. <https://www.pnme.org.br/wp-content/uploads/2020/04/guia_promobe_eletroposto_simples_v2.pdf>. Acesso em: 2025. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 21.
- CACHÃO, Diogo Filipe Busca. **Impacto Técnico Na Ligação De Carregadores Elétricos Às Redes De Distribuição Em Baixa Tensão**. Dissertação (Mestrado) — Instituto Politécnico de Setúbal, 2023. Citado na página 18.
- CARRILLO, Wilson Jhonatan Olmedo. **Fornecimento De Serviços de Sistema a Partir De Uma Frota De Veículos Elétricos**. Dissertação (Mestrado) — Instituto Politécnico de Leiria, 2022. Citado na página 17.
- Energisa. **Fornecimento de energia para estações de recarga de veículo elétrico**. Brasil: ENERGISA, 2021. 22 p. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 21.
- EQUATORIAL. **CrITÉrios De Conexão Para Estações De Recarga De Veículos Elétricos**. [S.l.], 2022. Citado na página 22.
- EV-Institute. **Plug-In Around the EV World**. 2022. Accessed: 2024-06-22. Disponível em: <http://ev-institute.com/images/charged_mag.pdf>. Citado 3 vezes nas páginas 23, 24 e 25.
- JUNIOR, Alessandro Negherbon. **Desenvolvimento da comunicação do pino piloto de uma estação de recarga modo 3 para veículos elétricos**. Dissertação (Monografia) — Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), 2023. Acesso em: 11 dez. 2025. Disponível em: <<https://repositorio.udesc.br/handle/UDESC/17801>>. Citado na página 39.
- Liston, Raul. **Desenvolvimento de um dispositivo para testes de carregadores para veículos elétricos**. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Santa Catarina. Acesso em: 20 nov. 2025. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/256980>>. Citado na página 14.
- Neocharge. **Tipos De Carregadores Para Veículos Elétricos**. 2021. Accessed: 2024-06-22. Disponível em: <<https://www.neocharge.com.br/tudo-sobre/carregador-carro-eletrico/tipo-carregador-ve>>. Citado 6 vezes nas páginas 21, 23, 24, 25, 26 e 27.

Qingdao Hantek Electronic Co., Ltd. **PC USB Oscilloscope: Hantek 6022BE**. 2020. Accessed: 2025-11-20. Disponível em: <<https://hantek.com/products/detail/153>>. Citado 2 vezes nas páginas 93 e 94.

TagoIO. **MQTT - Concepts and Configurations for IoT Applications**. 2024. Accessed: 2024-06-23. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=WwnSRoAyz54>>. Nenhuma citação no texto.

Tektronix, Inc. **Digital Storage Oscilloscopes: TDS2000C Series Datasheet**. 2019. Accessed: 20 Nov 2025. Disponível em: <file:///mnt/data/Digital_Storage_Oscilloscopes_TDS2000C_Series_Datasheet.pdf>. Citado na página 95.

ANEXO A – CÓDIGO DESENVOLVIDO DO TRABALHO

O código-fonte completo do firmware desenvolvido para o ESP32 está apresentado a seguir. A listagem inclui a lógica de controle do pino piloto, leitura de corrente, comunicação HTTP com a plataforma TagoIO e controle dos estágios de carga.

```

1 #include <Arduino.h>
2 #include <math.h>
3 #include <Wire.h>
4 #include "driver/ledc.h"
5 #include "EmonLib.h"
6 #include <WiFi.h>
7 #include <HTTPClient.h>
8
9 // ===== CONFIG WiFi =====
10 const char* ssid      = "Claro_202_2G";
11 const char* password = "Helen@nodar1";
12
13 unsigned long lastReconnectAttempt = 0;
14 const unsigned long reconnectInterval = 30000; // tenta reconectar a
      cada 30s
15
16 void conectarWiFi() {
17     if (WiFi.status() == WL_CONNECTED) return;
18
19     Serial.println("      Tentando reconectar ao WiFi...");
20     WiFi.disconnect();
21     WiFi.begin(ssid, password);
22
23     unsigned long startAttemptTime = millis();
24     while (WiFi.status() != WL_CONNECTED && millis() - startAttemptTime <
25           10000) {
26         delay(500);
27         Serial.print(".");
28     }
29
30     if (WiFi.status() == WL_CONNECTED)
31         Serial.println("\n      WiFi reconectado com sucesso!");
32     else
33         Serial.println("\n      Falha na reconex o WiFi!");
34 }
35 // ===== CONFIG TagoIO =====
36 const char* tago_host      = "https://api.tago.io/data";
37 const char* device_token = "25ff7408-6570-4b89-8965-2cc7c2a4b833";
38
39 // ===== OBJETO SCT-013 =====

```

```
40 EnergyMonitor SCT013;
41
42 #define pwm_pin 25          // sa da PWM piloto
43 #define ac_med2 33         // entrada CT corrente
44
45 int freq = 1000;
46 int dutyCycle = 0;
47
48 int tensao1 = 311;
49 int voltage;
50 int potencia;
51
52 int led_12 = 19, led_9 = 18, led_6 = 5, led_3 = 17, led_energia = 23;
53 const int Botao_energia = 2;
54
55 int corrente = 40;
56 float DC = 0;
57
58 const int in_tensao = 35;
59 int sensorValue = 0;
60 int maxValue = 0;
61
62 int in_freq = 34;
63 int rele = 15;
64
65 int R5 = 33000;
66 int R7 = 47000;
67 int R8 = 47000;
68 float Vout = 7.5;
69 float C1 = 47 * pow(10, -9);
70
71 float soma = 0;
72 int contador = 0;
73
74 bool estado_led = false;
75
76 const double CT_CAL = 1.64;
77 const double V_CAL = 101.5;
78 const double PHASECAL = 1.70;
79
80 const float VCO_K_GAIN = 0.216f;
81 const float VCO_V_OFFSET = 0.0f;
82
83 const float VCO_FREQ_MIN = 79.65f;
84 const float VCO_FREQ_MAX = 118.81f;
85
86 float medirFrequenciaHz(uint8_t pin, uint8_t n_medias = 6, unsigned long
```

```

    timeout_us = 25000) {
87 pulseIn(pin, HIGH, timeout_us);
88 double somaT = 0.0;
89 uint8_t cont = 0;
90 for (uint8_t i = 0; i < n_medias; i++) {
91     unsigned long tH = pulseIn(pin, HIGH, timeout_us);
92     unsigned long tL = pulseIn(pin, LOW, timeout_us);
93     if (tH > 0 && tL > 0) {
94         somaT += (double)(tH + tL);
95         cont++;
96     }
97 }
98 if (cont == 0) return 0.0f;
99 double Tmed_us = somaT / cont;
100 return 1e6 / Tmed_us;
101 }
102
103 float vcoFreqToVrms(float f_hz) {
104     if (f_hz <= 0.0f) return 0.0f;
105     float v = VCO_V_OFFSET + VCO_K_GAIN * f_hz;
106     return (v < 0.0f) ? 0.0f : v;
107 }
108
109 void setup() {
110
111     Serial.begin(115200);
112     Serial.println("\nIniciando WiFi...");
113
114     WiFi.mode(WIFI_STA);
115     WiFi.begin(ssid, password);
116
117     unsigned long startAttemptTime = millis();
118
119     while (WiFi.status() != WL_CONNECTED && millis() - startAttemptTime <
120           10000) {
121         delay(500);
122         Serial.print(".");
123     }
124
125     if (WiFi.status() == WL_CONNECTED) {
126         Serial.printf("\n Conectado a %s - IP: %s\n", ssid, WiFi.localIP
127           ().toString().c_str());
128     } else {
129         Serial.println("\n Falha ao conectar ao WiFi! Continuando
130           offline...");
131     }
132 }

```

```
130 pinMode(in_freq, INPUT);
131 pinMode(in_tensao, INPUT);
132
133 pinMode(led_12, OUTPUT);
134 pinMode(led_9, OUTPUT);
135 pinMode(led_6, OUTPUT);
136 pinMode(led_3, OUTPUT);
137 pinMode(led_energia, OUTPUT);
138
139 pinMode(rele, OUTPUT);
140 digitalWrite(rele, LOW); // rel inativo (AGORA inativo em LOW;
    ativo em HIGH)
141
142 pinMode(Botao_energia, INPUT_PULLUP);
143
144 analogReadResolution(12);
145 analogSetPinAttenuation(ac_med2, ADC_11db);
146
147 ledcAttach(pwm_pin, freq, 8);
148 ledcWrite(pwm_pin, 128);
149
150 SCT013.current(ac_med2, CT_CAL);
151 }
152
153 void loop() {
154
155     if (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
156         static unsigned long lastReconnect = 0;
157         unsigned long now = millis();
158
159         if (now - lastReconnect > 30000) {
160             lastReconnect = now;
161             Serial.println(" Tentando reconectar ao WiFi...");
162
163             if (WiFi.getMode() != WIFI_STA) {
164                 WiFi.mode(WIFI_STA);
165             }
166
167             if (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
168                 WiFi.disconnect(true);
169                 delay(100);
170                 WiFi.begin(ssid, password);
171             }
172         }
173     }
174
175     if (corrente == 0) {
```

```
176     DC = 5;
177 } else if (corrente < 6) {
178     DC = 9;
179 } else if (corrente >= 6 && corrente < 51) {
180     DC = corrente / 0.6;
181 } else if (corrente >= 51 && corrente < 80) {
182     DC = (corrente / 2.5) + 64;
183 } else if (corrente == 80) {
184     DC = 97;
185 } else {
186     DC = 0;
187 }
188
189 maxValue = 0;
190 soma     = 0;
191 contador = 0;
192
193 for (int i = 0; i < 1000; i++) {
194     sensorValue = analogRead(in_tensao);
195
196     if (sensorValue > 500) {
197         if (sensorValue > maxValue) maxValue = sensorValue;
198         soma += sensorValue;
199         contador++;
200     }
201     delayMicroseconds(2);
202 }
203
204 float voltageMax = (maxValue * 3.3f) / 4095.0f;
205 float voltagereal = 3.85f * voltageMax;
206
207 bool estadoA = false;
208 bool estadoB = false;
209 bool estadoC = false;
210 bool estadoD = false;
211
212 if (2.0f < voltagereal && voltagereal < 4.0f) {
213     estadoD = true;
214     digitalWrite(led_3, HIGH);
215     digitalWrite(led_6, LOW);
216     digitalWrite(led_9, LOW);
217     digitalWrite(led_12, LOW);
218 }
219 else if (5.0f < voltagereal && voltagereal < 7.0f) {
220     estadoC = true;
221     digitalWrite(led_6, HIGH);
222     digitalWrite(led_3, LOW);
```

```

223     digitalWrite(led_9, LOW);
224     digitalWrite(led_12, LOW);
225 }
226 else if (8.0f < voltagereal && voltagereal < 10.0f) {
227     estadoB = true;
228     digitalWrite(led_9, HIGH);
229     digitalWrite(led_3, LOW);
230     digitalWrite(led_6, LOW);
231     digitalWrite(led_12, LOW);
232 }
233 else if (11.0f < voltagereal && voltagereal < 13.0f) {
234     estadoA = true;
235     digitalWrite(led_12, HIGH);
236     digitalWrite(led_3, LOW);
237     digitalWrite(led_6, LOW);
238     digitalWrite(led_9, LOW);
239 }
240 else if (voltagereal <= 1.0f) {
241     digitalWrite(led_12, HIGH);
242     digitalWrite(led_3, HIGH);
243     digitalWrite(led_6, HIGH);
244     digitalWrite(led_9, HIGH);
245 }
246
247 float freq_vco = medirFrequenciaHz(in_freq, 6, 25000);
248 float tensao   = vcoFreqToVrms(freq_vco);
249
250 bool freq_ok = (freq_vco >= VCO_FREQ_MIN && freq_vco <= VCO_FREQ_MAX);
251
252 static bool releLigado = false;
253 static unsigned long tempoUltimaMudanca = 0;
254 const unsigned long tempoMinimoMudanca = 1000;
255
256 bool jumperAccionado = (digitalRead(Botao_energia) == HIGH);
257 bool cp_ok           = (estadoC || estadoD);
258 bool condicao_ok     = (cp_ok && jumperAccionado);
259
260 if (condicao_ok && !releLigado && millis() - tempoUltimaMudanca >
    tempoMinimoMudanca) {
261     releLigado = true;
262     digitalWrite(rele, HIGH);    // AGORA: HIGH liga o rel
263     tempoUltimaMudanca = millis();
264 }
265 else if (!condicao_ok && releLigado && millis() - tempoUltimaMudanca >
    tempoMinimoMudanca) {
266     releLigado = false;
267     digitalWrite(rele, LOW);    // LOW desliga o rel

```

```

268     tempoUltimaMudanca = millis();
269 }
270
271 // LED acompanha o rel ativo em HIGH
272 digitalWrite(led_energia, (digitalRead(rele) == HIGH) ? HIGH : LOW);
273
274 if (jumperAccionado) {
275     dutyCycle = DC;
276 } else {
277     dutyCycle = 100;
278 }
279
280 int pwmValue = map(dutyCycle, 0, 100, 0, 255);
281 ledcWrite(pwm_pin, pwmValue);
282 delay(10);
283
284 if (DC == 0) {
285     estado_led = !estado_led;
286     digitalWrite(led_12, estado_led);
287 }
288
289 Serial.print("Botao energia: ");
290 Serial.println(jumperAccionado ? 1 : 0);
291 Serial.print("CP (Vdc): ");
292 Serial.println(voltagereal, 3);
293 Serial.print("Estado CP: ");
294 if (estadoA) Serial.println("A");
295 else if (estadoB) Serial.println("B");
296 else if (estadoC) Serial.println("C");
297 else if (estadoD) Serial.println("D");
298 else Serial.println("Indefinido");
299
300 double Irms = SCT013.calcIrms(1480);
301 double Vrms = tensao;
302 double S = Vrms * Irms;
303 double PF = (S > 1e-6) ? 1.0 : 0.0;
304 double P = S * PF;
305
306 if (WiFi.status() == WL_CONNECTED) {
307     String payload = "[";
308     payload += "{\"variable\":\"irms\",\"value\":" + String(Irms
309         ,3) + "},";
310     payload += "{\"variable\":\"pot_ativa\",\"value\":" + String(P,1)
311         + "},";
312     payload += "{\"variable\":\"pot_aparente\",\"value\":" + String(S,1)
313         + "},";
314     payload += "{\"variable\":\"fp\",\"value\":" + String(PF,2)

```

```
        + "},";
312  payload += "{\"variable\":\"v_rms_calc\",\"value\":" + String(Vrms
        ,1) + "}";
313  payload += "]";
314
315  HTTPClient http;
316  http.begin(tago_host);
317  http.addHeader("Content-Type", "application/json");
318  http.addHeader("Device-Token", device_token);
319
320  int httpResponseCode = http.POST(payload);
321
322  if (httpResponseCode > 0) {
323    Serial.printf("      Enviado para TagoIO! HTTP %d\n",
        httpResponseCode);
324  } else {
325    Serial.printf("      Erro no envio: %s\n", http.errorToString(
        httpResponseCode).c_str());
326  }
327  http.end();
328 }
329
330 delay(500);
331 }
```

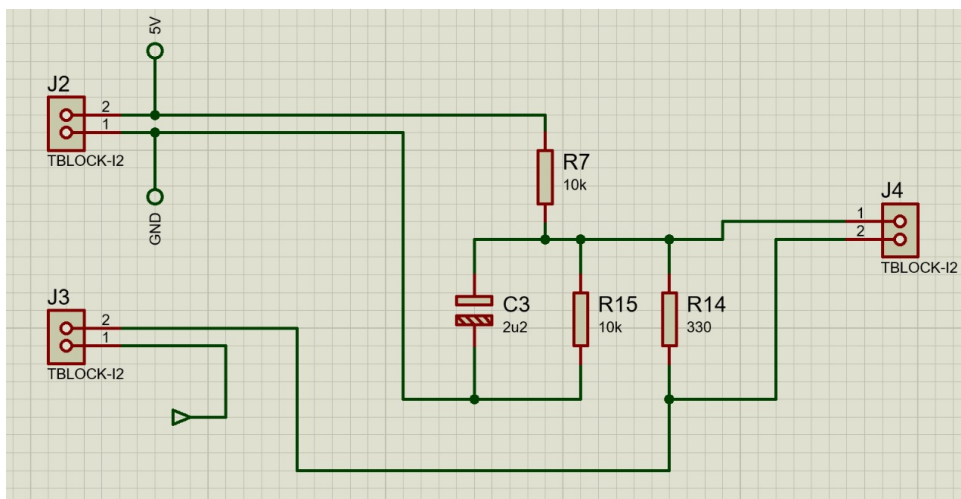
ANEXO B – LISTA DE MATERIAIS UTILIZADOS PARA MONTAGEM DA ESTAÇÃO DE RECARGA

A lista a seguir apresenta os principais componentes adquiridos para a montagem da estação de recarga do projeto.

- Interruptor DR 4 polos, 63 A, 30 mA;
- 10 m de cabo flexível 750 V, seção de 10 mm², cor verde;
- 10 m de cabo flexível 750 V, seção de 10 mm², cor azul;
- 10 m de cabo flexível 750 V, seção de 10 mm², cor preto;
- 10 m de cabo flexível 750 V, seção de 10 mm², cor branco;
- 10 m de cabo flexível 750 V, seção de 10 mm², cor vermelho;
- Disjuntor tripolar de 40 A;
- Contator tripolar de 50 A;
- 4 unidades de DPS (Dispositivo de Proteção contra Surtos), 1 polo, 45 kA;
- Botoeira de segurança (botão de emergência);
- Sinalizador luminoso vermelho;
- Sinalizador luminoso verde;
- Quadro de comando com dimensões de 500 mm × 400 mm × 250 mm.

ANEXO C – CONFEÇÃO DA PLACA DO SENSOR DE CORRENTE

Figura 86 – Proteus do sensor de corrente.



Fonte: Autor, 2025

A lista a seguir apresenta os principais componentes adquiridos para a montagem da placa do sensor de corrente.

- 3 × Conectores de dois pinos;
- 1 × Sensor de corrente SCT-013 (100 A);
- 2 × Resistores de 10 k Ω ;
- 1 × Resistor de 330 Ω ;
- 1 × Capacitor eletrolítico de 100 μ F;
- Jumpers diversos.