UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT
PROGRAMA DE GRADUAÇÃO – ENGENHARIA ELÉTRICA

ALESSANDRO NEGHERBON JUNIOR

DESENVOLVIMENTO DA COMUNICAÇÃO DO PINO PILOTO DE UMA ESTAÇÃO DE RECARGA MODO 3 PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS

JOINVILLE
2023

ALESSANDRO NEGHERBON JUNIOR

DESENVOLVIMENTO DA COMUNICAÇÃO DO PINO PILOTO DE UMA ESTAÇÃO DE RECARGA MODO 3 PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS

Dissertação apresentada ao Programa de Graduação em Bacharelado de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Tecnológicas da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Alessandro Luiz Batschauer

JOINVILLE
2023

Negherbon Junior, Alessandro
Desenvolvimento da comunicação do pino piloto de uma estação de recarga modo 3 para veículos elétricos / Alessandro Negherbon Junior. - Joinville, 2023.
104 p. : il. ; 30 cm.

Orientador: Alessandro Luiz Batschauer.
.
Dissertação (Graduação) - Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas, Programa de Graduação em Engenharia Elétrica, Joinville, 2023.

1. Estação de recarga. 2. Veículo elétrico. 3. Comunicação. 4. Pino piloto. I. Luiz Batschauer, Alessandro . II. , . III. Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas, Programa de Graduação em Engenharia Elétrica. IV. Desenvolvimento da comunicação do pino piloto de uma estação de recarga modo 3 para veículos elétricos.

ALESSANDRO NEGHERBON JUNIOR

DESENVOLVIMENTO DA COMUNICAÇÃO DO PINO PILOTO DE UMA ESTAÇÃO DE RECARGA MODO 3 PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS

Dissertação apresentada ao Programa de Graduação em Bacharelado de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Tecnológicas da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Alessandro Luiz Batschauer

BANCA EXAMINADORA:

Alessandro Luiz Batschauer, Dr. Eng.
UDESC

Membros:

Alessandro Luiz Batschauer, Dr. Eng.
UDESC

Felipe Joel Zimann, Dr. Eng.
UDESC

Marcello Mezaroba, Dr. Eng.
UDESC

Joinville, 12 de julho de 2023

RESUMO

A crescente demanda por veículos elétricos tem impulsionado a necessidade de infraestrutura de recarga eficiente e confiável. A fim de atender a essa demanda, a Norma ABNT NBR IEC 61851-1 estabelece os requisitos para a implementação de estações de recarga de veículos elétricos. Essa norma define os parâmetros de segurança, comunicação e desempenho para garantir um processo de recarga seguro e padronizado. O presente trabalho tem como objetivo desenvolver a comunicação entre estação de recarga e veículo elétrico. O desenvolvimento do projeto envolve diferentes etapas, começando pela pesquisa e compreensão dos requisitos da Norma 61851-1. Em seguida, são projetados os componentes do sistema de recarga, levando em consideração os aspectos de segurança, comunicação e eficiência energética. A etapa seguinte consiste na realização de testes para verificar a conformidade do protótipo com a norma, garantindo seu desempenho adequado e segurança durante a operação. Ao final deste trabalho, espera-se ter como resultado um protótipo da comunicação da estação de recarga modo 3 em conformidade com a Norma 61851-1, capaz de realizar a recarga eficiente de veículos elétricos. A contribuição deste projeto reside na promoção da mobilidade sustentável, oferecendo aos usuários de veículos elétricos uma solução confiável e segura para recarregar suas baterias.

Palavras-chave: Veículos elétricos. Estação de recarga. Norma ABNT NBR 61851-1. Comunicação

ABSTRACT

The increasing demand for electric vehicles has driven the need for efficient and reliable charging infrastructure. In order to meet this demand, the ABNT NBR IEC 61851-1 standard establishes the requirements for the implementation of electric vehicle charging stations. This standard defines safety, communication, and performance parameters to ensure a safe and standardized charging process. The present work aims to develop the communication between the charging station and the electric vehicle. The project development involves different stages, starting with research and understanding of the requirements of the 61851-1 standard. Next, the components of the charging system are designed, taking into consideration aspects of safety, communication, and energy efficiency. The next step involves conducting tests to verify the compliance of the prototype with the standard, ensuring its proper performance and safety during operation. At the end of this work, the expected outcome is a prototype of the communication system for mode 3 charging station in compliance with the 61851-1 standard, capable of efficiently charging electric vehicles. The contribution of this project lies in promoting sustainable mobility by offering electric vehicle users a reliable and safe solution for charging their batteries.

Keywords: Electric vehicles. Charging stations. ABNT NBR IEC 61851-1. Communication

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Evolução da Frota de VE no Brasil 15
Figura 2 – Evolução da Frota de VE no Mundo 15
Figura 3 – Tipos de VE 17
Figura 4 – Tecnologias para armazenar energia elétrica 19
Figura 5 – Carregamento em corrente alternada e corrente contínua 21
Figura 6 – SAE CA e CC 26
Figura 7 – IEC CA e CC 26
Figura 8 – GB/T e Tesla 27
Figura 9 – CHAdeMO 27
Figura 10 – Exemplo de wallbox conectado ao VE 29
Figura 11 – Pinagem Tipo 1 (SAE J1772) 30
Figura 12 – Pinagem Tipo 2 (IEC 62196-2) 31
Figura 13 – Protocolo SAE J1772 31
Figura 14 – Circuito típico segundo (ABNT, 2021) 32
Figura 15 – Ciclo de trabalho x Corrente máxima 34
Figura 16 – Estados possíveis da tensão Va no pino piloto - Gráfico 37
Figura 17 – Circuito geral do sistema do pino piloto simulado 38
Figura 18 – Geração do PWM simulado 40
Figura 19 – Circuito gerador do PWM simulado 41
Figura 20 – Gerador PWM obtido - Parte 1 42
Figura 21 – Gerador PWM obtido - Parte 2 42
Figura 22 – Circuito do pino piloto 43
Figura 23 – Retificador de precisão de meia onda simulado 44
Figura 24 – Simulação da estação não conectada 45
Figura 25 – Dados práticos de estação não conectada - Parte 1 46
Figura 26 – Dados práticos de estação não conectada - Parte 2 47
Figura 27 – Estação não conectada - tempo de subida 48
Figura 28 – Estação não conectada - tempo de descida 48
Figura 29 – Estação não conectada - visualização dos dados parte 1 49
Figura 30 – Estação não conectada - visualização dos dados parte 2 49
Figura 31 – Simulação da estação conectada e VE indisponível 50
Figura 32 – Dados práticos da estação conectada e VE indisponível - Parte 1 50
Figura 33 – Dados práticos da estação conectada e VE indisponível - Parte 2 51
Figura 34 – Estação conectada e VE indisponível - tempo de subida 52
Figura 35 – Estação conectada e VE indisponível - tempo de descida 53
Figura 36 – Estação conectada e VE indisponível - visualização dos dados parte 1 53
Figura 37 – Estação conectada e VE indisponível - visualização dos dados parte 2 54

Figura 38 – Simulação da estação conectada e VE disponível 54
Figura 39 – Dados práticos da estação conectada e VE disponível - Parte 1 55
Figura 40 – Dados práticos da estação conectada e VE disponível - Parte 2 56
Figura 41 – Estação conectada e VE disponível - tempo de subida 57
Figura 42 – Estação conectada e VE disponível - tempo de descida 57
Figura 43 – Estação conectada e VE disponível - visualização dos dados parte 1 58
Figura 44 – Estação conectada e VE disponível - visualização dos dados parte 2 58
Figura 45 – Simulação da estação conectada, VE disponível e necessitando ventilação . 59
Figura 46 – Dados práticos de Estação conectada, VE disponível e necessitando ventilação - Parte 1 59
Figura 47 – Dados práticos da estação conectada, VE disponível e necessitando ventilação - Parte 2 60
Figura 48 – Estação conectada, VE disponível e necessitando ventilação - tempo de subida 61
Figura 49 – Estação conectada, VE disponível e necessitando ventilação - tempo de descida 61
Figura 50 – Estação conectada, VE disponível e necessitando ventilação - visualização dos dados parte 1 62
Figura 51 – Estação conectada, VE disponível e necessitando ventilação - visualização dos dados parte 2 62
Figura 52 – Estação não disponível - visualização 63
Figura 53 – Estação não disponível - forma de onda 64
Figura 54 – Tensão Va em caso de erro na estação 64
Figura 55 – Tensão Va em caso de curto na estação 65
Figura 56 – Circuito geral da rede simulado 66
Figura 57 – Divisor de tensão para leitura da rede 68
Figura 58 – Diagrama de blocos retificador 69
Figura 59 – Retificador de precisão de onda completa - Parte 1 69
Figura 60 – Retificador de precisão de onda completa - Parte 2 69
Figura 61 – Filtro simulado 71
Figura 62 – Gráficos da simulação do retificador da rede 71
Figura 63 – Resultados retificador - Parte 2 72
Figura 64 – Resultados retificador - Parte 1 73
Figura 65 – Oscilador controlado por tensão 73
Figura 66 – Oscilador controlado por tensão simulado 73
Figura 67 – OCT estágio 1 - Amplificador com ganho +1 ou -1 75
Figura 68 – OCT estágio 2 - Amplificador integrador 75
Figura 69 – OCT estágio 3 - Comparador por histerese 75
Figura 70 – Resultado simulado VCO - estágio 3 76
Figura 71 – Resultado prático VCO - estágio 3 77
Figura 72 – VCO em blocos 77

Figura 73 – Dados resultantes do OCT 78
Figura 74 – Calibração realizada em 110 V 79
Figura 75 – Fórmula para correção do OCT 80
Figura 76 – Circuito do optoacoplador simulado 82
Figura 77 – Resultados do optoacoplador experimental 82
Figura 78 – Acionamento do contator simulado 83
Figura 79 – Cálculo do ciclo de trabalho de acordo com a corrente máxima 84
Figura 80 – Geração do sinal PWM pelo microcontrolador 85
Figura 81 – Medição da tensão Va por ADC 86
Figura 82 – Placa de circuito impresso 3D 88
Figura 83 – Placa de circuito impresso 3D 88
Figura 84 – Layout do circuito 89
Figura 85 – Placa elaborada 90
Figura 86 – Slew rate - falsificado 91
Figura 87 – Acionamento de Leds e Relê 101
Figura 88 – Circuito Pino Piloto e Medição de Va 102
Figura 89 – Circuito de Retificação da Rede 103
Figura 90 – Circuito do OCT 104

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparativo de baterias 20
Tabela 2 – Valores nominais máximos modo 1 23
Tabela 3 – Valores nominais máximos modo 2 23
Tabela 4 – Comparação entre os carregadores 28
Tabela 5 – Valores máximos e mínimos dos componentes 32
Tabela 6 – Valor máximo de corrente por ciclo de trabalho 33
Tabela 7 – Estados possíveis da tensão Va no pino piloto 37
Tabela 8 – Tempo de subida e descida de 10% a 90% 37
Tabela 9 – Valores de tensão Va e ADC do ESP 32 44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Udesc	Universidade do Estado de Santa Catarina
VE	Veículo Elétrico
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
SAE	Sistema de armazenamento de energia
OCT	Oscilador controlado por tensão

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 14
1.1 MOTIVAÇÃO 14
1.2 PROPOSTA 15
1.2.1 Objetivo geral 15
1.2.2 Objetivos específicos 16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 17
2.1 CLASSIFICAÇÃO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS 17
2.1.1 Veículo Elétrico Híbrido (HEV) 17
2.1.2 Veículo Elétrico Híbrido Plug In (PHEV) 18
2.1.3 Veículo Elétrico à Bateria (BEV) 18
2.1.4 Veículo Elétrico à Célula de Combustível (FCEV) 18
2.2 REVISÃO SOBRE FORMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA . . 18
2.2.1 Necessidade de desenvolvimento das baterias 19
2.2.2 Sistemas de armazenamento de energia 19
2.2.3 Análise sobre sistemas químicos de baterias 19
2.2.4 Bateria de íons de lítio 20
2.3 SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE BATERIA - BMS 20
2.4 FORMAS DE RECARGA DA BATERIA DO VE 21
2.5 MODOS DE RECARGA DE ACORDO COM A NORMA 22
2.5.1 Norma SAE J1772 22
2.5.2 Norma ABNT NBR IEC 61851-1 22
2.5.2.1 Modo 1 23
2.5.2.2 Modo 2 23
2.5.2.3 Modo 3 23
2.5.2.4 Modo 4 24
2.6 PADRÕES DE CONECTORES 24
2.6.1 Tipo 1 (SAE J1772) 24
2.6.2 Tipo 2 (IEC 62196) 24
2.6.3 CCS 25
2.6.3.1 CCS Tipo 1 25
2.6.3.2 CCS Tipo 2 25
2.6.4 GB/T 20234 25
2.6.5 Tesla 25
2.6.6 CHAdeMO 26
2.6.7 Comparativo entre os padrões 26

2.7 TIPOS DE CARREGADORES 28
2.7.1 Carregador portátil 28
2.7.2 Wallbox 28
2.7.3 Carregador comercial ou parking 28
2.7.4 Estação de recarga rápida CC 28
2.8 WALLBOX 29
2.8.1 Wallbox Tipo 1 30
2.8.2 Wallbox Tipo 2 30
2.9 PINO PILOTO 31
2.9.1 Protocolo geral 31
2.9.2 Circuito típico 32
2.9.3 Componentes 32
2.9.4 Funcionamento da função piloto 33
2.9.4.1 Funções da estação de recarga 33
2.9.4.2 Atribuições do VE durante o processo de recarga 34
2.9.4.3 Estados resultantes 36
3 DESENVOLVIMENTO 38
3.1 CIRCUITO PILOTO 38
3.1.1 PWM 38
3.1.1.1 Resultados PWM 40
3.1.2 Componentes Essenciais 41
3.1.3 Medição da Va 43
3.1.4 Resultados pino piloto 44
3.1.4.1 Estação não conectada 45
3.1.4.2 Estação conectada e VE indisponível 47
3.1.4.3 Estação conectada e VE disponível 53
3.1.4.4 Estação conectada, VE disponível e necessitando ventilação 58
3.1.4.5 Estação não disponível 62
3.1.4.6 Situações de erro 63
3.2 LEITURA DA REDE 65
3.2.1 Divisor de tensão 65
3.2.2 Retificador de precisão 68
3.2.3 Filtro 70
3.2.4 Resultados retificador 70
3.2.5 Oscilador controlado por tensão 72
3.2.5.1 OCT estágio 2 74
3.2.5.2 OCT estágio 3 76

3.2.5.3 *Resultados OCT* **77**
3.2.6 **Optoacoplador** **80**
3.2.7 **Contator** **83**
3.3 SOFTWARE **83**
3.3.1 **Ciclo de trabalho** **83**
3.3.2 **Geração PWM** **84**
3.3.3 **Leitura de *Va*** **84**
3.3.4 **Leitura da frequência** **86**
3.3.5 **Acionamento relê** **86**
3.3.6 **Visualização dos estados** **87**
3.4 PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO **87**
3.4.1 **Topologias** **87**
3.4.2 **Resultado** **89**
4 **CONCLUSÃO** **92**
REFERÊNCIAS **93**
ANEXO A – CÓDIGO DESENVOLVIDO DO TRABALHO **95**
ANEXO B – ESQUEMÁTICO DO PROTEUS **101**

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

No início do século XX, os veículos elétricos dominavam o mercado norte-americano, devido aos menores níveis de ruídos, ausência de vibrações e inexistência de marchas quando comparados aos veículos à combustão. Ademais, em uma época caracterizada por uma malha viária precária, com as melhores vias concentradas nos perímetros urbanos, a autonomia era um atributo menos valorizado. Porém, a crescente disponibilidade à baixo custo de derivados de petróleo e a legislação ambiental branda, associadas a um estágio mais primitivo das baterias e desenvolvimento acelerado das vias de rodagem, foram fundamentais para o fracasso da eletrificação veicular (CASTRO; FERREIRA, 2010).

Depois de inicialmente serem superados por motores à combustão, os veículos elétricos reapareceram e cresceram no cenário automotivo mundial. Nesse sentido, motivados por fatores como a superação das antigas limitações tecnológicas, as preocupações ambientais, a melhoria da qualidade e segurança energética dos países, vários governos têm apoiado a solução, por meio de incentivos fiscais e recomendações, levando praticamente todas as montadoras de automóveis a investir em projetos de veículos movidos à eletricidade (CASTRO; FERREIRA, 2010).

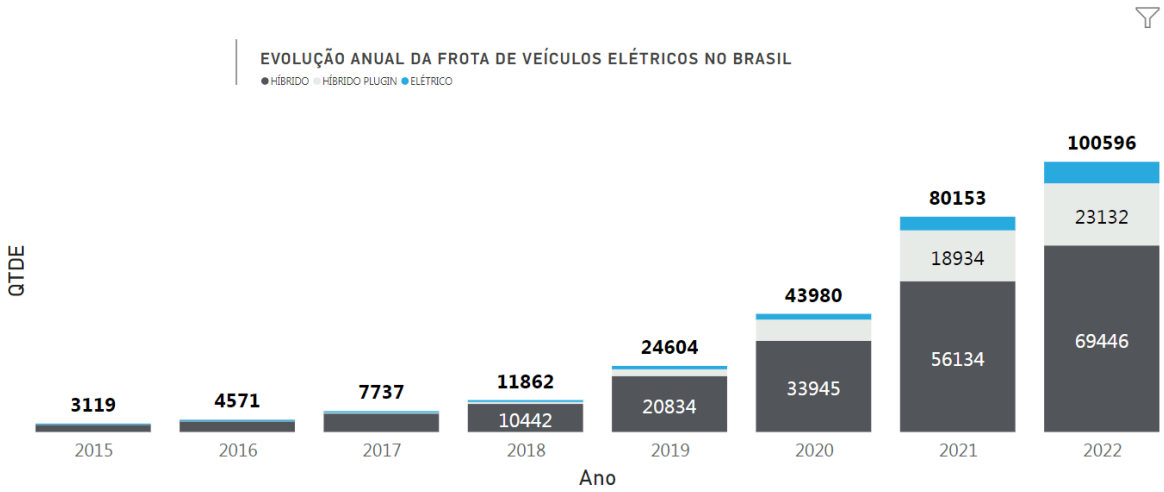
Desse modo, há basicamente cinco tipos de ações governamentais de incentivo à propagação do veículo elétrico, tais como o bônus aos compradores de veículos elétricos, descontos em tributos, adoção de restrições à utilização de veículos convencionais, auxílio à pesquisa e implantação de infraestrutura da infraestrutura (GÓMEZ; ARRUDA, 2015).

Outro programa de incentivo que pode ser destacado é o rota 2030, criado pelo Governo Federal para organizar toda a cadeia automotiva do país, visando buscar conexões entre vários setores automotivos assim como investir em pesquisa e desenvolvimento nesse setor. Uma parcela desse programa é dedicado a transição energética, que engloba temas como biocombustíveis, segurança veicular e propulsão alternativa a combustão, prevendo incentivos às empresas que realizarem investimentos em pesquisa e desenvolvimento nesse setor (CABRINI, 2022).

Nesse sentido, seguindo o panorama nacional, se nota que na Figura 1, a propagação da tecnologia dos VEs é notável, pois analisando quantitativamente, está ocorrendo uma popularização de forma exponencial crescente.

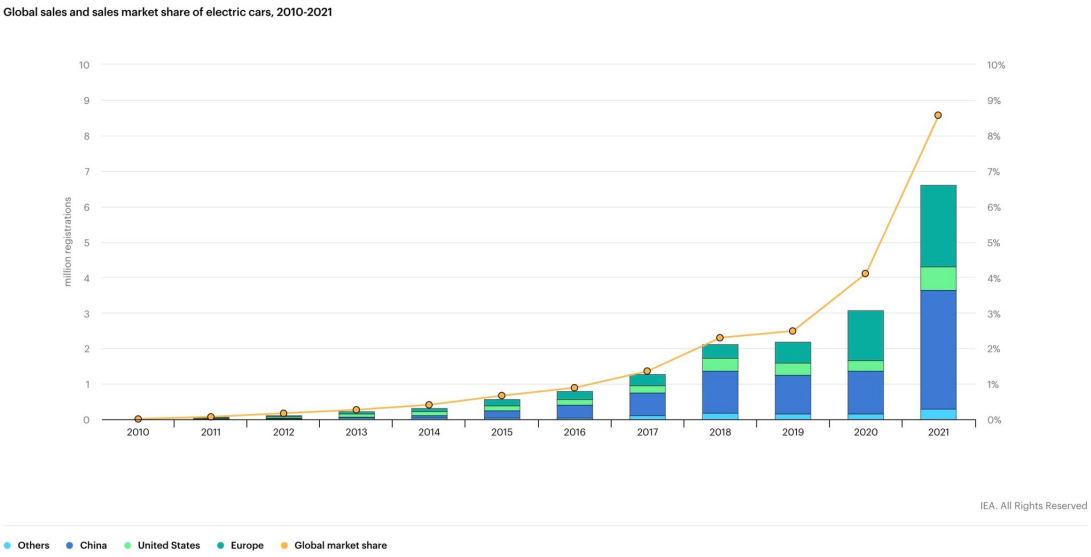
Em âmbito mundial, nota-se na Figura 2 que o crescimento está ainda mais acelerado, muito pelo desenvolvimento da China e da Europa nesse setor, com a China tendo mais vendas de VE em 2021 do que todos os outros países somados, resultado do incentivo fiscal e da variedade de modelos no país (BIANCHIN, 2022).

Figura 1 – Evolução da Frota de VE no Brasil



Fonte: Adaptado de (NEOCHARGE, 2021)

Figura 2 – Evolução da Frota de VE no Mundo



Fonte: (BIANCHIN, 2022)

1.2 PROPOSTA

Com o gradual aumento de veículos elétricos nos meios de transporte, é necessário suprir a necessidade de recarga destes em todas as situações, seja na própria residência ou em alguma rodovia no meio de uma viagem. Desse modo, com o objetivo de assegurar um processo de recarga rápido e eficiente, este trabalho abordará um modo de recarga de acordo com a regulamentação vigente no país.

1.2.1 Objetivo geral

Analisar as funções, topologias e normas de um carregador para veículo elétrico modo 3, em corrente alternada, e posteriormente construir um protótipo que siga os regimentos da norma.

1.2.2 Objetivos específicos

- Analisar o contexto dos veículos elétricos, assim como suas variações;
- Analisar os modos de recarga disponíveis no mercado;
- Analisar o que a norma vigente dispõe sobre os modos de recarga disponíveis;
- Compreender todas as etapas do modo 3 de recarga que será enfoque deste projeto;
- Construir um protótipo que cumpra as disposições previstas;
- Analisar o funcionamento e possíveis alterações para o projeto ser totalmente regularizado.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo contém a revisão bibliográfica deste trabalho, descrevendo os tipos de veículos elétricos, baterias, conectores, estações de recarga e padrões disponíveis, mas principalmente a revisão da norma brasileira que rege o desenvolvimento das estações no país.

2.1 CLASSIFICAÇÃO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS

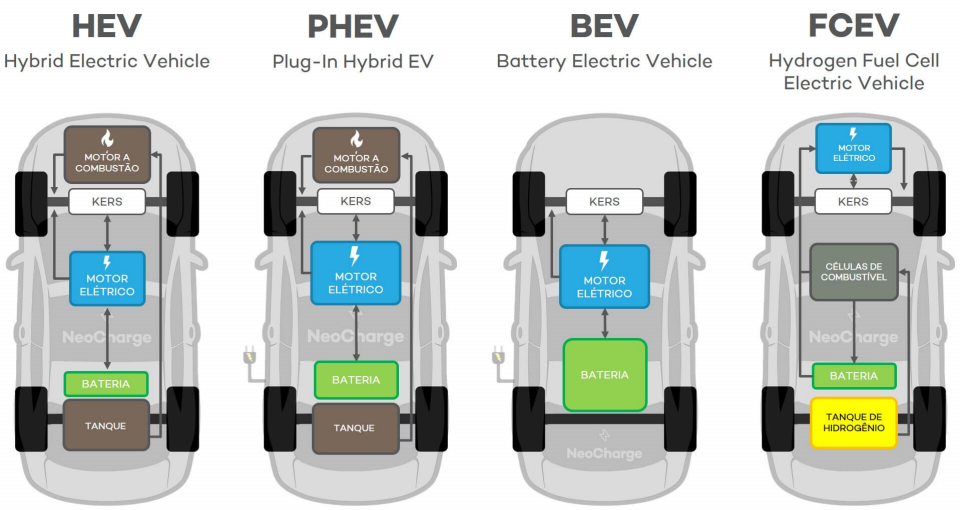
Os VE podem ser subdivididos em três categorias, tais como os totalmente elétricos, híbridos e híbridos plugin. Subdividindo os totalmente elétricos, pode-se encontrar os elétricos à bateria (BEV) e os carros elétricos à célula de combustível (FCEV)(NEOCHARGE, 2021).

2.1.1 Veículo Elétrico Híbrido (HEV)

Os veículos considerados híbridos, possuem tanto um motor à combustão como um motor elétrico, e assim, apresentam uma eficiência consideravelmente maior que os veículos somente à combustão, devido ao motor elétrico ser acionado nos momentos em que o gasto de combustível é alto, como no arranque e frenagem brusca do carro, atuando como um processo complementar à atuação do motor à combustão, e assim diminuindo o gasto de combustível. Outra característica do HEV, é o carregamento da bateria através da frenagem, elevando a autonomia (NEOCHARGE, 2021).

- Modelos conhecidos: Toyota Prius, Ford Fusion Hybrid, Chevrolet Malibu.

Figura 3 – Tipos de VE



Fonte: NeoCharge (2021)

2.1.2 Veículo Elétrico Híbrido Plug In (PHEV)

São muito semelhantes aos HEVs, com a principal diferença de que a sua bateria pode ser recarregada via conexão externa, e,desse modo, pode suportar distâncias mais altas somente atuando com a forma elétrica no veículo, até que sua bateria se esgote (NEOCHARGE, 2021). Como exemplo, a bateria de um Jaguar PHEV pode chegar a 59 km (Jaguar F-PACE) de autonomia com uma única carga, tornando possível viagens diárias somente no modo elétrico (LIMITED, 2022).

- Modelos conhecidos: BMW i8, Mercedes Benz C350e, Volvo V60 PHEV, Mitsubishi Outlander, Volkswagen Golf GTE.

2.1.3 Veículo Elétrico à Bateria (BEV)

Não possuem motor à combustão, portanto, são considerados totalmente elétricos, tendo sua fonte de energia na bateria interna, que pode ser recarregada tanto pela frenagem regenerativa, como pela conexão de uma rede externa (NEOCHARGE, 2021).

- Modelos conhecidos: Tesla, Chevrolet Bolt, Nissan Leaf, BMW i3, Renault Zoe, Jaguar I-Pace, Volkswagen e-Golf.

2.1.4 Veículo Elétrico à Célula de Combustível (FCEV)

Estes veículos combinam hidrogênio e oxigênio para produzir eletricidade, que alimenta o motor elétrico. Por funcionarem somente com eletricidade, são considerados veículos elétricos, enquanto sua autonomia e a forma de reabastecimento ainda se comparam a um veículo a combustão, pois os tanques de hidrogênio pressurizado são reabastecidos em estações como se fossem postos de combustíveis (NEOCHARGE, 2021).

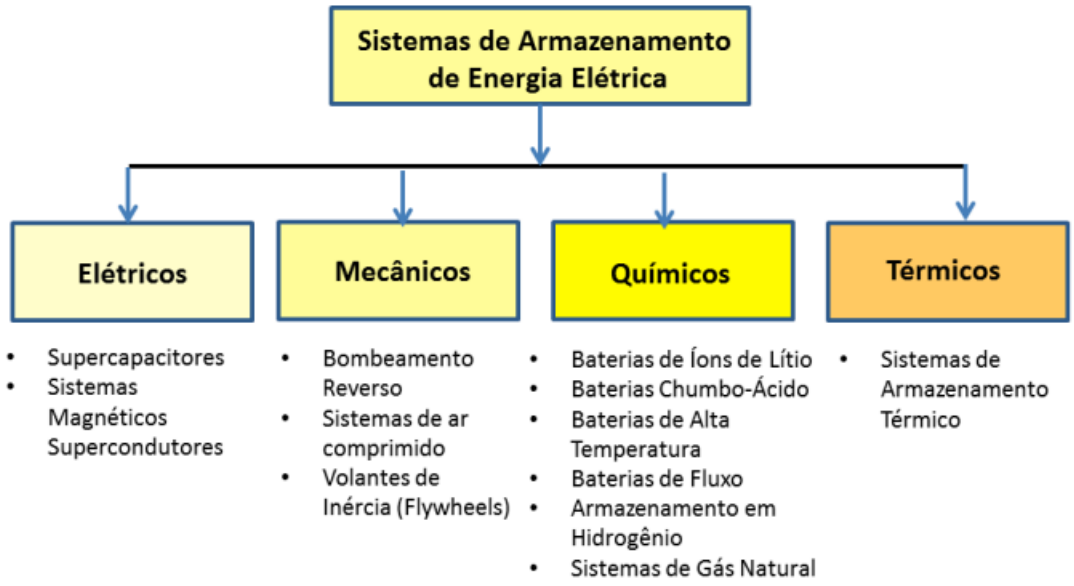
- Modelos conhecidos: Toyota Mirai, Hyundai Tucson FCEV, Hyundai Nexo, Honda Clarity.

2.2 REVISÃO SOBRE FORMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

A diferença principal entre carros a combustão e carros elétricos é a fonte de energia utilizada para alimentar o motor e tracionar as rodas. Enquanto os carros a combustão utilizam a energia da queima de combustível para locomover o automóvel, os veículos elétricos apresentam uma bateria como fonte de energia (NEOCHARGE, 2021).

Como exemplo, no momento em que o pedal do acelerador é pressionado, o carro instantaneamente fornece energia ao motor, que gradualmente consome a energia da bateria. Assim, quando descarregada, a bateria do VE é recarregada utilizando a energia da rede elétrica, seja de uma tomada de parede, que ocorre de forma mais lenta, ou por um carregador dedicado para isso.

Figura 4 – Tecnologias para armazenar energia elétrica



Fonte: (BUENO; BRANDÃO, 2017)

2.2.1 Necessidade de desenvolvimento das baterias

Devido ao fato de a energia elétrica estar altamente presente no cotidiano, a humanidade se tornou altamente dependente desse recurso, necessitando ter disponibilidade à qualquer momento, em qualquer lugar e na quantia necessária, assim, as formas de armazenar energia elétrica se desenvolveram para suprir essa necessidade, de concentrar mais energia em menor espaço.

2.2.2 Sistemas de armazenamento de energia

A Figura 4 mostra diversas formas de se armazenar energia elétrica, desde modelos elétricos à térmicos, cada um com suas particularidades específicas, porém, neste trabalho, o foco se dará ao processo químico, pois é o majoritariamente aplicado para armazenar energia em veículos automotores (BUENO; BRANDÃO, 2017).

2.2.3 Análise sobre sistemas químicos de baterias

Os sistemas químicos se evidenciam como um dos principais focos de estudo sobre armazenadores de energia, pela sua capacidade e variabilidade de aplicação. Os esforços atuais são no sentido de construir baterias com maior densidade de armazenamento (maior quantidade de energia armazenada em menor espaço utilizado), menores perdas no processo para melhorar a eficiência de carga/descarga, menores taxas de auto-descarga (descarga sem alimentar nenhum dispositivo) e elevado número de ciclos de carga/descarga, refletindo na durabilidade da bateria

Tabela 1 – Comparativo de baterias

	Íon de lítio	Níquel hidreto metálico	Chumbo-ácido	Supercapacitor
Densidade energética (Wh / kg)	100 - 300	40 - 120	30 - 40	1 - 10
Dendidade de potência (W / kg)	1.000 - 5.000	300 - 1.000	180	1.000 - 10.000
Ciclos de vida	500 - 15.000	500 - 1.000	500 - 800	Ilimitado
Eficiência de carga e descarga	95% - 99%	65% - 80%	70% - 92%	98%
Taxa de descarga própria	1% - 5% / mês	30% / mês	3% - 20% / mês	-
Tolerância a sobrerecarga	Baixa	Baixa	Alta	-
Manutenção	Baixa	60 dias - 90 dias	3 meses - 6 meses	Baixa
Tempo de carga rápida	1 hora ou menos	2 horas - 4 horas	8 horas - 16 horas	Segundos

Fonte: Adaptado de (NEOCHARGE, 2021)

(BUENO; BRANDÃO, 2017).

A tecnologia que se destaca dentre esses sistemas é a de íons de lítio, pois como analisado na Tabela 1, aspectos como taxa de auto descarga, densidade energética e tempo de recarga favorecem para este tipo de bateria ser o mais aplicado em VEs, e também em portáteis como celulares e notebooks (NEOCHARGE, 2021).

2.2.4 Bateria de íons de lítio

Como o próprio nome ressalta, as baterias utilizam o lítio, que é o metal alcalino com maior potencial eletroquímico na tabela periódica, e assim proporcionam altas densidades de energia e podem fornecer elevados picos de potência, muito indicadas aos veículos elétricos que buscam compactação (BUENO; BRANDÃO, 2017).

Outro fator que explica sua aplicabilidade é a baixa taxa de auto descarga destas baterias, perdendo cerca de 5% da carga por mês. Também, conseguem suportar centenas de ciclos de carga/descarga, gerando confiabilidade e longo prazo de uso para aplicação em VEs (BUENO; BRANDÃO, 2017).

Baterias de íons de Lítio são sensíveis a temperaturas altas pois o eletrólito é inflamável e a densidade de energia é elevada (BUENO; BRANDÃO, 2017), assim, se explica o alto nível de controle que se deve ter em um processo de recarga, pois se potência aplicada for além da indicado, pode-se ter danos graves no procedimento. Além disso, outro problema é a baixa temperatura, pois a maioria dos eletrólitos das baterias de íon-lítio congela a aproximadamente -40°C, refletindo o fato de que a aplicação da bateria somente é viável em temperaturas superiores à essa (LTDA, 2022).

A maioria das peças de baterias de íon de lítio são recicláveis, tornando essas baterias uma opção ambientalmente sustentável (NEOCHARGE, 2021).

2.3 SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE BATERIA - BMS

Do inglês *Battery Magement System*, o sistema de gerenciamento de bateria utilizado para aumentar e otimizar o tempo de vida útil das baterias recarregáveis dos VEs, observando

parâmetros como tensão, corrente, temperatura e balanço de carga nas células da bateria.

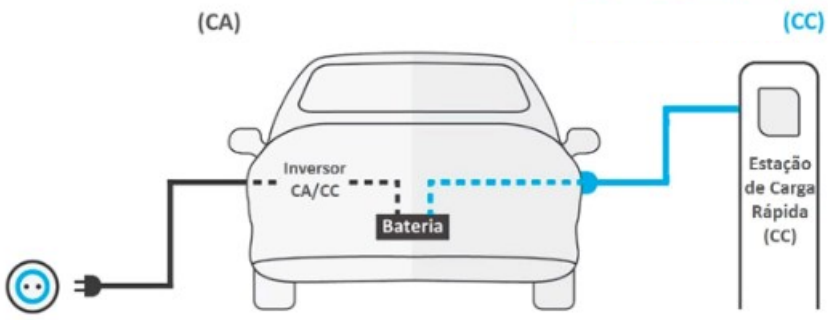
É recomendado que todos os veículos elétricos tenham o BMS embarcado, pois possui a capacidade de ajustar o resfriamento e dar início a outros mecanismos para encerrar algumas operações e minimizar riscos, como, por exemplo, no procedimento de recarga, onde pode ser necessário suspender o processo de recarga para solicitar ventilação externa ao veículo (NEOCHARGE, 2021).

2.4 FORMAS DE RECARGA DA BATERIA DO VE

Existem dois tipos de corrente para carregar um veículo elétrico, a corrente contínua e a corrente alternada. A energia da rede elétrica é sempre disponibilizada em corrente alternada pela concessionária, enquanto que as baterias apenas conseguem ser recarregadas em corrente contínua. Sendo assim, praticamente todos os dispositivos eletrônicos necessitam de um conversor CA-CC, o retificador.

Nesse sentido, notam-se duas principais formas de configurar o carregamento de baterias em um veículo elétrico, através de uma estação de recarga que gera diretamente uma corrente CC, ou se não existir esta forma de carregamento disponível, o VE têm a possibilidade de receber corrente CA e gerar a retificação da corrente de forma embarcada, como visto na comparação da Figura 5, por meio do retificador à bordo, para recarregar a bateria com corrente CC (NEOCHARGE, 2021), processo denominado *On Board Charger* (OBC).

Figura 5 – Carregamento em corrente alternada e corrente contínua



Fonte: Adaptado de (NEOCHARGE, 2021)

2.5 MODOS DE RECARGA DE ACORDO COM A NORMA

2.5.1 Norma SAE J1772

Nos Estados Unidos da América, o padrão para recarga de VEs utilizado é definido pela *Society of Automotive Engineers* (SAE), com o nome de J1772 (MANUFACTURERS; (SMMT), 2010), sendo assim, considerando neste momento as estações de recarga, observam-se diferentes configurações principalmente na potência das mesmas, que impactam diretamente no tempo de recarga de uma bateria veicular.

Nesse sentido, de acordo com a norma SAE J1772, se destacam as estações de recarga nível 1 e nível 2, tanto para modo de recarga em corrente contínua, como para modo de recarga em corrente alternada. O CC nível 1 e CA nível 1 e nível 2 são aplicadas quando o veículo pode ficar um grande período de tempo estacionado, para então atingir a carga completa. O CC nível 2 é aplicado quando necessário uma recarga mais rápida da bateria, e, assim, diminuindo o tempo de espera do condutor, com uso de maior potência no processo (RODRIGUES et al., 2014).

A SAE J1772 não descreve recarga baseada em alimentação trifásica, pois não é um tipo de fornecimento de energia comumente disponível aos consumidores norte-americanos (MANUFACTURERS; (SMMT), 2010).

Assim, se tomando como referência o padrão SAE para exemplificar, o nível de carga aplicado para a carga da bateria veicular depende do local e da necessidade do usuário. Assim, o carregamento lento CA nível 1 é aplicado quando o intervalo é de 6 horas a 8 horas para concluir a carga (NEOCHARGE, 2021), sendo recomendando para aplicações residenciais e empresariais, pois o usuário do veículo passa uma grande período de tempo no local, o suficiente para o carregamento da bateria.

O segundo tipo é o carregamento semirrápido, com as classes de CA nível 2 e CC nível 1, já que leva de 1 a 2 horas para a conclusão do carregamento (RODRIGUES et al., 2014), e, desta forma, aplicado majoritariamente em espaços públicos e estacionamentos, devido novamente ao tempo provável de o usuário permanecer no local.

Assim, conclui-se os tipos com o carregador rápido, o CC nível 2, que leva cerca de 30 minutos para recarregar até uma porcentagem de 70%, levando a bateria de 10% a 80%, e uma hora para atingir 100% do carregamento. Aplicado em rodovias, pontos de táxi ou onde o usuário necessite de uma carga extremamente rápida (NEOCHARGE, 2021).

2.5.2 Norma ABNT NBR IEC 61851-1

A Agência Brasileira de Normas Técnicas, ABNT, em 2021 atualizou os requisitos gerais para o processo de recarga dos veículos elétricos, subdividindo de outra maneira os modos de recarga e as especificações de cada modo.

2.5.2.1 Modo 1

No modo 1 está presente o tipo de recarga de forma corrente alternada, que não possui pino piloto e nenhum contato adicional para comunicação com o veículo (ABNT, 2021). Pela capacidade de recarga desse modo, sua aplicação já está em desuso atualmente. Os valores nominais de corrente e tensão não podem exceder os descritos na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores nominais máximos modo 1

Modo	Corrente	Tensão
Monofásico	16 A	250 V
Trifásico	16 A	480 V

Fonte: Adaptado de (ABNT, 2021)

2.5.2.2 Modo 2

No modo 2 é o método de recarga também da forma corrente alternada, mas agora com pino auxiliar piloto, para realizar a comunicação entre a estação de recarga e o VE, além de possuir proteção contra choques elétricos (ABNT, 2021). Os valores nominais de corrente e tensão não podem exceder os descritos na Tabela 3.

Tabela 3 – Valores nominais máximos modo 2

Modo	Corrente	Tensão
Monofásico	32 A	250 V
Trifásico	32 A	480 V

Fonte: Adaptado de (ABNT, 2021)

2.5.2.3 Modo 3

Assim como no modo 1 e 2, no modo 3 está presente o tipo de recarga na forma corrente alternada, mas diferentemente dos anteriores, nesse modo o VE pode ser conectado a uma estação de recarga que está permanentemente conectada à rede elétrica, como uma estação Wallbox por exemplo, enquanto que nos modos anteriores o cabo de carregamento é conectado a uma tomada normalizada (ABNT, 2021).

No modo 3 também é necessário um contato auxiliar para comunicação, o pino piloto, além de necessitar de um condutor de aterramento (ABNT, 2021). As capacidades de tensão e correntes são abordadas no capítulo referente ao pino piloto.

2.5.2.4 Modo 4

No modo 4 está presente o modo de recarga de forma contínua, que necessita de aterramento e pino piloto para comunicação com a estação de recarga (ABNT, 2021). Os requisitos adicionais desse modo são tratados na ABNT NBR IEC 61851-23, que trata sobre o modo de recarga na forma de corrente contínua, não sendo o enfoque deste trabalho.

2.6 PADRÕES DE CONECTORES

Nesse sentido, dependendo da localização e da aplicação, se encontram diferentes configurações de conectores no mercado, tais como o tipo 1 (SAE J1772), tipo 2 (IEC 62196), GB/T 20234, CHAdeMO, CCS e TESLA (NEOCHARGE, 2021).

2.6.1 Tipo 1 (SAE J1772)

Este conector é projetado para carregamento em rede monofásica em corrente alternada, e permite a carga em potência de até 7,4 kW (230 V, 32 A), dependendo do carregador e da capacidade da rede (NEOCHARGE, 2021). Muito utilizado na região norte americana, é considerado um conector CA de carga lenta, uma vez que possibilita o carregamento em potência de 3,7 kW a 16 A, e 7,4 kW a 32 A (RODRIGUES et al., 2014).

O conector Tipo 1, da Figura 6a, possui pinos de fase, neutro e terra, além de outros dois para comunicação com o veículo e proteção para travar o plugue com o intuito de evitar desconexão com o circuito ainda energizado (NEOCHARGE, 2021).

2.6.2 Tipo 2 (IEC 62196)

Diferentemente do Tipo 1, este conector é projetado para carregamento em rede trifásica em corrente alternada, e geralmente é chamado de conector 'mennekes' (KNEZ; ZEVNIK; OBRECHT, 2019). Possui conexões adicionais e suporta a recarga em potência de até 22 kW (400 V, 32 A), sendo assim um carregador CA de carga rápida. A distribuição dos pinos é similar ao conector Tipo 1, porém, dois pinos são adicionados que correspondem às fases extras conforme pode observar na Figura 7a, necessárias para o carregamento trifásico (NEOCHARGE, 2021).

Por conta da rede trifásica e do conector Tipo 2 permitirem maior capacidade de energia, o veículo é recarregado mais rápido quando comparado ao Tipo 1. As estações de carregamento instaladas em redes monofásicas e que possuem esse tipo de plugue, podem efetuar o processo de recarga normalmente (NEOCHARGE, 2021), no entanto, o carro é carregado em menor potência, como um carregador CA de carga lenta.

2.6.3 CCS

Os chamados conectores CCS são separados em Tipo 1 e Tipo 2, do inglês *Combined Charging System* (CCS) permite tanto a recarga rápida em corrente contínua, como também a recarga lenta ou rápida em corrente alternada (MACHADO, 2021).

2.6.3.1 CCS Tipo 1

O denominado CCS Tipo 1 é uma variação do Tipo 1 (SAE J1772), mas com dois pinos extras para corrente contínua na parte inferior, aumentando a potência para 125 kW, entre 200 V e 600 V (NEOCHARGE, 2021). Como é uma variação do Tipo 1, o CCS Tipo 1 também é mais usado nos EUA (MACHADO, 2021).

- Alguns fabricantes compatíveis com este padrão: Citroën, Chevrolet, Ford, Kia, Mitsubishi, Nissan, Opel, Peugeot e Toyota.

  Esses fabricantes também são compatíveis com o padrão Tipo 1.

2.6.3.2 CCS Tipo 2

O CCS Tipo 2 é a adaptação do Tipo 2 normal com duas entradas para corrente contínua. Por ser mais moderno, suporta tensões de até 1.000 V, e é padrão em híbridos plug-in e elétricos vindos da Europa, pelo fato de ser variação do padrão europeu (NEOCHARGE, 2021).

- Alguns fabricantes compatíveis com este padrão: Audi, BMW, BYD, Mercedes-Benz, Renault, Smart, Tesla, Volkswagen e Volvo.

  Esses fabricantes também são compatíveis com o padrão Tipo 2.

2.6.4 GB/T 20234

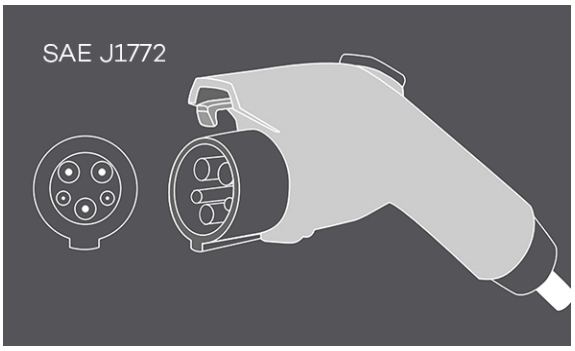
Semelhante ao Tipo 2, ou seja, suporta trifásico, é projetado para atender as normas de carregamento específicas da China, sendo assim, não compatível fisicamente com o Tipo 2 de padrão europeu (NEOCHARGE, 2021).

2.6.5 Tesla

A Tesla tem seu próprio padrão de conector para seus veículos, que é projetado para recarregar os veículos tanto em CC como CA utilizando o mesmo conector (NEOCHARGE, 2021). Alguns modelos de veículos Tesla usam o conector Tipo 2 com carregamento CC integrado para carregamento ultra rápido (NEOCHARGE, 2021).

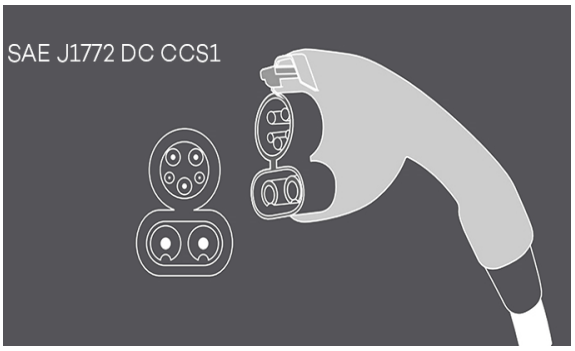
Em um indicativo de início de padronização dos carregadores para VEs, a Ford e a General Motors firmaram parceria com a Tesla para utilização dos carregadores da fabricante

(a) SAE J1772.



Fonte: Adaptado de (NEOCHARGE, 2021)

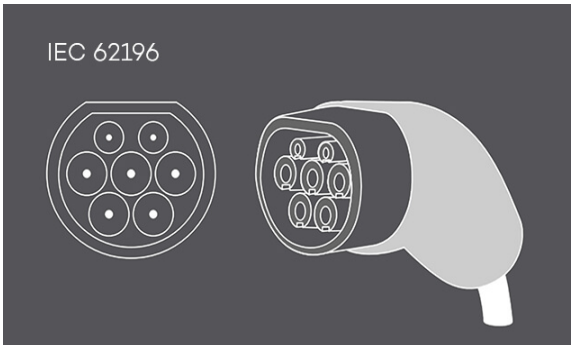
(b) CCS TIPO 1



Fonte: Adaptado de (NEOCHARGE, 2021)

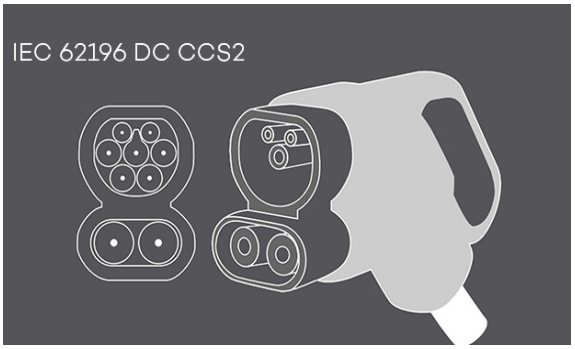
Figura 6 – SAE CA e CC

(a) IEC 62196



Fonte: Adaptado de (NEOCHARGE, 2021)

(b) CCS TIPO 2



Fonte: Adaptado de (NEOCHARGE, 2021)

Figura 7 – IEC CA e CC

por meio de um adaptador. Em troca, alguns novos veículos elétricos da Ford e da GM passarão a integrar o padrão de carregamento Tesla (RIVEIRA, 2023).

2.6.6 CHAdeMO

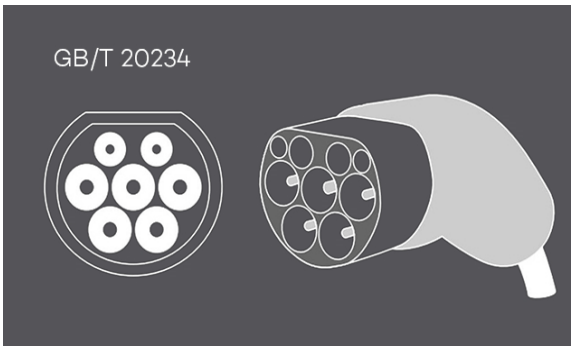
CHAdeMO é a abreviação de *"Charge deMove"* e este sistema de carregamento rápido em corrente contínua foi desenvolvido no Japão (NEOCHARGE, 2021). Suporta capacidades de carregamento muito altas, bem como fluxo bidirecional de energia, fornece energia em uma potência de até 100 kW, porém especificações revisadas permitem até 400 kW (1.000 V, 400 A) (NEOCHARGE, 2021).

2.6.7 Comparativo entre os padrões

Alguns fatores influenciam no tempo de uma recarga de um veículo elétrico, tais como a dimensão e o estado da bateria, a potência máxima de carregamento do veículo, a potência máxima do carregador e fatores ambientais (NEOCHARGE, 2021).

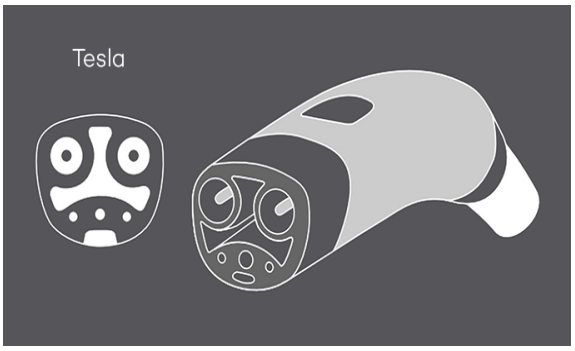
No entanto, a Tabela 4 evidencia um tempo médio necessário para carregar 100 km de autonomia de um veículo, tendo como base que o veículo em questão utiliza 20 kW para

(a) GB/T 20234



Fonte: Adaptado de (NEOCHARGE, 2021)

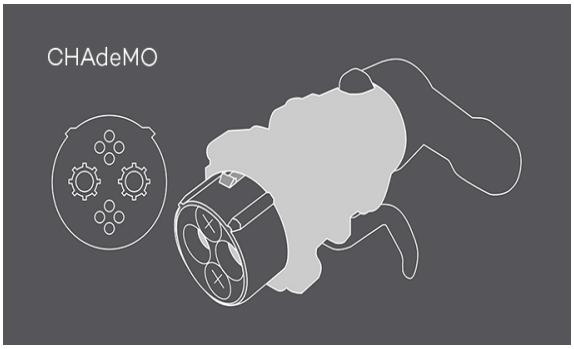
(b) TESLA



Fonte: Adaptado de (NEOCHARGE, 2021)

Figura 8 – GB/T e Tesla

Figura 9 – CHAdeMO



Fonte: Adaptado de (NEOCHARGE, 2021)

percorrer os 100 km, dados que podem ser usados para se ter uma noção da capacidade de cada padrão de carregamento.

Se denota que os carregadores CC têm uma maior capacidade de carga para os veículos, pois necessitam de menos tempo para carregar a mesma quantidade de energia que os CA. Porém, os recarregadores CC têm maior dificuldade de implementação, pois nem todos os VEs possuem capacidade de receberem elevada energia e, além disso, o controle deve ser feito majoritariamente no carregador, enquanto que no CA, o dispositivo de controle está embarcado no veículo (CARDOSO, 2021).

Tabela 4 – Comparação entre os carregadores

Capacidade do carregador	Tempo para autonomia de 100 Km (consumo de 20 W/km)	Conectores utilizados
1,8 kW (8A)	11 horas	Tipo 1, tipo 2 e GB/T (CA)
3,7 kW (16A)	5,4 horas	Tipo 1, tipo 2 e GB/T (CA)
11 kW (32A)	1,8 horas	Tipo 2 e GB/T (CA)
22 kW (32A)	55 minutos	Tipo 2 e GB/T (CA)
50 kW	24 minutos	CC
100 kW	12 minutos	CC
150 kW	8 minutos	CC
300 kW	4 minutos	CC

Fonte: Adaptado de NeoCharge (2021).

2.7 TIPOS DE CARREGADORES

2.7.1 Carregador portátil

Existem diversas configurações para carregadores de veículos elétricos, dependendo da necessidade do usuário. Nesse sentido, tem-se carregadores portáteis, que podem ser usados em qualquer local que tenha disponibilidade de energia, e são muito úteis pois podem ser empregados tanto em casa, como serem levados para viagem, por exemplo.

2.7.2 Wallbox

Outro modelo de carregador é o Wallbox, traduzindo para o português "caixa de parede", nada mais é do que um aparelho alocado na parede da garagem do usuário por exemplo, ou seja, é fixo. Diferentemente do modelo portátil, consegue empregar uma potência maior de carregamento e consequentemente diminuir o tempo de recarga (NEOCHARGE, 2021).

2.7.3 Carregador comercial ou parking

É um modelo muito similar ao wallbox, e um pode substituir o outro facilmente, no entanto, a principal diferença é de que o modelo comercial possui mais de uma saída para carga, além de ter a capacidade de gerar carga contínua à uma grande quantidade de veículos, ideal para ambientes comerciais. Trabalha com carregamento CA da mesma forma que o Wallbox (NEOCHARGE, 2021).

2.7.4 Estação de recarga rápida CC

Esta estação pode, por exemplo, com uma potência máxima de carregamento de 270 kW gerar uma autonomia ao Porsche Taycan EV de 100 km, com uma carga de quatro minutos e meio (BRASIL, 2022). Atinge este montante pelo fato de utilizar recarga em corrente contínua,

mais eficiente que a corrente alternada em quesito de tempo de recarga, dependendo da potência, sendo assim, é usado quando o proprietário do veículo não tem disponibilidade de tempo para carregar seu veículo.

Devido à elevada potência aplicada no processo, a instalação desta estação de recarga deve ser feita por um profissional capacitado e habilitado.

2.8 WALLBOX

Neste trabalho, o foco se dará ao carregador wallbox como da Figura 10.

Devido ao fato de as tomadas residenciais fornecerem uma baixa quantidade de potência, o wallbox foi desenvolvido com o intuito de elevar a potência e diminuir drasticamente o tempo de recarga, podendo ser instalado na garagem do proprietário do veículo, se tratando de um carregador residencial (EZVOLT, 2019).

Como declarado na norma da ABNT, a qual discorre sobre o carregamento em corrente alternada, para aumentar a potência no carregamento CA, é necessário ter uma estação permanentemente conectada à rede elétrica, com capacidade de comunicação com o veículo por meio do pino piloto.

Essa topologia de carregador só permite maior potência devido ao sistema de proteção exigido por norma, como a proteção de fuga para o terra, além da contínua comunicação entre VE e estação de recarga.

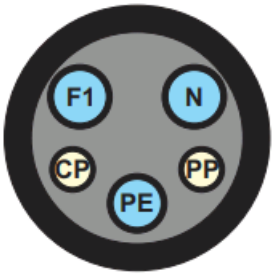
É possível encontrar modelos de carregadores Wallbox com potências bem distintas.

Figura 10 – Exemplo de wallbox conectado ao VE



Fonte: Soltaic (2021)

Figura 11 – Pinagem Tipo 1 (SAE J1772)



Fonte: (ROSA, 2020)

Atualmente, os equipamentos são encontrados em potências de 3,7 kW no modo monofásico até 22 kW no modo trifásico, e, nessas circunstâncias pode-se estimar que um equipamento desse tipo levará entre 2 horas à 12 horas para completar totalmente a recarga (NEOCHARGE, 2021).

Em comparação com os carregadores de emergência e portáteis, os do tipo Wallbox são:

- Mais potentes (o que torna a recarga do veículo mais rápida);
- Mais robustos (portanto também mais duráveis);
- Mais seguros (revestidos em invólucros protetores);

A vantagem do Wallbox para outros modelos é o melhor custo-benefício, pois possui durabilidade e robustez consideráveis, e para consumidores residenciais, supre bem a necessidade, além do investimento necessário para sua aquisição e instalação ser muito mais acessível do que o recarregadores rápidos em CC. Ainda, pode contar com uma função smart que gera controle à distância e consegue agendar o carregamento do carro quando o valor da tarifa está mais barata, em localidades onde há diferenciação no preço por horário do dia (NEOCHARGE, 2021).

Pelo fato de os principais fabricantes mundiais de automóveis ainda não terem conseguido chegar a um acordo para a criação de um cabo de conexão universal, faz com que o Wallbox somente seja compatível com alguns veículos, tendo a sua variação em Tipo 1 e 2 (STANDVIRTUAL, 2022).

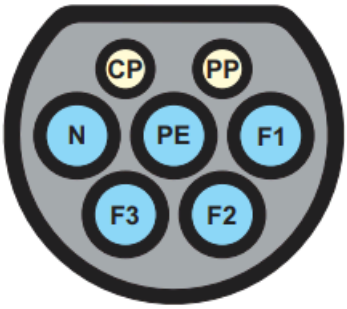
2.8.1 Wallbox Tipo 1

O cabo Tipo 1 (SAE J1772), por se tratar de um padrão americano, é utilizado no EUA e também no Japão, e é composto por 5 pinos, fase, neutro, terra, detector de inserção e piloto de controle, que são os condutores de controle, como visto na Figura 11 (STANDVIRTUAL, 2022).

2.8.2 Wallbox Tipo 2

O cabo Tipo 2 (IEC 62196-2) é utilizado principalmente na Europa, por se tratar de um padrão europeu, e, assim, possui disponibilidade para trifásico. Desse modo, porta mais 2 pinos

Figura 12 – Pinagem Tipo 2 (IEC 62196-2)



Fonte: (ROSA, 2020)

em comparação ao Tipo 1 para completar as fases, totalizando 7 pinos, três fases, neutro, terra, detector de inserção e piloto de controle, como na Figura 12 (LENZ, 2012).

2.9 PINO PILOTO

2.9.1 Protocolo geral

Para a comunicação entre a estação de recarga e o veículo elétrico, a IEC 61851-1 de 2021 traz em seu anexo A o circuito típico para ser aplicado na função pino piloto, nos modos 2, 3 e 4.

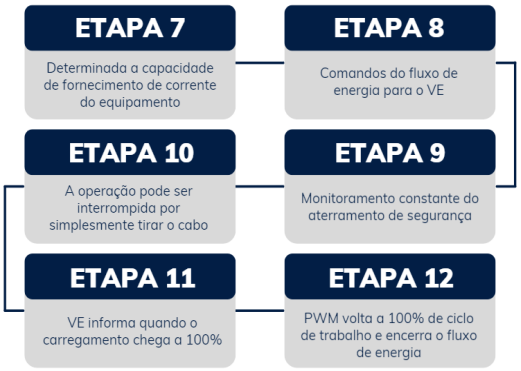
O funcionamento do pino piloto baseado em modulação por largura de pulsos, é escolhido para assegurar a interoperabilidade dos sistemas com aqueles projetados de acordo com a SAE J1772 (ABNT, 2021), no qual é demonstrado nas Figuras 13a e 13b.

(a) Parte 1



Fonte: Adaptado de ABNT (2021)

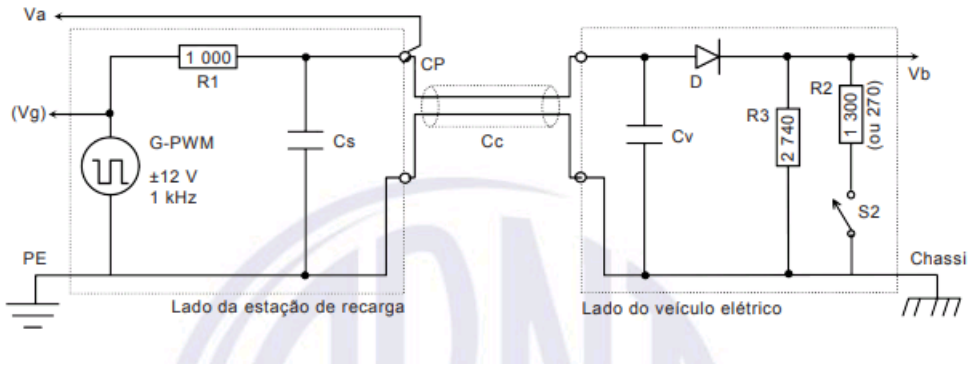
(b) Parte 2



Fonte: Adaptado de ABNT (2021)

Figura 13 – Protocolo SAE J1772

Figura 14 – Circuito típico segundo (ABNT, 2021)



Fonte: (ABNT, 2021)

Tabela 5 – Valores máximos e mínimos dos componentes

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)

2.9.2 Circuito típico

A Figura 14 traz o circuito típico segundo a norma vigente atual, onde se têm a divisão entre o lado da estação de recarga, cabo de conexão e lado do veículo elétrico.

O lado da estação de recarga conta com um gerador PWM, que varia de -12 V a +12 V volts em uma frequência de 1 KHz, conectado em série com uma resistência de 1,000 Ω e em paralelo com um capacitor Cs para filtro de altas frequências.

Após o cabo para conexão, o lado do veículo elétrico possui o capacitor *Cv* para filtro de altas frequências, em série com o diodo, pois para o VE, apenas a parcela positiva da onda quadrada é aproveitada. Conectado em paralelo, se têm o resistor *R*3 e *R*2, que são chaveados de forma que o veículo informa à estação de recarga por meio do valor de pico da modulação PWM de comunicação, em qual estágio do carregamento o processo se encontra (ABNT, 2021).

2.9.3 Componentes

A Tabela 5 mostra os valores nominais para cada componente presente no circuito piloto. O resistor *R vent* não é mostrado na imagem do circuito, pois está posicionado no mesmo local que o *R*2, sendo acionado quando o veículo necessita de ventilação externa.

Tabela 6 – 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*0,6	A
Entre 85% e 96%	(D-64)*2,5	A
Entre 96% e 97%	80	A
Mais de 97%	0	A

Fonte: Adaptado de (ABNT, 2021)

2.9.4 Funcionamento da função piloto

As funcionalidades da função piloto podem ser divididas entre funções da estação de recarga e funções do VE.

2.9.4.1 Funções da estação de recarga

A estação tem a função principal de, por meio da modulação de largura de pulsos, informar ao VE o quanto de corrente se tem disponível para o veículo drenar da rede durante o processo de recarga (ABNT, 2021).

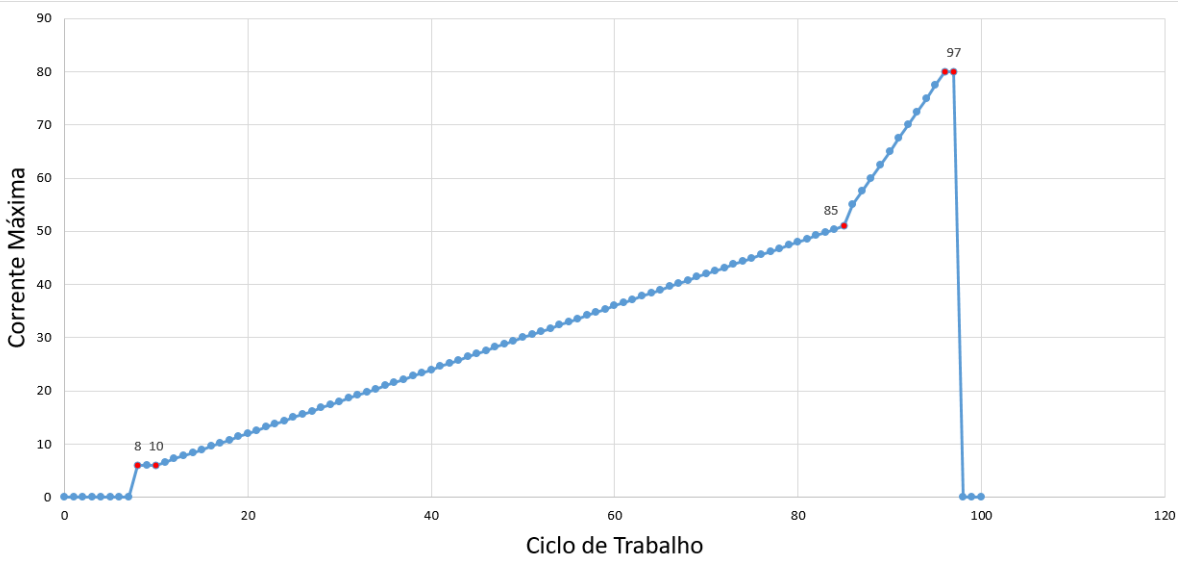
A relação de ciclo de trabalho e corrente máxima é descrita na Tabela 6, onde para menor que 3% e maior que 97% a corrente máxima disponível é 0. Entre 3% e 7% a corrente máxima é determinada por uma comunicação digital extra, presente apenas para o modo 4 de carregamento de forma obrigatória, ou seja, para o modo 3, a corrente máxima também é zero nesse intervalo (ABNT, 2021).

Para o intervalo de 7% a 8% a norma também implica corrente máxima 0, no sentido de isolar a faixa de comunicação digital, ficando então com a corrente máxima igual a 0 para o ciclo de trabalho menor que 8%. Para a faixa de 8% a 10% o valor máximo é de 6 A, enquanto que para a faixa de 10% até 85% o valor da corrente máxima segue a equação descrita na Tabela 6, implicando na inclinação de reta vista na Figura 15.

Para os valores de ciclo de trabalho 85% a 96%, a corrente máxima segue outra equação descrita na Tabela 6, sendo uma reta mais acentuada quando comparada a faixa anterior de ciclo de trabalho, como observado na Figura 15. Por fim, para os valores de ciclo de trabalho de 96% até 97%, a corrente máxima é de 80 A, sendo esse quantitativo o maior valor disponível para o modo 3 de recarga para VEs (ABNT, 2021).

Para o ciclo de trabalho de 0%, o PWM fica com um valor constante de -12 V, indicando que a estação de recarga apresenta erros e precisa de reparo, já para um ciclo de trabalho de 100%, o PWM fica com um valor constante, indicando que a estação de recarga não esta pronta para fornecer energia ao veículo elétrico (ABNT, 2021).

Figura 15 – Ciclo de trabalho x Corrente máxima



Fonte: Do autor

2.9.4.2 Atribuições do VE durante o processo de recarga

Tendo o pino piloto conectado ao veículo, o VE tem que possuir a capacidade de medir a razão cíclica, para então iniciar o processo de recarga sem ultrapassar o valor de corrente máxima disponível durante todo o carregamento das baterias.

Outra função do VE é informar à estação por meio do chaveamento dos resistores $R2$, $R3$ e $R\ vent$, em qual estado do processo de recarga o VE se encontra. Tomando como exemplo o estágio 1, apenas o resistor $R3$ é inserido no circuito, então, se pode calcular Va pela malha fechada pelo resistor $R3$:

$$-12 + VR1 + VD + VR3 = 0 \tag{1}$$

Considerando a queda de 0,7 V para o diodo:

$$VR1 + VR3 = 11,30 \text{ V} \tag{2}$$

Tendo a soma das tensões na equação 2, basta calcular a queda de tensão no resistor $R1$ para se ter a tensão Va_1, então:

$$VR1 = \frac{11,30 \cdot 1000}{1000 + 2740} \tag{3}$$

$$VR1 = 3,02 \text{ V} \tag{4}$$

$$Va = 12 - 3,02 \tag{5}$$

$$Va = 8,98 \text{ V} \tag{6}$$

Assim, no primeiro estágio a tensão *Va_1* é de aproximadamente 9 V. Para o estágio 2, o resistor $R2$ de 1.300 Ω é chaveado em paralelo com $R3$, gerando uma resistência equivalente de:

$$Req_2 = \frac{R3 \cdot R2}{R3 + R2} \tag{7}$$

$$Req_2 = \frac{2740 \cdot 1300}{2740 + 1300} \tag{8}$$

$$Req_2 = 881{,}70 \ \Omega \tag{9}$$

Assim, partindo do mesmo divisor de tensão da equação 3, mas agora com outra resistência equivalente, têm-se:

$$VR1 = \frac{11,3 \cdot 1000}{1000 + 881,70} \tag{10}$$

$$VR1 = 6,01 \text{ V} \tag{11}$$

E para a tensão *Va_2*:

$$Va = 12 - 6,01 \tag{12}$$

$$Va = 5,99 \text{ V} \tag{13}$$

Portanto, para o segundo estado a tensão *Va_2* é de aproximadamente 6 V. Para o terceiro estado, em vez de inserir o resistor de 1.300 Ω para $R2$, o VE insere o resistor de 270 Ω. Assim, partindo da mesma equação 3, a resistência equivalente é de:

$$Req_3 = \frac{R3 \cdot R2}{R3 + R2} \tag{14}$$

$$Req_3 = \frac{2740 \cdot 270}{2740 + 270} \tag{15}$$

$$Req_3 = 245{,}78\ \Omega \tag{16}$$

E para o novo divisor de tensão:

$$VR1 = \frac{11{,}3 \cdot 1000}{1000 + 245{,}78} \tag{17}$$

$$VR1 = 9{,}07\ \text{V} \tag{18}$$

Finalmente, a tensão *Va_3* resultante é de:

$$Va = 12 - 9{,}07 \tag{19}$$

$$Va = 2{,}93\ \text{V} \tag{20}$$

Portanto, para o terceiro estado disponível, a tensão *Va_3* é de aproximadamente 3 V.

2.9.4.3 Estados resultantes

Tendo o funcionamento correto das funções do VE no pino piloto, os estados possíveis da tensão *Va* são descritos na Tabela 7. Os estado A, B, C e D índice 1 possuem a mesma tensão *Va* dos estados de índice 2, mas diferem pelo fato de a estação de recarga poder liberar energia ou não, ou seja, se o consumo de corrente ainda não estiver disponível, o PWM permanece em 100%, com um sinal constante de tensão *Va*, e se a corrente for liberada, o ciclo de trabalho é atualizado para o valor máximo de corrente disponível.

Dessa forma, o processo de recarga só ocorre de forma efetiva durante os estados C2 e D2, e ainda, durante o estado D2 o VE pode encerrar o processo de recarga a qualquer momento se a ventilação requerida não estiver disponível.

O estado E indica um curto entre o pino piloto e o fio de proteção, devendo esse estado ser verificado continuamente pelo sistema de recarga, encerrando o processo caso ele ocorra. O estado F indica algum erro na estação de recarga, necessitando de reparo.

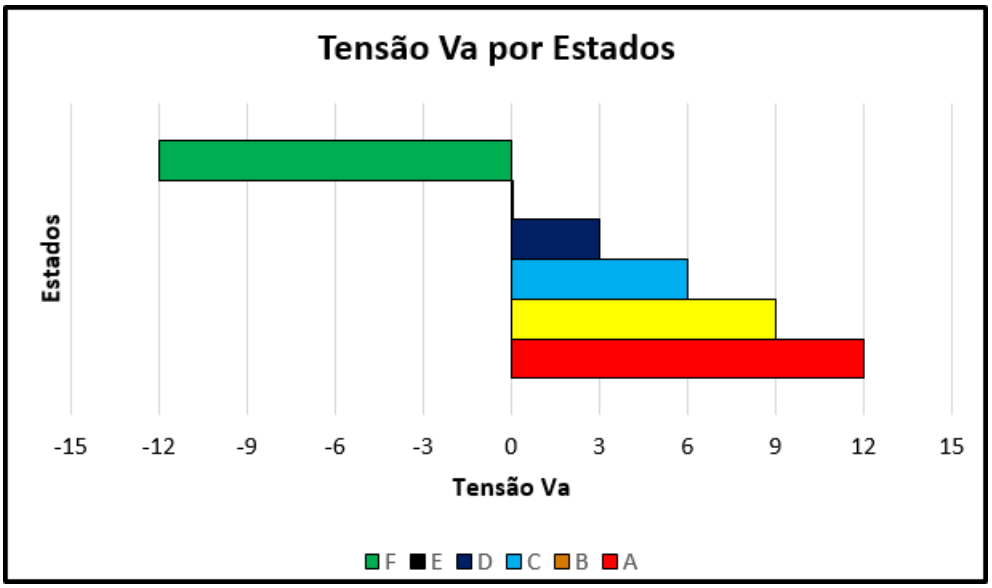
A estação de recarga deve somente liberar energia se o VE elétrico informar que está apto a receber energia. Estas funções são definidas na seção 3.3.

Tabela 7 – Estados possíveis da tensão Va no pino piloto

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

Fonte: Adaptado de (ABNT, 2021)

Figura 16 – Estados possíveis da tensão Va no pino piloto - Gráfico



Fonte: Do autor (2023)

Tabela 8 – Tempo de subida e descida de 10% a 90%

Estado	Tempo de subida	Tempo de descida	Unidade
B	10	13	µs
C	7	13	µs
D	5	13	µs

Fonte: Adaptado de (ABNT, 2021)

Para a comunicação ocorrer de forma bem sucedida pelos dois lados do circuito, o tempo de subida e de descida da onda do PWM deve corresponder a Tabela 8, onde o variação da onda de 10% acima do valor mínimo até 90% do valor máximo deve ser menor do que o tempo de subida descrito, e a variação contrária deve ser menor do que o tempo de descida descrito. Como os estados possuem diferentes tensões, o tempos de subida são diferentes entre cada um dos estados.

3 DESENVOLVIMENTO

O desenvolvimento do projeto pode ser dividido em duas etapas, a primeira é a montagem do circuito piloto, tanto do lado da estação de recarga como do lado do VE, assim como também a medição da tensão Va para análise de funcionamento.

A segunda etapa é a medição da tensão da rede elétrica conectada à estação de recarga para obter maior controle do processo, fazendo a leitura de forma isolada para possíveis instabilidades da rede não comprometerem o restante do circuito. Outra forma de realizar a medição de forma isolada é com a aplicação de um transformador ao circuito desenvolvido.

3.1 CIRCUITO PILOTO

A Figura 17 mostra o panorama geral do circuito da função piloto simulado, onde pode ser subdividido em 3 estágios para análise, a geração da onda quadrada, os componentes essenciais da função piloto e o circuito de medição da tensão Va para controle.

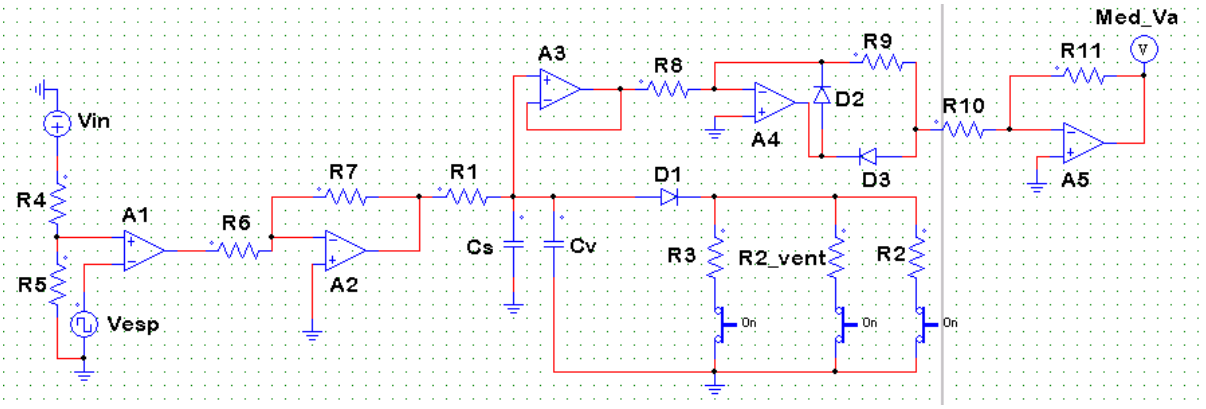
3.1.1 PWM

Para a geração da onda quadrada de 1 kHz, utilizada para a comunicação entre veículo e estação, se usou o mesmo microcontrolador do restante do circuito para economia de componentes.

O microcontrolador escolhido para aplicação é o ESP32-DevKitC V4 da fabricante Espressif, que possui a capacidade de gerar onda quadrada em duas de suas portas de saída, com tensão de 3,3 V de amplitude, o que é uma limitação para o projeto, pois se necessita de 12 V de amplitude.

Assim, o condicionamento de sinal emprega um amplificador operacional como comparador para gerar a onda quadrada em 12 V, comparando o sinal PWM gerado pelo ESP 32 com uma tensão entre 0 e 3,3 V, proveniente do divisor de tensão da fonte de alimentação do circuito,

Figura 17 – Circuito geral do sistema do pino piloto simulado



Fonte: Do autor (2023)

assim, fazendo o divisor de tensão:

$$V_+ = \frac{Valimentacao \cdot R5}{R5 + R4} \tag{21}$$

$$V_+ = \frac{15 \cdot 10000}{100000 + 10000} \tag{22}$$

$$V_+ = 1,36 \text{ V} \tag{23}$$

Aplicando essa tensão na porta positiva do comparador, como visto na Figura 80, na porta negativa é aplicada a tensão de saída do ESP, simulado por uma fonte de tensão que varia de 0 V a 3,3 V com uma frequência de 1 kHz, então:

Se tensão do ESP for igual a 3,3 V:

$$Vsaida = -15 \text{ V} \tag{24}$$

Se tensão do ESP for igual a 0 V:

$$Vsaida = +15 \text{ V} \tag{25}$$

Pois o comparador satura na tensão de alimentação do ampop, que para este trabalho se tinha disponível uma fonte de alimentação de mais ou menos 15 V. Para condicionar o sinal ao valor utilizado no pino piloto, posteriormente se aplicou uma topologia redutora inversora ao sinal de saída do comparador, para com o auxílio de um potenciômetro atingir exatamente 12 V, assim:

$$Vsaida_2 = -\frac{Vsaida \cdot R7}{R6} \tag{26}$$

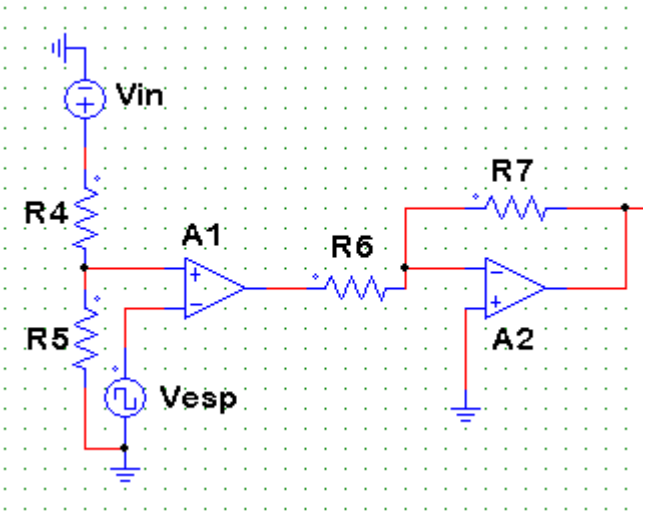
Quando *Vsaída* é igual a +15 V:

$$Vsaida_2 = -\frac{15 \cdot 100000}{125000} \tag{27}$$

$$Vsaida_2 = -12 \text{ V} \tag{28}$$

Quando *Vsaída* é igual a -15 V:

Figura 18 – Geração do PWM simulado



Fonte: Do autor (2023)

$$Vsaida_2 = -\frac{-15 \cdot 100000}{125000} \tag{29}$$

$$Vsaida_2 = +12 \text{ V} \tag{30}$$

Portanto, de saída do circuito PWM se obteve o seguinte resultado:
Se tensão do ESP for igual a 3,3 V:

$$Vsaida = +12 \text{ V} \tag{31}$$

Se tensão do ESP for igual a 0 V:

$$Vsaida = -12 \text{ V} \tag{32}$$

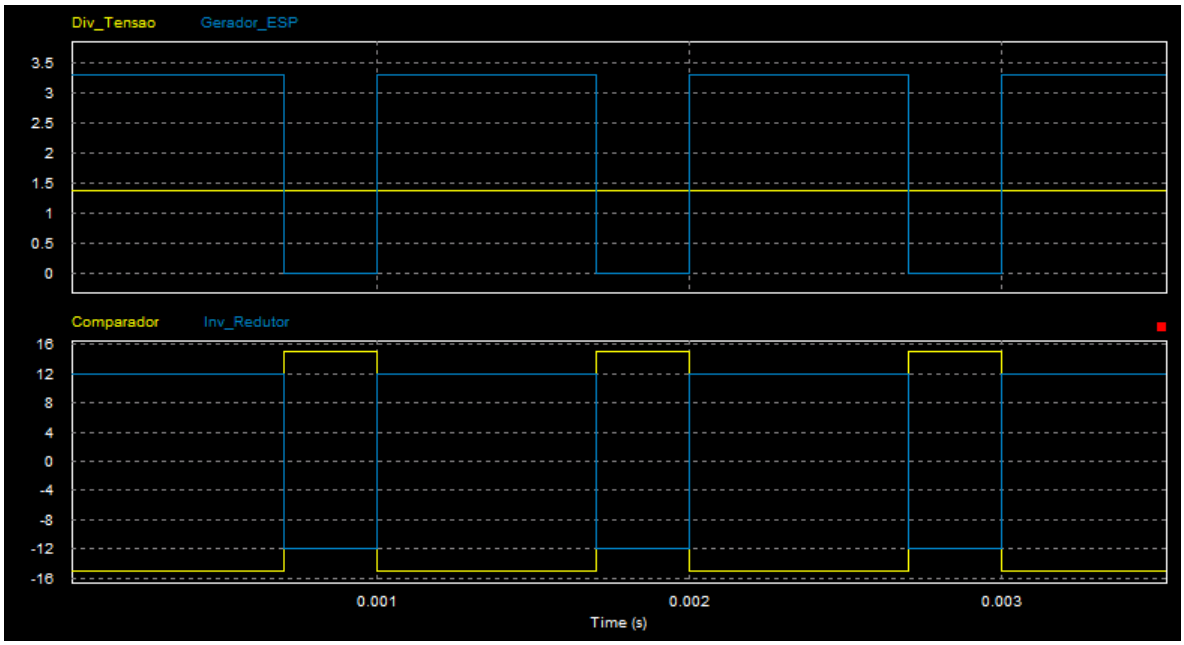
Isto possibilita o controle do ciclo de trabalho diretamente pela programação do ESP 32, pois apenas controlando o tempo ativo da saída é possível controlar a corrente máxima indicada que deve ser interpretada pelo VE.

3.1.1.1 Resultados PWM

Para a topologia do gerador do PWM, o resultado do simulador pode ser observado na Figura 19, onde os valores coincidiram com os valores teóricos e estão com um erro reduzido.

Os resultados práticos também ficaram dentro do esperado, com o circuito funcionando da maneira projetada, porém com as algumas distorções, como, por exemplo na geração de onda

Figura 19 – Circuito gerador do PWM simulado



Fonte: Do autor (2023)

quadrada pelo ESP. Na onda quadrada da Figura 20, onde a onda inferior e superior ficaram com ruídos significativos, que não comprometeram o valor médio mas distorceram o valor pico a pico que na teoria é de 3,3 V, e é obtido 3,78 V, um erro de:

$$Erro\% = \frac{3,88 - 3,3}{3,3} \cdot 100 \tag{33}$$

$$Erro\% = 15,15\ \% \tag{34}$$

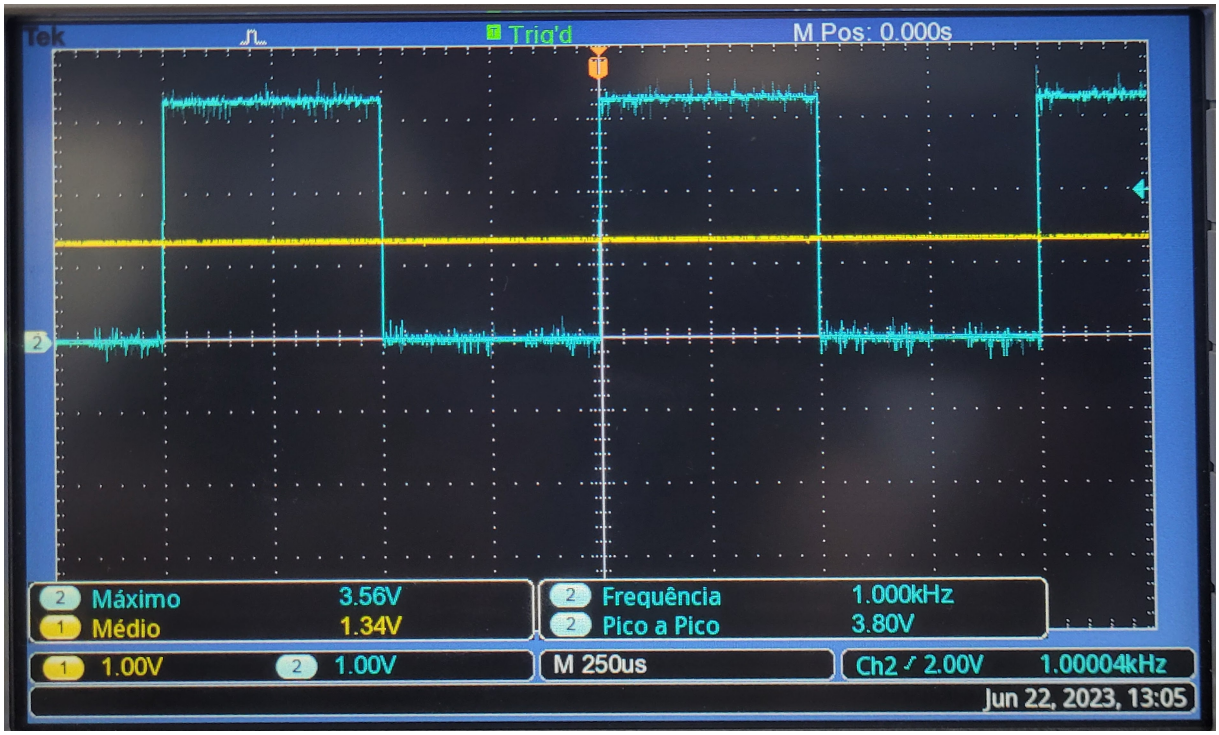
O erro pode ser considerado alto. Contudo, como o sinal é aplicado em um comparador, em que a saída resultante depende apenas do valor de maior módulo na entrada, o circuito funciona da maneira esperada independentemente do ruído no sinal, que pode ser reduzido com adição de um filtro próximo da porta do comparador.

Para melhorar o sinal de saída do amplificador inversor, foi instalado na placa de circuito impresso um potenciômetro de 10 kΩ em série com um resistor de 120 kΩ, variando então o resistor teórico de 125 kΩ do valor de 120 kΩ até 130 kΩ no resistor equivalente $R6$, podendo assim fazer um ajuste fino para o ganho, através da calibração do potenciômetro. O resultado como esperado ficou exatamente em 24 V de pico a pico, como verificado na Figura 21.

3.1.2 Componentes Essenciais

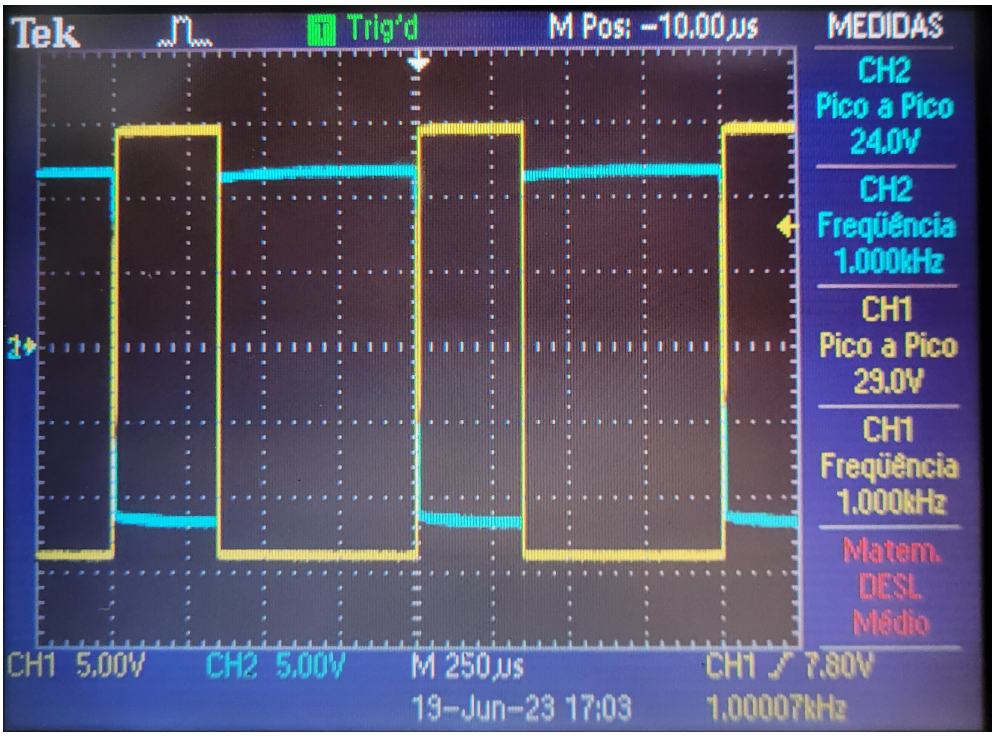
Esta parcela do circuito é basicamente a implementação da norma já discutida, onde como visto na Figura 22, o chaveamento dos resistores $R2$, $R3$ e $R2$ *vent* altera o valor do divisor de tensão e controla a tensão *Va* resultante.

Figura 20 – Gerador PWM obtido - Parte 1



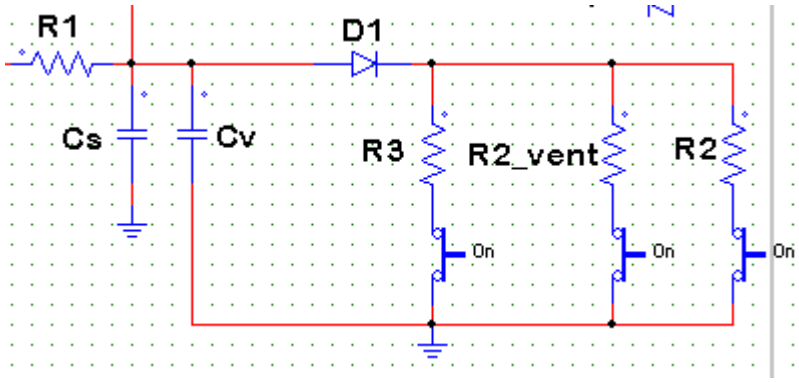
Fonte: Do autor (2023)

Figura 21 – Gerador PWM obtido - Parte 2



Fonte: Do autor (2023)

Figura 22 – Circuito do pino piloto



Fonte: Do autor (2023)

Em um circuito prático de VE, o resistor $R3$ está sempre inserido no circuito, pois é usado para indicar a conexão entre o VE e a wallbox, mas para quesitos de simulação e protótipo é implementada uma chave para emular a não conexão entre as duas partes do circuito piloto.

3.1.3 Medição da Va

Para a medição da tensão *Va*, se optou pela aplicação de um retificador de precisão de meia onda, pelo fato de se estar interessado apenas na parcela positiva da onda de PWM.

Assim, se utilizando inicialmente de um buffer como na Figura 23, para conexão com o circuito principal, o segundo estágio é o retificador de precisão, que é escolhido para minimizar os efeitos da queda de tensão do diodo retificador. Quando a tensão de entrada é positiva o diodo $D2$ é polarizado de forma reversa e o diodo $D3$ é polarizado positivamente, tornando o circuito um amplificador inversor de ganho dado por:

$$Vout = -\frac{Vin \cdot 10000}{10000} \tag{35}$$

$$Vout = -Vin \tag{36}$$

Ou seja, nesse ponto da onda quadrada a saída do segundo estágio é a inversão da parte positiva da onda. Para a parcela negativa da onda quadrada, o diodo $D2$ é polarizado diretamente, e o diodo $D3$ é polarizado inversamente, fechando um curto na realimentação negativa do ampop, e assim o ganho é dado por:

$$Vout = -\frac{Vin \cdot 0}{10000} \tag{37}$$

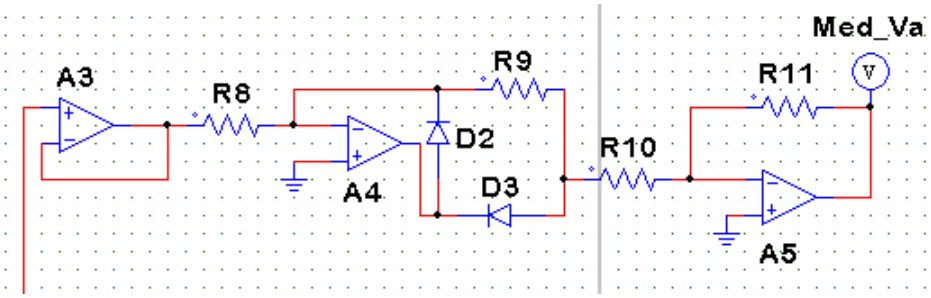
$$Vout = 0 \text{ V} \tag{38}$$

Tabela 9 – Valores de tensão Va e ADC do ESP 32

Va	Vesp	Unidade
12	3	V
9	2,25	V
6	1,5	V
3	0,75	V

Fonte: Do autor (2023)

Figura 23 – Retificador de precisão de meia onda simulado



Fonte: Do autor (2023)

Assim, se tem agora na saída do segundo estágio apenas a parcela positiva da tensão *Va*, que varia de -12 V à 0 V dependendo da situação em que o carregamento se encontra. Para condicionar esse sinal de modo a fazer sua leitura no ADC do ESP 32 é necessário deixa-lá na faixa de 0 V à 3,3 V para não exceder o limite do microcontrolador. Nesse sentido, o terceiro estágio conta com um amplificador inversor de modo a tornar a tensão positiva novamente e condicionar para a porta do ESP, com o seguinte ganho para a máxima tensão:

$$Vesp = -\frac{-12 \cdot 100000}{400000} \tag{39}$$

$$Vesp = 3 \text{ V} \tag{40}$$

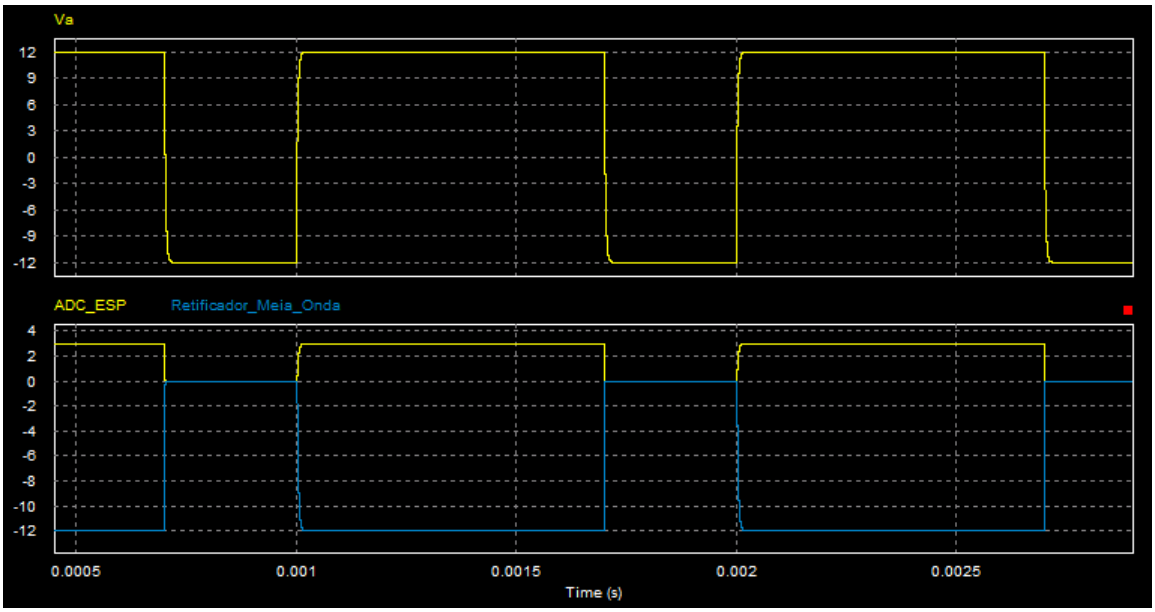
Tendo essa aplicação, a tensão 3 V recebida pelo ESP corresponde aos 12 V de pico da tensão *Va*, e proporcionalmente pode ser calculada as variações da tensão no sistema pelo software elaborado, tendo em consideração que o valor real de pico da tensão *Va* é o valor gerado pelo ADC multiplicado por 4, como descrito os valores na Tabela 9.

Como a tensão não é constante, dependendo do ciclo de trabalho do circuito piloto, pode ser melhor calculada por média móvel.

3.1.4 Resultados pino piloto

Do mesmo modo que é feita a calibração do potenciômetro para a tensão de saída do amplificador inversor, um outro potenciômetro é instalado na placa de circuito impresso para

Figura 24 – Simulação da estação não conectada



Fonte: Do autor (2023)

fazer um ajuste fino no sinal que é lido na porta ADC do ESP, através de um potenciômetro de 20 kΩ em série com um resistor de 390 kΩ, assim, variando o resistor teórico de 390 kΩ até 410 kΩ na resistência equivalente $R10$, para controlar o ganho e condicionar a tensão que chega à porta de leitura ADC do ESP 32, nos parâmetros corretos. Após o desenvolvimento da placa seguindo os resultados teóricos e a simulação, chegou-se aos seguintes resultados para cada parâmetro do circuito piloto.

3.1.4.1 Estação não conectada

De acordo com a Tabela 7, a tensão Va para o estado de não conexão entre VE e estação de recarga é de 11 V à 13 V, assim, considerando para o valor de *Va* apenas a parcela positiva da onda, na Figura 24 se observa que o resultado apresentado pela topologia é correto, com uma tensão exata de 12 V para *Va*.

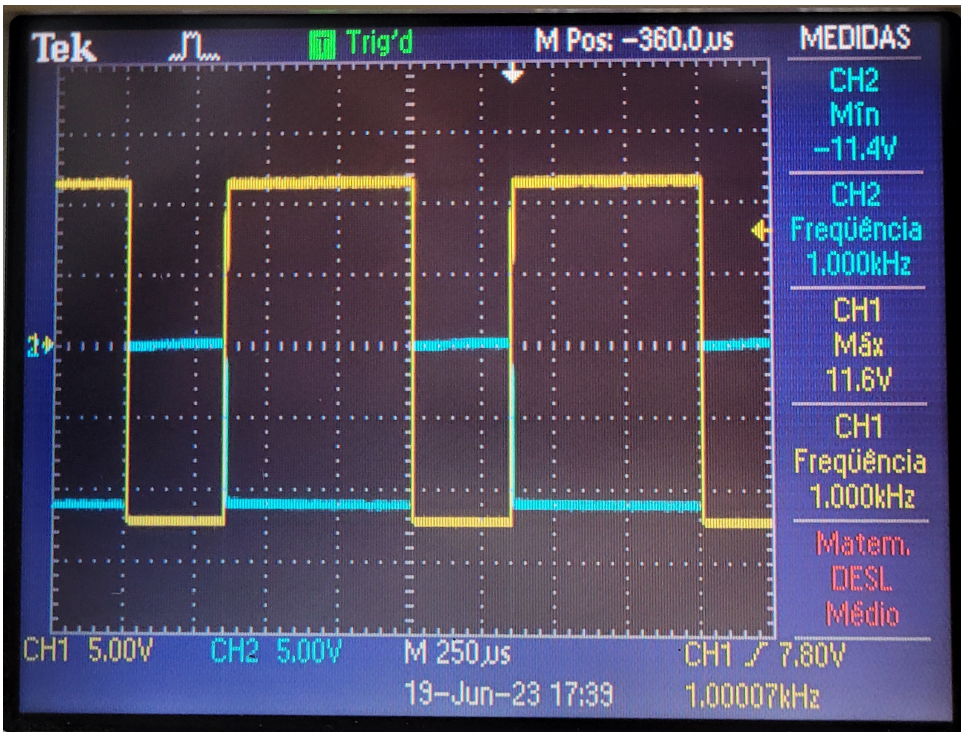
Pelo resultado observado na Tabela 9, o valor da tensão de pico para leitura pelo microcontrolador é de 3 V, valor obtido também na simulação. Para o resultado simulado do retificador de meia onda, é esperado inverter a tensão de pico de Va, então, o valor simulado também está coerente.

Para o resultado prático da Figura 25, houve uma pequena variação na tensão Va destacada em amarelo:

$$Erro\% = \frac{12 - 11,6}{12} \cdot 100 \tag{41}$$

$$Erro\% = 3,33\ \% \tag{42}$$

Figura 25 – Dados práticos de estação não conectada - Parte 1



Fonte: Do autor (2023)

Essa diferença pode ser explicada por uma variação na tensão da fonte de bancada no momento de obter os dados, pois a tensão *Va* extraída anteriormente estava exatamente em 12 V, contudo, essa alteração não traz prejuízos significativos ao funcionamento do circuito, visto que a margem de *Va* é de 1 V em torno do resultado teórico.

Para o retificador de meia onda prático, destacado em azul na Figura 25, o erro observado é de:

$$Erro\% = \frac{11,6 - 11,4}{11,6} \cdot 100 \tag{43}$$

$$Erro\% = 1,72\ \% \tag{44}$$

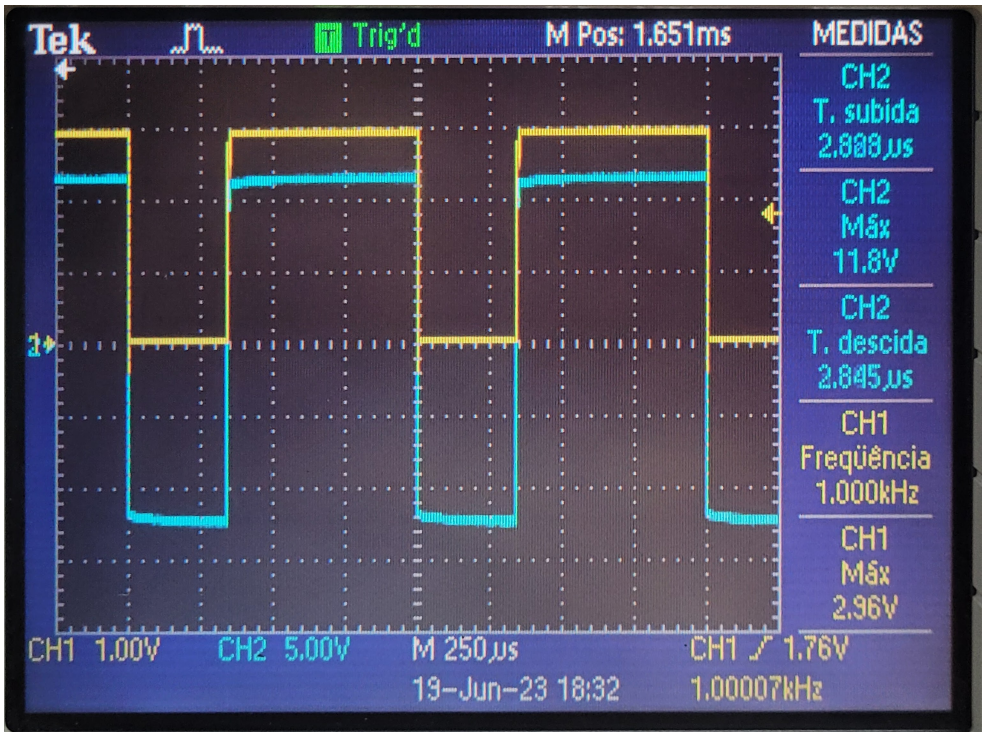
Este erro é significativamente baixo e pode ser explicado pela imprecisão dos resistores aplicados na retificação.

O sinal lido pelo ADC do microcontrolador está destacado em amarelo na Figura 26, onde o valor de pico é de 2,96 V, assim:

$$Erro\% = \frac{3 - 2,96}{3} \cdot 100 \tag{45}$$

$$Erro\% = 1,33\ \% \tag{46}$$

Figura 26 – Dados práticos de estação não conectada - Parte 2



Fonte: Do autor (2023)

O erro obtido pode ser considerado baixo, pois ainda é refletido pela variação da tensão *Va*, que no momento da análise de dados deste sinal estava em 11,8 V.

Ademais, outro ponto analisado é o tempo de subida e descida da onda quadrada, como descrito na Tabela 8. Para o caso de conexão a norma não faz exigência, pois ainda não está conectado ao VE, então apenas ilustrando na Figura 27, o tempo de subida é de 2,35 μs, e o de descida na Figura 28 é de 2,49 μs.

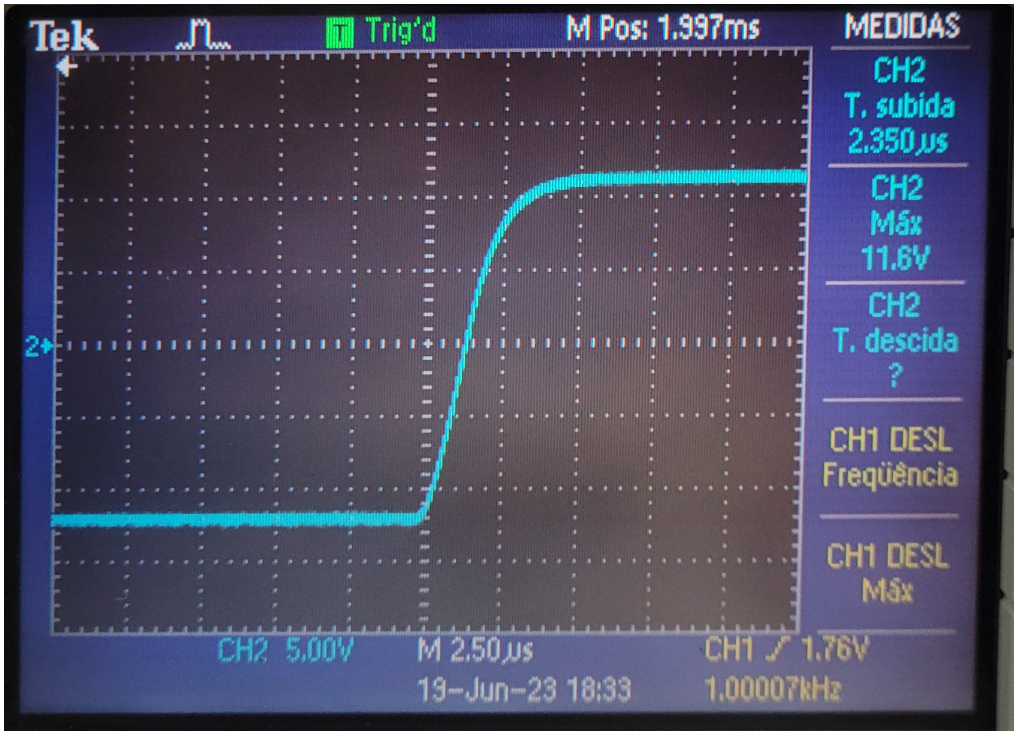
Para a visualização dos dados como já mencionado, as duas opções são o monitor serial da arduino IDE e os leds instalados na placa. O monitor visto na Figura 29 indica o ciclo de trabalho de 66,67 %. Este valor coincide com o analisado na forma de onda *Va* em que a parcela positiva dura aproximadamente 650 μs. O monitor mostra também que a leitura de tensão Va resultante coincide com a amostra da Figura 25, na qual será usada para acionar o led. A tensão da rede e a frequência são analisadas posteriormente.

No circuito impresso de fato, a Figura 30 mostra o acionamento referente ao estado A, de não conectado, e o led superior que mostra a situação do fluxo de energia desligado, indicando que não há ativação do relê.

3.1.4.2 Estação conectada e VE indisponível

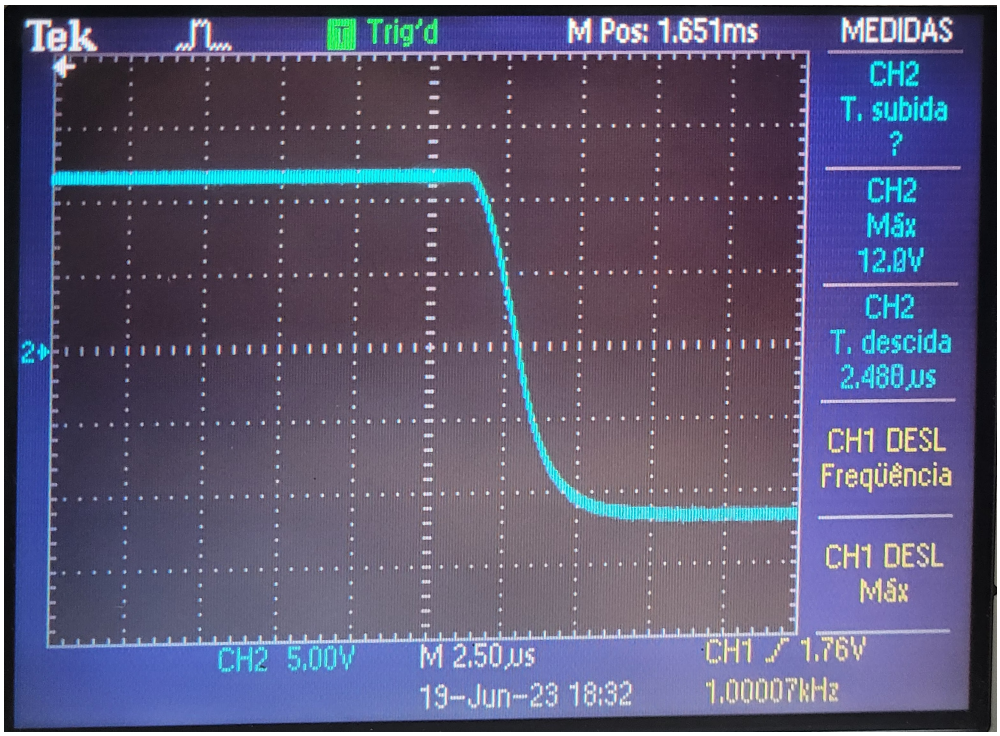
A análise dos outros estados segue o padrão de análise do estado A. Assim, a fonte de erro possivelmente é a mesma, pois a diferença de um circuito para outro é o chaveamento de um resistor.

Figura 27 – Estação não conectada - tempo de subida



Fonte: Do autor (2023)

Figura 28 – Estação não conectada - tempo de descida



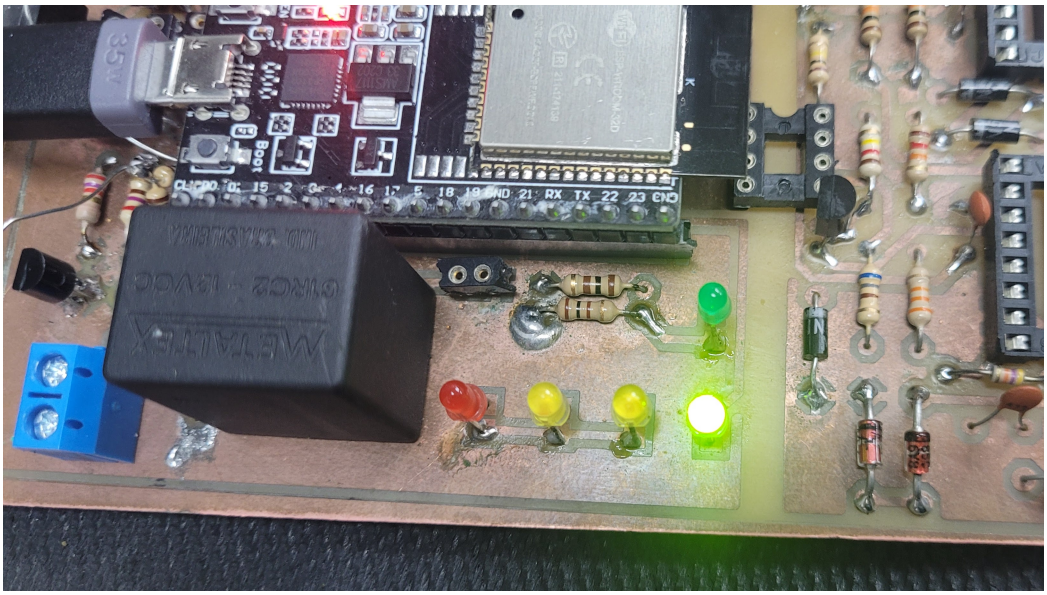
Fonte: Do autor (2023)

Figura 29 – Estação não conectada - visualização dos dados parte 1

```
18:16:53.716 -> Ciclo de trabalho: 66.67%
18:16:54.751 -> Tensao Va: 11.6352V
18:16:54.751 -> Tensao rede: 312.7853V
18:16:54.794 -> Frequencia: 138.00Hz
```

Fonte: Do autor (2023)

Figura 30 – Estação não conectada - visualização dos dados parte 2



Fonte: Do autor (2023)

Nesse sentido, com o chaveamento do resistor de 2.740 Ω, a tensão esperada de *Va* é de 9 V, para representar o estado de estação conectada e VE não apto a receber energia. Assim, como verificado na Figura 32, os resultados estão como o esperado, tendo a tensão do ESP teórica de 2,25 V.

Para a parte experimental, teve-se novamente uma variação na tensão *Va*:

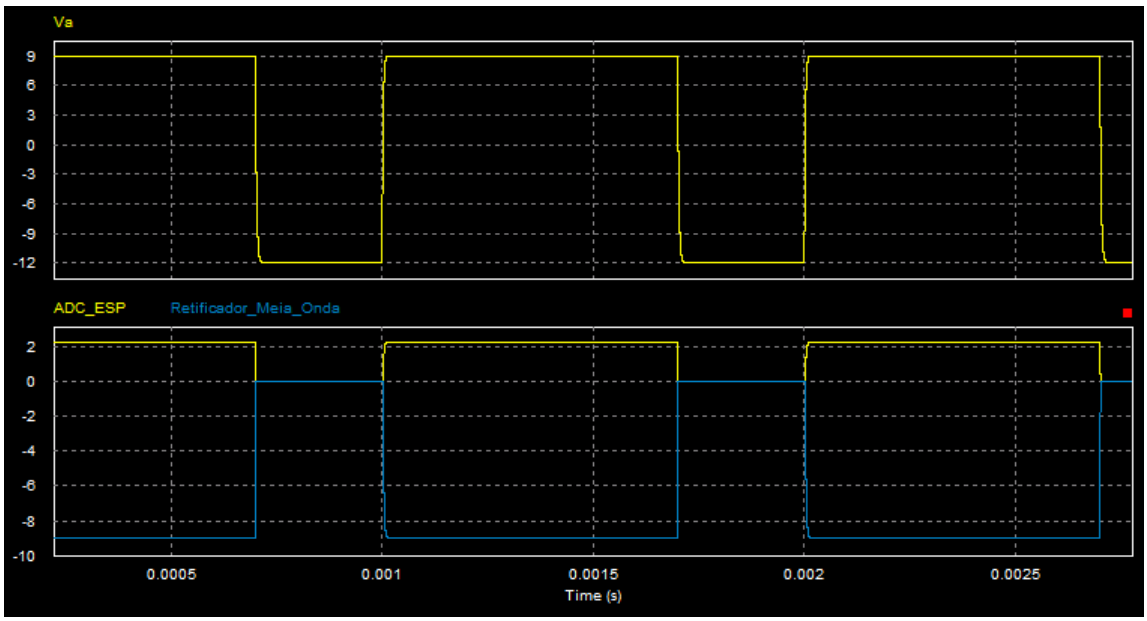
$$Erro\% = \frac{9 - 8,6}{9} \cdot 100 \tag{47}$$

$$Erro\% = 4,44\ \% \tag{48}$$

O erro percentual na tensão *Va* aumentou por se tratar de uma tensão menor que o estado A, mas a diferença em módulo permaneceu em 0,4 V, o que pode ser explicado novamente pela variação da rede. O mesmo raciocínio se aplica ao retificador de meia onda, onde a diferença em módulo para tensão *Va* permaneceu em 0,2 V, sendo explicado pela imprecisão dos resistores do retificador de meia onda.

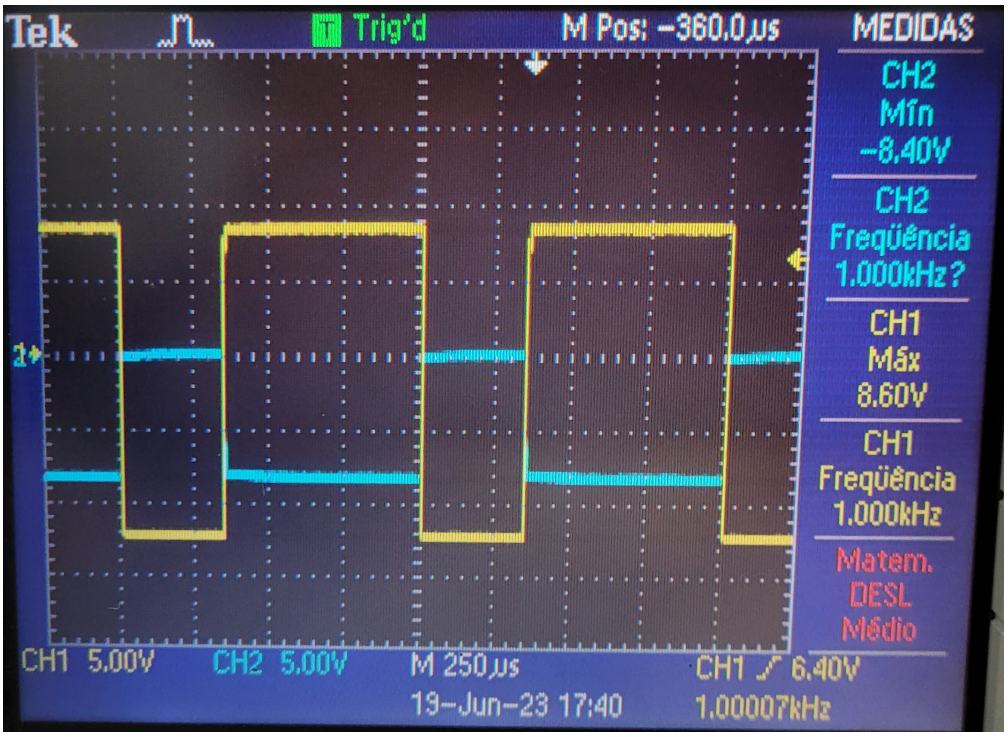
Para a tensão de leitura no ADC, em amarelo na Figura 33, se obteve experimentalmente 2,20 V, sendo o erro em relação ao valor teórico de 2,25 V:

Figura 31 – Simulação da estação conectada e VE indisponível



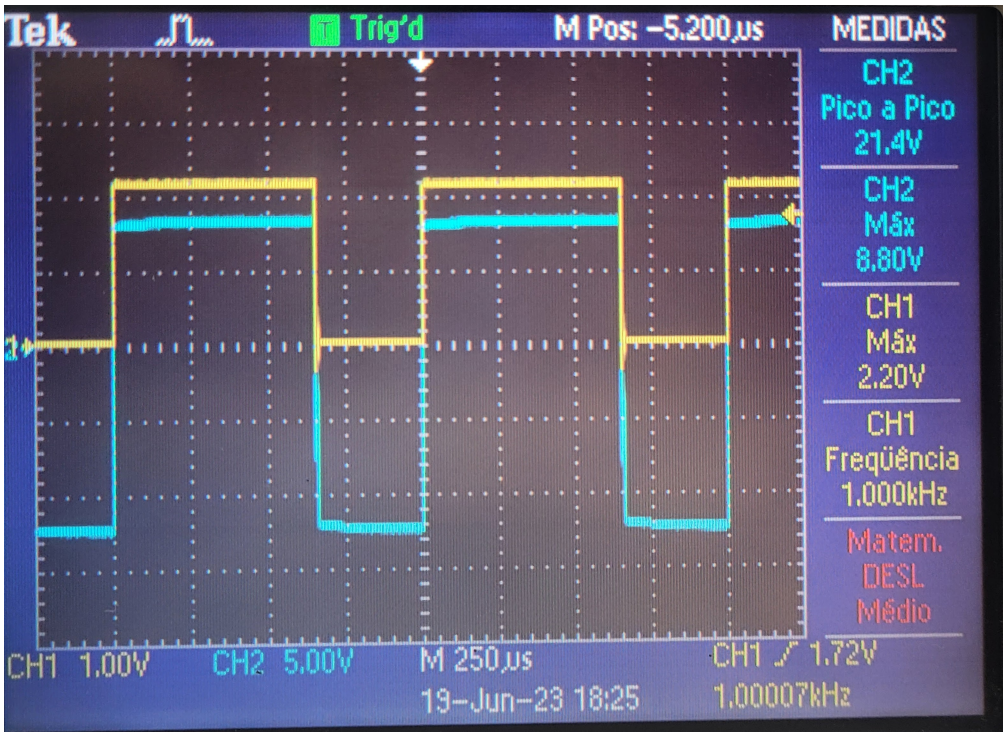
Fonte: Do autor (2023)

Figura 32 – Dados práticos da estação conectada e VE indisponível - Parte 1



Fonte: Do autor (2023)

Figura 33 – Dados práticos da estação conectada e VE indisponível - Parte 2



Fonte: Do autor (2023)

$$Erro\% = \frac{2,25 - 2,20}{2,25} \cdot 100 \tag{49}$$

$$Erro\% = 2,22\ \% \tag{50}$$

Assim, pode ser considerado baixo o erro de leitura no ADC.

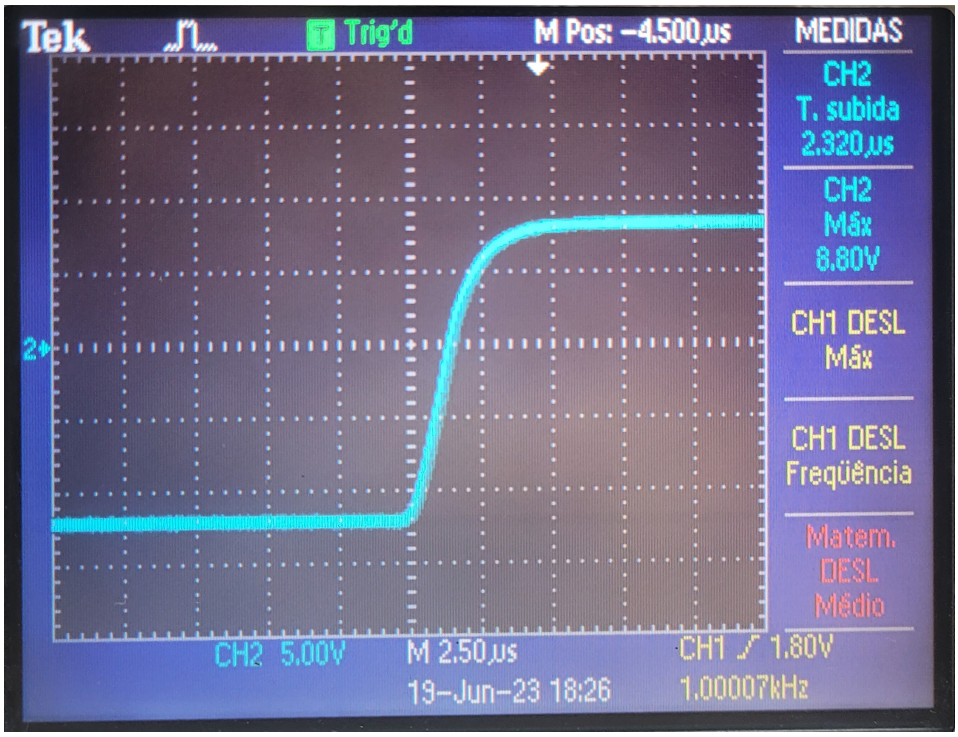
Neste momento, como a estação de recarga e o VE estão efetivamente conectados, é necessário apurar se o tempo de subida e de descida da onda quadrada estão dentro dos parâmetros da Tabela 8. Na Figura 34 se têm o tempo de subida para o estado B, de 2,32 μs, que na norma se determina o máximo de 10 μs, assim:

$$Diferenca\% = \frac{10 - 2,32}{10} \cdot 100 \tag{51}$$

$$Diferenca\% = 76,79\ \% \tag{52}$$

A velocidade de subida é 76,79 % mais veloz que o necessário, implicando em um bom funcionamento do circuito.

Figura 34 – Estação conectada e VE indisponível - tempo de subida



Fonte: Do autor (2023)

O tempo de descida é verificado na Figura 35, onde o valor obtido foi de 2,37 μs, e comparando com o máximo determinado de 13 μs:

$$Diferenca\% = \frac{13 - 2,37}{13} \cdot 100 \tag{53}$$

$$Diferenca\% = 81,77\ \% \tag{54}$$

A velocidade de descida neste estado está 81% mais rápida que o necessário, ou seja, dentro da norma.

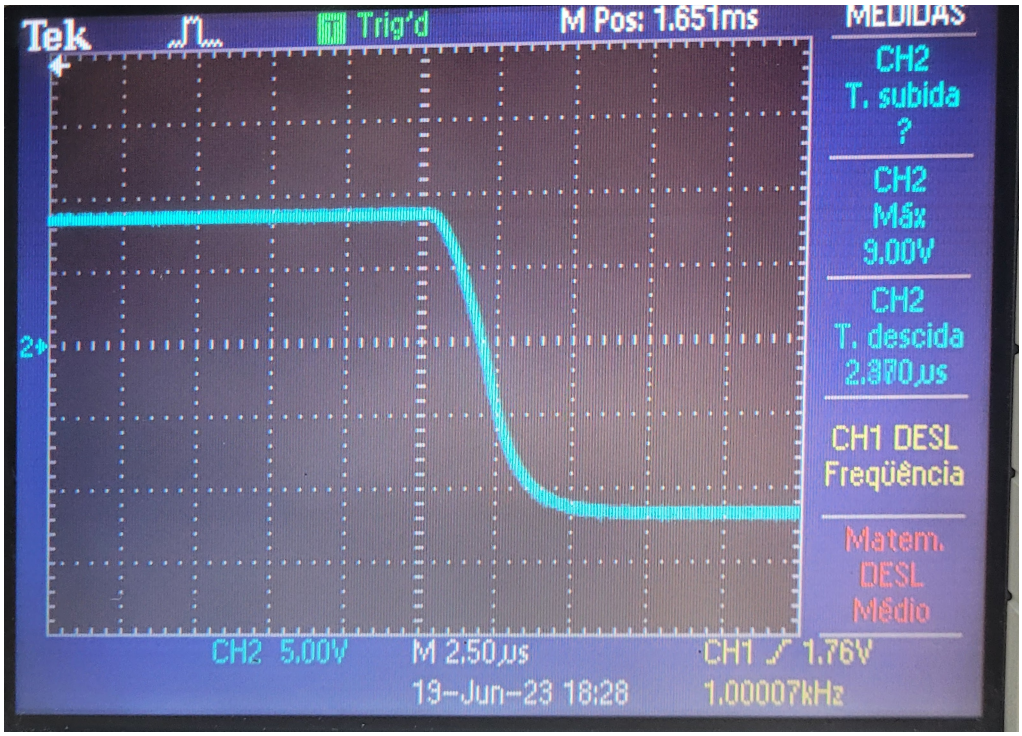
Na Figura 36 se têm o monitor serial apontando 8,17 V, o que comparando com o valor de *Va* visto na Figura 32 de 8,6 V

$$Diferenca\% = \frac{8,6 - 8,17}{8,6} \cdot 100 \tag{55}$$

$$Diferenca\% = 5,00\ \% \tag{56}$$

O erro neste momento foi significativo, também explicado pela variação da fonte de um momento para outro e pelo fato de a leitura ADC apresentar variações de 0,2 V, como descrito no catálogo do modelo do microcontrolador.

Figura 35 – Estação conectada e VE indisponível - tempo de descida



Fonte: Do autor (2023)

Figura 36 – Estação conectada e VE indisponível - visualização dos dados parte 1

```
18:29:41.104 -> Ciclo de trabalho: 66.67%
18:29:42.133 -> Tensao Va: 8.1744V
18:29:42.133 -> Tensao rede: 312.7853V
18:29:42.180 -> Frequencia: 138.00Hz
```

Fonte: Do autor (2023)

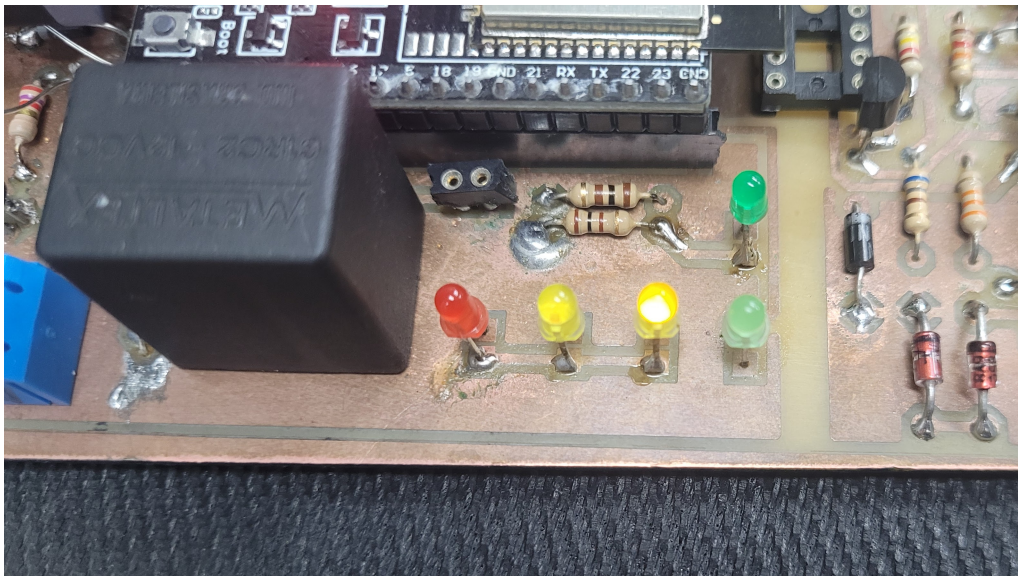
Porém, mesmo com esta variação, o funcionamento do circuito não é comprometido e segue cumprindo os requisitos apontados na norma, pois a faixa de tensão deste estágio vai de 8 V até 10 V, assim, o acionamento do led referente ao estado B ocorre de maneira efetiva como visto na Figura 37, e o led de fluxo de energia continua desativado pois nesse estado ainda não há o processo de recarga.

3.1.4.3 Estação conectada e VE disponível

Para o estágio de estação conectada e VE disponível, ocorre o chaveamento do resistor de 1.300 Ω, reduzindo a tensão *Va* para aproximadamente 6 V, o retificador de meia onda também fica com o valor de 6 V só que invertido, e a tensão de leitura no microcontrolador com aproximadamente 1,5 V, como visto na Figura 38.

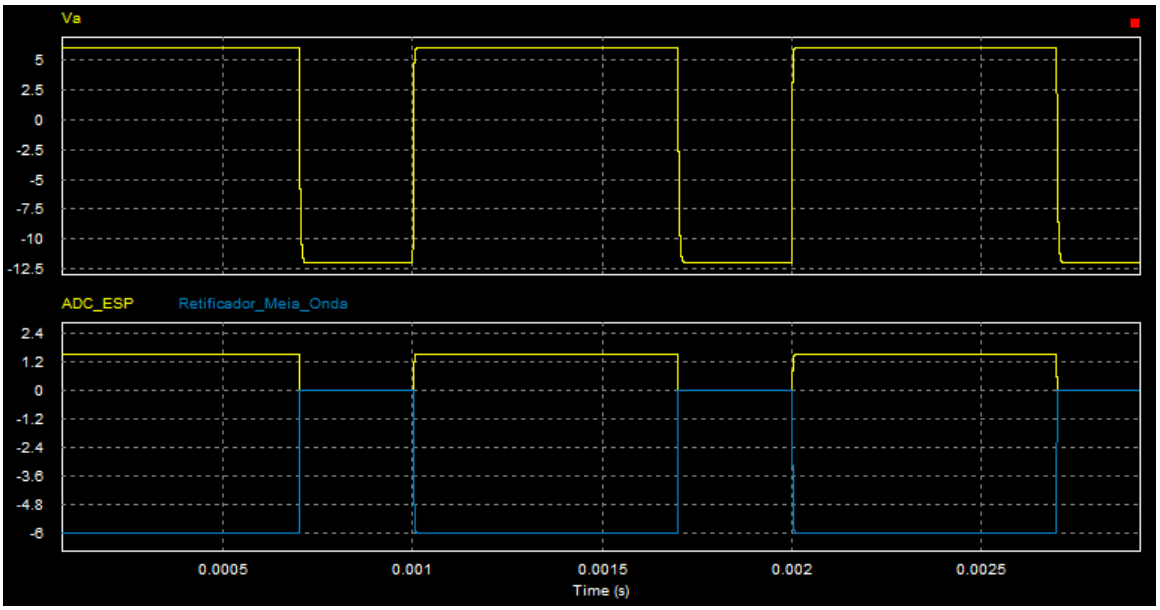
Os resultados práticos permaneceram dentro do esperado, como observado na Figura 39, Va atingiu uma tensão de 5,80 V:

Figura 37 – Estação conectada e VE indisponível - visualização dos dados parte 2



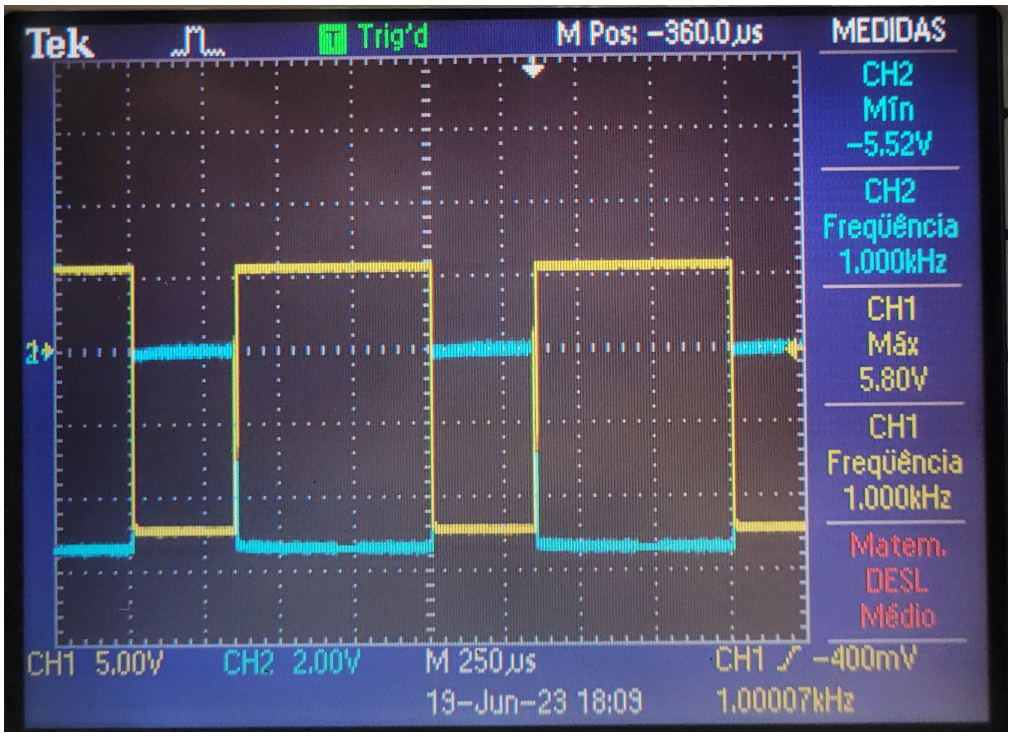
Fonte: Do autor (2023)

Figura 38 – Simulação da estação conectada e VE disponível



Fonte: Do autor (2023)

Figura 39 – Dados práticos da estação conectada e VE disponível - Parte 1



Fonte: Do autor (2023)

$$Erro\% = \frac{6 - 5,8}{6} \cdot 100 \tag{57}$$

$$Erro\% = 3,33\ \% \tag{58}$$

A diferença permaneceu no mesmo patamar das análises dos estados anteriores, não comprometendo o funcionamento da função piloto, pois a faixa permitida nesse estágio é de 5 V até 7 V.

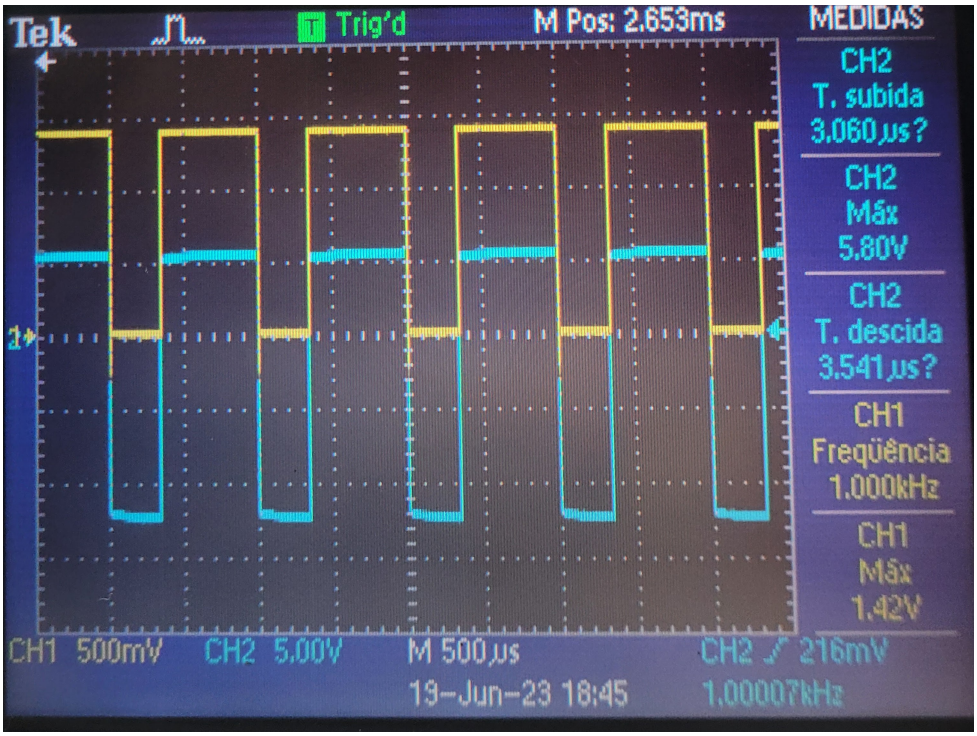
Para o sinal de leitura da tensão *Va* da Figura 40, o resultado obtido é de 1,42 V, assim:

$$Erro\% = \frac{1,5 - 1,42}{1,5} \cdot 100 \tag{59}$$

$$Erro\% = 5,33\ \% \tag{60}$$

O erro de leitura *Va* aumentou em relação ao estágio anterior, o que pode ser explicado pelo retificador de meia onda também apresentar uma diferença considerável do valor de pico da tensão *Va* na Figura 39, e o próprio valor de pico da tensão *Va* não atingir exatamente 6 V.

Figura 40 – Dados práticos da estação conectada e VE disponível - Parte 2



Fonte: Do autor (2023)

De acordo com a Tabela 8, o tempo de subida do estágio C deve ser no máximo de 7 μs, e como verificado na Figura 41, o resultado obtido é de 2,085 μs, então:

$$Diferenca\% = \frac{7 - 2,085}{7} \cdot 100 \tag{61}$$

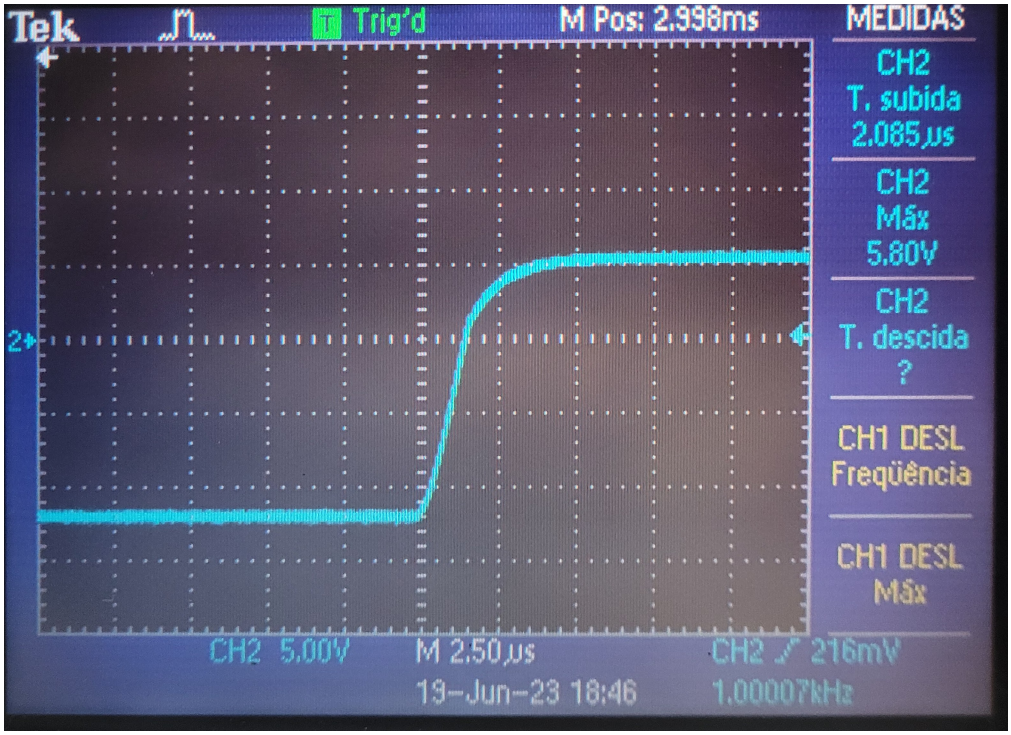
$$Diferenca\% = 70,21\% \tag{62}$$

Concluindo que o circuito está operando nessa situação aproximadamente 70 % mais rápido que o necessário. Para o tempo de descida, a norma exige no máximo 13 μs, sendo o obtido 2,510 μs como observado na Figura 42, chegando a um resultado 80 % mais rápido que o exigido.

A visualização no monitor serial da Figura 43 aponta uma tensão Va de 5,14 V, ainda refletida pelo erro significativo da tensão Va na porta de leitura, porém, não comprometendo o funcionamento pois está dentro da margem permitida.

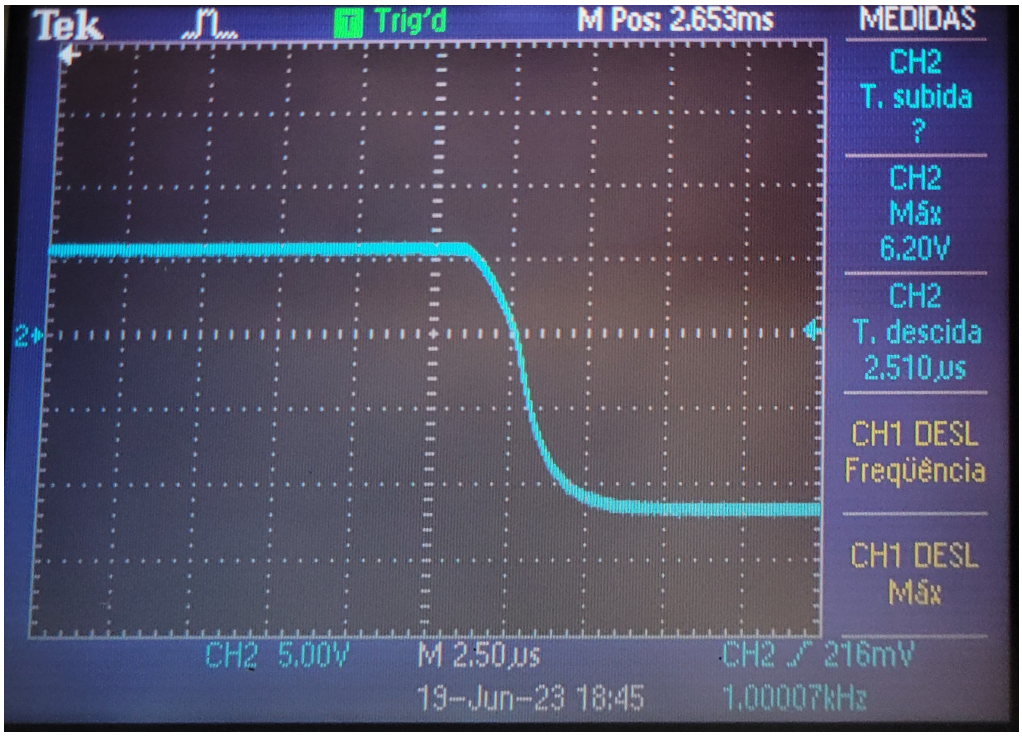
Nesse sentido, como a frequência nesse estágio dos testes está declarada no código como uma constante, a tensão da rede permanece dentro dos parâmetros normais, assim, são cumpridas as condições para iniciar o processo de recarga, como observado na Figura 44, em que o led amarelo referente ao estágio C está ativo, e o led verde referente ao acionamento do relê também está ativo, representando desse modo que está ocorrendo o processo de recarga.

Figura 41 – Estação conectada e VE disponível - tempo de subida



Fonte: Do autor (2023)

Figura 42 – Estação conectada e VE disponível - tempo de descida



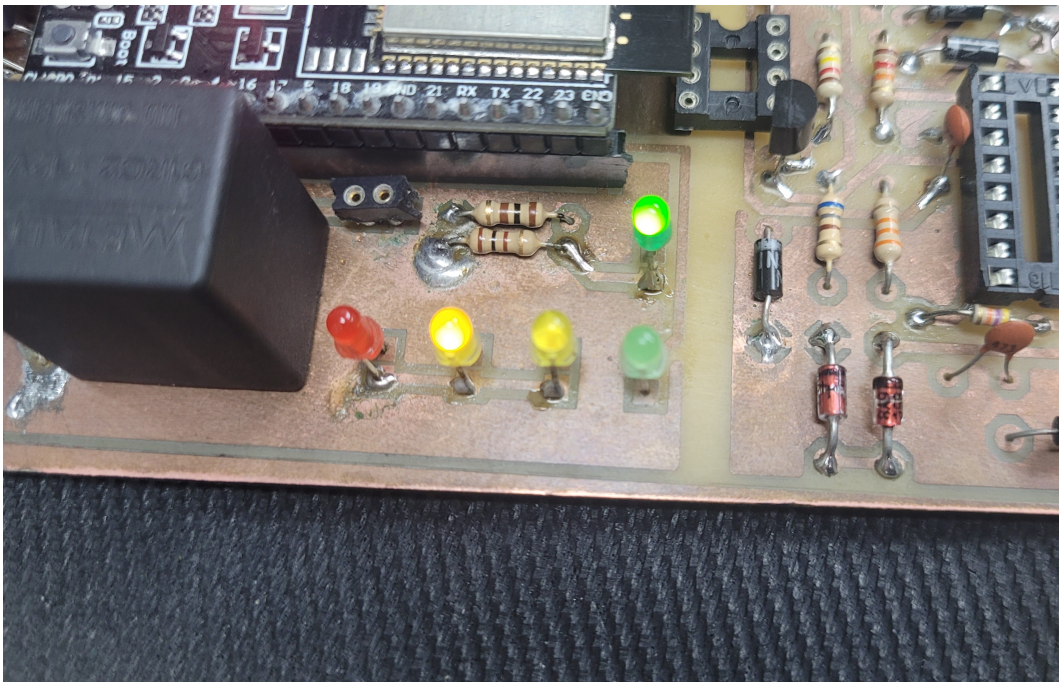
Fonte: Do autor (2023)

Figura 43 – Estação conectada e VE disponível - visualização dos dados parte 1

```
18:42:00.282 -> Ciclo de trabalho: 66.67%
18:42:01.285 -> Tensao Va: 5.1448V
18:42:01.285 -> Tensao rede: 312.7853V
18:42:01.332 -> Frequencia: 138.00Hz
```

Fonte: Do autor (2023)

Figura 44 – Estação conectada e VE disponível - visualização dos dados parte 2



Fonte: Do autor (2023)

3.1.4.4 Estação conectada, VE disponível e necessitando ventilação

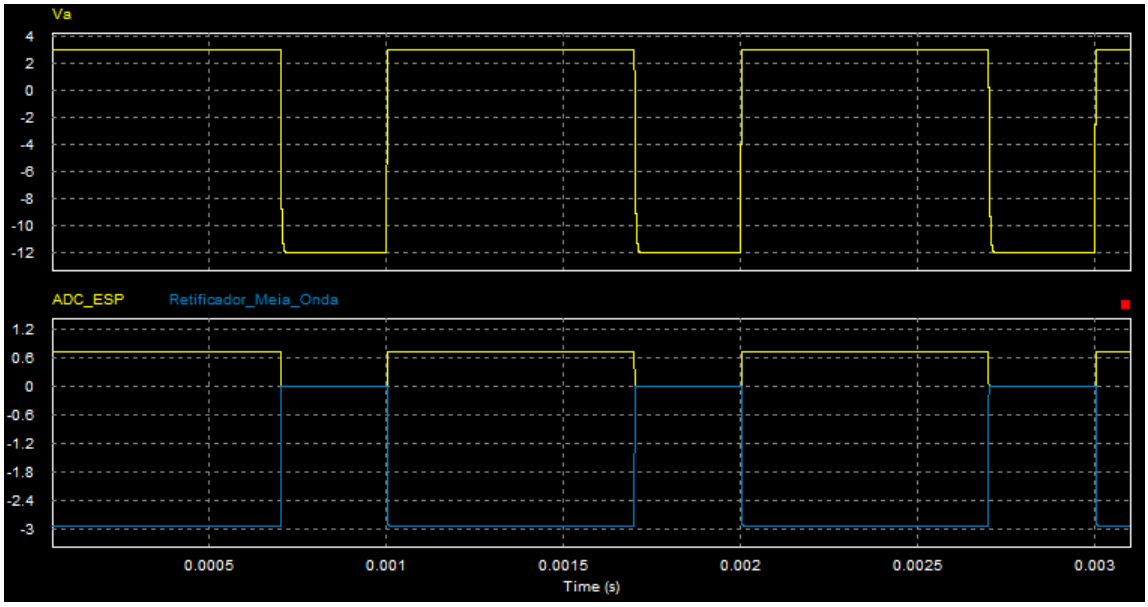
Para o último estágio, em vez de chavear o resistor de 1.300 Ω, o sistema de controle do VE aciona o resistor de 270 Ω, indicando que o veículo necessita de ventilação externa. O processo de recarga ainda é permitido, mas se o veículo não tiver as requisições atendidas e o sobreaquecimento continuar, este pode encerrar o processo de recarga a qualquer momento.

Desse modo, pelo novo divisor de tensão o valor de *Va* atinge 3 V de acordo com a simulação da Figura 45, assim como o valor do ADC do ESP resulta em 0,75 V, cumprindo as diretrizes da Tabela 9.

Na parte prática, a tensão obtida em *Va* é de exatamente 3 V, enquanto que o retificador de meia onda se obteve 2,80 V como analisado na Figura 46, uma diferença de 0,2 V que já é observada nos demais estágios de operação.

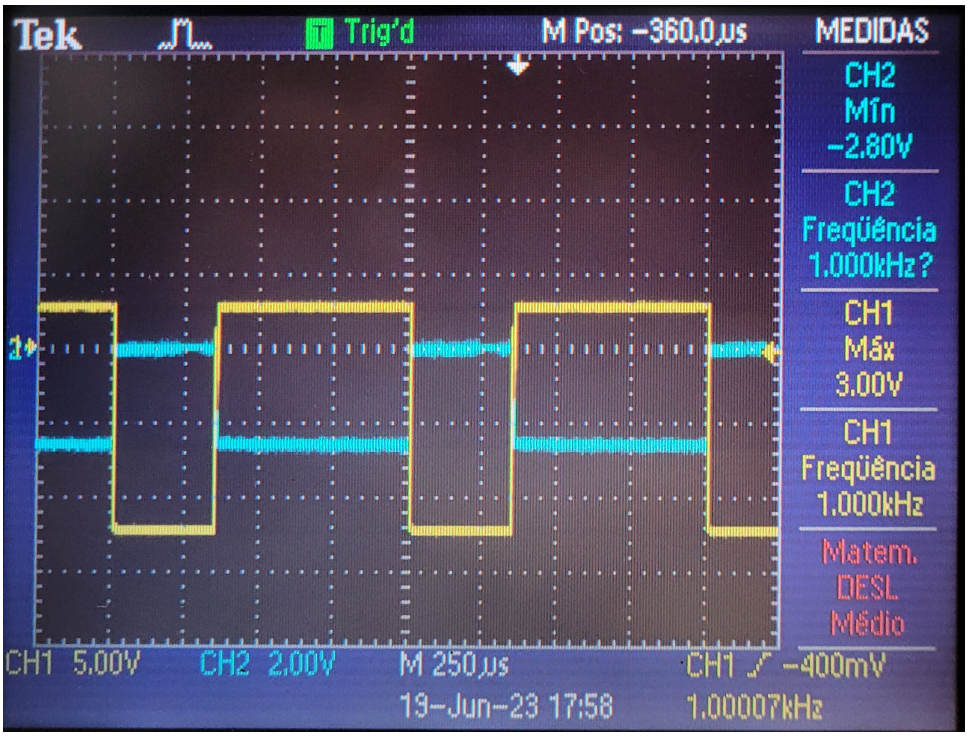
A tensão que é lida pelo ADC ficou com o valor de 0,55 V, observado na Figura 47, onde nos cálculos teóricos se obteve 0,75 V, essa discrepância se deve tanto a imprecisão do retificador de meia onda, quanto ao resistor de 270 Ω inserido no circuito, que pode ter variações, e para

Figura 45 – Simulação da estação conectada, VE disponível e necessitando ventilação



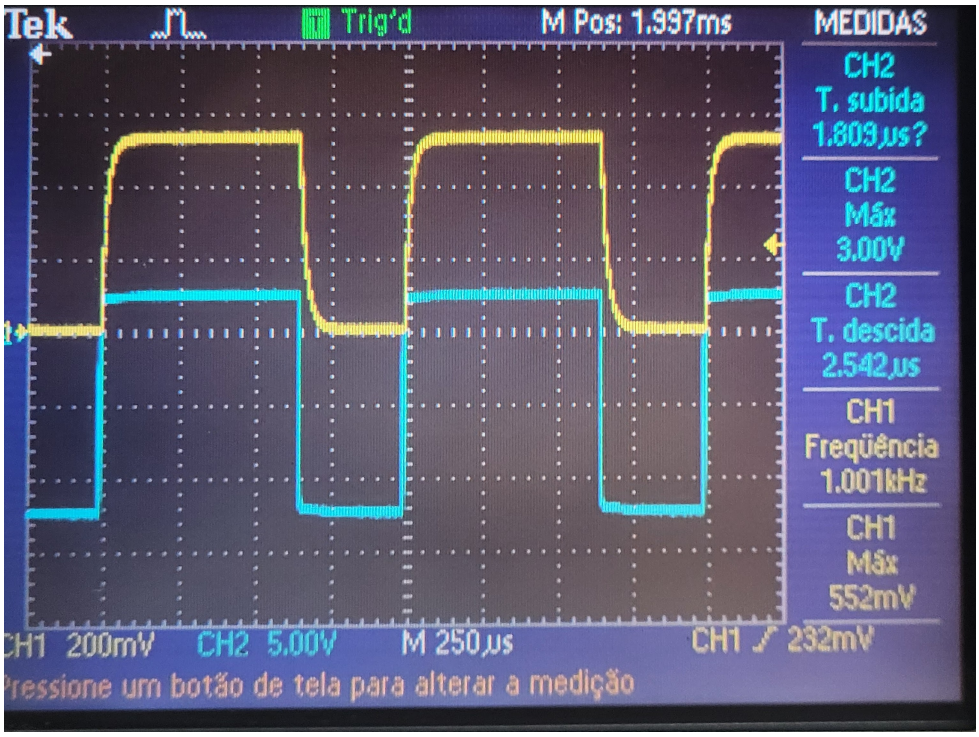
Fonte: Do autor (2023)

Figura 46 – Dados práticos de Estação conectada, VE disponível e necessitando ventilação - Parte 1



Fonte: Do autor (2023)

Figura 47 – Dados práticos da estação conectada, VE disponível e necessitando ventilação - Parte 2



Fonte: Do autor (2023)

uma tensão mais baixa, se tornam mais aparentes. Contudo mesmo com a diferença, o circuito funcionou como projetado, pois a leitura ADC ficou no limiar da faixa permitida pela norma.

O tempo de subida para o estágio D de acordo com a Figura 48 foi de 1,326 μs, onde se exige pela norma 5 μs no máximo, assim:

$$Diferenca\% = \frac{5 - 1,236}{5} \cdot 100 \tag{63}$$

$$Diferenca\% = 75,28\ \% \tag{64}$$

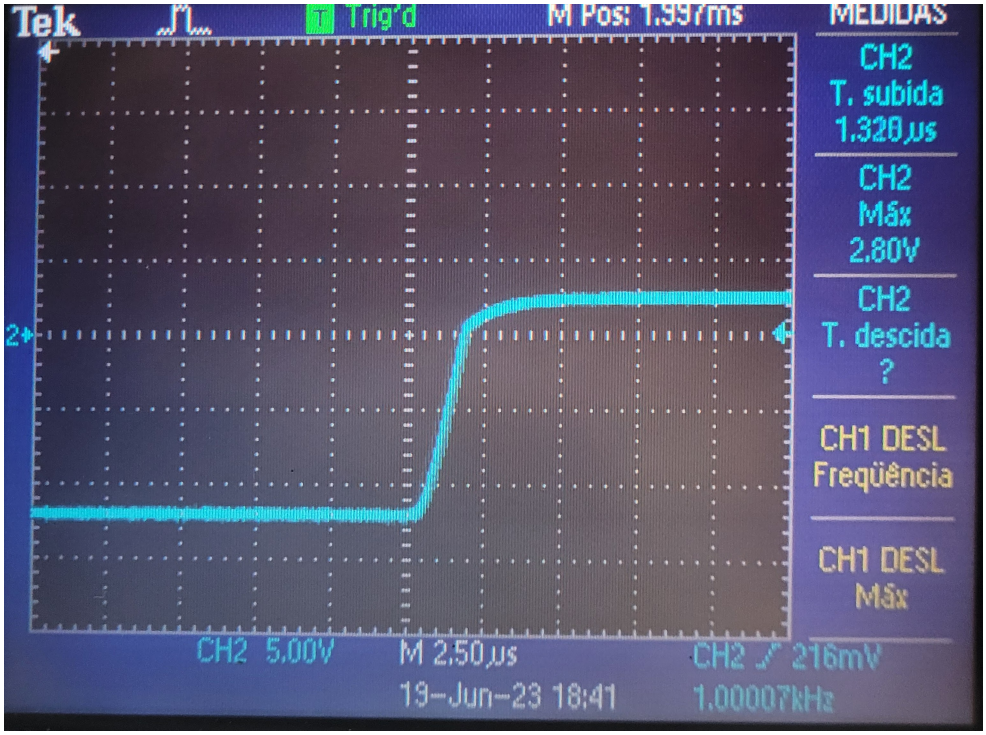
Indicando que a razão de velocidade de subida da onda obtida e da exigida se manteve na mesma proporção dos estágios anteriores.

Para o tempo de descida, a diferença ficou ainda maior, em torno de 85 % utilizando o dado obtido na Figura 49, implicando no cumprimento da norma.

A visualização dos dados no monitor da Figura 50 comprova que a tensão *Va* ficou no limiar da faixa permitida de 2 V, mas ainda sim de acordo com o exigido, levando ao funcionamento observado na Figura 51, em que o led vermelho representando o estágio D está acionado assim como o led verde indicando o processo de recarga ativo.

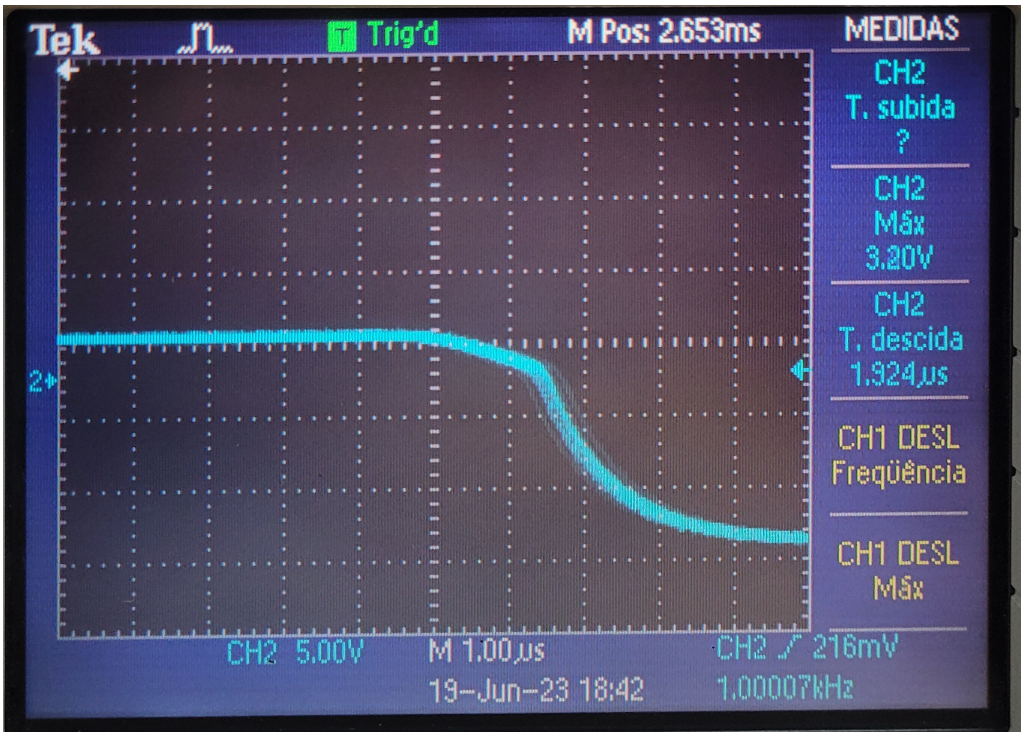
No entanto, se as condições exigidas de ventilação não são atendidas, o controle do VE abre o contato referente ao resistor de 270 Ω, encerrando o processo de recarga e regressando

Figura 48 – Estação conectada, VE disponível e necessitando ventilação - tempo de subida



Fonte: Do autor (2023)

Figura 49 – Estação conectada, VE disponível e necessitando ventilação - tempo de descida



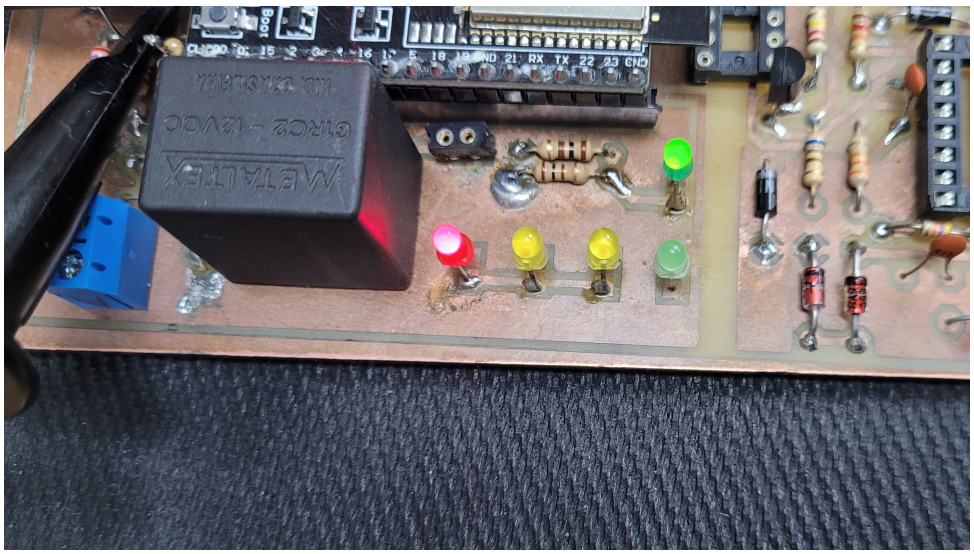
Fonte: Do autor (2023)

Figura 50 – Estação conectada, VE disponível e necessitando ventilação - visualização dos dados parte 1

```
18:33:57.709 -> Ciclo de trabalho: 66.67%
18:33:58.700 -> Tensao Va: 2.0070V
18:33:58.748 -> Tensao rede: 312.7853V
18:33:58.748 -> Frequencia: 138.00Hz
```

Fonte: Do autor (2023)

Figura 51 – Estação conectada, VE disponível e necessitando ventilação - visualização dos dados parte 2



Fonte: Do autor (2023)

ao sistema do estágio B, representado na Figura 37. O tempo necessário desde a indicação da necessidade de ventilação até os requisitos serem atendidos não é contemplado em norma, ficando a cargo dos fabricantes de veículos essa indicação.

3.1.4.5 Estação não disponível

Para simular que temporariamente a estação está indisponível para a recarga, é feita a leitura de uma porta do ESP 32, que emula o acionamento de um botão externo, assim, como pode ser visto na Figura 52, em que o jumper aplicado fecha o contato entra a porta do microcontrolador e a malha de terra, assim, como a porta possui um pull up interno acionado por software, lê a variável como nível baixo, indicando que não é possível fornecer energia ao VE.

Nesse sentido, é observado na Figura 52, que mesmo a estação estando no estágio C, em que normalmente o fluxo de energia ocorre, o led referente ao processo de recarga em si está desativado, indicando que o relê também está desativado não acionando a bobina do contator.

Assim, pela norma nesse estágio o ciclo de trabalho deve permanecer em 100 % como declarado na Tabela 7. O resultado da forma de onda obtida se encontra na Figura 53, representada pela onda de saída do gerador do Esp 32, que apresenta um decrescimento ao nível zero por instantes muito reduzidos de tempo. Esta situação ocorre devido a atualização do ciclo de

Figura 52 – Estação não disponível - visualização



Fonte: Do autor (2023)

trabalho, entretanto, isto não deve ser reconhecido pelo VE com a aplicação de um filtro passa baixas na saída do circuito do pino piloto. A onda resultante em *Va* é um sinal contínuo com 12 V de valor médio, já que a tensão gerada pelo Esp no comparador é sempre maior.

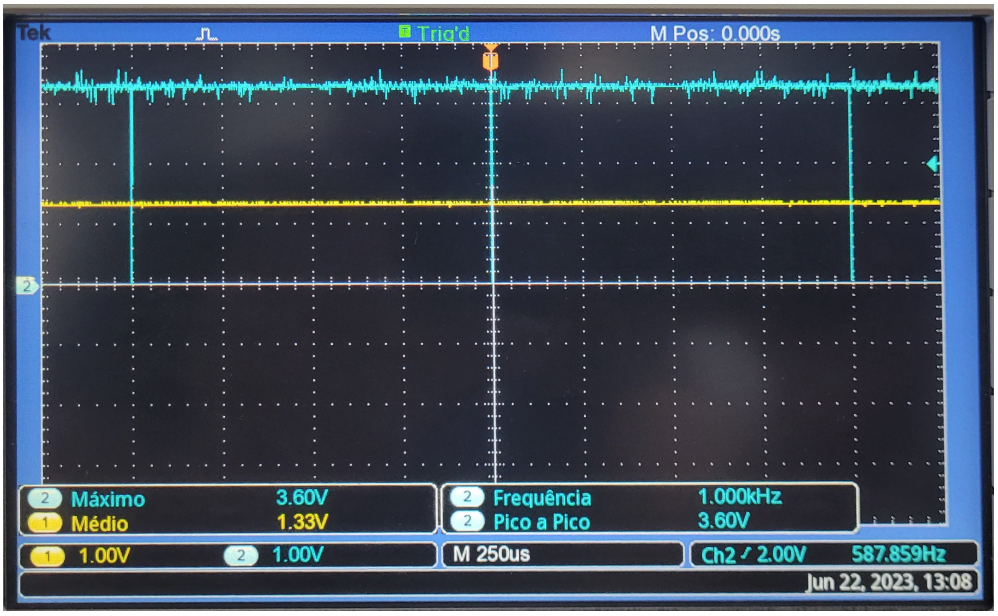
3.1.4.6 Situações de erro

Diferentemente do estágio anterior, a situação declarada como erro é um mau funcionamento da estação de recarga, em que pode ser informado gerando uma tensão *Va* constante de -12 V, demonstrado na Tabela 7 com o estado F, de falha.

Para emular isto, é informada uma corrente ao software maior do que o permitido pela norma, que é 81 A, assim, com esta condição, o ciclo de trabalho computado é de 0 %, fazendo com que a tensão gerada pelo microcontrolador no comparador seja sempre menor, gerando um sinal constante de valor médio - 12 V, como observado na Figura 54.

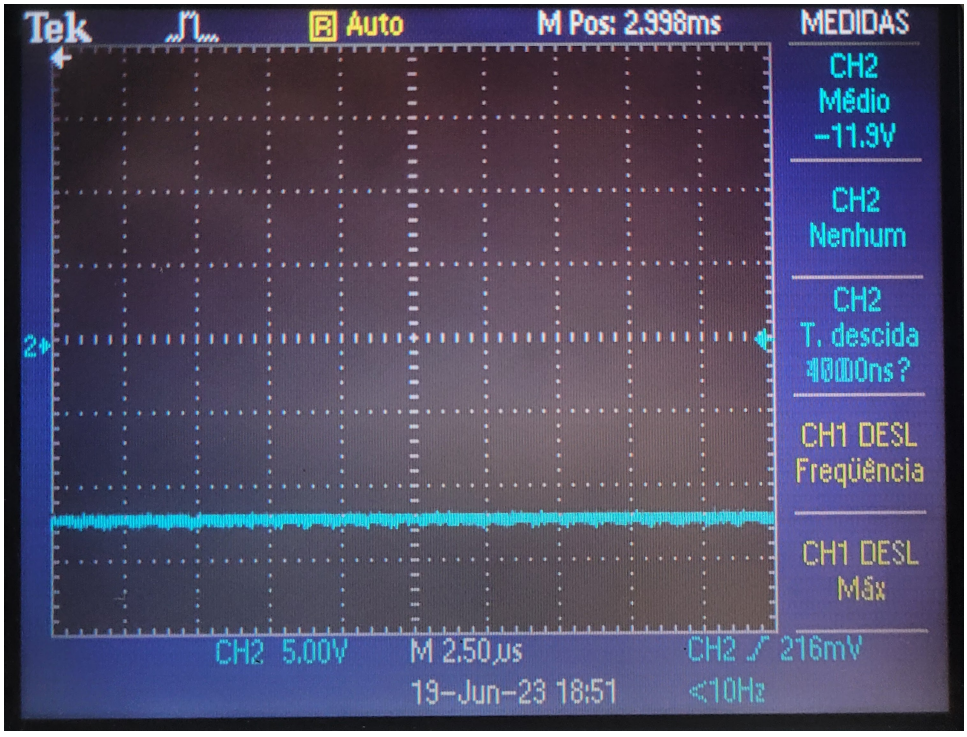
Por fim, o último estado que a norma se refere é o E, em que há um curto circuito entre o cabo piloto e o cabo de proteção, assim, a tensão resultante em *Va* é 0 V como visto na Figura 55, e como a medição de *Va* é feita de forma constante pelo microcontrolador, quase que instantaneamente o relê é desativado cessando o processo de carregamento.

Figura 53 – Estação não disponível - forma de onda



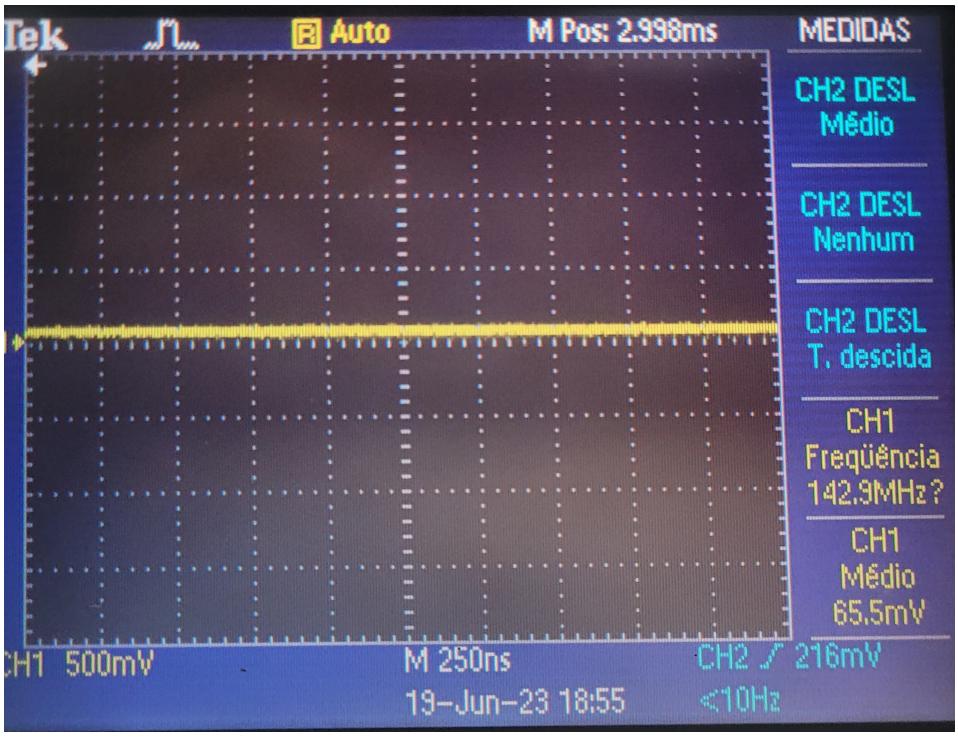
Fonte: Do autor (2023)

Figura 54 – Tensão Va em caso de erro na estação



Fonte: Do autor (2023)

Figura 55 – Tensão Va em caso de curto na estação



Fonte: Do autor (2023)

3.2 LEITURA DA REDE

A norma (ABNT, 2021) não pede que as estações de recarga do modo 3 obrigatoriamente façam leitura da tensão da rede, mas para se ter um maior controle do processo, a leitura se faz necessária com o intuito de cessar o processo de recarga se a tensão da rede aumentar 20% ou diminuir 20%, seja por fatores externos ou pelo processo de recarga do VE.

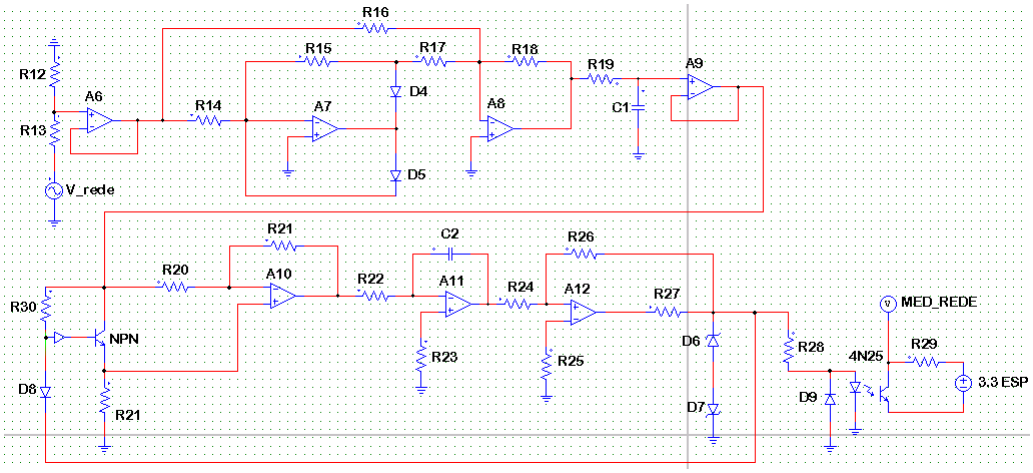
Neste trabalho optou-se por realizar a leitura de forma isolada, elevando o nível de segurança da placa de processamento dos sinais e do microcontrolador. Desta forma, o circuito passa a ter 2 referências distintas, uma para a função piloto e o microcontrolador, e outra referência para a medição da rede.

Também considera-se neste trabalho uma rede trifásica equilibrada, fazendo a leitura de uma das fases e generalizando para as demais fases. Entretanto para medir as outras fases basta replicar mais duas vezes a topologia desenvolvida. Este circuito pode ser visualizado na Figura 56, onde contém um divisor de tensão, seguido de um retificador de precisão com filtro capacitivo, gerando uma tensão retificada, a qual é aplicada a um oscilador controlado por tensão (OCT), finalizando com o optoacoplador que é acionado na frequência do oscilador.

3.2.1 Divisor de tensão

Para fazer a captação do sinal da rede, é utilizado um divisor de tensão, o qual é apresentado na Figura 57. Este divisor de tensão realiza uma redução de tensão para adequar o nível

Figura 56 – Circuito geral da rede simulado



Fonte: Do autor (2023)

elevado da rede ao nível de tensão dos circuitos eletrônicos de condicionamento de sinal, assim:

$$Vpico = 220 \cdot \sqrt{2} \tag{65}$$

$$Vpico = 311,13 \text{ V} \tag{66}$$

O divisor de tensão calculado é projetado para ter aproximadamente 10 V no circuito de medição, assim:

$$VR1pico = \frac{Vpico \cdot R12}{R12 + R13} \tag{67}$$

$$VR1 = \frac{311 \cdot 10000}{300000 + 10000} \tag{68}$$

$$VR1pico = 10,03 \text{ V} \tag{69}$$

Desse modo, o valor de tensão nominal a ser medido é de aproximadamente 10 V, em cima do resistor de 10 kΩ. E para os limites de tensão onde o processo de recarga sera mantido:

$$Lim+ = VR12pico \cdot 1,2 \tag{70}$$

$$Lim+ = 10,03 \cdot 1,2 \tag{71}$$

$$Lim+ = 12,04 \text{ V} \tag{72}$$

$$Lim- = VR12pico \cdot 0,8 \tag{73}$$

$$Lim- = 10,03 \cdot 0,8 \tag{74}$$

$$Lim- = 8,02 \text{ V} \tag{75}$$

Como o divisor de tensão é aplicado em uma alta tensão, se faz necessário calcular a potência dissipada pelo resistor de 300 kΩ:

$$IR13 = \frac{VR13}{R13} \tag{76}$$

$$IR13 = \frac{311 - 10,03}{300000} \tag{77}$$

$$IR13 = 1 \text{ mA} \tag{78}$$

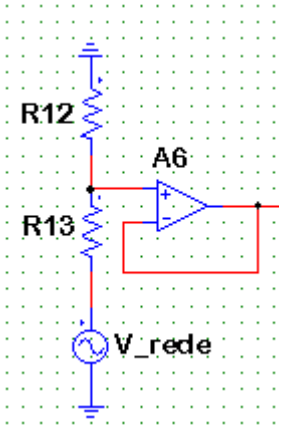
$$PotR13 = VR13 \cdot IR13 \tag{79}$$

$$PotR13 = 300,97 \cdot 1 \cdot 10^{-3} \tag{80}$$

$$PotR13 = 0,3 \text{ W} \tag{81}$$

Então é necessário utilizar um resistor de pelo menos 0,5 W para o resistor $R13$. Por fim, para realizar o casamento de impedâncias com o próximo estágio do circuito se aplicou um amplificador operacional com a topologia buffer no divisor de tensão.

Figura 57 – Divisor de tensão para leitura da rede



Fonte: Do autor (2023)

3.2.2 Retificador de precisão

Para ter uma maior precisão e por se tratar de uma tensão baixa na saída do buffer, em vez de um retificador de onda completa convencional, é desenvolvido um retificador de onda completa a base de amplificadores operacionais.

A Figura 59a mostra todo o circuito do retificador de onda completa simulado, que pode ser subdividido em duas partes, que são um amplificador retificador de precisão de meia onda e um amplificador somador.

A Figura 59b destaca o retificador de meia onda, que possui topologia similar ao circuito já aplicado para fazer a medição da tensão *Va* no circuito piloto. A imagem 58 ajuda a compreender melhor o funcionamento do circuito, pois traz o diagrama de blocos de cada etapa.

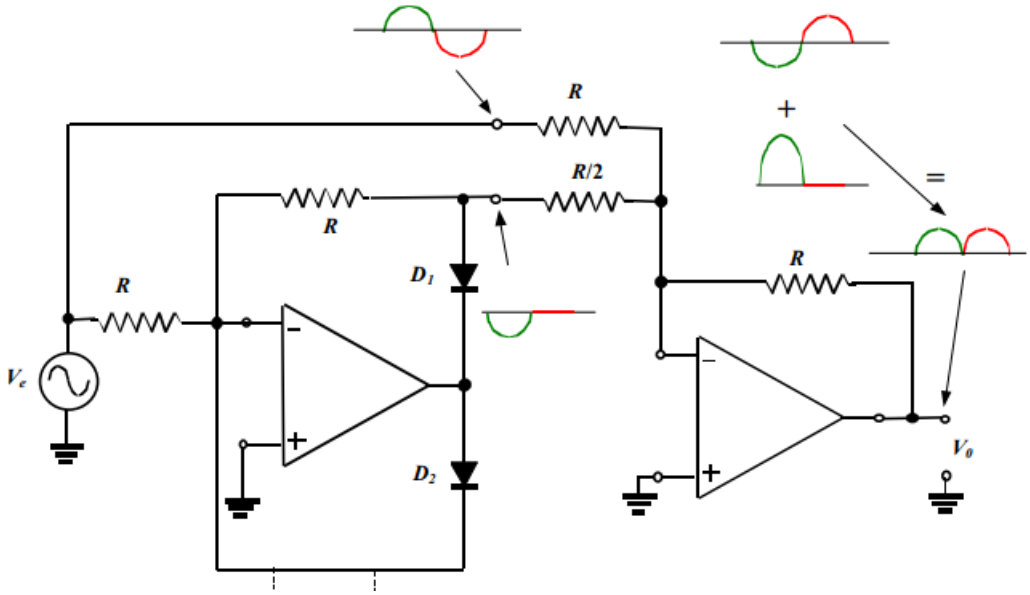
Nesse sentido, a tensão de saída do retificador de meia onda, que é a parcela positiva da onda com ganho de -1 pela topologia inversora, é aplicada ao amplificador inversor em destaque na Figura 60a, que pela razão de resistores:

$$Vout = -\frac{Vin \cdot 10k}{5k} \tag{82}$$

$$Vout = -2\,Vin \tag{83}$$

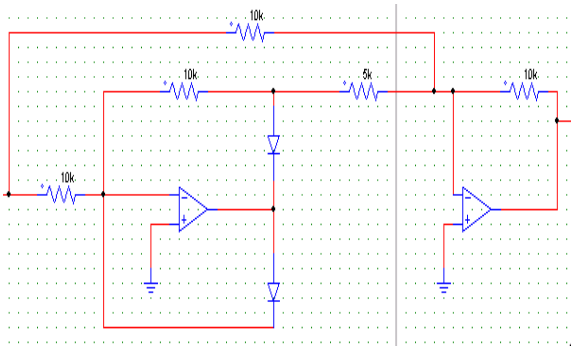
Assim a saída do retificador de precisão de meia onda atinge um ganho de -2 para essa parcela do sinal. Assim, analisando agora o amplificador somador da Figura 60b, este realiza a soma da parcela positiva da onda com ganho final de 2, com a onda original invertida no braço superior do circuito, gerando assim uma retificação completa da onda como visto na imagem 58, que para a aplicação do circuito, se espera uma tensão de pico de 10,03 V.

Figura 58 – Diagrama de blocos retificador



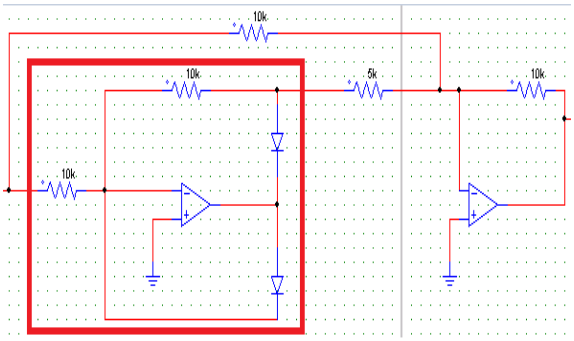
Fonte: Adaptado de Unesp

(a) Retificador de precisão de onda completa



Fonte: Do autor (2023)

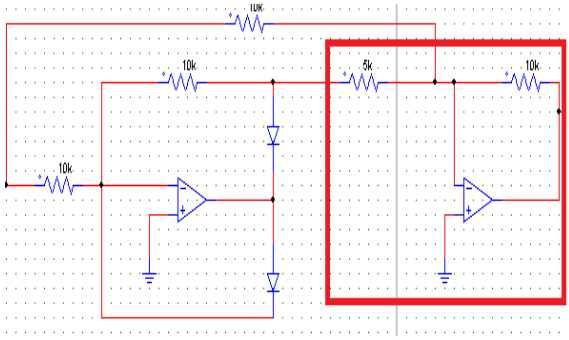
(b) Destaque ao retificador de meia onda



Fonte: Do autor (2023)

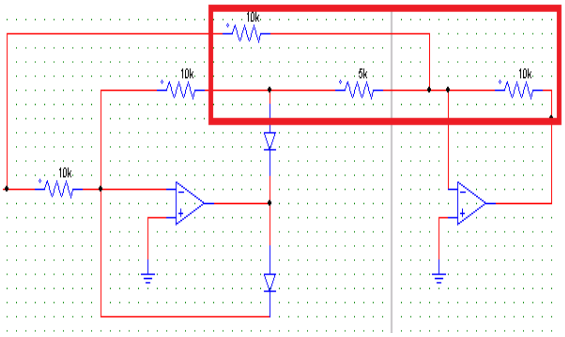
Figura 59 – Retificador de precisão de onda completa - Parte 1

(a) Destaque ao amplificador do meia onda



Fonte: Do autor (2023)

(b) Destaque ao amplificador somador



Fonte: Do autor (2023)

Figura 60 – Retificador de precisão de onda completa - Parte 2

3.2.3 Filtro

Primeiramente é necessário calcular a tensão média resultante da aplicação do filtro, que para uma onda senoidal pode ser dada por:

$$Vmed = \frac{vpico}{\sqrt{2}} \cdot 0,9 \tag{84}$$

$$Vmed = \frac{10,03}{\sqrt{2}} \cdot 0,9 \tag{85}$$

$$Vmed = 6,38 \text{ V} \tag{86}$$

Desse modo, é necessário determinar o filtro a ser utilizado após o retificador de precisão, com a aplicação de um buffer na saída do filtro para realizar o casamento de impedâncias com o próximo estágio que é o oscilador controlado por tensão. Assim, para implementar um filtro RC simples, pode-se determinar a tensão de ripple pela seguinte fórmula:

$$Vripple = \frac{Vpico}{2 \cdot f \cdot C \cdot R} \tag{87}$$

Em que a tensão de ripple buscada é de 0,1 V, e o capacitor utilizado de 2 μF, assim:

$$0,1 = \frac{10,03}{2 \cdot 60 \cdot 2 \cdot 10^{-6} \cdot R} \tag{88}$$

$$R = \frac{10,03}{2 \cdot 60 \cdot 2 \cdot 10^{-6} \cdot 0,1} \tag{89}$$

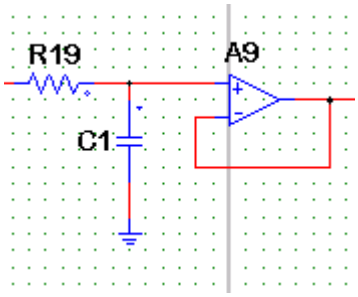
$$R = 418 \ k\Omega \tag{90}$$

3.2.4 Resultados retificador

O resultado obtido do simulador se encontra na Figura 62. Verifica-se que os resultados obtidos coincidiram com o resultado teórico, comprovando a eficácia da topologia.

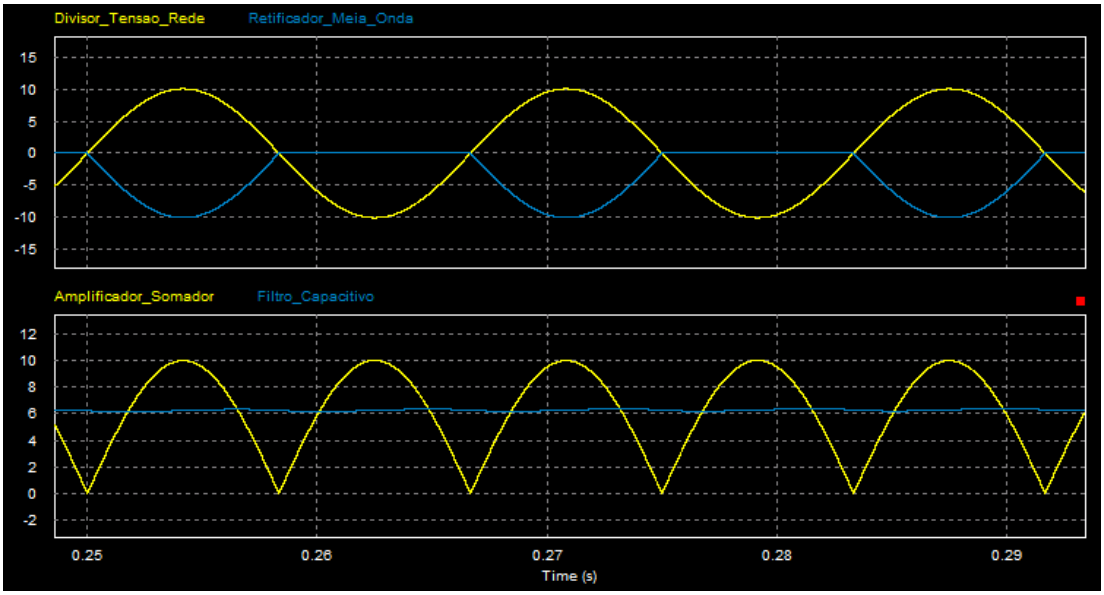
Dessa forma, para o teste experimental, é utilizado metade do valor da tensão simulada, pois inicialmente o teste é feito com um gerador de ondas com tensão limitada, portanto se analisa também a proporcionalidade. Nesse sentido, na Figura 63 se observa o resultado obtido pelo retificador de meia onda em azul, em comparação ao sinal original em amarelo, que se

Figura 61 – Filtro simulado



Fonte: Do autor (2023)

Figura 62 – Gráficos da simulação do retificador da rede



Fonte: Do autor (2023)

diferencia da simulação apenas por um pequeno sinal na fase não retificada, possivelmente pela tensão de offset do amplificador utilizado, já que nesse ponto a tensão deve ser de 0 V na saída do ampop.

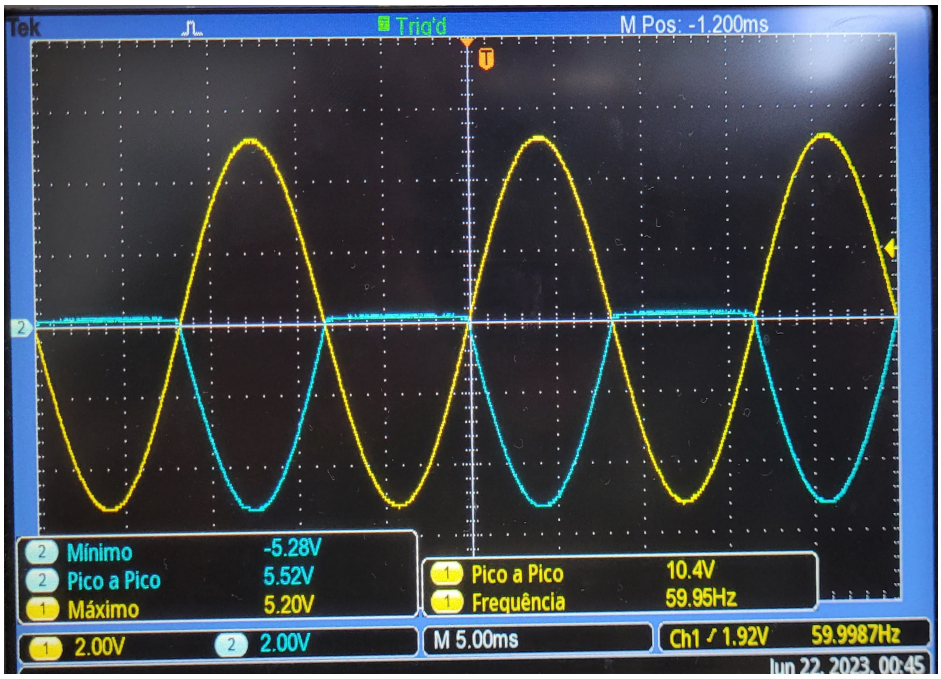
Na Figura 64, se identifica a saída do amplificador somador, apresentando o sinal retificado com o dobro da frequência da rede, e com a tensão de pico muito próxima do valor de entrada. Para validar, é analisado o valor médio obtido, assim:

$$Vmed = \frac{Vpico \cdot 0,9}{\sqrt{2}} \tag{91}$$

$$Vmed = \frac{5,04 \cdot 0,9}{\sqrt{2}} \tag{92}$$

$$Vmed = 3,21 \text{ V} \tag{93}$$

Figura 63 – Resultados retificador - Parte 2



Fonte: Do autor (2023)

Fechando então com o valor obtido experimentalmente e sendo comprovada a eficácia do retificador de precisão, pois o erro observado foi de:

$$Erro\% = \frac{3,22 - 3,21}{3,21} \cdot 100 \tag{94}$$

$$Erro\% = 0,3\ \% \tag{95}$$

3.2.5 Oscilador controlado por tensão

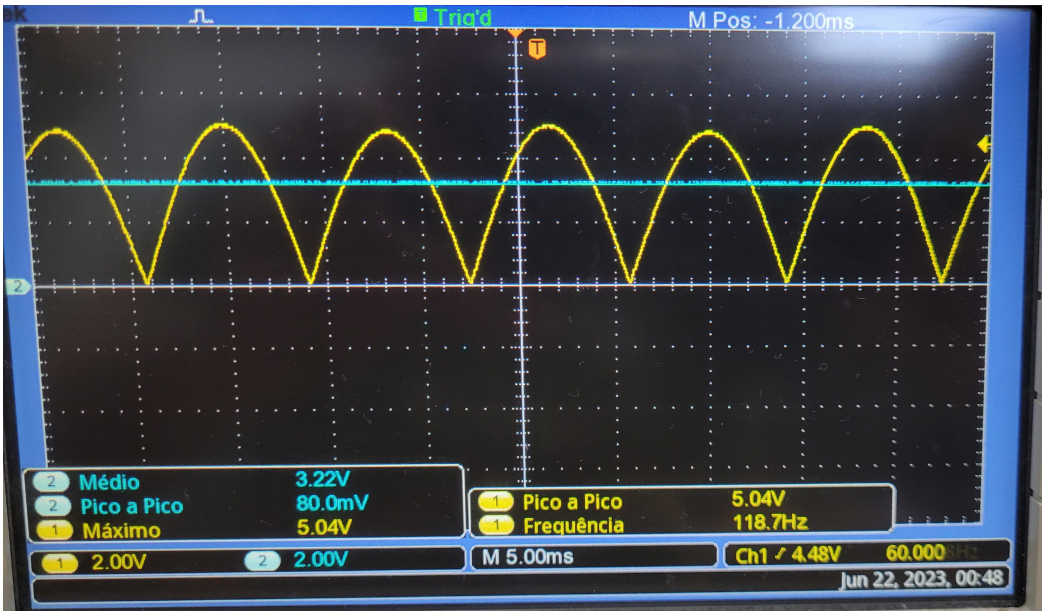
O oscilador controlado por tensão desenvolvido neste projeto tem como base e inspiração a mesma topologia apresentada em (ABREU, 1981), com o mesmo circuito como visto na Figura 65.

De maneira geral, o OCT recebe uma tensão constante na entrada e gera na saída uma onda quadrada com frequência proporcional ao sinal de entrada, com variação de tensão na saída controlada pela aplicação dos dois diodos zener em série, fixando tanto a tensão positiva como a negativa.

Para explicação do funcionamento, o OCT é dividido em três estágios. O primeiro visto na Figura 67 é um amplificador com ganho de mais um ou menos um dependendo se o transistor npn está em corte ou saturação, ou seja, sendo usado como uma chave eletrônica.

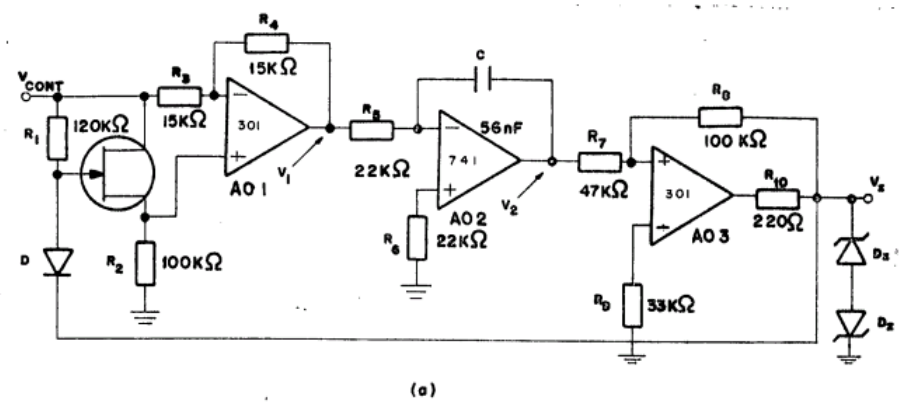
A situação do transistor é controlada pela realimentação do sinal de saída na base do transistor, ou seja, quando a tensão de saída é positiva, o diodo conduz, gerando uma queda de

Figura 64 – Resultados retificador - Parte 1



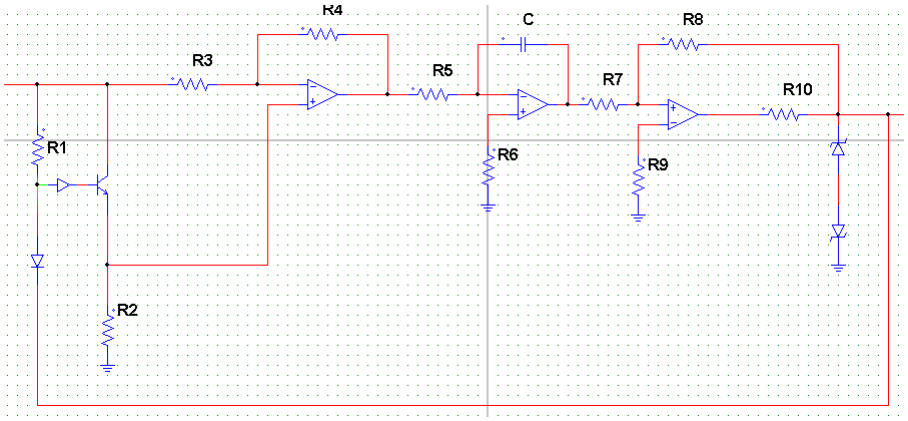
Fonte: Do autor (2023)

Figura 65 – Oscilador controlado por tensão



Fonte: Eulógio Chagas de Abreu (1981)

Figura 66 – Oscilador controlado por tensão simulado



Fonte: Do autor (2023)

tensão entre a base e o emissor do transistor de modo que a chave eletrônica está fechada, e assim, a tensão de saída do primeiro estágio é dada por:

$$Vout = -\frac{Vin \cdot R21}{R20} + Vin \cdot (1 + \frac{R21}{R20}) \tag{96}$$

$$Vout = -\frac{Vin \cdot 13.000}{13.000} + Vin \cdot (1 + \frac{13.000}{13.000}) \tag{97}$$

$$Vout = -Vin + 2 \cdot Vin \tag{98}$$

$$Vout = +Vin \tag{99}$$

E quando a tensão de saída do OCT é negativa, faz com que o diodo não conduza, mantendo o transistor bloqueado, pois a tensão de base do mesmo é zero. A tensão de saída do primeiro estágio nessas condições é dada por:

$$Vout = -\frac{Vin \cdot R21}{R20} \tag{100}$$

$$Vout = -\frac{Vin \cdot 13.000}{13.000} \tag{101}$$

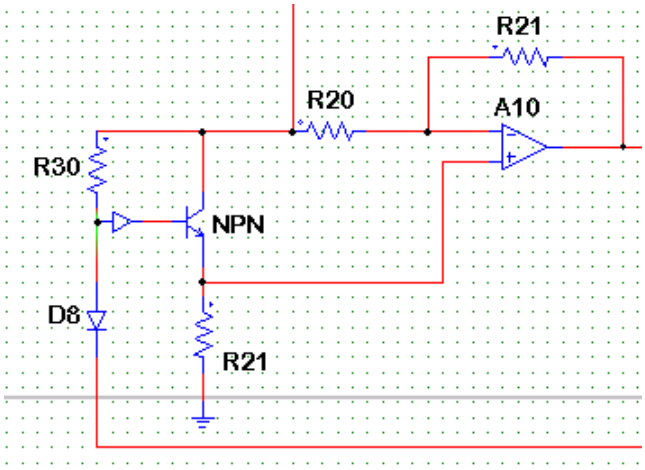
$$Vout = -Vin \tag{102}$$

Assim, se obtém o amplificador com ganho de mais um ou menos um, e como essa comutação da chave tem uma frequência aproximadamente fixa, gera uma onda quadrada de amplitude 2 vezes o sinal de Vin na saída do primeiro estágio do OCT.

3.2.5.1 OCT estágio 2

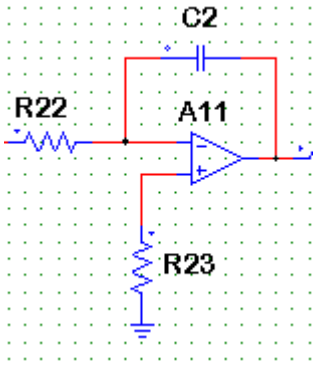
O segundo estágio é basicamente uma configuração integradora, que tem a onda quadrada resultante do estágio 1 e gera uma onda triangular na saída do segundo estágio, essa onda triangular serve como base de comparação para o terceiro estágio.

Figura 67 – OCT estágio 1 - Amplificador com ganho +1 ou -1



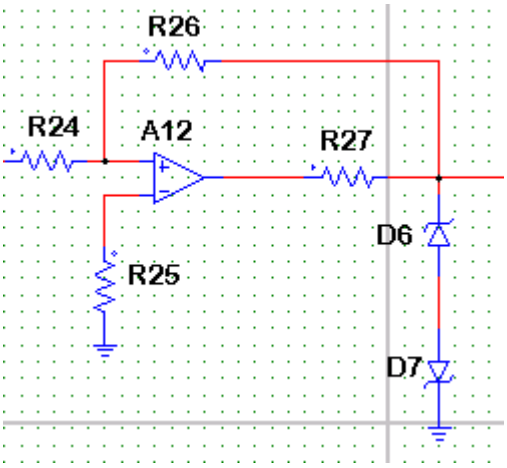
Fonte: Do autor (2023)

Figura 68 – OCT estágio 2 - Amplificador integrador



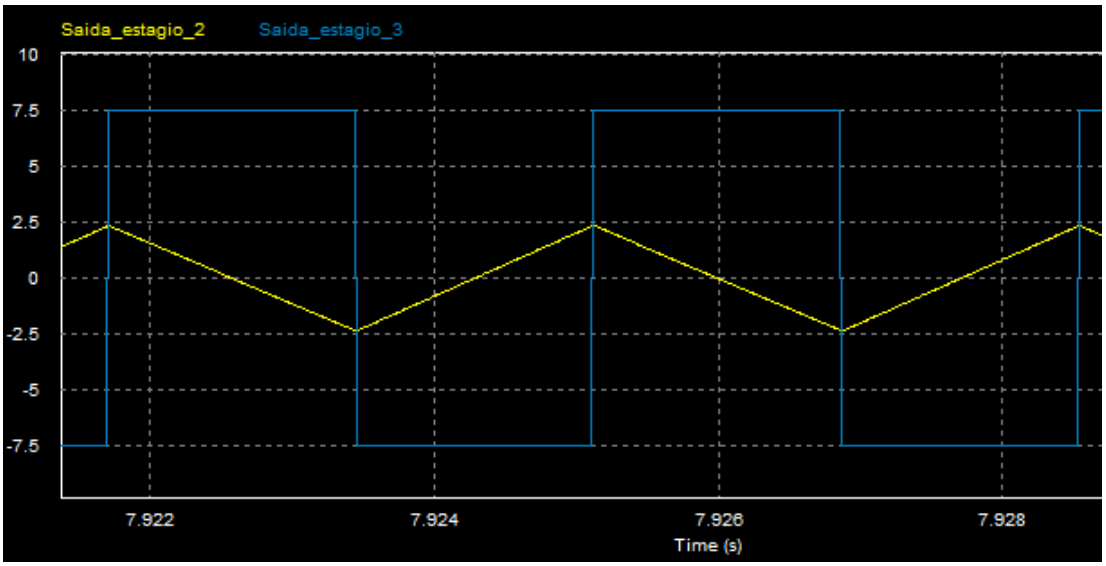
Fonte: Do autor (2023)

Figura 69 – OCT estágio 3 - Comparador por histerese



Fonte: Do autor (2023)

Figura 70 – Resultado simulado VCO - estágio 3



Fonte: Do autor (2023)

3.2.5.2 OCT estágio 3

O estágio 3 do OCT é um comparador por histerese, apresentado na Figura 69, que tem como entrada a onda triangular advinda do estágio 2. O circuito não opera na região linear graças a realimentação do estágio 3 para o estágio 1, e assim, os níveis de comparação da topologia são definidos pelo divisor de tensão composto pelos resistores $R24$ de 47 kΩ e $R26$ 150 kΩ, assim:

$$Vcomp = -\frac{Vz \cdot R24}{R26} \tag{103}$$

$$Vcomp = -\frac{Vz \cdot 47.000}{150.000} \tag{104}$$

$$Vcomp = -0,313 \cdot Vz \tag{105}$$

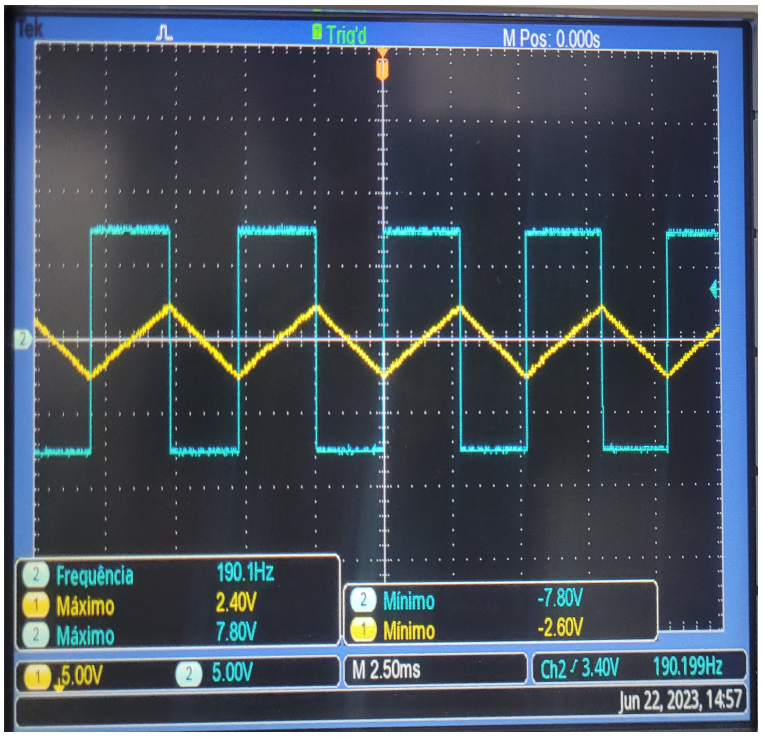
E considerando Vz como 7,5 V:

$$Vcomp = -2,35 \text{ V} \tag{106}$$

Desse modo, quando o valor da saída do integrador atingir 2,35 V, o estado de saída deve alterar de +Vz para -Vz, como visualizado na simulação da Figura 70 e no resultado obtido da Figura 71.

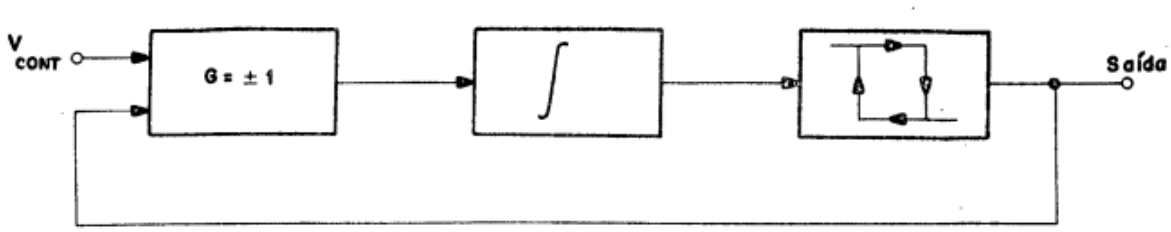
A onda amarela do resultado prático está com a função de inverter ativa do osciloscópio, demonstrando que o valor máximo do segundo estágio é comparado com o valor mínimo de saída do estágio 3, respeitando a equação 105.

Figura 71 – Resultado prático VCO - estágio 3



Fonte: Do autor (2023)

Figura 72 – VCO em blocos



Fonte: (ABREU, 1981)

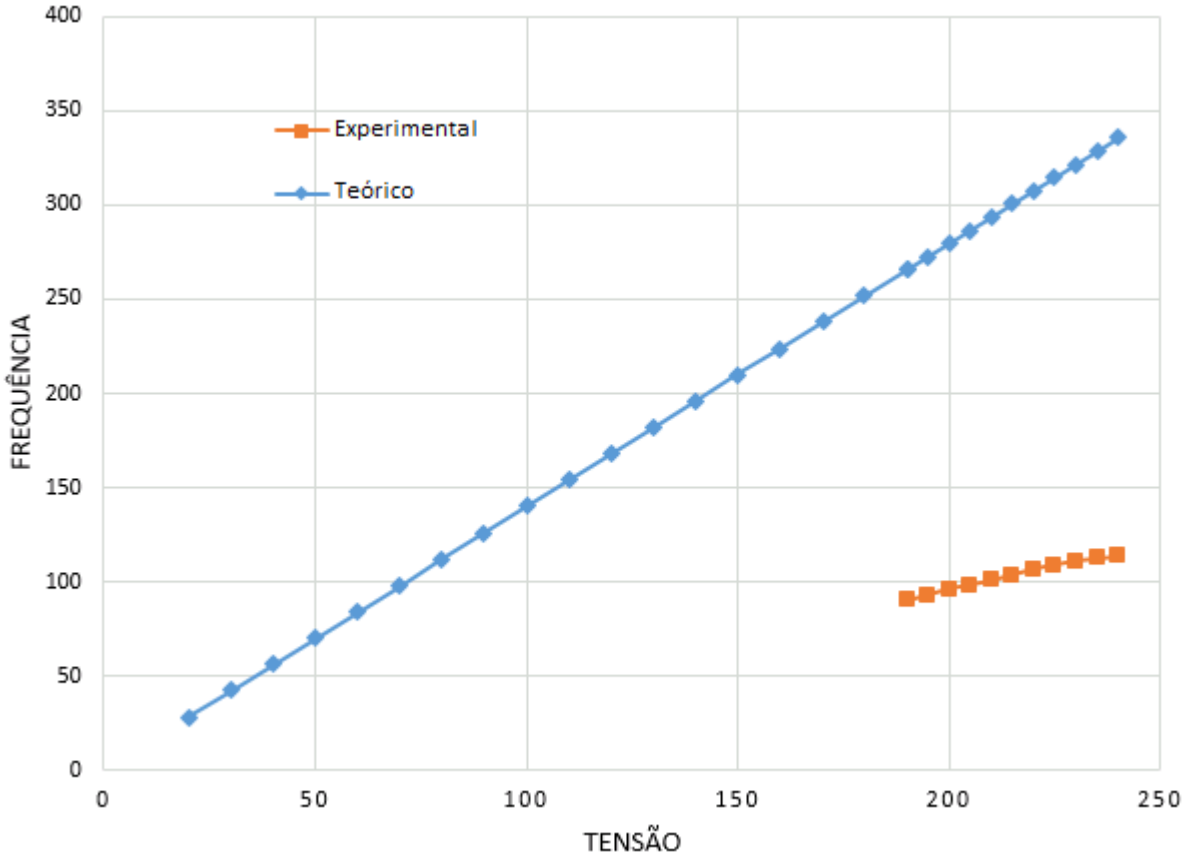
Se nota que os resultados obtidos são muito próximos, com o resultado experimental diferindo 0,1 V do teórico, comprovando a funcionalidade do comparador por histerese e do integrador.

3.2.5.3 Resultados OCT

Desse modo, na Figura 72 se têm um visão geral de cada etapa do circuito do oscilador controlador por tensão, que então, tem sua frequência de saída para o valor normal da rede dada por:

$$f = \frac{R26 \cdot Vin}{4 \cdot R22 \cdot R24 \cdot C2 \cdot Vz} \tag{107}$$

Figura 73 – Dados resultantes do OCT



Fonte: Do autor (2023)

$$f = \frac{150.000 \cdot 6,38}{4 \cdot 47.000 \cdot 47.000 \cdot 47 \cdot 10^{-9} \cdot (6,8 + 0,7)} \tag{108}$$

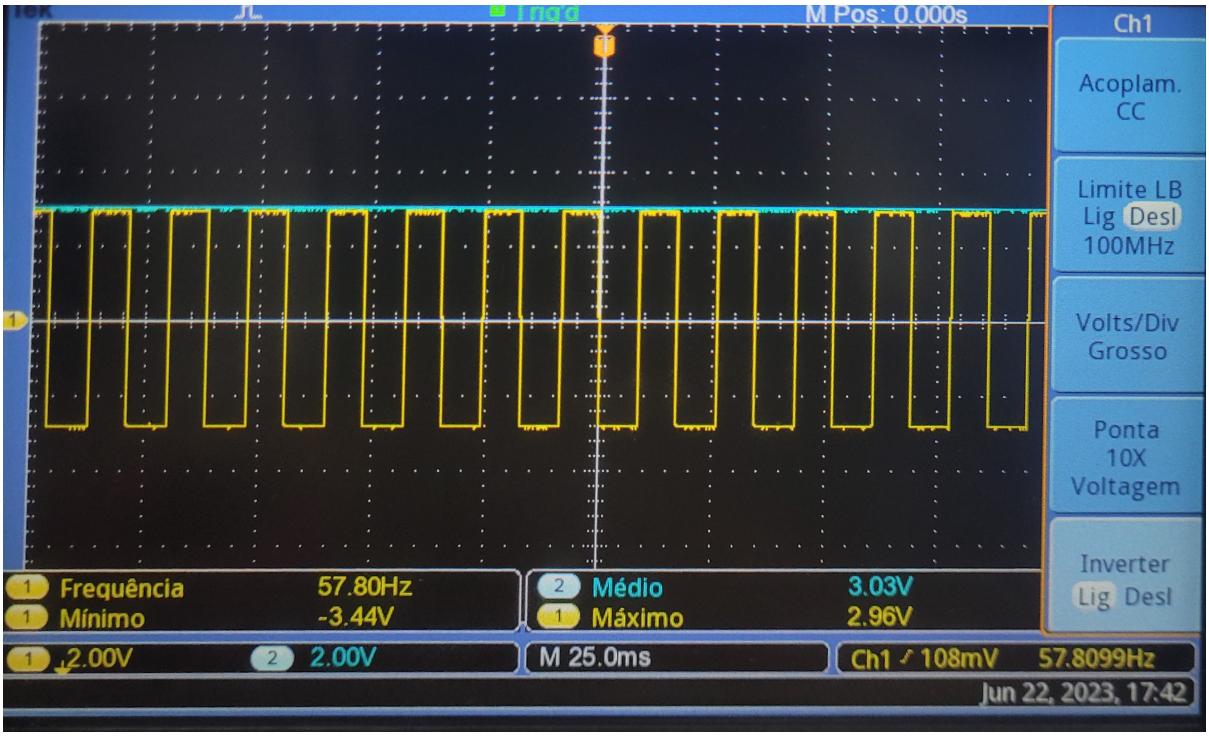
$$f = 307,25 \text{ Hz} \tag{109}$$

Considerando que o grampeamento da tensão de saída resulta de um diodo zener em série com um diodo que está polarizado com a tensão direta, optou pelo emprego de um zener com tensão de zener de 6,8 V, o qual somado a tensão direta de 0,7 V, proporciona o valor de projeto de 7,5 V.

Desse modo, se esperava do resultado experimental a mesma linearidade vista nas simulações, porém o circuito apresenta linearidade apenas para determinadas faixas, como é observado na Figura 73, onde a série 1 representa os valores teóricos, e a série 2 os valores obtidos em torno da tensão de 220 V.

A calibração, onde na Figura 74 é observado um exemplo de calibração na tensão de 110 V, ou seja, é onde é controlado o ganho unitário da topologia inversora do estágio 1, para a tensão negativa coincidir com a a tensão de entrada, demonstrando que o ganho está correto.

Figura 74 – Calibração realizada em 110 V



Fonte: Do autor (2023)

Mesmo após a calibração, os dados obtidos estão consideravelmente longe dos dados teóricos determinados pela série 1.

Para solucionar essa questão, foi adotado a realização de uma regressão logística com os dados obtidos, para chegar a uma relação da frequência pela tensão, e assim fazer a correção dos dados via software.

O resultado da regressão logística pode ser observado na Figura 75, onde a equação desenvolvida é polinomial, por mais que o coeficiente 2 é considerado baixo, para melhorar o resultado nas extremidades da onda que tendem a estabilização, assim, se chegou a um R quadrado de 0,9984, demonstrando a eficácia da aproximação. Desse modo, para os limites desejados:

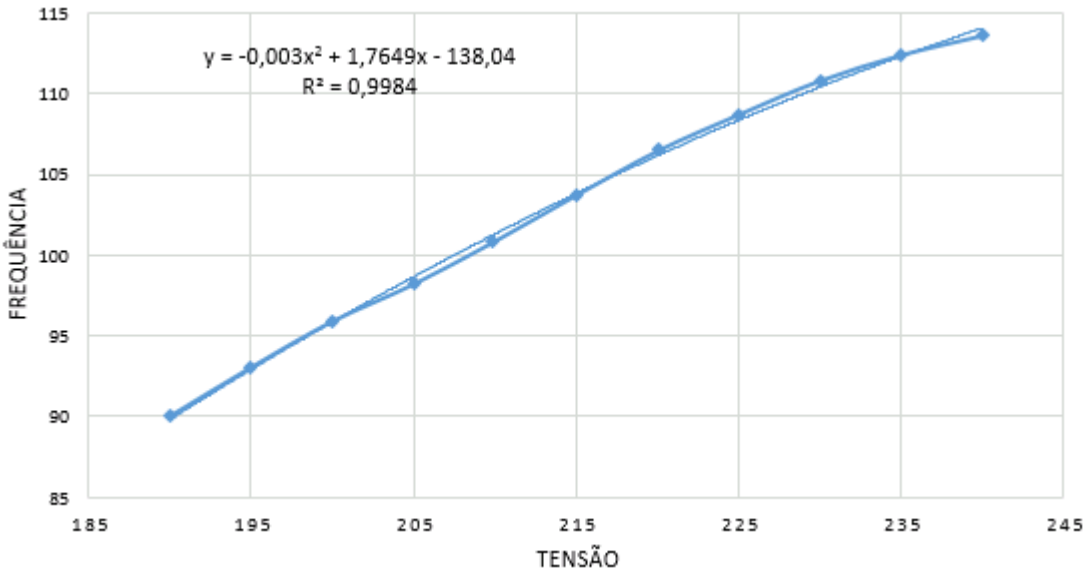
$$freq = -0,003 \cdot V^2 + 1,7649 \cdot V - 138,04 \tag{110}$$

$$freq+ = -0,003 \cdot (220 \cdot 1,2)^2 + 1,7649 \cdot (220 \cdot 1,2) - 138,04 \tag{111}$$

$$freq+ = 118,81 \text{ Hz} \tag{112}$$

$$freq- = -0,003 \cdot (220 \cdot 0,8)^2 + 1,7649 \cdot (220 \cdot 0,8) - 138,04 \tag{113}$$

Figura 75 – Fórmula para correção do OCT



Fonte: Do autor (2023)

$$freq- = 79,65 \text{ Hz} \tag{114}$$

Sendo assim, colocando estes limites e a própria fórmula resultante no microcontrolador, é possível contornar o resultado não esperado para o circuito funcionar dentro das especificações iniciais.

3.2.6 Optoacoplador

Nesse estágio do circuito de medição da rede é realizada efetivamente a isolação do circuito, pois de um lado do optoacoplador está o circuito de medição da rede, com uma referência, e do outro está o circuito da função piloto com outra referência, sendo estas separadas pela atuação do optoacoplador.

Segundo a Figura 76, o opto está situado na saída do OCT, ou seja, o acionamento da saída do optoacoplador é de acordo com a frequência gerada pelo oscilador controlado por tensão, e então medindo a frequência na saída do optoacoplador e tendo a relação da equação 107, é possível determinar a tensão de entrada medindo a frequência de saída de forma isolada.

O dispositivo selecionado é o 4N25, um optoacoplador fototransistorizado, que atende as especificações necessárias, tendo uma isolação para corrente alternada à 60 Hz de frequência de 7.500 V de pico. A queda de tensão do led em uma corrente típica de 10 mA é de 1,15 V, então:

$$R = \frac{7,5 - 1,15}{10 \cdot 10^{-3}} \tag{115}$$

$$R = 635\ \Omega \tag{116}$$

Com base no resultado da equação 116, adotou-se o valor comercial mais próximo de 680 Ω. Além disso, é adicionado um diodo *D*9 de roda livre pois a máxima tensão reversa do optoacoplador é de 3 V, e como a onda quadrada excursiona de -7,5 V até 7,5 V, o diodo de roda livre assegura que a tensão negativa não danifique o componente.

Para a saída do 4N25, outra característica é a relação de corrente de entrada e corrente de saída, onde neste dispositivo a relação é de 70 %, assim:

$$Iin = \frac{7,5 - 1,15}{680} \tag{117}$$

$$Iin = 9,3\ \text{mA} \tag{118}$$

$$Iout = 9,3 \cdot 0,7 \tag{119}$$

$$Iout = 6,5\ \text{mA} \tag{120}$$

Nesse sentido, para a medição de frequência, quando a saída do optoacoplador é ativada, a tensão medida no terminal é igual a 0 V, e, quando a saída está desativada, a tensão medida é de 3,3 V, que é a alimentação do ESP. Assim, para limitar a corrente de saída:

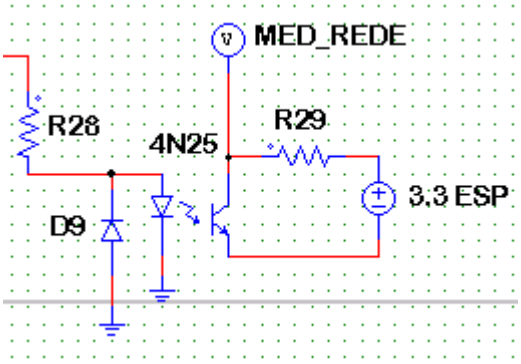
$$R = \frac{3,3}{6,5 \cdot 10^{-3}} \tag{121}$$

$$R = 508\ \Omega \tag{122}$$

Onde o próximo valor comercial é de 510 Ω.

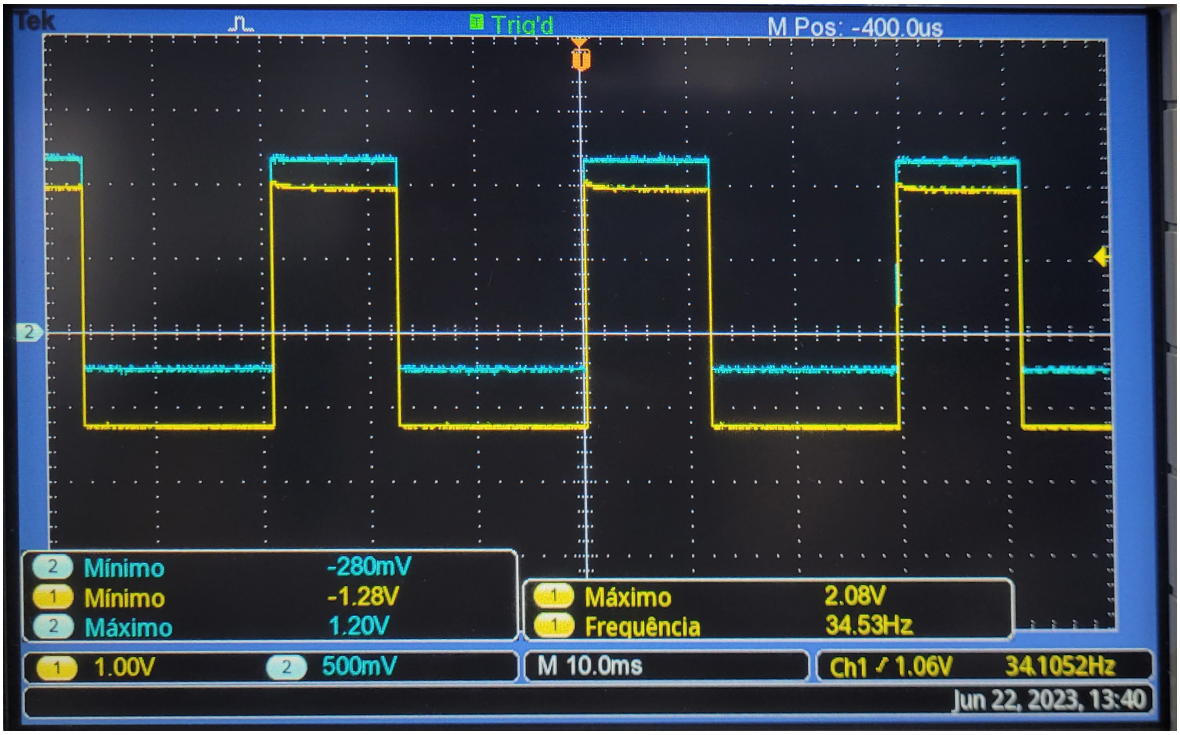
O acionamento do optoacoplador pode ser observado na Figura 77, seguindo a mesma frequência do OCT e com uma queda positiva de 1,2 V, referente a tensão do led interno, e aproximadamente 0,7 V de tensão mínima, referente ao diodo de roda livre.

Figura 76 – Circuito do optoacoplador simulado



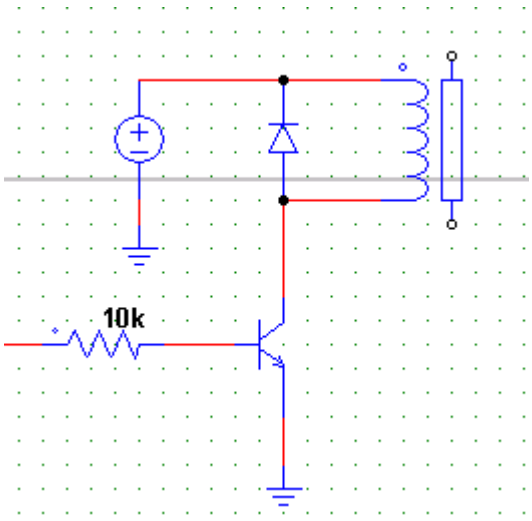
Fonte: Do autor (2023)

Figura 77 – Resultados do optoacoplador experimental



Fonte: Do autor (2023)

Figura 78 – Acionamento do contator simulado



Fonte: Do autor (2023)

3.2.7 Contator

Para fazer o acionamento do contator e iniciar de fato a liberação de energia quando a rede estiver em situação normal, é utilizado um relê acionado por uma das portas do ESP.

Assim, como visto na Figura 78, um transistor npn é utilizado como chave para acionar a bobina do relê, que posteriormente é ligada ao contator para controlar o processo de recarga.

A saída do ESP está conectada à base do transistor, por meio de um resistor de 10 kΩ para regular a corrente e proteger o transistor, que quando acionado, fecha um caminho para as bobinas do relê que estão alimentadas com a tensão de 15 V da fonte. Ainda, um diodo de roda livre é adicionado para proteger o sistema contra variações da rede.

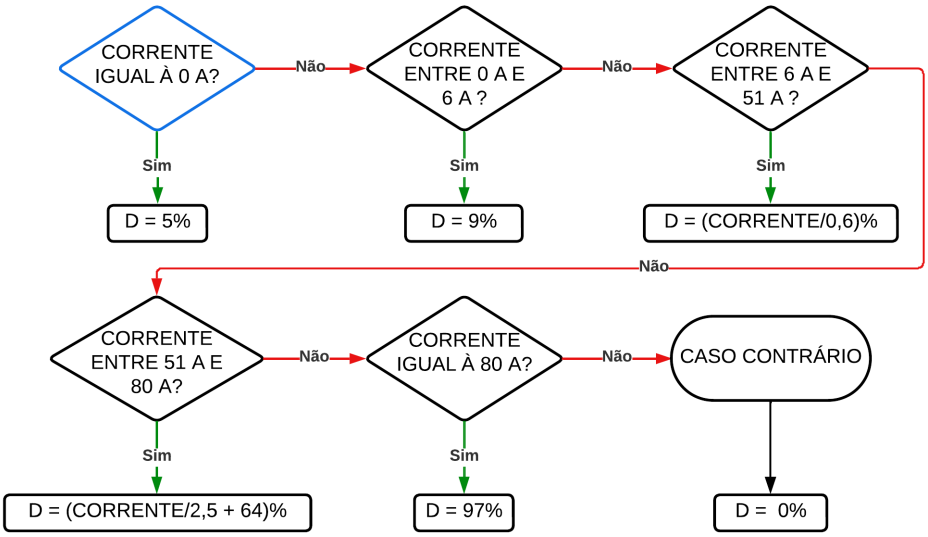
3.3 SOFTWARE

A leitura das variáveis e controle dos parâmetros do sistema de carregamento é realizado via software, mais especificamente no microcontrolador ESP32-DevKitC V4, programado na IDE do Arduino. As funções mais importantes desempenhadas são a determinação do valor do ciclo de trabalho, geração do PWM, leitura da tensão *Va* e frequência de chaveamento do optoacoplador, acionamento do relê de visualização do estado de recarga.

3.3.1 Ciclo de trabalho

O cálculo do ciclo de trabalho é realizado seguindo a Tabela 6, tendo a variável do valor máximo de corrente como constante sendo declarada no código de acordo com o local de instalação da estação de recarga, assim, o valor de ciclo de trabalho que é utilizado é calculado automaticamente pelo programa, seguindo o fluxograma da Figura 79.

Figura 79 – Cálculo do ciclo de trabalho de acordo com a corrente máxima



Fonte: Do autor (2023)

3.3.2 Geração PWM

A geração do do sinal de PWM também é realizada pelo ESP 32 com a função DAC (Digital to Analog Converter), ou seja, possui a capacidade de gerar um sinal analógico a partir de um dado digital em duas portas, 25 e 26. Assim, apenas com a resolução de 1 bit é possível gerar uma onda quadrada de 0 V até 3,3 V, que é a tensão de alimentação.

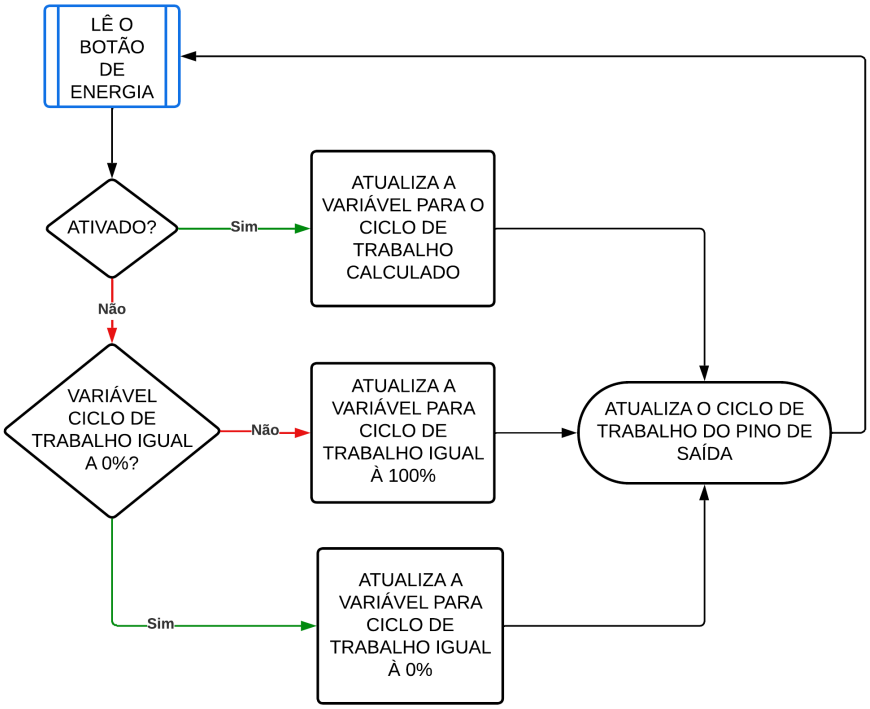
Desse modo, como analisado no fluxograma da Figura 80, após a configuração do pino 25 como DAC, o controle do ciclo de trabalho é feito a partir da leitura de outro pino denominado energia, que representa a possibilidade da estação de recarga liberar energia, ou seja, se o botão de energia estiver ativado significa que a estação está apta a liberar energia, atualizando o valor do ciclo de trabalho para o valor determinado pela corrente máxima, gerando um sinal de PWM de fato. Se o pino não estiver ativado, representa que a estação de recarga não pode liberar energia, atualizando o valor do ciclo de trabalho para 100% e deixando o valor do PWM constante e não realizando a recarga, como determina a norma.

O valor de ciclo de trabalho igual a zero representa um erro na estação de recarga, sendo atribuído o valor de ciclo de trabalho igual a 0 e dessa forma, tornando o valor da tensão Va constante e igual a -12 V, acusando o estado de erro de acordo com a Tabela 7.

3.3.3 Leitura de *Va*

Como visto no tópico 3.1.3, a medição da tensão *Va* é feita na forma de conversão de analógio para digital, com os valores de tensão representados na Tabela 9.

Figura 80 – Geração do sinal PWM pelo microcontrolador



Fonte: Do autor (2023)

Dessa forma, como descrito no fluxograma da Figura 81, o cálculo é realizado por média móvel, em que a cada ciclo do programa são realizadas 1000 leituras, com espaçamento de 2 μs entre cada leitura, assim:

$$T_1 = 1000 \cdot 2 \cdot 10^{-6} \tag{123}$$

$$T_1 = 2 \text{ ms} \tag{124}$$

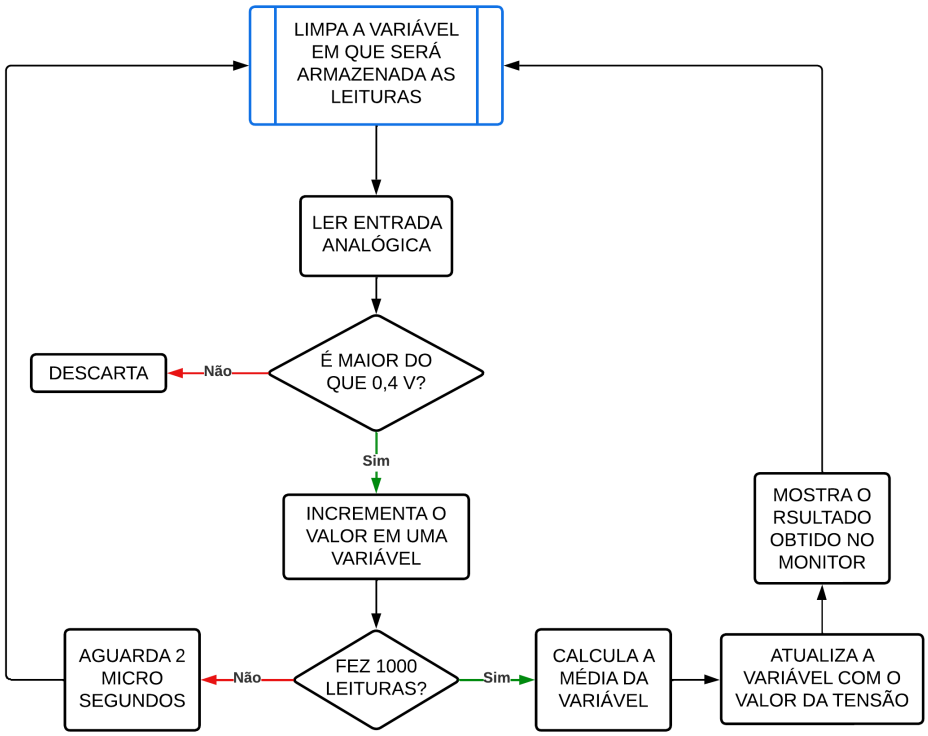
Dessa forma, a leitura é realizada em 2 ms, e considerando a frequência do PWM:

$$T_2 = \frac{1}{1.000} \tag{125}$$

$$T_2 = 1 \text{ ms} \tag{126}$$

Assim, como o tempo de leitura leva o dobro de tempo para o PWM completar um período, as leituras em cada ciclo do programa ocorrem em 2 ciclos do PWM, o suficiente para o cálculo da média móvel ter amostras adequadas. A média móvel desconsidera os valores iguais a 0, pois se está interessado apenas no valor de pico da onda quadrada.

Figura 81 – Medição da tensão Va por ADC



Fonte: Do autor (2023)

3.3.4 Leitura da frequência

A leitura de frequência de saída do optoacoplador é realizada por medição de pulsos, onde é realizada a contagem de tempo de um pulso negativo e de um pulso positivo, e, com isso, é determinada a frequência de chaveamento do circuito de oscilador controlado por tensão.

Desse modo, tendo determinada a frequência e se utilizando da equação de correção por regressão logística, é determinado a tensão da rede levando em consideração o divisor de tensão inicial e o processo de retificação.

3.3.5 Acionamento relê

O acionamento do relê, para fornecimento efetivo de energia, só ocorrerá nas seguintes condições:

- Tensão Va igual a 3 V ou 6 V, indicando que o VE pode receber energia.
- PWM em onda quadrada e indicando o valor máximo de corrente, mostrando que a estação está disponível para realizar a recarga.

- Tensão da rede dentro dos parâmetros definidos, indicando situação normal do sistema de energia.

3.3.6 Visualização dos estados

Para a visualização das variáveis se têm dois métodos disponíveis. O primeiro é referente ao monitor serial da própria Arduino IDE, onde plugando um cabo USB ao ESP 32 é possível visualizar as variáveis desejadas durante o processo de recarga inclusive, como tensão Va, tensão da rede, frequência do optoacoplador e ciclo de trabalho. Essa opção poderá ser mais explorada para manutenção da estação, como testes iniciais e calibração dos potenciômetros.

A segunda opção que está presente junto ao projeto é o acionamento de 5 leds para indicar os estados. Destes 5 leds, 4 são usados para indicar os estados que a tensão Va se encontra, 12 V para não conectado, 9 V para conectado, 6 V para conectado e podendo carregar e 3 V para conectado, podendo carregar e necessitando de ventilação. Assim, o led extra é utilizado para indicar se o processo de recarga está ocorrendo de fato, ou seja, se o relê está acionado depois de cumprir as especificações do item 3.3.5, refletindo assim a situação do PWM e da tensão da rede.

3.4 PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO

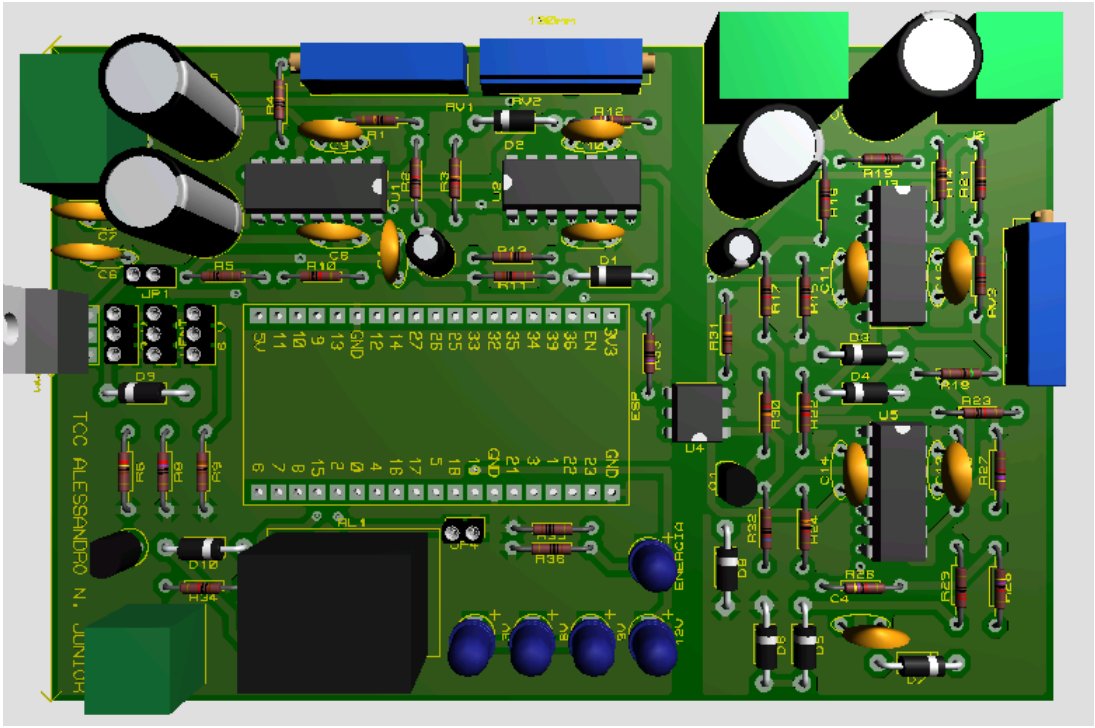
A placa de circuito impresso é desenvolvida no software Proteus e são feitas algumas modificações em relação ao esquemático inicial. Na Figura 82 é possível ver o 3D gerado pelo software, que é usado para identificar os circuitos presentes.

3.4.1 Topologias

A Figura 83 traz a divisão interna dentre os circuitos trabalhados na placa. Assim, pode-se destacar os quadros por diferentes cores:

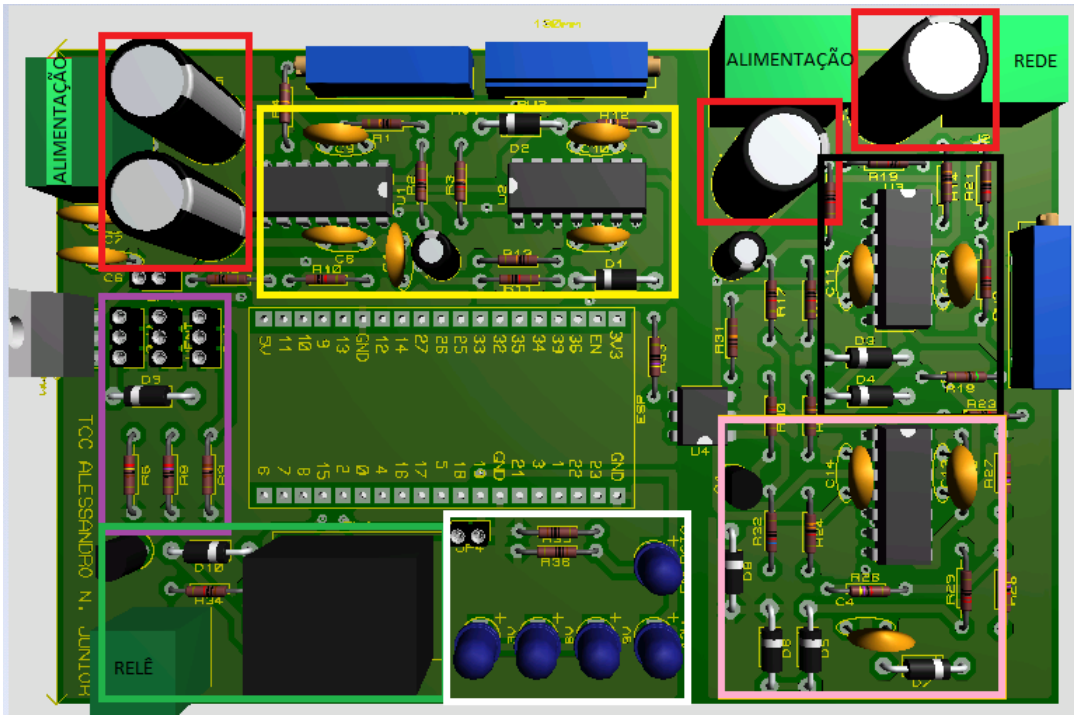
- Vermelho: estão representados os capacitores de entrada da fonte de alimentação, para os CIs TL084, cada um com 1.000 μF.
- Amarelo: esta representado o circuito de medição de Va, assim como os capacitores de 47 nF para alimentação dos CIs.
- Branco: estão representados os leds utilizados para visualização dos estados, assim como o jumper utilizado para habilitar ou não o fornecimento de energia da estação de recarga.
- Roxo: estão representados os jumpers e resistores utilizados para simular a mudança de estado no processo de recarga, de acordo com o acionamento do veículo.
- Verde: está representado o circuito de acionamento do relê.
- Preto: está representado o circuito de retificação da onda senoidal proveniente da rede.

Figura 82 – Placa de circuito impresso 3D



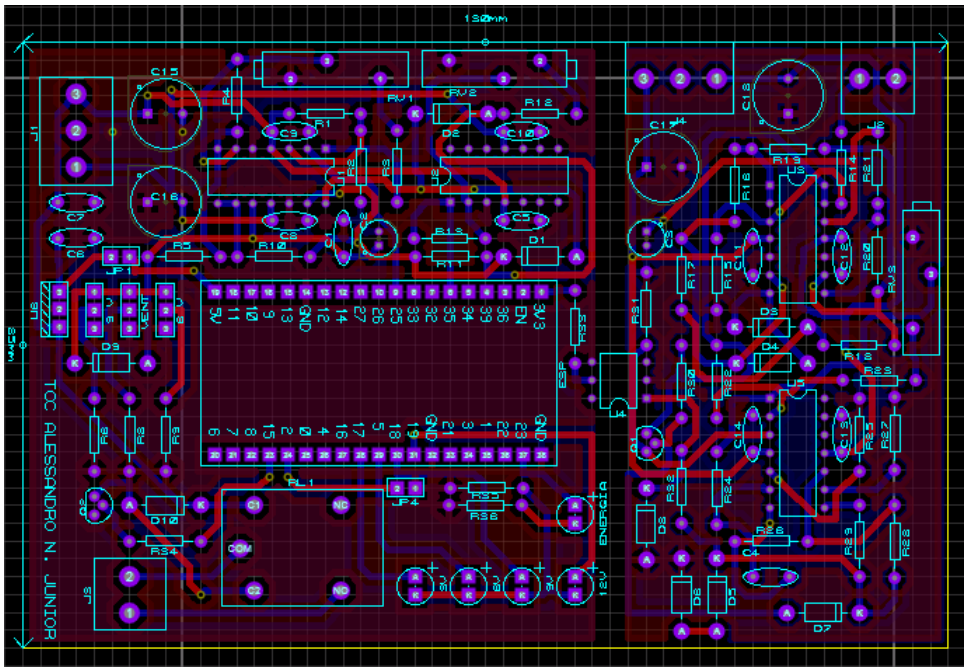
Fonte: Do autor (2023)

Figura 83 – Placa de circuito impresso 3D



Fonte: Do autor (2023)

Figura 84 – Layout do circuito



Fonte: Do autor (2023)

- Rosa: está representado o oscilador controlado por tensão sendo ligado ao optoacoplador.
- Não destacados: dentre os itens que não estão em destaque, estão o regulador de tensão, utilizado para alimentar o microcontrolador sem necessidade de cabo, os bornes de alimentação e entrada do sinal da rede, os potenciômetros em azul para calibração dos circuitos, e o optoacoplador juntando as duas malhas de terra, para fazer integração entre os circuitos.

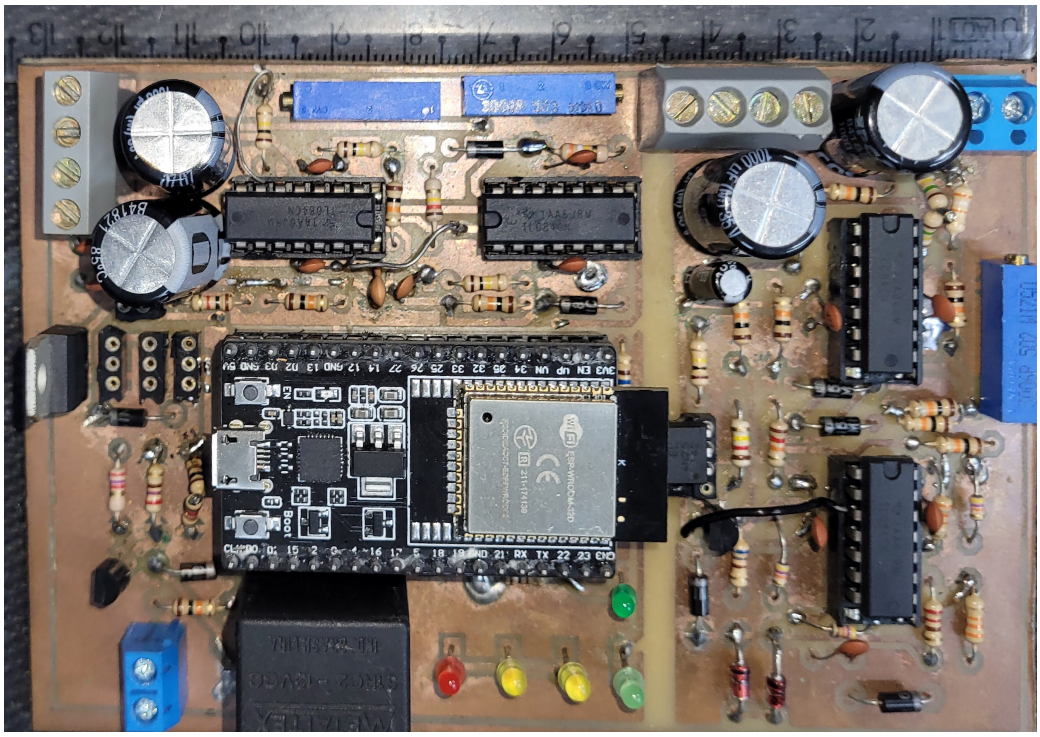
Em relação aos referenciais de aterramento, como a proposta do circuito é medir a tensão da rede de forma isolada, é necessário ter dois referenciais para a completa isolação dos circuitos.

Como pode ser observado na Figura 86, a placa possui 2 layers, o top layer em vermelho, onde ficam algumas trilhas e todos os componentes, e o bottom layer em azul, onde ficam os restantes das trilhas. Têm-se 2 malhas de referência zero, a esquerda e a direita do optoacoplador. No lado direito estão conectados todos os componentes referentes ao circuito de medição da rede, como o OCT por exemplo, e, no lado esquerdo, estão situados o microcontrolador, o relê, os leds, e todo o circuito referente ao pino piloto de fato.

3.4.2 Resultado

Algumas modificações em relação ao esquemático geral são feitas no momento da confecção da placa, como recálculo de capacitor que não se tinha disponível, mas mantendo a mesma ondulação, aproximação de resistores sem valor comercial, e algumas soldagens extras em que o software considerou uma placa com furos metalizados, deixando assim alguns pontos

Figura 85 – Placa elaborada

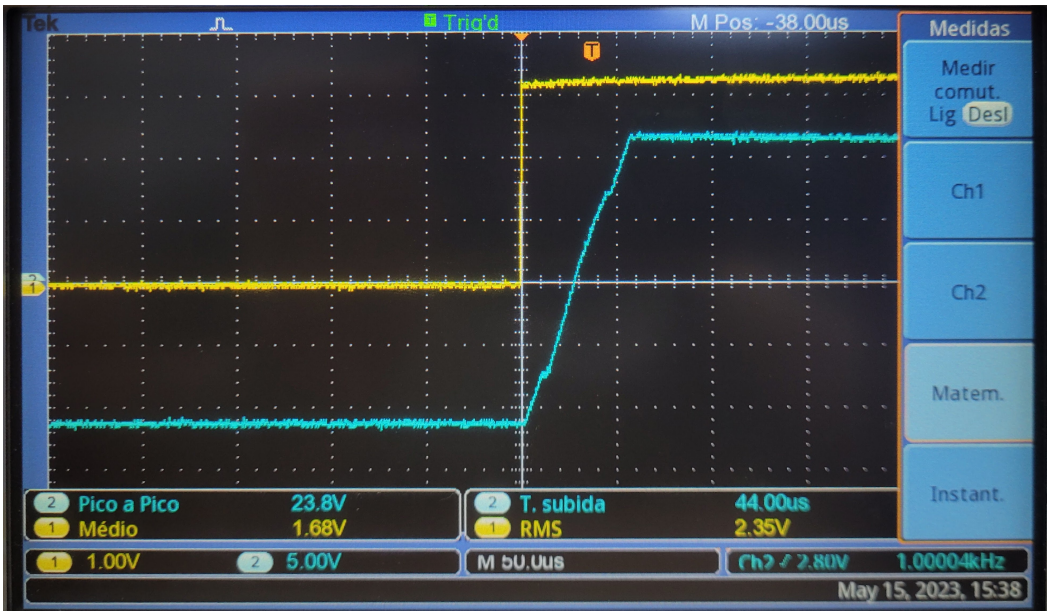


Fonte: Do autor (2023)

sem conexão que foram consertados posteriormente. Nesse sentido, chegou-se a placa final vista na Figura 85

Durante a obtenção dos resultados experimentais, destaca-se um caso relacionado a falsificação de amplificadores operacionais. Observou-se o mau funcionamento de 4 TL084 comprados inicialmente, em que o slew rate verificado experimentalmente na Figura 86 é de aproximadamente 0,5 V/μs, sendo que o data sheet indicava 13 V/μs, e como este fato ocorreu nos 4 CIs, provavelmente se tratava de um lote falsificado.

Figura 86 – Slew rate - falsificado



Fonte: Do autor (2023)

4 CONCLUSÃO

O tema mobilidade elétrica está cada vez mais recorrente dentro o meio acadêmico e os veículos elétricos gradativamente ganham espaço como meio de transporte eficiente e seguro. Para isto, estudos e análises nesse contexto são essenciais para exploração do tema, tanto para compreensão do tema como para compartilhamento das experiências acerca do trabalho realizado nesse ramo. Nesse sentido, o desenvolvimento deste projeto de carregador de veículo elétrico modo 3 pode servir de objeto de estudo para futuras pesquisas a serem elaboradas.

Do trabalho realizado, pode-se concluir que os resultados foram muito satisfatórios, pois todas as etapas do circuito cumpriram o determinado pela norma referente ao processo de recarga, apenas o oscilador controlado por tensão não obteve o resultado esperado, sendo realizada uma adaptação necessária, e ainda assim não se tratava do objeto principal de estudo.

Pode-se destacar que devido aos resultados obtidos, para desenvolvimento do projeto, é possível efetuar a troca do amplificador operacional por um outro de menor slew rate, sem trazer grandes impactos ao circuito.

De aprendizados sobre problemas do projeto que também podem servir de base para melhoras futuras, podem ser citadas a melhora de disposição e redução do layout do circuito, pois algumas soldas tiveram grande dificuldades de serem feitas e alguns espaços sobraram na placa. Nesse contexto, em certos pontos as trilhas ficaram muito próximas, ocasionando problemas ao projeto e danificando a placa.

Para trabalhos futuros, pode-se citar:

- Melhora no layout da placa;
- Construção de uma caixa para colocação do projeto;
- Disposição dos dados ao usuário, promovendo uma integração do microcontrolador com o smartphone para tornar a visualização dos estados melhor;
- Adicionar funções extras, como alterar programar o horário da recarga para iniciar fora do pico de consumo, e assim economizando no processo.
- Medição de potência e energia de recarga;
- Testes com o equipamento CDS para validar a comunicação.

REFERÊNCIAS

ABNT. **Sistema de recarga condutiva para veículos elétricos - Parte 1 - Requisitos gerais**. 2021. Último acesso em 09 de junho de 2023. Disponível em: <https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/33080/nbriec61851-1-sistema-de-recarga-condutiva-para-veiculos-eletricos-parte-1-requisitos-gerais>. Citado 8 vezes nas páginas 6, 23, 24, 31, 32, 33, 37 e 65.

ABREU, Eulógio Chagas de. **Inversor trifásico com frequência variável a transistor de potência**. 1981. Último acesso em 07 de junho de 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/76789>. Citado 2 vezes nas páginas 72 e 77.

BIANCHIN, Victor. **Dobra a porcentagem de veículos elétricos no mundo**. 2022. Último acesso em 30 de junho de 2023. Disponível em: <https://automotivebusiness.com.br/pt/posts/mobility-now/dobra-a-porcentagem-de-veiculos-eletricos-no-mundo/>. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 15.

BRASIL, Instituto Aço. **Conheça os carros elétricos mais rápidos na hora de carregar as baterias**. 2022. Último acesso em 11 de novembro de 2022. Disponível em: <https://acobrasil.org.br/site/noticia/conheca-os-carros-eletricos-mais-rapidos-na-hora-de-carregar-as-baterias/>. Citado na página 28.

BUENO, A. F. M.; BRANDÃO, C.A.L. **Visão geral de tecnologia e mercado para os sistemas de armazenamento de energia**. 2017. Último acesso em 13 de outubro de 2022. Disponível em: <http://abaque.com.br/wp-content/uploads/2017/07/Estudo_Mercado_Armazenamento_Brasil.pdf>. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 20.

CABRINI, Ju. **Conheça o Rota 2030, programa do governo federal criado para estimular a cadeia automotiva**. 2022. Último acesso em 30 de junho de 2023. Disponível em: <https://mobilidade.estadao.com.br/inovacao/uma-luz-sobre-a-rota-2030/>. Citado na página 14.

CARDOSO, Eduardo. Carregador de baterias off-board para carros elétricos a partir de redes monofásicas. 2021. Citado na página 27.

CASTRO, Bernardo Hauch Ribeiro de; FERREIRA, Tiago Toledo. Veículos elétricos: aspectos básicos, perspectivas e oportunidades. **BNDES Setorial, n. 32, set. 2010, p. 267-310**, Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2010. Citado na página 14.

EZVOLT. **O que é um wallbox**. 2019. Último acesso em 13 de outubro de 2022. Disponível em: <https://ezvolt.com.br/estacoes-de-carregamento/o-que-e-um-wallbox-para-carro-eletrico/#post-content>. Citado na página 29.

GÓMEZ, Juan Pablo España; ARRUDA, FS. Perspectivas da implantação do veículo elétrico no brasil: o estudo de caso de brasília. In: **XXIX Congresso Nacional de Pesquisa em Transporte da ANPET, Ouro Preto**. [S.l.: s.n.], 2015. p. 2554–2557. Citado na página 14.

KNEZ, Matjaz; ZEVNIK, Gasper Kozelj; OBRECHT, Matevz. A review of available chargers for electric vehicles: United states of america, european union, and asia. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 109, p. 284–293, 2019. Citado na página 24.

LENZ, André Luis. **Por Dentro de uma EVSE (Estação de Carregamento EV SAE-J1772-AC Nível 2)**. 2012. Último acesso em 14 de outubro de 2022. Disponível em: <http://automoveiseletricos.blogspot.com/2012/07/pordentro-de-uma-estacao-de.html>. Citado na página 31.

LIMITED, JAGUAR LAND ROVER. **EXPLICAÇÃO DE CARROS HÍBRIDOS PLUG-IN (PHEV)**. 2022. Último acesso em 08 de novembro de 2022. Disponível em: <https://www.jaguarbrasil.com.br/electric-cars/plug-in-hybrid.html>. Citado na página 18.

LTDA, RAISA PRODUTOS ELETRÔNICOS. **COMO PRESERVAR SUA BATERIA DE ÍON DE LÍTIO E PROLONGAR SUA VIDA ÚTIL**. 2022. Último acesso em 11 de novembro de 2022. Disponível em: <https://www.raisa.com.br/como-preservar-sua-bateria-de-ion-de-litio-e-prolongar-sua-vida-util>. Citado na página 20.

MACHADO, André Goulart. Estudo técnico de estações de recarga de veículos elétricos no rio grande do sul. Universidade Federal de Santa Maria, 2021. Citado na página 25.

MANUFACTURERS, Society of Motor; (SMMT), Traders. Report on the current situation and future direction of electric vehicle charger standards. **Rel. Técnico**, 2010. Citado na página 22.

NEOCHARGE. **Tipos de plugues e tomadas para carros elétricos**. 2021. Último acesso em 06 de outubro de 2022. Disponível em: <https://www.neocharge.com.br/tudo-sobre/carregador-carro-eletrico/tipo-conector-veiculo-eletrico>. Citado 12 vezes nas páginas 15, 17, 18, 20, 21, 22, 24, 25, 26, 27, 28 e 30.

RIVEIRA, Carolina. **Após Ford, GM fecha parceria com a Tesla para usar "super carregador"**. 2023. Último acesso em 02 de julho de 2023. Disponível em: <https://www.metropoles.com/negocios/apos-ford-gm-fecha-parceria-com-a-tesla-para-usar-super-carregador.> Citado na página 26.

RODRIGUES, Márcio do CBP et al. Conexão de veículos elétricos à rede de energia elétrica para recarga de baterias: Uma visão geral. **Revista Eletrônica de Potência**, v. 19, n. 2, p. 193–207, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 24.

ROSA, Jonas Menon da. **Desenvolvimento de uma estação de recarga modo 3 para veículos elétricos**. 2020. Último acesso em 10 de junho de 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/20299/Da20Rosa_Jonas_Menon_2020_TCC.pdf?sequence=1>. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 31.

STANDVIRTUAL. **Carregar carros elétricos: o que é uma Wallbox?** 2022. Último acesso em 14 de outubro de 2022. Disponível em: <https://www.standvirtual.com/blog/carregar-carros-eletricos-o-que-e-uma-wallbox/>. Citado na página 30.

ANEXO A – CÓDIGO DESENVOLVIDO DO TRABALHO

```
#include <math.h>

const int freq_out = 25; // define o pino de saída do LED
int freq = 1000;// define a frequência da onda quadrada em Hz
int dutyCycle = 0; // define o ciclo de trabalho inicial em porcentagem


int led_12 = 19,led_9 = 18,led_6 = 5,led_3 = 17,led_energia = 23;

const int Botao_energia = 2;

//informar o máximo de corrente possível
int corrente = 30;
float DC = 0;

const int in_tensao = 35; // define o pino da entrada analógica
int sensorValue = 0;        // variável para armazenar o valor
                            // lido da entrada analógica

int maxValue = 0;           // variável para armazenar o valor máximo da tensão

int in_freq = 34;  // pino de entrada analógica
float pulseDuration_1 = 0;  // duração do pulso em microssegundos
float pulseDuration_2 = 0;  // duração do pulso em microssegundos

int rele = 15;

int R5 = 33000;
int R7 = 47000;
int R8 = 47000;
float Vout = 7.5;
float C1 = 47*pow(10,-9);

float soma = 0;
int contador = 0;
```

```
bool estado_led = false;

void setup() {

  pinMode(in_freq, INPUT);

  pinMode(led_12, OUTPUT);
  pinMode(led_9, OUTPUT);
  pinMode(led_6, OUTPUT);
  pinMode(led_3, OUTPUT);
  pinMode(led_energia, OUTPUT);


  pinMode(freq_out, OUTPUT); // define o pino do LED como saída
  ledcSetup(0, freq, 8); // configura o canal 0 do LEDC com frequência
                         //de 1 kHz e resolução de 8 bits

  ledcAttachPin(freq_out, 0); // conecta o pino do LED ao canal 0 do LEDC

  pinMode(rele, OUTPUT);

  pinMode(Botao_energia, INPUT_PULLUP);

  Serial.begin(9600); // inicializa a comunicação serial
  analogReadResolution(12); // define a resolução de leitura da
                            //entrada analógica como 12 bits
}

void loop() {
  maxValue = 0; // reseta o valor máximo

  if (corrente == 0) {
  DC = 5;
  }
  else if (corrente < 6) {
    DC = 9;
  }
  else if (corrente >= 6 && corrente < 51) {
    DC = corrente / 0.6;
```

```
}
else if (corrente >= 51 && corrente < 80) {
  DC = (corrente / 2.5) + 64;
}
else if (corrente == 80) {
  DC = 97;
}
else {
  DC = 0;
}

soma = 0;
contador = 0;

for (int i = 0; i < 1000; i++) { // faz 1000 leituras da entrada analógica
  sensorValue = analogRead(in_tensao); // lê a entrada analógica

  if (sensorValue > 500) {
        soma += sensorValue;
        contador++;
      }
  delayMicroseconds(2); // aguarda um curto intervalo antes da próxima leitura
}

float maxValue = soma / contador;

float voltageMax = (maxValue * 3.3) / 4095; // calcula a tensão
                                            //máxima em volts
float voltagereal = 4*voltageMax;

if (2 < voltagereal && voltagereal < 4){
  digitalWrite(led_3,HIGH);
  digitalWrite(led_6,LOW);
  digitalWrite(led_9,LOW);
  digitalWrite(led_12,LOW);
}
else if (5 < voltagereal && voltagereal < 7){
  digitalWrite(led_6,HIGH);
  digitalWrite(led_3,LOW);
```

```
    digitalWrite(led_9,LOW);
    digitalWrite(led_12,LOW);
  }
  else if (8 < voltagereal && voltagereal < 10){
    digitalWrite(led_9,HIGH);
    digitalWrite(led_3,LOW);
    digitalWrite(led_6,LOW);
    digitalWrite(led_12,LOW);
  }
  else if (11 < voltagereal && voltagereal < 13){
    digitalWrite(led_12,HIGH);
    digitalWrite(led_3,LOW);
    digitalWrite(led_6,LOW);
    digitalWrite(led_9,LOW);
  }
  else if (voltagereal <= 1){
    digitalWrite(led_12,HIGH);
    digitalWrite(led_3,HIGH);
    digitalWrite(led_6,HIGH);
    digitalWrite(led_9,HIGH);
  }

//fazer leitura do botao de energia e setar em high e low

  int energia = digitalRead(Botao_energia);
  delay(10);

  if(energia == HIGH){ //liberar ou não energia
     dutyCycle = DC;
  }
  else if (DC == 0){
     dutyCycle = DC;
  }
  else{
     dutyCycle = 100; //considerar
  }

  ledcWrite(0, map(dutyCycle, 0, 100, 0, 1023)); // atualiza o ciclo de
  delay(10);
```

```
pulseDuration_1 = pulseIn(in_freq, HIGH);  // mede a duração do pulso positivo
pulseDuration_2 = pulseIn(in_freq, LOW);  // mede a duração do pulso negativo

float frequency = 1000000 / (pulseDuration_1 + pulseDuration_2);
                                        // calcula a frequência em Hz

//float Vret = (frequency*4*R7*R5*C1*Vout)/R8;

//float div_ten = (Vret/0.9)*sqrt(2);

//float tensao = 310*div_ten/10;

if((energia == HIGH)&&((5 < voltagereal && voltagereal < 7) ||
(2 < voltagereal && voltagereal < 4))){
  digitalWrite(rele,HIGH);
}
else{
  digitalWrite(rele,LOW);
}

if((79.65 > frequency)||(frequency > 118.81)){ //desligar o rele se
                                                //a tensão está fora
  digitalWrite(rele,LOW);
}

if(digitalRead(rele) == HIGH){ //ativa o led se energia estiver fluindo
  digitalWrite(led_energia,HIGH);
}
else{
  digitalWrite(led_energia,LOW);
}

if (DC == 0){
estado_led = !estado_led;
digitalWrite(led_12,estado_led);
}

Serial.print("Tensao Va: ");
```

```
Serial.print(voltagereal, 4); // imprime a tensão de
                              //pico com 4 casas decimais
Serial.println("V");

Serial.print("Tensao rede: ");
Serial.print(tensao, 4); // imprime a tensão de pico com 4 casas decimais
Serial.println("V");

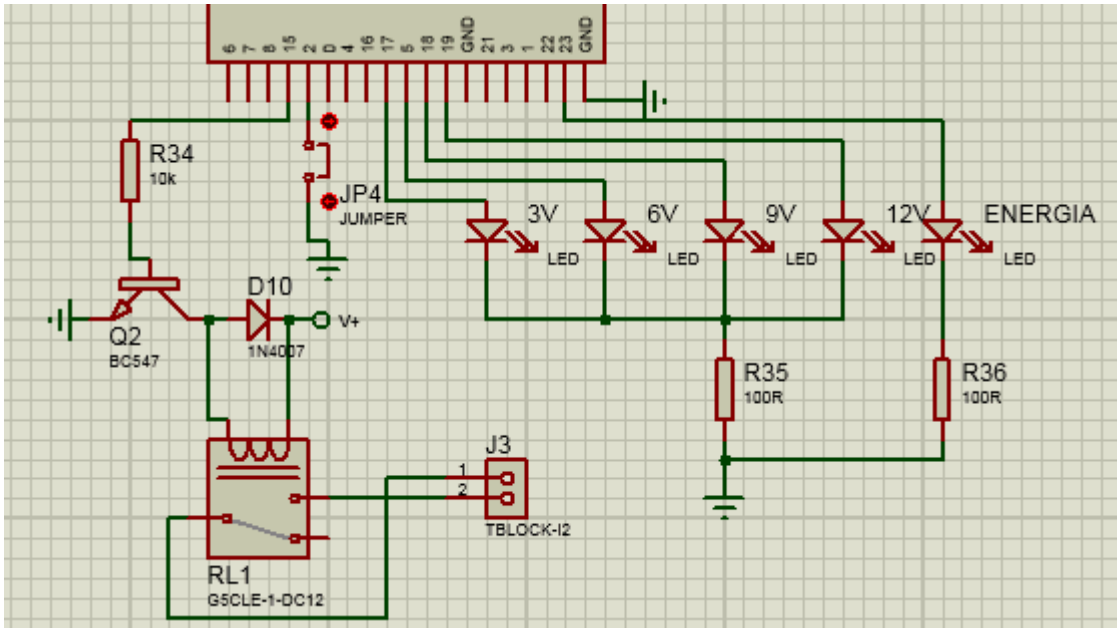
Serial.print("Frequencia: ");
Serial.print(frequency);
Serial.println("Hz");

Serial.print("Ciclo de trabalho: ");
Serial.print(DC);
Serial.println("%");

delay(100);
}
```

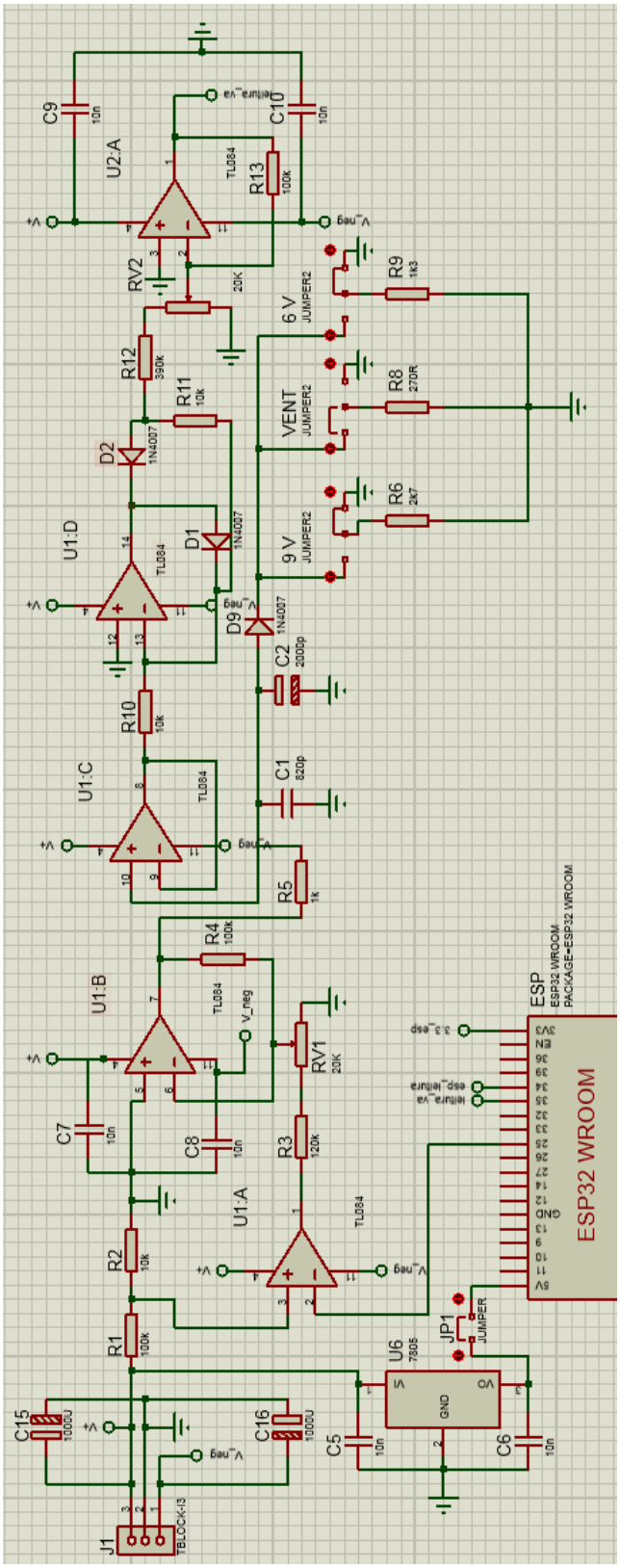
ANEXO B – ESQUEMÁTICO DO PROTEUS

Figura 87 – Acionamento de Leds e Relê



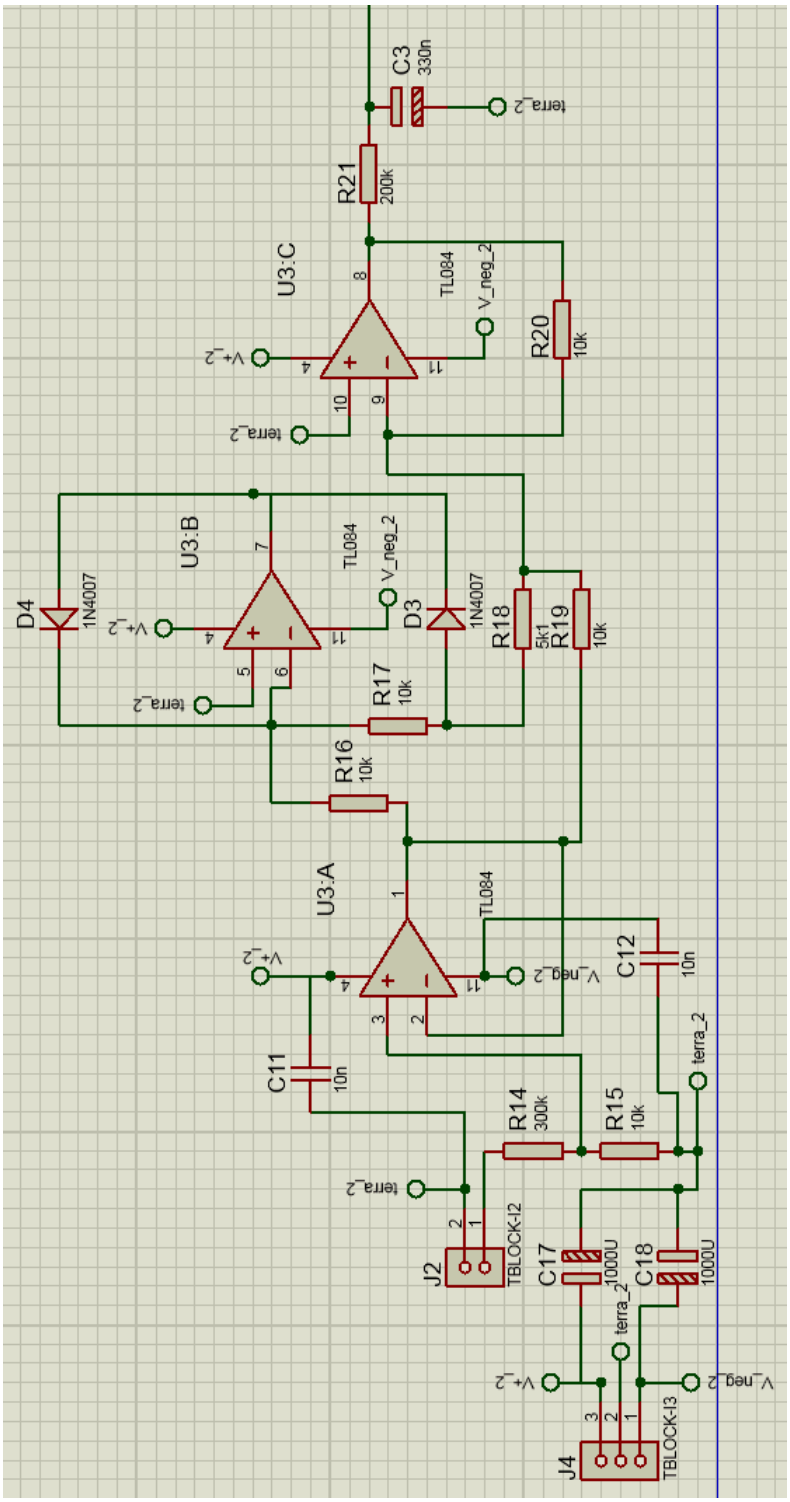
Fonte: Do autor (2023)

Figura 88 – Circuito Pino Piloto e Medição de Va



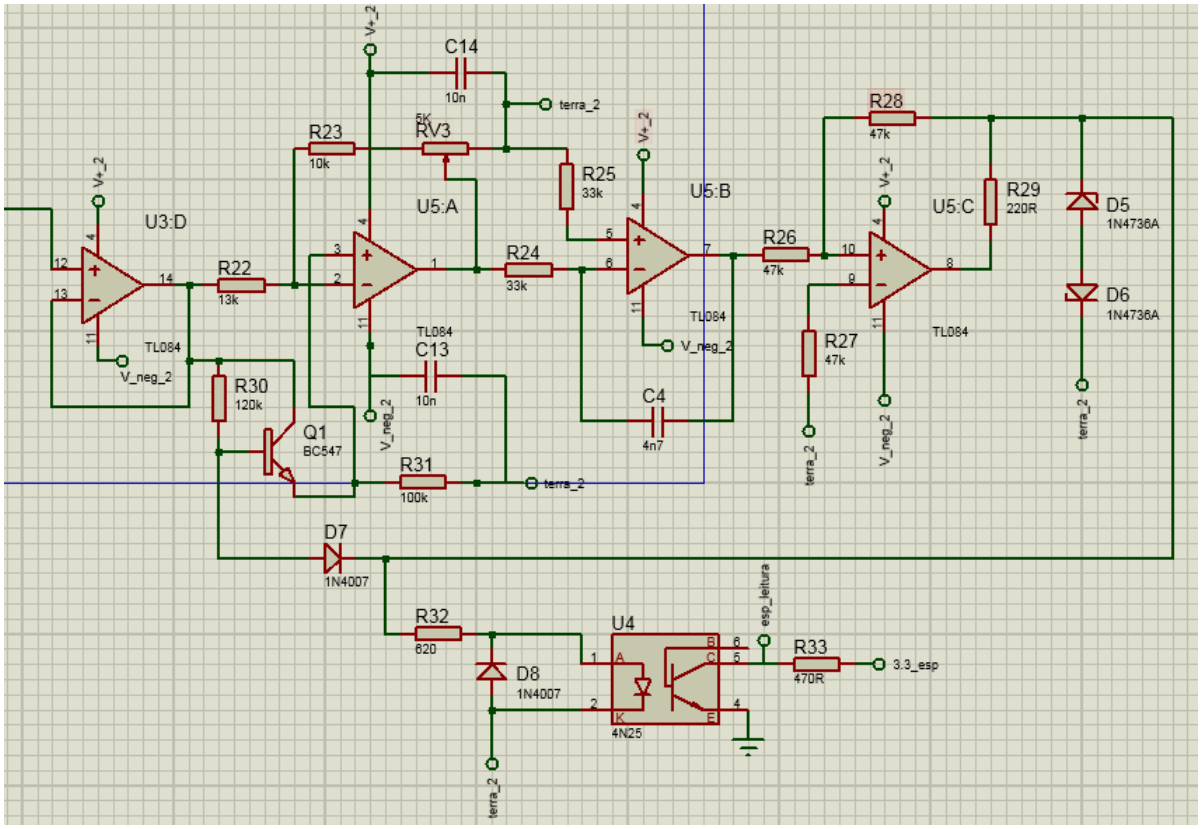
Fonte: Do autor (2023)

Figura 89 – Circuito de Retificação da Rede



Fonte: Do autor (2023)

Figura 90 – Circuito do OCT



Fonte: Do autor (2023)