

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

PEDRO HENRIQUE HARENZA

**PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE UMA ESTAÇÃO DE RECARGA
DE VEÍCULOS ELÉTRICOS NÍVEL 1**

FLORIANÓPOLIS, 2025.

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

PEDRO HENRIQUE HARENZA

**PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE UMA ESTAÇÃO DE RECARGA
DE VEÍCULOS ELÉTRICOS NÍVEL 1**

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

Orientador:
Prof. Prof. Joabel Moia, Dr. Eng.

FLORIANÓPOLIS, 2025.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Harenza, Pedro Henrique
Projeto e Desenvolvimento de uma Estação de Recarga
de Veículos Elétricos Nível 1 / Pedro Henrique Harenza;
orientação de Joabel Moia. - Florianópolis, SC, 2025.
85 p.

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

1. Estação de recarga. 2. Veículos elétricos. 3.
Consumo de energia. 4. Instrumentação. 5. Medida de energia.
I. Moia, Joabel. II. Instituto Federal de Santa
Catarina. III. Projeto e Desenvolvimento de uma Estação
de Recarga de Veículos Elétricos Nível 1 .

AFERIÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA EM ESTAÇÃO DE RECARGA DE VEÍCULOS ELÉTRICOS

PEDRO HENRIQUE HARENZA

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

Florianópolis, 04 de abril de 2025.

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **JOABEL MOIA**
Data: 09/04/2025 19:57:00-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Joabel Moia, Dr Eng.

Documento assinado digitalmente
 **MAURO TAVARES PERACA**
Data: 10/04/2025 13:08:07-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Mauro Tavares Peraça, Dr Eng.

 Documento assinado digitalmente
Gierri Waltrich
Data: 10/04/2025 10:34:42-0300
CPF: ***.757.199-**
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Gierri Waltrich, Dr Eng.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de expressar minha profunda gratidão aos meus pais, Vania e Marcelo, por sempre me apoiarem incondicionalmente e me incentivarem a estudar e a me tornar uma pessoa melhor. Sem o amor, a dedicação e o suporte deles, eu não teria chegado até aqui.

Agradeço também ao meu professor orientador, Joabel Moia, por sua orientação, paciência e disponibilidade ao longo do desenvolvimento deste projeto. Suas valiosas contribuições foram fundamentais para o sucesso deste trabalho.

À Instituição Federal de Santa Catarina (IFSC), pela oportunidade de cursar um ensino de qualidade e pela infraestrutura disponibilizada, que permitiu o acesso a conhecimentos teóricos e práticos essenciais para minha formação como engenheiro.

Por fim, agradeço a todos os colegas, amigos e professores que, de alguma forma, contribuíram para meu aprendizado e crescimento ao longo dessa jornada acadêmica.

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma estação de recarga de veículos elétricos de nível 1. A motivação principal para a realização deste projeto vem do crescimento da popularidade dos veículos elétricos, que tem gerado uma demanda por estações de recarga seguras e confiáveis. O projeto engloba a fundamentação teórica, o desenvolvimento do hardware e do firmware necessários para a implementação da solução proposta. Inicialmente, foram analisadas estações de recarga disponíveis no mercado, com o objetivo de compreender as etapas essenciais de seu funcionamento e identificar os requisitos técnicos necessários. Em seguida, o estudo aprofundou-se na fundamentação teórica dos cálculos utilizados para a aquisição e processamento das medições de energia. Foram realizados testes práticos para avaliar o desempenho da estação de recarga desenvolvida. Os resultados obtidos demonstram o potencial da solução proposta para aplicações reais, destacando sua viabilidade técnica e contribuição para a infraestrutura de mobilidade elétrica.

Palavras-chave: Estação de recarga. Veículos elétricos. Consumo de energia. Instrumentação. Medida de energia.

ABSTRACT

This work presents the development of a Level 1 electric vehicle charging station. The primary motivation for this project stems from the growing popularity of electric vehicles, which has created a demand for safe and reliable charging infrastructure. The project encompasses the theoretical foundation, as well as the development of the necessary hardware and firmware to implement the proposed solution. Initially, existing charging stations were analyzed to understand their essential operational stages and identify the required technical specifications. Subsequently, the study delved into the theoretical principles behind the calculations used for energy measurement acquisition and processing. Practical tests were conducted to evaluate the performance of the developed charging station. The results demonstrate the potential of the proposed solution for real-world applications, highlighting its technical feasibility and contribution to electric mobility infrastructure.

Keywords: Charging station. Electric vehicles. Energy consumption. Instrumentation. Energy measurement.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama de identificação de componentes da estação de recarga.....	16
Figura 2 – Exemplo de estação de recarga nível 1.....	18
Figura 3 – Exemplo de estação de recarga nível 2.....	18
Figura 4 – Exemplo de estação de recarga nível 3.....	19
Figura 5 – Diagrama de uma estação de recarga de veículos elétricos.....	21
Figura 6 – Diagrama de uma estação de recarga de veículos elétricos trifásico.....	21
Figura 7 – Sinal Control Pilot em diferentes estados de operação.....	25
Figura 8 – Circuito simplificado do sinal de comunicação da estação de recarga.....	26
Figura 9 – Sistema de conexão de um veículo elétrico.....	27
Figura 8 - Triângulo de Potência.....	30
Figura 10 - Circuito divisor de tensão.....	34
Figura 11 - Condicionamento do sinal de corrente.....	35
Figura 12 - Diagrama de Blocos.....	37
Figura 13 - Diagrama de blocos para o circuito integrado dedicado a medida de energia.....	38
Figura 14 - Estação de Recarga Pionix.....	39
Figura 15 - Diagrama de blocos da estação de recarga.....	41
Figura 16 - Diagrama esquemático do microcontrolador SMT32F030.....	42
Figura 17 - Diagrama esquemático do acionamento dos relés.....	43
Figura 18 - Diagrama esquemático do circuito responsável pelo sinal de comunicação.....	44
Figura 19 - Diagrama esquemático do microcontrolador SMT32F373.....	46
Figura 20 - Diagrama esquemático do circuito de isolamento da comunicação UART.....	47
Figura 21 - Diagrama esquemático do circuito de condicionamento do sinal de medida de corrente elétrica.....	48
Figura 22 - Diagrama esquemático do circuito de condicionamento do sinal de medida de tensão elétrica.....	49
Figura 23 - Diagrama esquemático do circuito de alimentação isolada.....	50
Figura 24 - Diagrama esquemático do circuito de alimentação não isolada.....	51
Figura 25 - Diagrama de conexões da implementação completa da estação de recarga.....	52
Figura 26 - Circuitos da placa de circuito impresso.....	53
Figura 27 - Modelo 3D da placa de circuito impresso.....	53
Figura 28- Diagrama de estados aplicado a estação de recarga proposta.....	55
Figura 29 - Diagrama de tempos para comunicação do led WS2812.....	56
Figura 30 - Estação de recarga de veículos elétricas montada.....	60
Figura 31 - Apresentação da placa de circuito impresso montada.....	61
Figura 32 - Configuração para o teste do sinal de comunicação Control Pilot.....	62
Figura 33 - Sinal de comunicação Control Pilot com a estação operando em estado A.....	62
Figura 34 - Sinal de comunicação Control Pilot com a estação operando em estado B.....	63
Figura 35 - Sinal de comunicação Control Pilot com a estação operando em estado C.....	63
Figura 36 - Sinal de comunicação Control Pilot com a estação operando em estado F.....	64
Figura 37 - Tempo do sinal Control Pilot em nível alto.....	64
Figura 38 - Indicações de estados por meio das cores emitidas pelos LEDs WS2812.....	65
Figura 39 - Tensão de saída durante cada estado de operação.....	66

Figura 40 - Configuração para os teste com carga utilizando o equipamento PA1000.....	67
Figura 41 - Carga resistiva referente ao primeiro teste.....	67
Figura 42 - Medidas realizadas no teste com carga de 30 Ω	68
Figura 43 - Medidas realizadas no teste com carga de 15 Ω	69
Figura 44 - Gráfico da medida de energia com carga de 30 Ω em 10 minutos de operação.	70
Figura 45 - Gráfico da medida de energia com carga de 90 Ω em 10 minutos de operação.	70

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Estados da estação de recarga.....	25
Quadro 2 - Resistência do circuito de proximidade.....	27
Quadro 3 - Indicação dos estados de carregamento.....	45

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACK	<i>Acknowledgement</i> (Reconhecimento)
ADC	<i>Analog-to-digital converter</i> (Conversor analógico digital)
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CC	Corrente Contínua
CA	Corrente Alternada
CP	<i>Control Pilot</i>
DMA	<i>Direct Memory Access</i> (Acesso direto à memória)
GPIO	<i>General Purpose Input / Output</i> (Entrada / saída de propósito geral)
NACK	<i>Negative Acknowledgment</i> (Reconhecimento negativo)
OBC	<i>On Board Charger</i> (Carregador de bordo)
PE	<i>Protective Earth</i>
PFC	<i>Power Factor Correction</i> (Correção de fator de potência)
PP	<i>Proximity Pilot</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> (Modulação por largura de pulso)
SOC	<i>State Of Charge</i> (Estado de carga)
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver-Transmitter</i>
VE	Veículo elétrico

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
1.1 Justificativa.....	12
1.2 Definição do Problema.....	13
1.3 Objetivo Geral.....	14
1.4 Objetivos Específicos.....	14
1.5 Estrutura do Trabalho.....	15
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
2.1 Princípio de Funcionamento de Uma Estação de Recarga.....	16
2.1.1 Classificação de Estações de Recargas.....	17
2.1.2 Diagrama Simplificado da Estação de Recarga.....	20
2.1.3 Protocolo de Comunicação.....	22
2.2 Medida de energia.....	28
2.2.1 Exatidão e Precisão em Medições de Energia.....	28
2.2.2 Cálculos de medida de energia.....	29
2.3 Análise de Medidores de Energia Para Estação de Recarga.....	33
2.3.1 Medidor de Energia Monofásico do Fabricante NXP.....	33
2.3.2 Solução de Medição de Energia Monofásica Com Medida Isolada da Texas Instrument.....	36
2.3.3 Solução Para Medidores de Energia Desenvolvida Pela Fabricante Analog Devices.....	37
3 METODOLOGIA.....	40
4 DESENVOLVIMENTO DO HARDWARE DA ESTAÇÃO DE RECARGA.....	41
5 DESENVOLVIMENTO DO FIRMWARE DA ESTAÇÃO DE RECARGA.....	54
5.1 Desenvolvimento do Firmware Dedicado a Estação de Recarga.....	54
5.2 Desenvolvimento do Firmware Dedicado a Medição de Energia.....	57
6 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DA ESTAÇÃO DE RECARGA PROPOSTA.....	60
6.1 Construção do protótipo.....	60
6.2 Testes da estação de recarga.....	61
6.3 Análise e discussão dos resultados.....	71
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	73
7.1 Sugestões para trabalhos futuros.....	73

1 INTRODUÇÃO

A mobilidade elétrica tem se tornado um assunto cada vez mais relevante quando se trata de sustentabilidade e avanço tecnológico. Com o aumento das preocupações ambientais e a busca por alternativas menos poluentes de transporte, os veículos elétricos (VE) estão ganhando destaque significativo no mercado global. Segundo a Agência Internacional de Energia (AIE, 2021, p. 5), as vendas globais de veículos elétricos têm crescido exponencialmente, com projeções indicando que esses veículos podem chegar a representar 30% do mercado automotivo até 2030. "Em mais um ano de grandes resultados, a eletromobilidade no Brasil terminou 2024 com um novo recorde de 177.358 veículos eletrificados leves emplacados de janeiro a dezembro, ou 89% acima dos 93.927 de 2023. Só em dezembro, as vendas chegaram a 21.634" (ABVE, 2025). Esse crescimento demanda uma infraestrutura de recarga robusta e confiável, capaz de suportar a demanda e garantir a segurança do usuário. Além disso, a infraestrutura de recarga desempenha um papel estratégico no planejamento urbano e na economia. A instalação de estações em locais estratégicos, como centros urbanos, rodovias e estacionamentos públicos, não apenas facilita a vida dos usuários, mas também estimula a adoção de VEs, o crescimento de negócios relacionados à eletromobilidade, serviços de manutenção e desenvolvimento da tecnologia.

1.1 Justificativa

A crescente adesão aos VEs nos últimos anos reflete uma mudança significativa nas preferências dos consumidores e nas políticas ambientais globais. Este fenômeno não apenas indica uma evolução nas práticas de mobilidade, mas também destaca a necessidade de uma infraestrutura de recarga adequada e confiável. À medida que mais pessoas optam por VEs, a demanda por estações de recarga se intensifica, tornando essencial o desenvolvimento de sistemas de recargas confiáveis.

A implementação de um método eficaz para medir o consumo de energia durante a recarga é essencial para garantir a confiança dos consumidores. Assim como nos postos de combustíveis, onde a precisão e exatidão das medições são

asseguradas por regulamentações rigorosas, as estações de recarga de veículos elétricos também devem adotar padrões equivalentes, assegurando transparência e confiabilidade nas cobranças.

Dessa forma, este trabalho justifica-se pela crescente demanda por estações de recarga confiáveis e seguras. A proposta visa oferecer uma solução que não apenas garanta transparência e segurança ao consumidor, mas também contribua para um ambiente mais sustentável e eficiente, promovendo a adoção de VEs.

1.2 Definição do Problema

Para atingir os resultados esperados, o projeto visa desenvolver uma estação de recarga de corrente alternada (CA) capaz de realizar a recarga seguindo o protocolo de comunicação exigido pela norma ABNT NBR IEC 61851-1:2021, também englobando a implementação de um circuito dedicado para realização da medida de energia.

Como no Brasil o desenvolvimento da tecnologia envolvendo a recarga de veículos elétricos é recente e ainda está passando pelo processo de adoção pela população, ainda não existe um amplo conhecimento sobre o funcionamento e a parte técnica envolvendo essa tecnologia. Essa falta de conhecimento, aliada à falta de infraestrutura adequada, representa um desafio significativo para a popularização dos veículos elétricos no país.

Atualmente, a maioria das estações de recarga disponíveis no mercado brasileiro são importadas, o que eleva os custos e dificulta a manutenção e a adaptação às necessidades locais. Além disso, a falta de padronização pode resultar em incompatibilidades entre veículos e carregadores de diferentes fabricantes, gerando frustração nos usuários e limitando a eficiência da rede de recarga.

Diante desses desafios, este projeto busca desenvolver uma estação de recarga de veículos elétricos que atenda aos requisitos técnicos estabelecidos na norma ABNT NBR IEC 61851-1:2021 e também seja segura para o usuário. A solução

proposta também visa educar e trazer mais informações sobre a tecnologia que engloba as estações de recarga de veículos elétricos.

Portanto, o problema central que envolve esse projeto é a crescente demanda de estações de recarga de veículos elétricos, junto da falta de infraestrutura e conhecimento relacionado às estações de recarga.

1.3 Objetivo Geral

Desenvolver uma estação de recarga de veículos elétricos capaz de atender aos requisitos solicitados pelo protocolo de comunicação entre a estação de recarga e o VE com a capacidade de medir a energia durante a recarga.

1.4 Objetivos Específicos

- a) Estudar a teoria relacionada ao funcionamento de estações de recarga, com ênfase nas exigências de segurança e no protocolo de comunicação entre a estação e o VE.
- b) Analisar estações de recargas disponíveis no mercado, avaliando suas características técnicas, métodos de medição e capacidade de operar em condições reais, com o objetivo de desenvolver uma solução que garanta segurança e confiabilidade para o usuário.
- c) Desenvolver o projeto prático de uma estação de recarga de veículos elétricos de corrente alternada, monofásica, com capacidade de até 16 A, que incorpore um sistema de medição de energia confiável.
- d) Realizar testes práticos para validar o desempenho da estação de recarga desenvolvida.
- e) Analisar os resultados dos testes para avaliar a viabilidade da solução proposta, identificando possíveis limitações e pontos de melhorias.
- f) Apresentar propostas de melhorias que contribuam para o aprimoramento da solução apresentada.

1.5 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está organizado em 7 capítulos, que abordam desde a fundamentação teórica até os resultados e conclusões obtidos. A estrutura do trabalho é detalhada a seguir:

Introdução: Apresenta o contexto do tema, a justificativa, o problema de pesquisa, os objetivos gerais e específicos, e a estrutura do trabalho.

Fundamentação Teórica: Aprofunda nos conceitos do funcionamento de uma estações de recarga de veículos elétricos e a teoria que trata da medida de energia que será implementada.

Metodologia: Descreve os métodos e procedimentos utilizados para o desenvolvimento do trabalho, incluindo a análise de medidores de energia e estações de recargas, o desenvolvimento do hardware e firmware da estação de recarga, e os testes práticos realizados.

Desenvolvimento do Hardware: Detalha a implementação do hardware da estação de recarga, incluindo a seleção de componentes, a montagem do circuito e a integração do medidor de energia.

Desenvolvimento do Firmware: Aborda o desenvolvimento do firmware necessário para o funcionamento da estação de recarga incluindo os cálculos para realizar a medida de energia

Apresentação dos Resultados: Mostrar os resultados obtidos nos testes práticos, a fim de concluir se os requisitos estabelecidos foram atendidos.

Considerações Finais: Resume as principais contribuições do trabalho, destacando os resultados alcançados e sua relevância para a área de mobilidade elétrica. Também são propostas melhorias para o sistema desenvolvido e sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

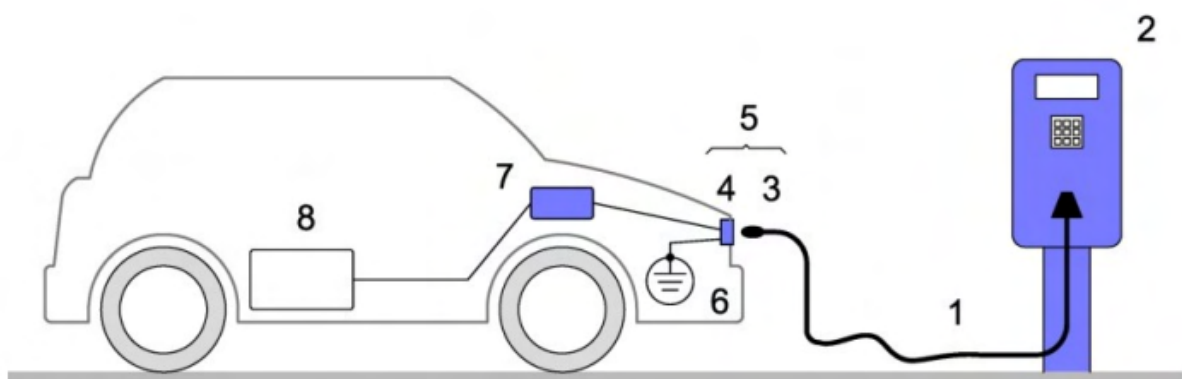
Esta parte do trabalho tem como objetivo aprofundar os conceitos teóricos que embasam o funcionamento de uma estação de recarga de veículos elétricos e os conceitos da medição de energia. Serão abordados os princípios de operação das estações de recarga que são relevantes para o entendimento do projeto. Além disso, serão abordados pontos importantes que devem ser levados em consideração para atender aos requisitos de medida de energia.

A fundamentação teórica também inclui uma análise dos métodos de medição de energia, destacando as técnicas utilizadas para garantir a confiabilidade das medidas. Aprofundando em conceitos como harmônicas e taxa de amostragem. Esses conceitos são essenciais para o desenvolvimento do medidor de energia proposto neste trabalho, que será detalhado nos capítulos subsequentes.

2.1 Princípio de Funcionamento de Uma Estação de Recarga

Para facilitar a compreensão, a Figura 1 apresenta uma representação resumida dos principais componentes da estação de recarga em corrente alternada (CA), que constitui o foco principal do desenvolvimento deste trabalho.

Figura 1 – Diagrama de identificação de componentes da estação de recarga



Fonte: Comissão técnica de normalização eletrotécnica (2017).

- 1) Cabo de recarga;
- 2) Estação de recarga;
- 3) Plugue da estação de recarga;
- 4) Conector de entrada de energia do VE;
- 5) Sistema de conexão do VE;
- 6) Aterramento;
- 7) Carregador de bordo (OBC);
- 8) Bateria;

2.1.1 Classificação de Estações de Recargas

Segundo a NeoCharge (2025) as estações de recarga de veículos elétricos são classificadas em três níveis: nível 1, nível 2 e nível 3. As estações de nível 1 operam com até 16 A e tensão de 127 V ou 220 V, sendo ideais para uso residencial ou portátil. As estações de nível 2 podem chegar a 80 A, normalmente com tensões de 220 V ou 380 V, sendo mais eficientes para aplicações comerciais. Já as estações de nível 3, ou carregadores rápidos, operam com corrente contínua e com potências mais elevadas, exigindo uma infraestrutura elétrica mais robusta, o que permite carregamentos mais rápidos. Esse padrão não é estabelecido por normas técnicas oficiais, mas sim por uma convenção amplamente adotada pela indústria. Este trabalho foca no desenvolvimento de uma estação de nível 1, que utiliza corrente alternada, e apresentam o mesmo princípio de funcionamento das estações de nível 2, se diferenciando principalmente pela sua potência, além de ambas serem as mais utilizadas, especialmente em aplicações residenciais e comerciais, devido ao equilíbrio entre custo, eficiência e facilidade de instalação. As Figuras 2, 3 e 4 ilustram os diferentes tipos de estações de recarga descritas anteriormente.

Figura 2 – Exemplo de estação de recarga nível 1



Fonte: NeoCharge (2025).

Figura 3 – Exemplo de estação de recarga nível 2



Fonte: WEG (2025).

Figura 4 – Exemplo de estação de recarga nível 3



Fonte: WEG (2025).

As estações de recarga de veículos elétricos de nível 1 e nível 2 funcionam como a interface entre a rede elétrica e o VE, com a energia sendo convertida e regulada pelo carregador de bordo (*On Board Charger* - OBC), antes de ser enviada para a bateria. Por essa razão, as estações de recarga de nível 1 e nível 2 não podem ser tecnicamente classificadas como carregadores, pois sua função principal é fornecer energia elétrica ao veículo, enquanto a conversão e controle da carga são responsabilidades do OBC.

Por outro lado, as estações de recarga de nível 3, que operam com corrente contínua (CC), realizam a conversão da energia diretamente na estação e controlam a distribuição da carga para a bateria do veículo, podendo, portanto, serem consideradas carregadores.

O processo de conversão de CA para CC realizado pelo OBC utiliza retificadores que, por natureza, possuem um baixo fator de potência, gerando harmônicas e causando distorções indesejadas na forma de onda da corrente elétrica. Essas distorções afetam diretamente a medição da energia consumida

durante o carregamento da bateria, o que poderia comprometer a confiabilidade das medições realizadas pela estação de recarga, além disso, durante o carregamento, a corrente e a tensão exigida pela bateria varia conforme o estado de carga (*State of Charge* - SOC) da bateria, que é um indicador que representa a quantidade de energia armazenada em uma em relação à sua capacidade total.

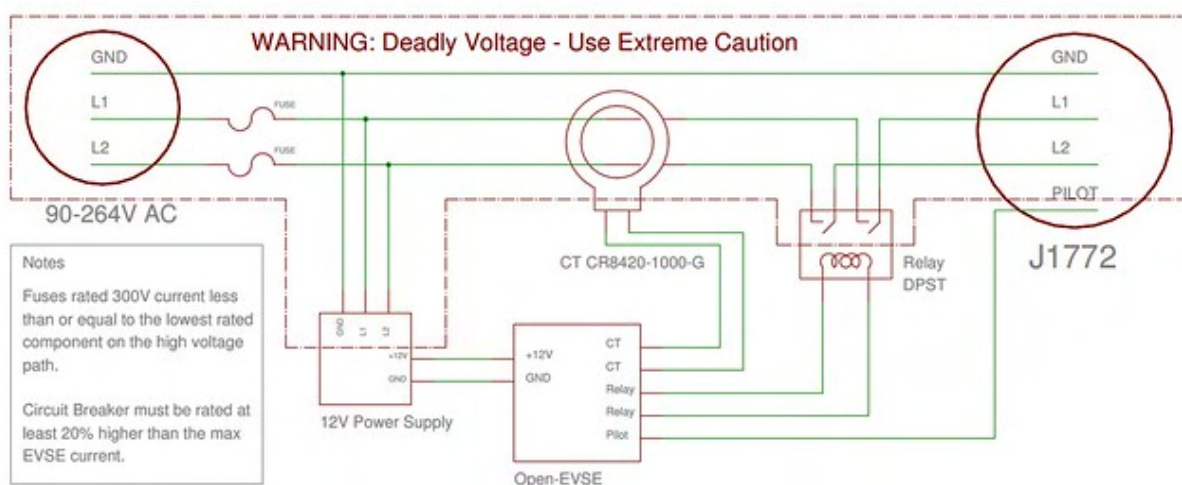
Para mitigar esses efeitos, os OBCs incorporam um estágio de correção do fator de potência (*Power Factor Correction* - PFC), que torna o comportamento muito próximo de um sistema puramente resistivo.

2.1.2 Diagrama Simplificado da Estação de Recarga

A Figura 5 exemplifica um diagrama simplificado de uma estação de recarga de veículos elétricos de nível 1, desenvolvida pelo projeto aberto OpenEVSE, detalhando seus principais componentes e conexões. A estação é composta por um circuito de potência, responsável pela comutação da corrente alternada da rede elétrica até o VE, e um sistema de proteção contra fugas de corrente elétrica, que conforme a norma ABNT NBR IEC 61851-1:2021, deve estar presente na instalação elétrica ou na estação de recarga. O controlador principal gerencia todo o processo de recarga, seguindo o protocolo de comunicação estabelecido entre a estação e o veículo. Destacando que este diagrama não exemplifica a implementação de medidas de energia.

O diagrama ilustra as principais conexões entre os módulos de uma estação de recarga. Essa representação gráfica demonstra a integração dos componentes e serve como referência para a discussão dos requisitos técnicos e funcionais da estação que serão abordados no decorrer desse trabalho.

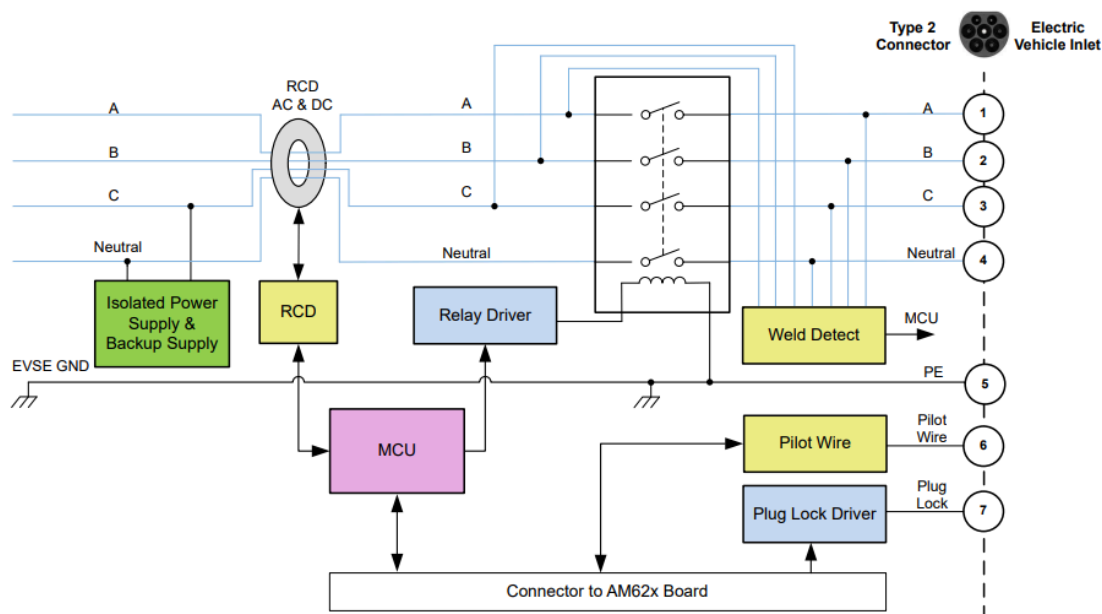
Figura 5 – Diagrama de uma estação de recarga de veículos elétricos



Fonte: OpenEVSE(2025).

A Figura 6 ilustra o diagrama de uma estação de recarga trifásica presente no design de referência desenvolvido pela fabricante Texas Instruments. O diagrama também aborda as principais conexões entre os diferentes módulos da estação de recarga, incluindo o circuito de potência para controle de comutação da corrente elétrica, sistema de proteção, incluindo detecção de fuga corrente elétrica residual AC e CC e detecção do colamento dos relés

Figura 6 – Diagrama de uma estação de recarga de veículos elétricos trifásico



Fonte: Texas Instrument (2022).

2.1.3 Protocolo de Comunicação

O funcionamento das estações de recarga para VEs são regidos por diversas normas, sendo a norma utilizada para determinação do protocolo de baixo nível presente em estações de nível 1 e nível 2, definidos pela norma ABNT NBR IEC 61851-1:2021 sendo a norma ISO 15118 abordando o padrão de comunicação de alto nível. Os requisitos para comunicação de baixo nível especificam diversos estados de operação representando diferentes condições no processo de recarga. Cada estado indica uma etapa distinta na comunicação e no fornecimento de energia entre a estação de recarga e o VE.

A norma descreve os estados com as letras A, B, C, D, E e F, com subdivisões que indicam variações ou condições específicas. A lógica de transição entre cada estado depende do sinal de comunicação entre a estação de recarga e o VE. Esse sinal é chamado de *Control Pilot* (CP) e pode apresentar tanto uma tensão elétrica fixa, quanto um sinal modulado por largura de pulso (PWM).

A comunicação por largura de pulso desempenha um papel importante na interação entre a estação de recarga e o VE. Sua principal função é transmitir a informação de corrente elétrica que o VE pode consumir em um determinado momento, podendo variar dinamicamente durante a recarga. Essa comunicação é realizada por meio de um sinal de onda quadrada, em que a largura do pulso é modulada enquanto a frequência permanece constante em 1 kHz. A largura do pulso é convertida na informação de corrente elétrica máxima que pode ser consumida para o carregamento do veículo, já o VE, por sua vez, interpreta essa informação e controla o consumo de energia durante o carregamento. Essa relação entre a largura do pulso e a corrente, pode ser expressa pela Equação 1:

$$I = 60 \cdot D \tag{1}$$

Onde:

I = corrente elétrica (A)

D = razão cíclica (%)

O sistema de alimentação da estação de recarga gera um sinal PWM com a amplitude do sinal variando entre ± 12 V, a amplitude do sinal pode variar de acordo com os estados de carregamento definidos pelo VE. O veículo elétrico responde ao sinal PWM aplicando uma carga resistiva ao sinal CP, essa carga gera uma queda de tensão, alterando a amplitude do sinal PWM, determinando os estados da estação de recarga, sendo o VE responsável por controlar a carga resistiva aplicada, consequentemente controlando as mudanças dos estados de operação da estação. Cada estado corresponde a uma condição específica do processo de carregamento, como explicado anteriormente. A seguir, detalha-se cada um desses estados e suas implicações para o funcionamento da estação de recarga.

Estado A: Sem conexão no estado A, não há conexão entre o veículo elétrico e a estação de recarga. Nesse estado, o *Control Pilot* da estação de recarga está operando com 12 V sem modulação por largura de pulso, indicando que o sistema está inativo e aguardando a conexão do cabo de recarga. Deve-se considerar que este é o estado inicial, onde ainda não houve qualquer interação entre a estação e o veículo.

Estado B: Conexão Estabelecida O Estado B é alcançado quando o cabo de recarga é conectado entre o veículo e a estação de recarga. Esse estado é subdividido em duas condições principais.

B1: Neste subestado, o sinal *Control Pilot* está em 9 V e não há comunicação ativa. Deve-se entender que isso indica que a estação está aguardando a sinalização do veículo para poder iniciar a carga.

B2: Quando o sinal *Control Pilot* ainda está em 9 V, mas com a modulação por largura de pulso ativa, deve-se considerar que a estação de recarga está pronta para fornecer energia, e o processo de carregamento pode começar assim que o veículo autorizar.

Estado C: Alimentação Disponível O Estado C indica que a alimentação elétrica está disponível, ou seja, a estação de recarga pode fornecer energia ao veículo elétrico. O sinal *Control Pilot* está operando a 6 V, sinalizando que a recarga pode ser iniciada. Esse estado também é subdividido em duas variações.

C1: O sinal *Control Pilot* está em 6 V. Deve-se compreender que isso significa que as condições de segurança do carregamento estão sendo atendidas e o VE está pronto para receber energia sem nenhuma necessidade extra.

C2: O sinal *Control Pilot* está em 6 V com a modulação por largura de pulso ativa, o que indica que a estação está ativa e pronta para iniciar a carga de forma dinâmica, regulando a entrega de energia conforme a necessidade do veículo.

Estado D: Alimentação Disponível com Requisitos de Ventilação O Estado D é similar ao Estado C, mas com a diferença de que o veículo exige ventilação adicional no processo de recarga devido ao calor gerado durante o carregamento. O sinal *Control Pilot* estará operando a 3 V, indicando que o sistema está em uma condição de recarga que exige controle térmico adequado. Esse estado também possui variações.

D1: O sinal *Control Pilot* está em 3 V e a ventilação é necessária para evitar o superaquecimento durante a recarga.

D2: O sinal *Control Pilot* está em 3 V com a modulação por largura de pulso ativa, assim como no estado C2, a alimentação está pronta, com a modulação para controlar o fornecimento de energia.

Estado E: O Estado E indica que não há alimentação disponível para o veículo. Nesse estado, o sinal *Control Pilot* está a 0 V, sinalizando uma falha no fornecimento de energia ou uma condição de emergência. Deve-se observar que esse estado é ativado quando o sistema de alimentação para o VE não pode fornecer energia e pode indicar uma situação de falta de energia, onde o dispositivo de acionamento do sistema precisa abrir para garantir a segurança.

Estado F: O Estado F representa uma falha no sistema de alimentação da estação de recarga. O sinal *Control Pilot* estará operando a -12 V, sinalizando que há um problema crítico no sistema que requer manutenção. Quando o sistema entra nesse estado, assim como no estado E, o dispositivo de acionamento do sistema precisa abrir para garantir a segurança.

Os diferentes estados e condição estão resumidos pelo Quadro 1:

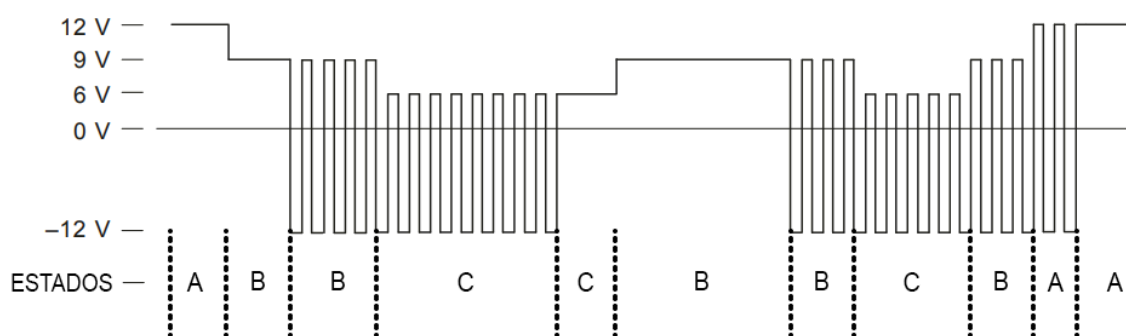
Quadro 1 - Estados da estação de recarga

Estado	Descrição	<i>Control Pilot</i> (V)	Faixa de Tolerância (V)
A	Sem Conexão	+12 V	11,4 a 12,6 V
B1	Conexão Estabelecida (sem PWM)	+9 V	8,37 a 9,59 V
B2	Conexão Estabelecida (com PWM)	+9 V (PWM ativo)	8,37 a 9,59 V
C1	Alimentação Disponível (sem PWM)	+6 V	5,47 a 6,53 V
C2	Alimentação Disponível (com PWM)	+6 V (PWM ativo)	5,47 a 6,53 V
D1	Alimentação com Requisitos de Ventilação (sem PWM)	+3 V	2,59 a 3,28 V
D2	Alimentação com Requisitos de Ventilação (com PWM)	+3 V (PWM ativo)	2,59 a 3,28 V
E	Sem Alimentação Disponível	0 V	Não especificado
F	Falha no Sistema	-12 V	Não especificado

Fonte: Elaboração própria (2025).

A forma de onda que descreve o comportamento do sinal *Control Pilot* ao longo dos diferentes estados de operação da estação de recarga está ilustrada na Figura 7.

Figura 7 – Sinal *Control Pilot* em diferentes estados de operação

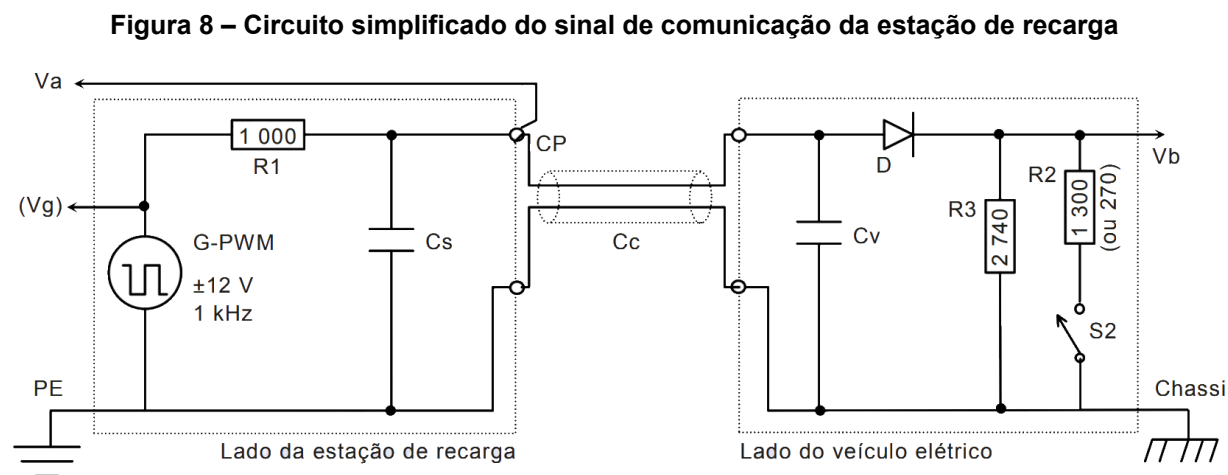


Fonte: Adaptado de ABNT NBR IEC 61851-1:2021 (2021).

O circuito equivalente que exemplifica o comportamento do sinal de comunicação ao ser conectado a um VE pode ser representado pela Figura 8. À esquerda, temos o circuito da estação de recarga, que gera um sinal fixo em +12 V ou em -12 V ou um sinal PWM variando entre +12 V e -12 V, seguido por um resistor de 1 k Ω . O sinal CP é medido após esse resistor.

Do outro lado, temos o circuito que representa o comportamento do VE do ponto de vista da estação. Esse circuito inclui um diodo e cargas resistivas aplicadas ao sinal CP. O diodo garante que a parte inferior do sinal PWM permaneça em -12 V, sem variações devido às cargas resistivas. Por sua vez, essas cargas são controladas pelo VE para definir o estado de operação da estação de recarga.

Com o resistor de 1 k Ω e a carga resistiva, a amplitude positiva do sinal pode ser determinada pelo divisor resistivo formado entre o resistor de 1 k Ω e a carga aplicada.



Fonte: ABNT NBR IEC 61851-1:2021 (2021).

Outro sinal de comunicação abordado pela norma ABNT NBR IEC 61851-1:2021 é conhecido como circuito de proximidade, que é transmitido pelo sinal *Proximity Pilot* (PP). A função de proximidade é descrita como um dispositivo elétrico ou mecânico que indica o estado de conexão entre o conector de entrada de energia do VE e plugue da estação de recarga. Esse mecanismo é essencial para garantir a segurança e a eficiência durante o processo de carregamento,

assegurando que a conexão esteja corretamente estabelecida antes que a energia seja transferida. A comunicação via PP também informa o VE qual a corrente máxima suportada pelo cabo de alimentação. Essa informação é dada por uma resistência, normalmente encontrada dentro do plug presente no cabo de alimentação, entre a conexão PP e a referência, identificada no cabo como *Protective Earth* (PE), o valor dessa resistência indica qual a capacidade máxima aceita pelo cabo de alimentação e se o plug foi corretamente conectado.

A relação entre os diferentes valores de resistência e a máxima corrente que pode circular no cabo está representada no Quadro 2.

Quadro 2 - Resistência do circuito de proximidade

Resistência do PP (Ω)	Corrente Máxima Suportada Pelo Cabo (A)
1.500 Ω	10 A
680 Ω	20 A
220 Ω	32 A
100 Ω	63 A

Fonte: ABNT NBR IEC 61851-1:2021 (2021).

A Figura 9 ilustra a conexão entre o conector de entrada de energia do VE e o plugue da estação de recarga.

Figura 9 – Sistema de conexão de um veículo elétrico



Fonte: Adaptado de Aquakent (2025).

2.2 Medida de energia

2.2.1 Exatidão e Precisão em Medições de Energia

No contexto do desenvolvimento de uma estação de recarga com capacidade de medir o consumo de energia, é essencial compreender os conceitos de exatidão e precisão, que são fundamentais para garantir a confiabilidade das medições do consumo de energia. Embora esses termos sejam frequentemente usados de forma intercambiável, eles se referem a aspectos distintos da qualidade das medições.

A exatidão de uma medição refere-se à proximidade entre o valor medido e o valor verdadeiro ou referência. Em outras palavras, uma medição é considerada exata quando o valor obtido pelo instrumento de medição está muito próximo ao valor real do consumo de energia, que pode ser determinado por um padrão de referência ou calculado com base em modelos precisos. No caso de uma estação de recarga, a exatidão é crítica, pois ela assegura que os dados fornecidos ao usuário, como o consumo de energia durante o processo de recarga, sejam representativos e confiáveis.

Por exemplo, se uma estação de recarga indicar que 10 kWh foram consumidos durante uma recarga, mas o valor real medido por um sistema de referência for 9,8 kWh, a exatidão do medidor da estação de recarga pode ser questionada, pois apresenta uma discrepância de 0,2 kWh em relação ao valor real. Essa diferença deve ser levada em consideração, especialmente quando é realizada a cobrança pelo consumo da energia.

Por outro lado, a precisão refere-se à capacidade de um instrumento de medição de fornecer resultados consistentes ao realizar medições repetidas sob as mesmas condições. Em termos práticos, um instrumento preciso sempre fornecerá os mesmos resultados quando medindo a mesma quantidade, mesmo que esses resultados não sejam exatos. A precisão é importante para garantir que as leituras do consumo de energia não variem significativamente entre medições sucessivas, o que poderia levar a interpretações errôneas dos dados.

No contexto de uma estação de recarga, se a medição do consumo de energia for repetida várias vezes, em uma mesma circunstância, e sempre resultar em valores semelhantes, mas não necessariamente no valor exato, o sistema será considerado preciso, mas não necessariamente exato. No entanto, um sistema altamente preciso pode ser ajustado ou calibrado para melhorar sua exatidão.

Idealmente as medições devem ser tanto exatas quanto precisas. Um sistema que seja exato, mas não preciso, indicará corretamente o valor médio do consumo de energia, mas poderá apresentar flutuações em medições repetidas, dificultando a interpretação dos dados. Por outro lado, um sistema preciso, mas não exato, poderá fornecer medições consistentes, mas distorcidas em relação ao valor real, o que afetaria a confiabilidade dos dados.

No caso da estação de recarga, é essencial que os instrumentos de medição utilizados para monitorar o consumo de energia apresentem tanto exatidão quanto precisão, garantindo que os usuários recebam informações corretas e consistentes sobre o consumo de energia durante o processo de recarga. Embora não exista oficialmente uma regulamentação específica que estabeleça valores de erro de medidas de energia para estações de recarga, no caso de medidores residenciais, há normas que definem limites aceitáveis de precisão. A adoção de padrões semelhantes em estações de recarga melhora a transparência para os usuários e assegura que eles sejam cobrados apenas pelo que realmente foi consumido.

2.2.2 Cálculos de medida de energia

Energia elétrica é a forma de energia associada ao movimento de elétrons em um condutor. Ela é gerada quando cargas elétricas são movimentadas por uma diferença de potencial em um circuito. Essa movimentação de cargas, ou corrente elétrica, pode ser convertida em outras formas de energia, como luz (em lâmpadas), calor (em aquecedores) ou movimento (em motores elétricos).

A unidade de medida da energia elétrica no Sistema Internacional de Unidades é o joule, mas no contexto da distribuição e consumo de eletricidade, a energia elétrica é comumente medida em quilowatt-hora (kWh).

Uma parte da energia é responsável por realizar trabalho útil, enquanto a outra é destinada a sustentar os campos magnéticos e elétricos essenciais para a circulação da energia.

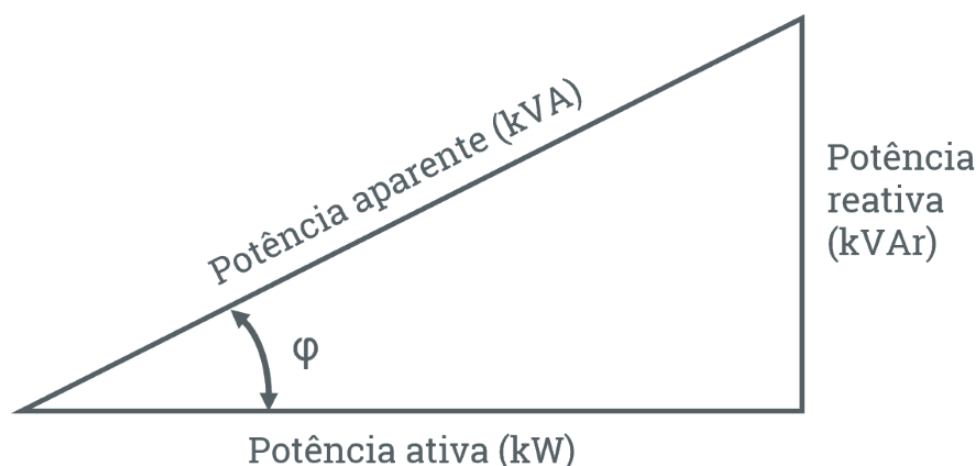
A energia ativa é definida como a soma da potência ativa ao longo do tempo, enquanto a energia reativa é a soma da potência reativa no tempo (KOZUB, 2012, p. 2). Portanto podemos dizer que a energia pode ser dividida em duas componentes, sendo uma delas expressa pela integral da potência ativa ao longo do tempo e outra a integral da potência reativa no mesmo intervalo, como descrito na Equação 2 e na Equação 3:

$$E_{ativa} = \int_{t1}^{t2} P(t) \cdot dt \quad (2)$$

$$E_{reativa} = \int_{t1}^{t2} Q(t) \cdot dt \quad (3)$$

A componente de potência ativa (P) e potência reativa (Q) podem ser ilustradas pelo Triângulo de Potência, que também faz a representação da potência aparente (S), conforme a Figura 8:

Figura 8 - Triângulo de Potência



Fonte: Luterled (2023).

Seguindo a trigonometria, a relação entre a potência ativa e a potência reativa é representada pelo triângulo de potência, onde a soma vetorial dessas grandezas resulta na potência aparente (S), que representa a potência total fornecida ao sistema, dada pela Equação 4:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (4)$$

"Em um sistema puramente senoidal, sem harmônicos de ordem superior, a potência aparente é igual à potência total do sistema. Quando harmônicos são introduzidos no sistema, a soma vetorial perde precisão." (KOZUB et al., 2012, p. 2, tradução nossa). Portanto, não é possível considerar que a soma vetorial da potência ativa e da potência reativa seja igual a potência aparente.

No contexto da cobrança de energia residencial e em estações de recarga de VEs, considera-se o consumo de energia ativa, que é a quantidade efetivamente consumida para realizar trabalho útil. Já a energia reativa, é responsável por manter os campos magnéticos e elétricos do sistema, envolvendo a troca constante entre a fonte de energia e a carga, sem ser consumida de fato, mas necessária para o funcionamento do sistema.

A potência ativa, medida em watts (W), é definida como a média da potência instantânea ao longo de um período. A potência instantânea, por sua vez, é dada pelo produto da tensão instantânea pela corrente instantânea no mesmo instante de tempo. Matematicamente, a potência ativa pode ser expressa conforme a Equação 5:

$$P_{ativa} = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) \cdot i(t) \cdot dt \quad (5)$$

Considerando um sistema microcontrolado, não se pode adotar um modelo contínuo, mas sim um sistema discreto. Dessa forma, deve-se empregar a Equação 6 para a medição de potência ativa e a Equação 7 para a medição de energia, respectivamente.

$$P_{ativa} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N v_k \cdot i_k \quad (6)$$

$$E = \sum P_{ativa} \Delta t \quad (7)$$

Ao considerar um sistema discreto, é necessário também atentar-se para a frequência de amostragem. Segundo Lathi (2007), para que o sinal seja recuperado a partir das amostras, a frequência de amostragem deve ser pelo menos o dobro da largura de faixa do sinal. Nesse caso, o sinal amostrado pode ser recuperado por meio de um filtro passa-baixas ideal. A menor taxa de amostragem necessária para garantir a recuperação do sinal é chamada de taxa de Nyquist.

Considerando um sistema com carga que possui comportamento não linear, é esperado que ocorram harmônicas na forma de onda da corrente. A presença dessas harmônicas deve ser levada em conta ao determinar a frequência de amostragem para a medição acurada da energia, uma vez que a amostragem inadequada pode resultar em distorções nas medições.

Em um OBC que possui um estágio de PFC, a frequência de amostragem pode ser reduzida, uma vez que o estágio de PFC minimiza as distorções causadas por harmônicas de ordens mais altas. No entanto, ainda é necessário considerar as harmônicas de ordens mais baixas, pois elas podem persistir no sistema e afetar a qualidade da medida de energia. Portanto, mesmo com o PFC, a análise e o controle das harmônicas remanescentes são essenciais para atingir os níveis de precisão e exatidão desejados.

Para considerar as harmônicas de forma adequada, é preciso levar em conta o Teorema de Nyquist, que estabelece que a frequência de amostragem mínima deve ser pelo menos o dobro da frequência da harmônica de maior ordem que se deseja analisar. Isso garante que o sinal seja reconstruído corretamente sem perda de informação, evitando o fenômeno de *aliasing*. Portanto, ao definir a frequência de amostragem, é necessário identificar a harmônica de maior ordem relevante para o sistema e assegurar que a taxa de amostragem seja suficiente para capturar suas características de forma adequada.

2.3 Análise de Medidores de Energia Para Estação de Recarga

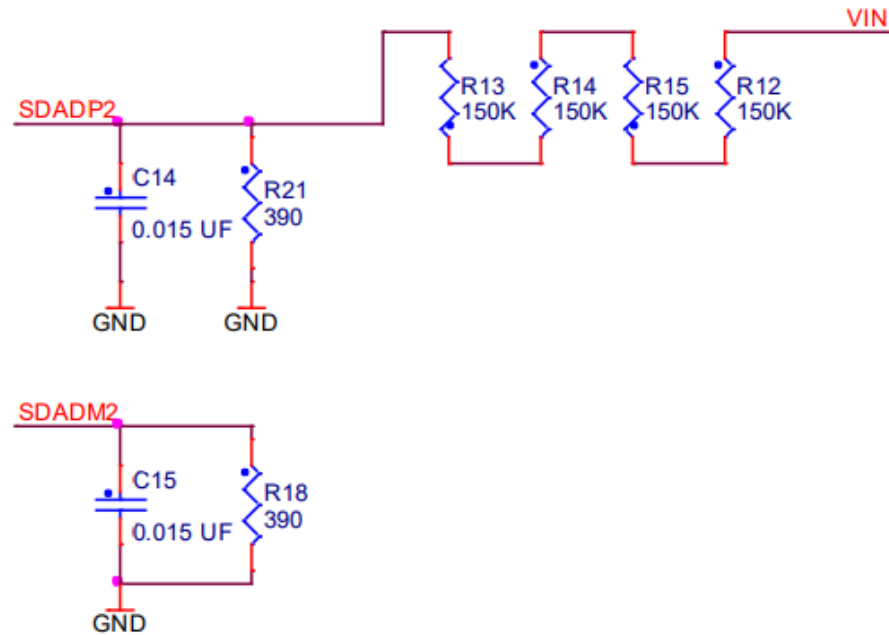
Os medidores de energia são dispositivos utilizados para a medição confiável do consumo de energia elétrica em sistemas de potência, encontrados em aplicações residenciais, comerciais e industriais. Nesta seção, serão apresentadas diferentes soluções de diferentes fabricantes para a realização de medidas de energia. Essa tecnologia é amplamente estudada e apresenta diversas soluções diferentes. O objetivo dessa seção do texto, é aprofundar nos conceitos que as soluções abordam para entender como essa tecnologia pode ser implementada em uma estação de recarga de veículos elétricos de forma viável.

2.3.1 Medidor de Energia Monofásico do Fabricante NXP

O primeiro ponto observado ao estudar os diferentes medidores de energia foi a necessidade da medida de tensão elétrica de fase em relação ao neutro. A solução para o medidor de energia monofásico da NXP foi a utilização de um circuito não isolado. Além disso, o medidor conta com um microcontrolador dedicado ao processamento digital do sinal, que possui um conversor analógico-digital (ADC) do tipo sigma-delta. Esse tipo de ADC é amplamente utilizado em aplicações de medição de energia devido à sua alta resolução e capacidade de filtragem de ruídos devido a técnica de sobreamostragem, especialmente em sinais considerados pequenos, além de ter a flexibilidade para atingir frequências de amostragens altas o suficientes para considerar as harmônicas.

Como o circuito utilizado é referenciado à rede elétrica, não há necessidade do isolamento das medidas de tensão e corrente elétrica. Dessa forma, a medição de tensão é realizada por meio de um divisor resistivo, que reduz a tensão a ser medida, V_{IN} , para um valor compatível com a faixa de leitura do microcontrolador, conforme ilustrado na Figura 10. Para a medição de corrente, optou-se pela utilização de um resistor shunt, como mostra a Figura 11.

Figura 10 - Circuito divisor de tensão

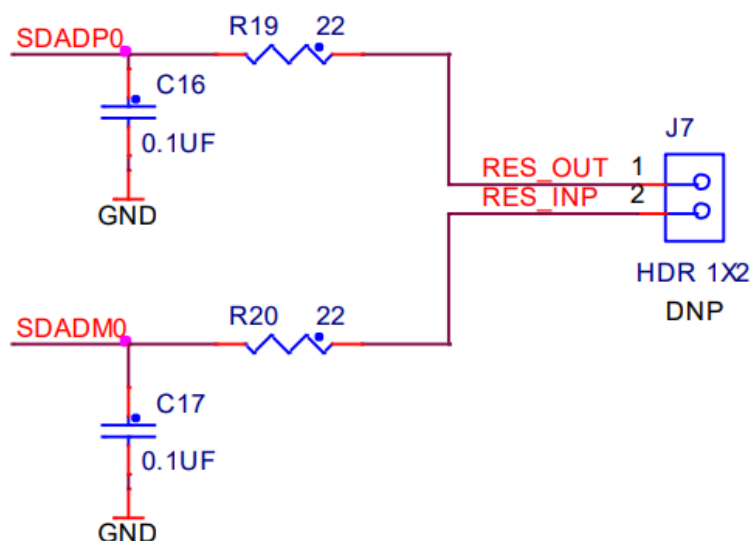


Fonte: Martin Mienkina (2013, p. 13).

O circuito dedicado à aquisição de amostras de tensão elétrica utiliza o ADC sigma-delta operando com base em medições diferenciais, o que significa que as amostras são dadas pela diferença de potencial entre dois pontos, neste caso, SDADP2 e SDADM2. Para garantir a integridade do sinal, o circuito incorpora um filtro anti-aliasing passa-baixa, composto pelos capacitores C14 e C15 e pelos resistores R18 e R21, com uma frequência de corte de 27,22 kHz. Esse filtro atenua ruídos de alta frequência melhorando a qualidade das medidas. Além disso, observa-se a utilização de múltiplos resistores conectados em série no divisor resistivo, isso se justifica pela distribuição da dissipação de potência ao longo do circuito, diminuindo a diferença de potencial em cada resistor, evitando a necessidade de resistores maiores e a quebra do dielétrico.

O Circuito dedicado à aquisição de corrente elétrica pode ser observado na Figura 11.

Figura 11 - Condicionamento do sinal de corrente



Fonte: Martin Mienkina (2013, p. 13).

Para o condicionamento do sinal de corrente elétrica, emprega-se o mesmo princípio utilizado na medição de tensão, com o ADC sigma-delta operando em modo diferencial entre os pontos SDADP0 e SDADM0. O circuito também incorpora um filtro anti-aliasing, com frequência de corte de 72,3 kHz, para garantir a integridade do sinal e evitar a distorção causada por ruídos de alta frequência. Esse circuito é otimizado para utilizar um resistor shunt como sensor de corrente, mas oferece flexibilidade para substituí-lo por uma bobina de Rogowski que atenda aos limites de tensão, quando necessário. A troca do sensor é facilitada pela presença do conector J7.

É importante ressaltar que a tolerância dos resistores utilizados tanto para a medida de tensão quanto para medida de corrente tem influência na exatidão da medida de energia. Porém parte do erro causado por tolerâncias pode ser compensado pelo processo de calibração do equipamento.

2.3.2 Solução de Medição de Energia Monofásica Com Medida Isolada da Texas Instrument

A solução apresentada pela fabricante Texas Instruments para um medidor de energia monofásico faz uso de dois microcontroladores, sendo um

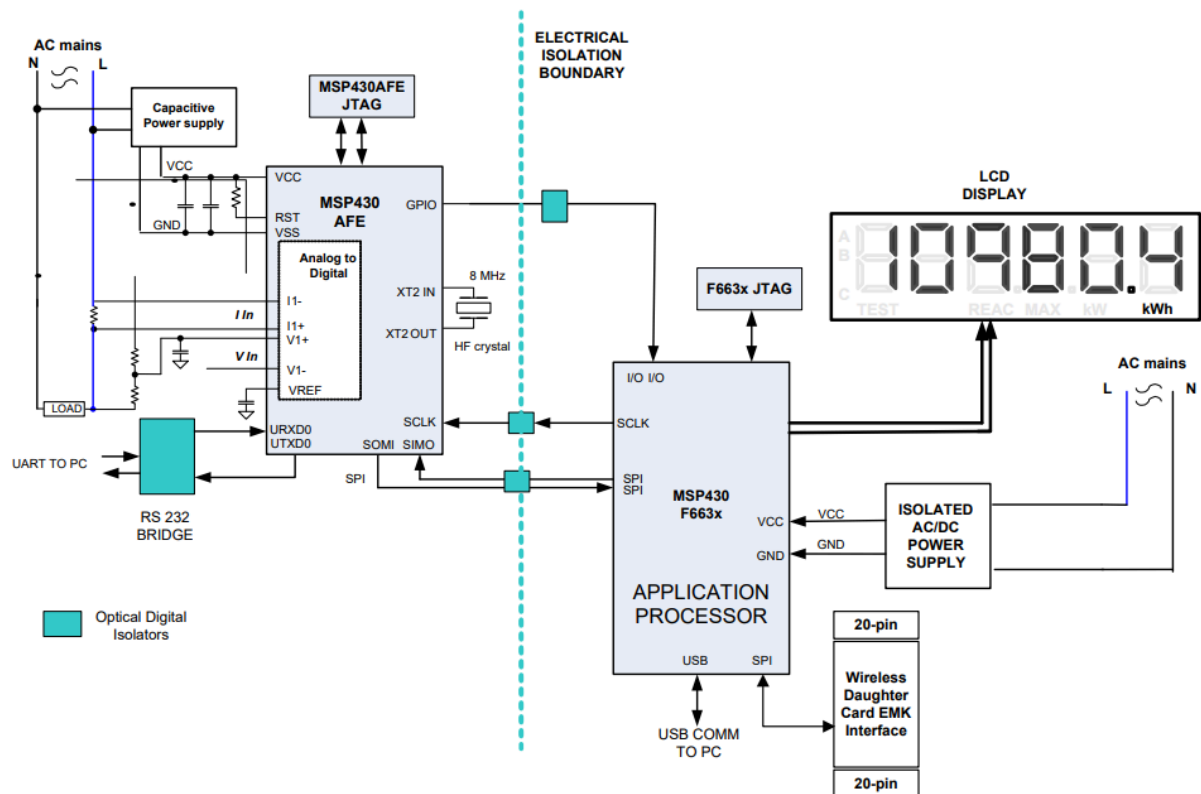
responsável pelas medições, não isolado, e outro responsável pela comunicação, gestão de dados e interface com o usuário, isolado. A comunicação entre eles é realizada por meio de linhas SPI/UART isoladas.

A principal vantagem dessa abordagem é o isolamento elétrico entre as funções de medição e as funções de aplicação. O microcontrolador que atua como processador de metrologia, está diretamente ligado à rede elétrica para realizar medições de energia. Para proteger o restante do sistema e o usuário contra choques provenientes da rede elétrica, este processador é isolado do microcontrolador que atua como processador de aplicação. O isolamento é garantido por isoladores digitais nas linhas de comunicação SPI/UART.

Cada microcontrolador é escolhido com base nas suas capacidades específicas, o que resulta em um desempenho mais eficiente, além da divisão de tarefas entre dois microcontroladores, o que permite uma melhor organização e otimização do sistema, essa abordagem apresenta vantagens que podem ser implementadas no desenvolvimento da estação de recarga, visto que o funcionamento da estação de recarga pode ser separado do processamento e aquisição das amostras tornando o sistema mais eficiente.

A Figura 12 ilustra o diagrama de blocos da implementação do medidor de energia utilizando microcontroladores isolados.

Figura 12 - Diagrama de Blocos



Fonte: Mekre Mesganaw (2014, p. 16).

As medições de corrente e tensão são realizadas utilizando conversores analógico-digitais (ADCs) sigma-delta, semelhante a solução da apresentada pela NXP. O sistema usa entradas diferenciais, garantindo maior precisão e rejeição de ruído. Filtros RC passa baixa são usados como filtros anti-aliasing, e a amostragem dos sinais de tensão e corrente é sincronizada para obter medições simultâneas e precisas. A compensação de fase e a remoção de offset DC também são implementadas para garantir a exatidão das medições.

2.3.3 Solução Para Medidores de Energia Desenvolvida Pela Fabricante Analog Devices

Outra solução estudada foi o circuito integrado ADE7978ACPZ-RL, desenvolvido pela Analog Devices, projetado para monitoramento de energia em sistemas trifásicos. Esse componente é amplamente utilizado em medidores de energia e sistemas de gerenciamento de energia, sendo capaz de medir com alta

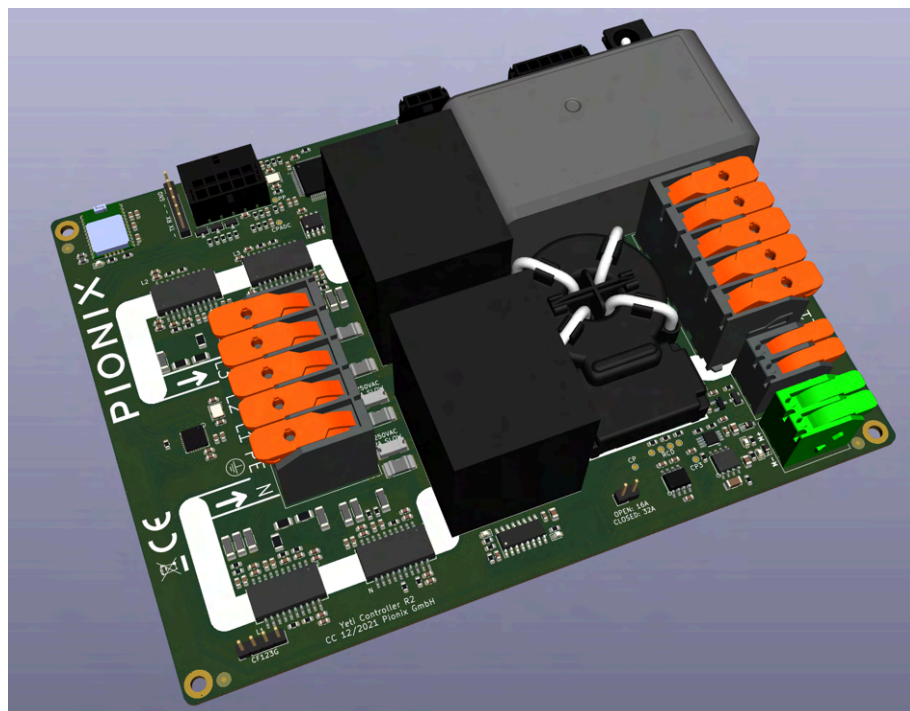
Para a aquisição das medidas, o circuito integrado utiliza um ADC externo, o ADE7932ARIZ, que incorpora isolamento galvânico, garantindo maior segurança na medição. A comunicação entre a estação de recarga e o ADE7978ACPZ-RL ocorre por meio de uma interface SPI, proporcionando integração simplificada com microcontroladores. A Figura 13 ilustra um diagrama de blocos dessa implementação.

A principal vantagem dessa abordagem é a facilidade de implementação, uma vez que o circuito integrado elimina a necessidade de desenvolver um firmware para aquisição e processamento de sinais. Além disso, o isolamento galvânico

assegura maior segurança operacional, protegendo os usuários contra choques provenientes da rede elétrica.

Por outro lado, o ADE7978ACPZ-RL apresenta um custo mais elevado em comparação com as outras soluções discutidas anteriormente. Essa solução foi identificada na estação de recarga desenvolvida pela empresa Pionix, um projeto aberto que também foi analisado durante o desenvolvimento deste trabalho. A Figura 14 exibe o modelo 3D da estação de recarga analisada.

Figura 14 - Estação de Recarga Pionix



Fonte: Pionix (2025).

3 METODOLOGIA

Este capítulo descreve a metodologia empregada no desenvolvimento de uma estação de recarga de veículos elétricos de nível 1, projetada para operar com uma capacidade de corrente elétrica de 16 A e realizar a medição do consumo de energia durante a recarga. O projeto foi estruturado em etapas que incluem a análise de estações de recargas e medidores de energia, o desenvolvimento do hardware, desenvolvimento do firmware, a implementação prática e a validação dos resultados.

Inicialmente, foram analisados medidores de energia e estações de recarga disponíveis no mercado, com o intuito de compreender as etapas essenciais de funcionamento e identificar as melhores práticas. Essa análise serviu como base para o desenvolvimento do hardware.

O desenvolvimento firmware foi dividido em duas partes, uma dedicada para o funcionamento da estação de recarga e outra dedicada para realizar as aquisições de medidas e processar os dados coletados para o cálculo de energia.

Para validar os resultados, foram realizados testes práticos da estação de recarga com carga nominal, analisando principalmente o sinal de comunicação *Control Pilot*, com intuito de verificar se os requisitos do protocolo de comunicação foram cumpridos. Também foi incluído a medição de energia e o funcionamento da estação de recarga, comparando os resultados obtidos com valores de referência medidos por equipamentos que apresentam alta exatidão.

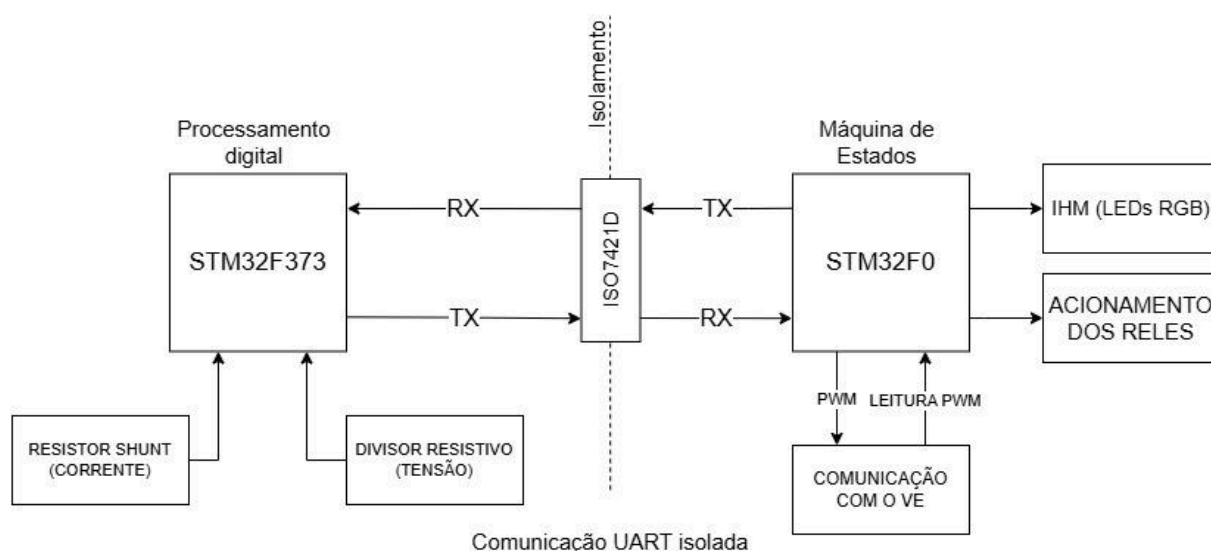
Por fim, a metodologia adotada permitiu o desenvolvimento de uma solução eficiente para uma estação de recarga que possui medição de consumo de energia confiável. Os resultados obtidos evidenciam o potencial da solução proposta para aplicações práticas, atendendo aos requisitos estabelecidos pelo projeto.

4 DESENVOLVIMENTO DO HARDWARE DA ESTAÇÃO DE RECARGA

O desenvolvimento do hardware para a estação de recarga de veículos elétricos nível 1 de 16 A foi dividido em duas partes principais. A primeira parte é voltada para o funcionamento da estação de recarga, seguindo o protocolo de comunicação tratado pela norma ABNT NBR IEC 61851. Já a segunda parte é dedicada à aquisição de medidas de tensão e corrente elétrica, com o objetivo de calcular o consumo de energia.

Para facilitar a compreensão da implementação completa do hardware, a Figura 15 ilustra a estrutura e as interconexões entre os principais componentes do sistema.

Figura 15 - Diagrama de blocos da estação de recarga

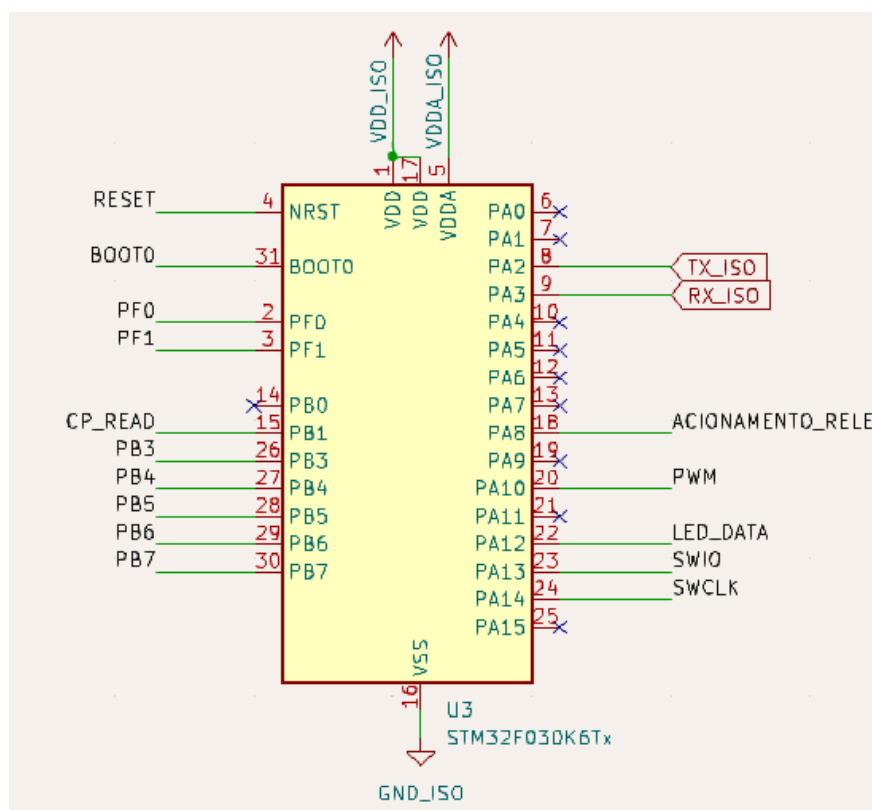


Fonte: Elaboração própria (2025).

A primeira parte do sistema é responsável pelo controle da estação de recarga, que é realizada por meio da implementação de uma máquina de estados no microcontrolador STM32F0. Este microcontrolador foi escolhido por ser uma solução simples, de baixo custo, além de atender plenamente às necessidades da aplicação.

O Diagrama esquemático do microcontrolador SMT32F030 e as principais conexões podem ser observadas na Figura 16.

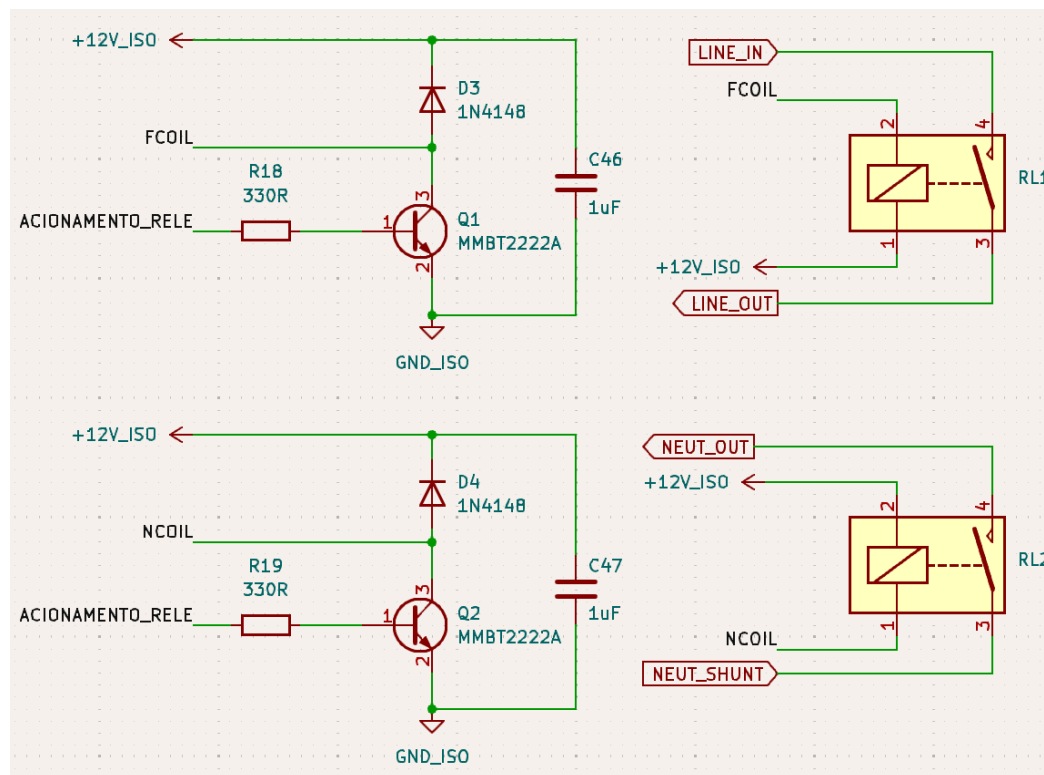
Figura 16 - Diagrama esquemático do microcontrolador SMT32F030



Fonte: Elaboração própria (2025).

Para a realização da comutação principal da estação de recarga, foram selecionados dois relés, um para a fase e outro para o neutro. Os relés utilizados são do modelo HF161F da Hongfa, que possuem capacidade para suportar até 20 A em 250 VAC e corrente de acionamento de 75 mA, atendendo assim a todos os requisitos necessários para a aplicação. A escolha de utilizar relés é justificada principalmente pelo custo e tamanho reduzido, quando comparado à utilização de contadores. A Figura 17 apresenta o circuito utilizado para o controle do acionamento dos relés via microcontrolador.

Figura 17 - Diagrama esquemático do acionamento dos relés



Fonte: Elaboração própria (2025).

O circuito responsável pelo controle do sinal de comunicação *Control Pilot* foi projetado utilizando um amplificador operacional TLV1805, alimentado por uma fonte simétrica de +12 V e -12 V, configurado em modo de comparação, possibilitando que o sinal possa ser controlado pelo microcontrolador STM32F0. O controle é feito comparando um sinal PWM gerado pelo STM32F0, identificado na figura como PWM, ao valor da tensão de 1,65 V, que é metade da tensão de referência do sistema. Na saída do TLV1805 é esperado +12 V quando o sinal PWM gerado pelo pelo STM32F0 estiver em nível lógico alto, e -12 V quando o sinal PWM for 0 V.

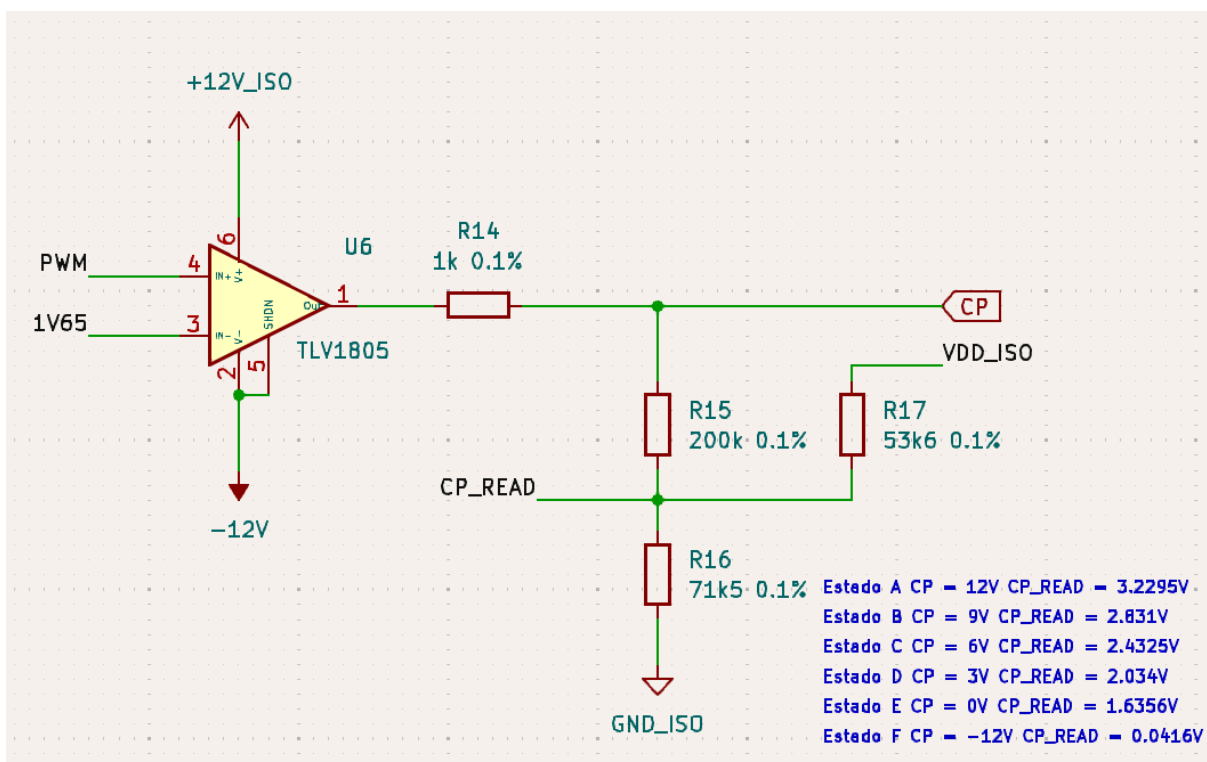
Para que a estação de recarga consiga interpretar corretamente o estado atual determinado pelo VE, foi necessário condicionar o sinal *Control Pilot*, representado na figura como CP, de modo que atenda aos níveis de tensão compatíveis com a leitura do microcontrolador STM32F0. Para isso, foram utilizados os resistores R15, R16 e R17, garantido que o sinal esteja dentro dos limites adequados para o processamento.

O ponto identificado como *CP_READ* apresenta uma tensão proporcional ao sinal de comunicação, e é nesse ponto onde as leituras de tensão são feitas com objetivo de determinar os estados de operação da estação de recarga.

É importante destacar que a estação gera o sinal CP com o valores fixo de +12 V ou -12 V ou um sinal PWM variando de +12 V a -12 V e a amplitude positiva, varia de acordo com a carga resistiva aplicada pelo VE sobre o sinal *Control Pilot*, por conta disso, os estados de operação são definidos pelo próprio VE e a estação apenas reage a carga aplicada sobre sinal CP.

A Figura 18 ilustra a implementação do circuito de controle do sinal de comunicação *Control Pilot*.

Figura 18 - Diagrama esquemático do circuito responsável pelo sinal de comunicação



Fonte: Elaboração própria (2025).

Para realizar a interface entre a estação de recarga e o usuário foram utilizados leds RGB endereçável WS2812, alterando as cores de acordo com os estados de carregamento, a indicação de cada estado está resumida no Quadro 3.

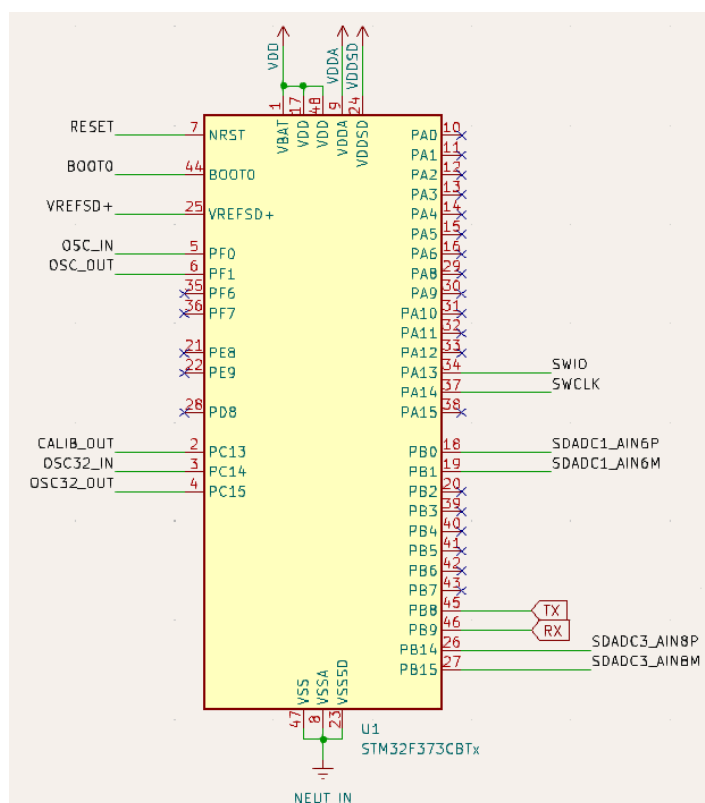
Quadro 3 - Indicação dos estados de carregamento

Cor	Estado de carregamento
Branco	Estado A
Amarelo	Estado B início de uma recarga
Verde	Estado B recarga finalizada
Verde (Efeito)	Estado C
Vermelho	Estado F

Fonte: Elaboração própria (2025).

A segunda parte do sistema é dedicada à aquisição de medidas de tensão e corrente elétrica, essenciais para o cálculo do consumo de energia. O desenvolvimento teve como inspiração, características de cada solução estudada nos medidores de energias apresentados. Para essa finalidade, foi utilizado o microcontrolador STM32F373 ilustrado na Figura 19, que possui características voltadas para instrumentação, como um módulo de ponto flutuante, que garante desempenho de processamento, e um ADC do tipo sigma-delta. O sensor utilizado para medir a corrente elétrica selecionado, foi um resistor shunt no valor de 5 mΩ, apresentando simplicidade na implementação e também um ótimo desempenho quando utilizado junto a um ADC do tipo sigma-delta, enquanto a medida de tensão elétrica foi realizada por meio de um divisor resistivo. Diferente da primeira parte, os circuitos para aquisição de medidas de tensão e corrente elétrica, não são isolados da rede elétrica, visto que a medida de tensão deve ser em relação ao neutro, o que exigiu cuidados adicionais em relação a segurança durante o desenvolvimento do projeto.

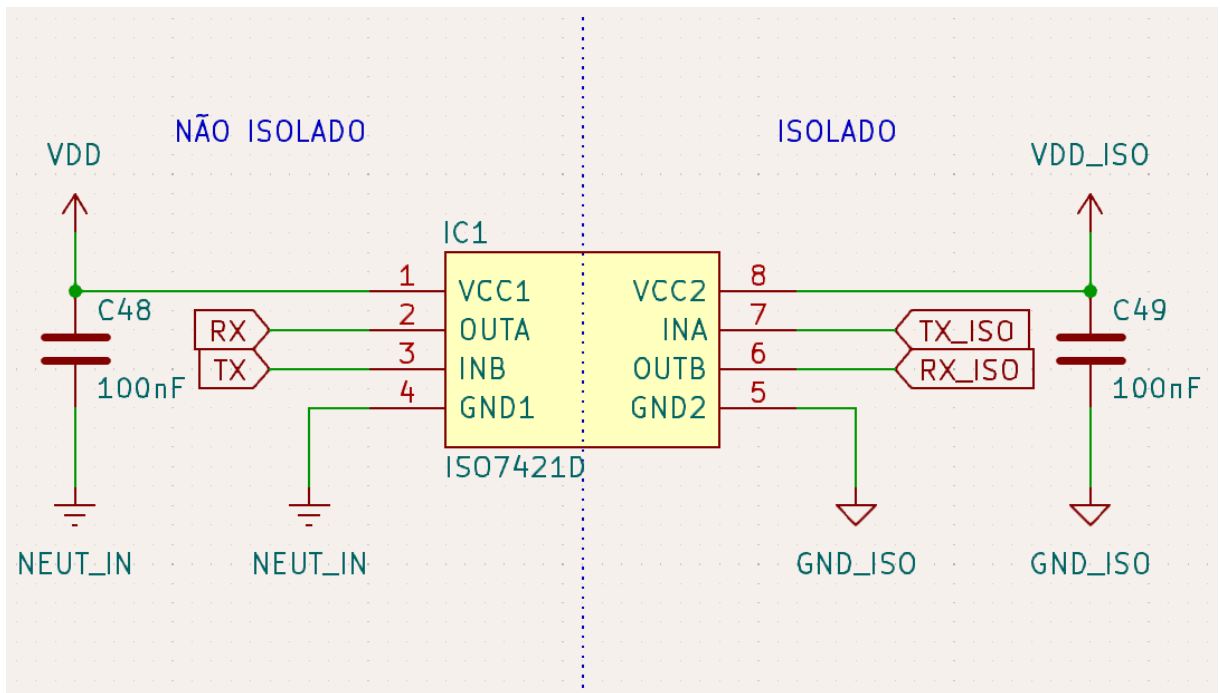
Figura 19 - Diagrama esquemático do microcontrolador SMT32F373



Fonte: Elaboração própria (2025).

Para estabelecer a comunicação entre os microcontroladores STM32F0 e STM32F373, foi utilizada a interface serial UART (*Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*). A fim de garantir a integridade do sinal, a comunicação foi isolada eletricamente por meio do circuito integrado ISO7421D da Texas Instruments. Esse isolamento galvânico assegura a transmissão de dados de forma segura entre os microcontroladores que possuem referências distintas. A Figura 20 ilustra as conexões para o isolamento da comunicação UART

Figura 20 - Diagrama esquemático do circuito de isolamento da comunicação UART

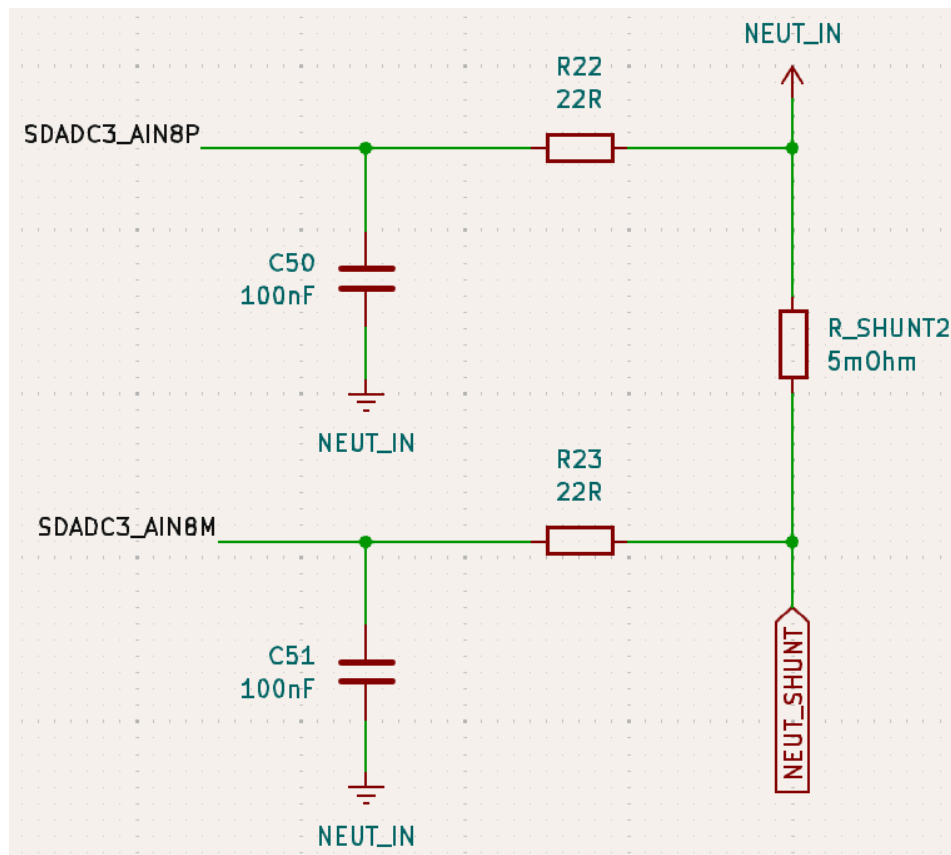


Fonte: Elaboração própria (2025).

O STM32F373 foi configurado para trabalhar com tensão de referência interna de 1,22 V, por conta disso os sinais medidos utilizando o ADC sigma delta em modo diferencial precisam atender a faixa de tensão máximas no valor de +0,61 V e -0,61 V. Para isso, foram empregados os circuitos de condicionamento dos sinais medidos.

Para o condicionamento do sinal de medida de corrente elétrica proveniente do resistor shunt, foi utilizado apenas um filtro *anti-aliasing* passa-baixa, já que a faixa de tensão sobre o resistor shunt estará dentro da faixa necessária quando a corrente elétrica nominal estiver circulando na estação de recarga, conforme ilustrado na Figura 21.

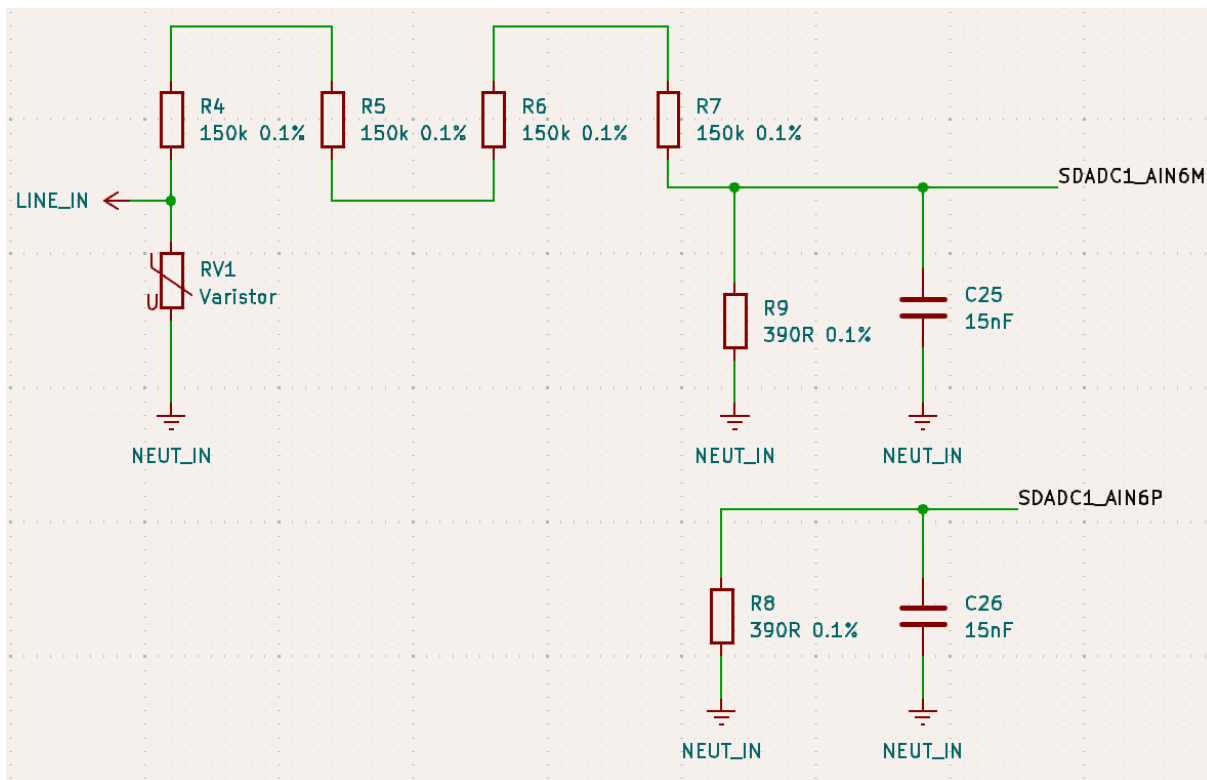
Figura 21 - Diagrama esquemático do circuito de condicionamento do sinal de medida de corrente elétrica



Fonte: Elaboração própria (2025).

Para o condicionamento do sinal de medição de tensão elétrica, foi utilizado um divisor resistivo seguido de um filtro anti-aliasing do tipo passa-baixa. O divisor resistivo é composto por quatro resistores de 150 k Ω , escolhidos para distribuir a dissipação de energia entre eles. Além disso, o circuito apresenta um varistor, RV1, que atua como proteção contra picos de tensão elétrica na fase de alimentação, assegurando a integridade do sistema em caso de surtos elétricos. A Figura 22 ilustra o esquema completo do circuito.

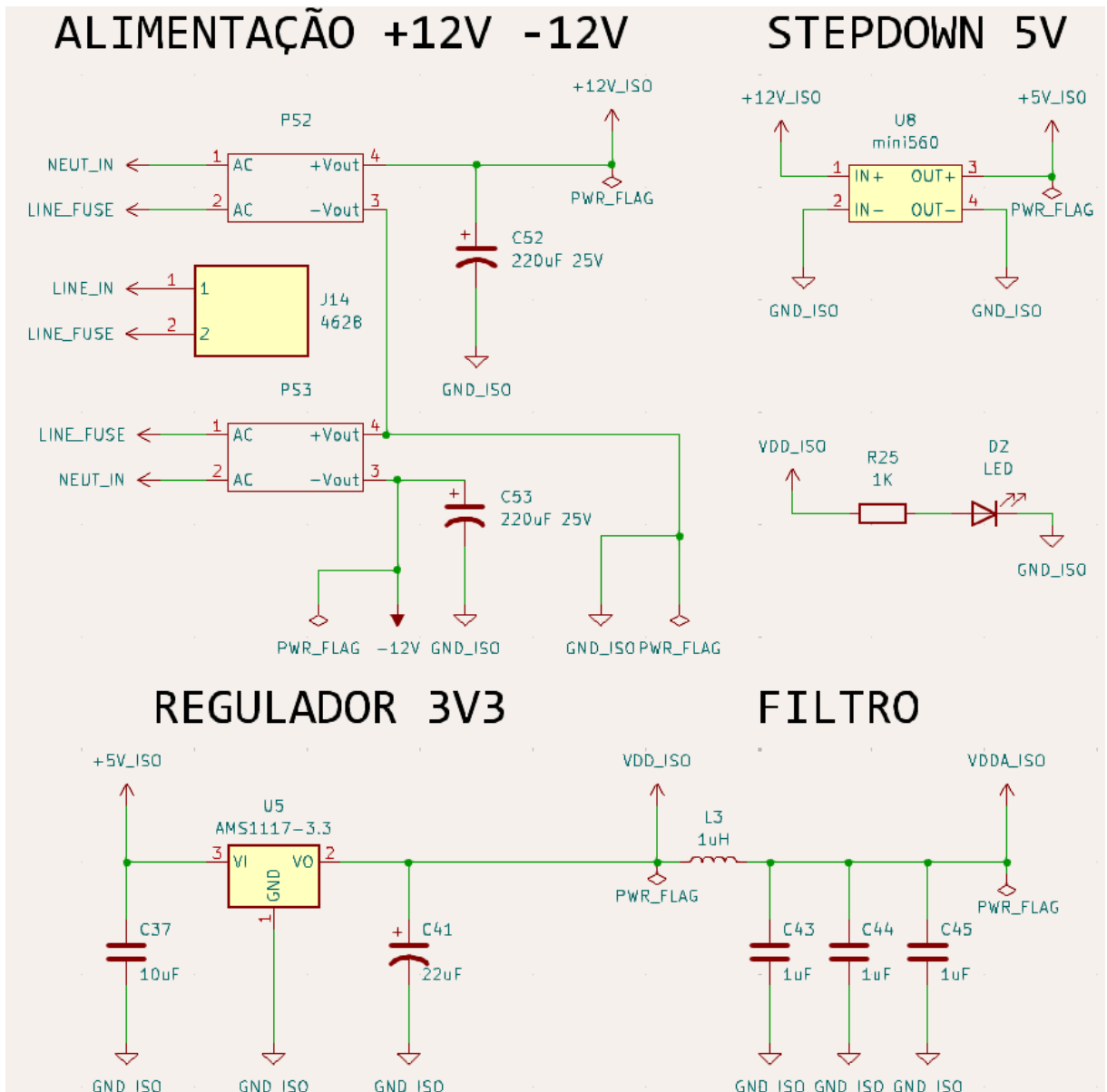
Figura 22 - Diagrama esquemático do circuito de condicionamento do sinal de medida de tensão elétrica



Fonte: Elaboração própria (2025).

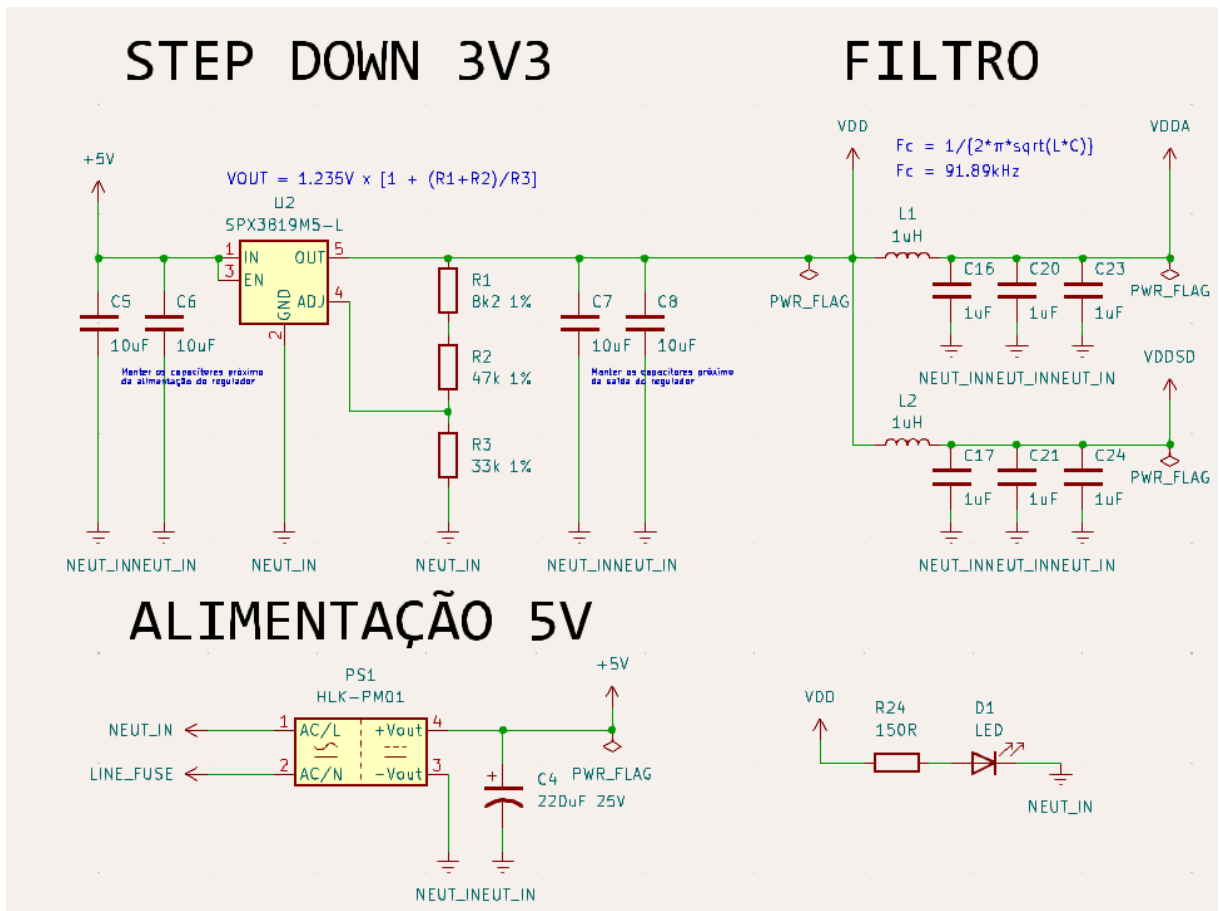
Em relação a alimentação dos circuitos, com objetivo de atender aos níveis de tensão, foram utilizados dois módulos de fonte chaveada isolados de 12 V, conectados de forma a produzir um sinal simétrico de +12 V e -12 V, necessários para o protocolo de comunicação da estação de recarga, seguido de estágios de redução para 5 V e 3,3 V para a alimentação dos demais circuitos. Para a parte não isolada do circuito, foi utilizado um módulo de fonte chaveada de 5 V, seguido por um estágio de redução de tensão para 3,3 V. As Figuras 23 e 24 ilustram o esquemático de como foi realizada a implementação da alimentação da estação.

Figura 23 - Diagrama esquemático do circuito de alimentação isolada



Fonte: Elaboração própria (2025).

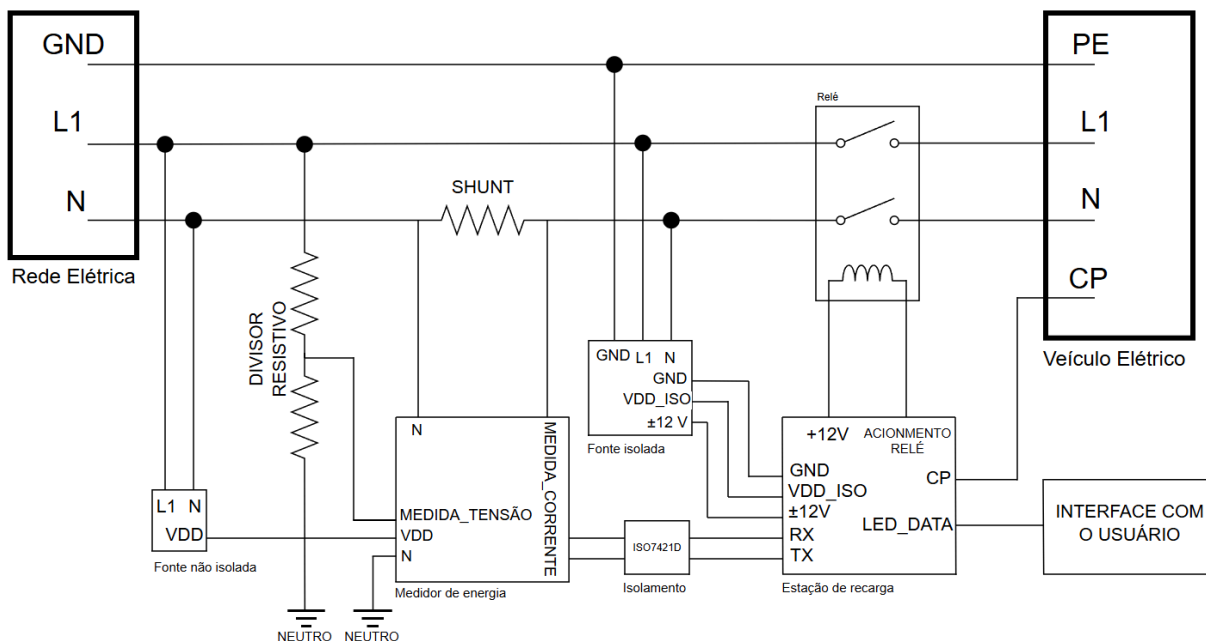
Figura 24 - Diagrama esquemático do circuito de alimentação não isolada



Fonte: Elaboração própria (2025).

Para a melhor compreensão de como as conexões entre cada parte da estação de recarga foi projetada, a Figura 25 apresenta um diagrama com a implementação completa do sistema. O diagrama esquemático completo pode ser encontrado no Apêndice A.

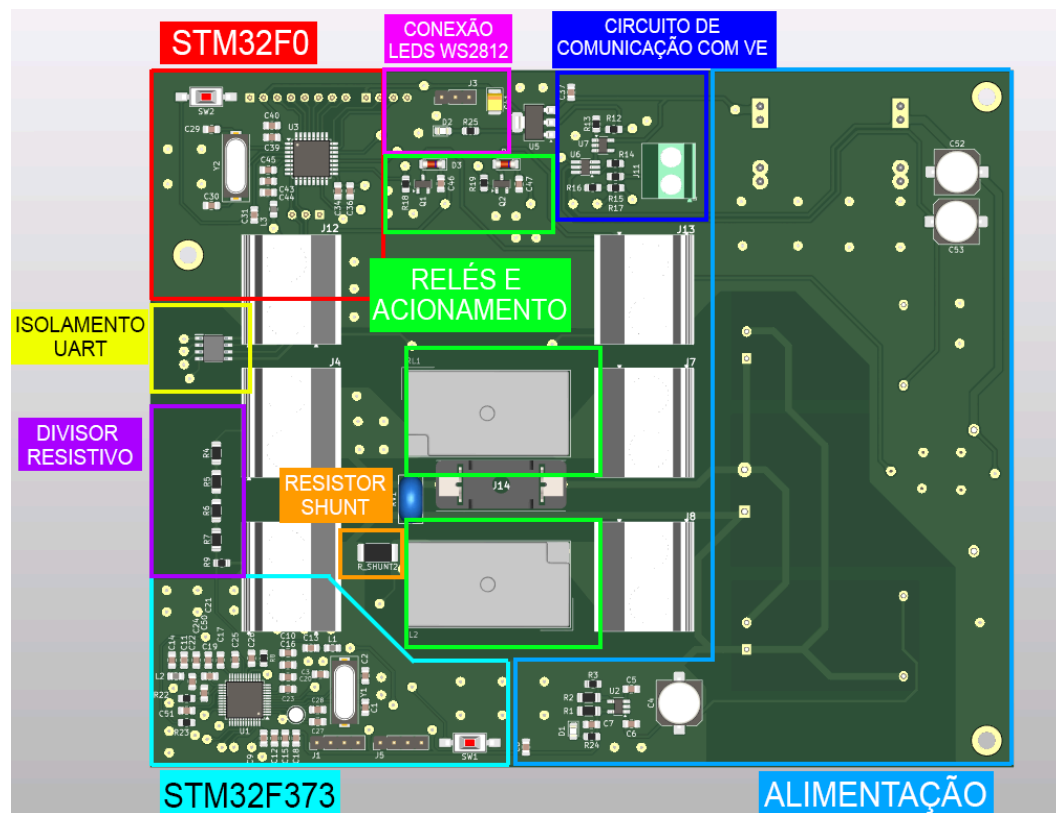
Figura 25 - Diagrama de conexões da implementação completa da estação de recarga



Fonte: Elaboração própria (2025).

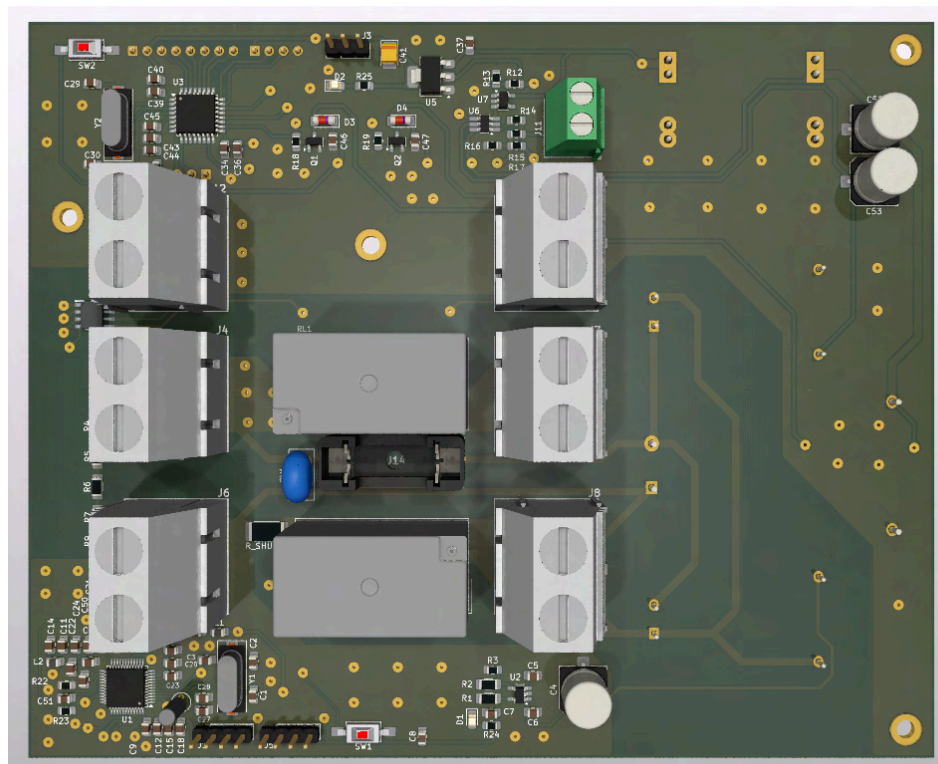
Para a implementação dos circuitos, foi projetado o *layout* da placa de circuito impresso utilizando o software KiCad. O projeto seguiu a estrutura definida pelo diagrama de blocos, com atenção especial ao posicionamento e ao espaçamento das trilhas que conduzem a tensão elétrica de 220 V e aquelas que operam com tensões baixas, seguindo o critério de espaçamento mínimo de 2,5 mm, garantindo o isolamento elétrico adequado e a segurança. Além disso, a parte do circuito referenciada à rede elétrica foi projetada com objetivo de manter a qualidade das medidas evitando interferências e também garantir o isolamento elétrico dos demais circuitos. O resultado obtido pode ser visualizado nas Figuras 26 e 27.

Figura 26 - Circuitos da placa de circuito impresso



Fonte: Elaboração própria (2025).

Figura 27 - Modelo 3D da placa de circuito impresso



Fonte: Elaboração própria (2025).

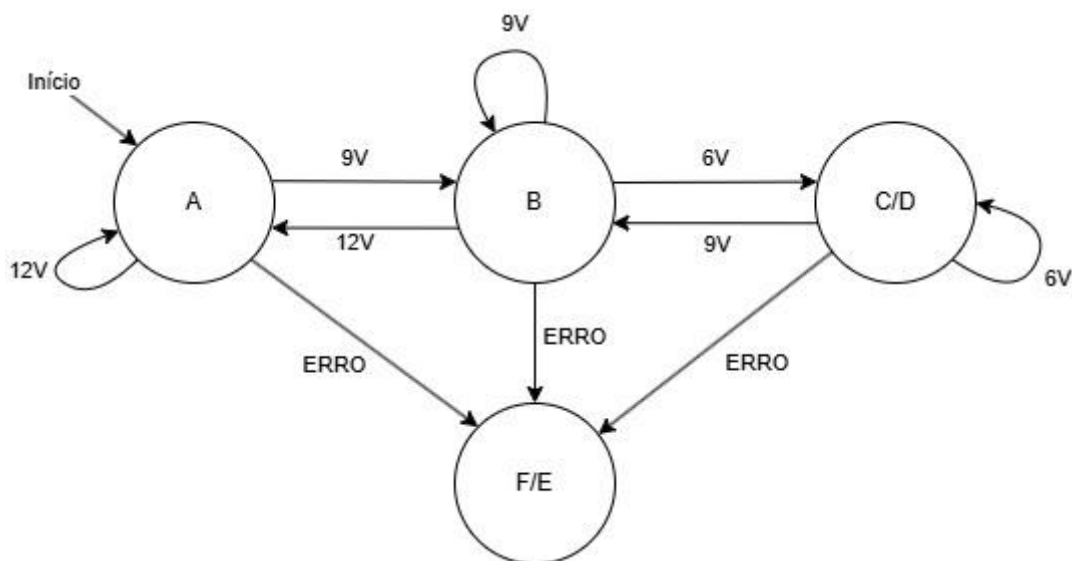
5 DESENVOLVIMENTO DO FIRMWARE DA ESTAÇÃO DE RECARGA

O desenvolvimento do firmware foi estruturado de forma modular, seguindo a lógica apresentada no diagrama de blocos presente na Figura 25, o que facilitou a organização e a manutenção do código. A programação foi realizada em linguagem C, utilizando o ambiente de desenvolvimento integrado STM32CubeIDE, que oferece ferramentas para configuração e depuração dos microcontroladores da família STM32. Assim como no desenvolvimento do hardware, a programação foi dividida em duas partes principais, sendo a primeira dedicada para o funcionamento da estação de recarga e a segunda dedicada na aquisição de medidas e cálculo do consumo de energia, ambas as partes foram programadas sem o uso de sistema operacional de tempo real.

5.1 Desenvolvimento do Firmware Dedicado a Estação de Recarga

A primeira etapa do desenvolvimento do firmware foi focada no funcionamento da estação de recarga, seguindo o protocolo de comunicação discutido anteriormente. Para isso, foi implementada uma máquina de estados para gerenciar os diferentes estados do processo de carregamento. Com o objetivo de simplificar a implementação, os estados D e E foram suprimidos sem comprometer o funcionamento da estação. O estado D foi incorporado ao estado C, pois ambos compartilham o mesmo comportamento, diferenciando-se apenas por informar a necessidade de ventilação durante o carregamento. Da mesma forma, o estado E foi tratado como F, uma vez que ambos resultam na interrupção do carregamento. A lógica de transição entre os estados pode ser visualizada na Figura 28.

Figura 28- Diagrama de estados aplicado a estação de recarga proposta



Fonte: Elaboração própria (2025).

O sistema inicia com o comportamento do estado A. para que ocorra alteração no estado de carregamento é preciso que a tensão elétrica no sinal *Control Pilot* se altere, isso ocorrerá quando o VE solicitar alteração no estados de carregamento ou ocorrer uma intervenção do usuário, como a remoção da conexão entre estação de recarga e o VE. Para identificar a alteração de estado também foi necessário a configuração adequada do ADC para interpretar o sinal de comunicação com o VE e consequentemente definir o estado de funcionamento da estação de recarga.

Para o controle do sinal de comunicação, foi necessário configurar o periférico para gerar um sinal PWM com razão cíclica de aproximadamente 26,7%, permitindo que a estação de recarga informe ao VE a corrente máxima disponível de 16 A, conforme os requisitos do projeto.

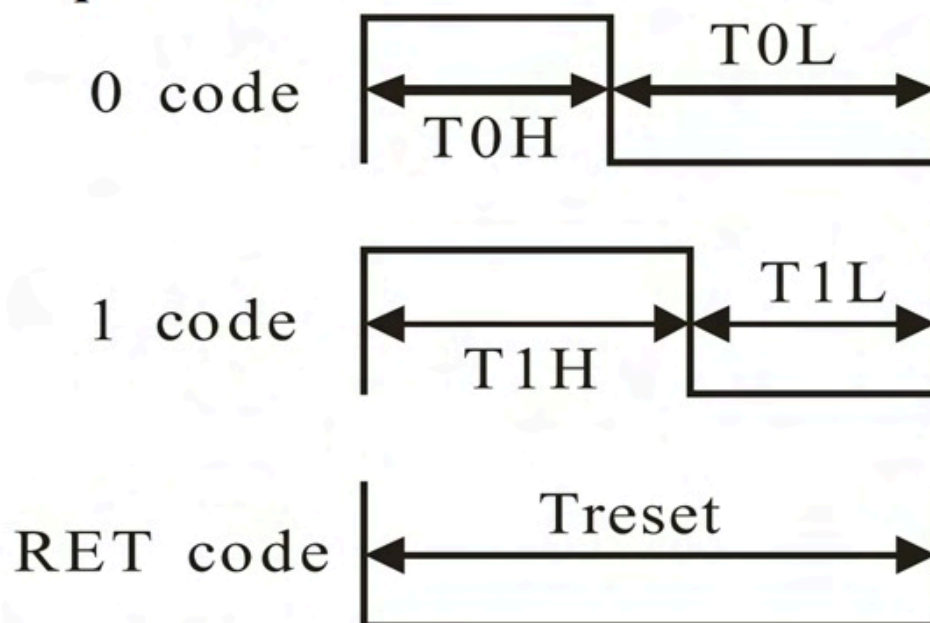
O acionamento dos relés foi realizado por um pino de propósito geral (GPIO) do STM32F0 configurado como saída, responsável por controlar tanto o relé de comutação da fase quanto o relé de comutação do neutro.

A interface com o usuário foi implementada utilizando LEDs RGB WS2812, que fornecem feedback visual sobre o estado de carregamento. O controle das cores é realizado por meio de pulsos PWM, permitindo a transmissão das

informações necessárias. A comunicação é feita pelo envio de 24 bits para cada led, sendo dividido em 8 bits para cor verde, 8 bits para a cor vermelha e 8 bits para o azul. Os bits são transmitidos a cada 1,25 microssegundos, o que corresponde a uma frequência de 800 kHz. Para enviar o bit 1, o sinal de comunicação deve permanecer em nível alto por aproximadamente dois terços do período representado por T1H, e em nível baixo por um terço do período representado por T1L. Já para enviar o bit 0, o sinal deve permanecer em nível alto por cerca de um terço do período, representado por T0H, e em nível baixo por dois terços do período, representado por T0L. Após o envio dos dados é preciso manter o sinal em baixo por 50 microssegundos, representado por Treset, para indicar a finalização da comunicação. A Figura 29 ilustra a forma de onda do sinal de comunicação para o envio de dados para controlar os leds WS2812.

Figura 29 - Diagrama de tempos para comunicação do led WS2812

Sequence chart:



Fonte: WORLDSEMI (2025).

Para realizar essa comunicação, utilizou-se o acesso direto à memória (DMA) para transferir as diferentes larguras de pulso para o temporizador, que gera um sinal PWM com os dados definidos.

Para a comunicação entre os dois microcontroladores, foi configurada a interface serial UART. Esse protocolo se mostrou eficiente para solução por conta de ser utilizado apenas para o controle do medidor de energia e a transmissão da

informação de energia consumida, com a baixa quantidade de informação sendo transmitida foi possível utilizar a comunicação UART sem a necessidade de protocolos que apresentam alta frequência, facilitando a implementação no projeto da estação.

Para garantir a integridade dos dados transmitidos, foi implementado um protocolo baseado em confirmação, onde cada mensagem recebida é validada antes do processamento. O STM32F373 envia uma confirmação positiva (ACK) ou negativa (NACK) após cada instrução recebida do STM32F0. A execução da instrução ocorre somente quando o STM32F0 recebe a confirmação adequada, assegurando a confiabilidade da comunicação. Caso contrário, cinco tentativas são feitas e se mesmo assim não existir a confirmação positiva o sistema interrompe o funcionamento determinando estado F.

5.2 Desenvolvimento do Firmware Dedicado a Medição de Energia

O desenvolvimento do firmware dedicado à medida de energia no STM32F373 foi realizado com foco em garantir uma medida confiável. O microcontrolador foi configurado para utilizar o ADC sigma-delta, um conversor analógico-digital de 16 bits, que permite a aquisição de medidas de corrente e tensão elétrica em modo diferencial. O uso de ADC sigma-delta em medidores de energia é comum devido à sua alta resolução, capacidade de rejeição a ruídos e precisão em medições de sinais de baixa amplitude, como os provenientes de sensores de corrente e tensão elétrica utilizados, garantindo cálculos confiáveis de potência e energia.

O ADC sigma-delta foi configurado para operar em conjunto com acesso direto à memória (DMA), que permite o envio contínuo das amostras de corrente e tensão para um buffer circular. Esse buffer é uma estrutura de dados que armazena temporariamente as informações em um ciclo contínuo, sobrescrevendo os dados mais antigos ao atingir o final do espaço alocado. Essa abordagem garante que as medições sejam realizadas de forma contínua e sem perda de dados, mesmo em cenários de alta taxa de amostragem.

A aquisição das medidas de corrente e tensão elétrica é feita de forma simultânea, um requisito fundamental para o cálculo da potência instantânea. A potência instantânea é obtida pelo produto da tensão e da corrente elétrica no mesmo instante de tempo. Se as duas grandezas fossem amostradas em momentos diferentes, poderia ocorrer um descompasso entre elas, resultando em erros significativos no cálculo da potência. A amostragem simultânea garante que a relação entre tensão e corrente seja capturada corretamente, assegurando a exatidão dos cálculos de energia.

A frequência de amostragem do ADC sigma-delta foi cuidadosamente ajustada para garantir que as harmônicas até a décima quinta ordem fossem consideradas. Para capturar essas distorções, foi definida uma frequência mínima de amostragem de 16,66 kHz, que permite a inclusão das componentes harmônicas relevantes na análise. Essa configuração contribui para que a medida da energia consumida atenda ao nível de erro estabelecido.

Assim como no firmware da estação de recarga, também foi configurada a interface serial UART para comunicação com o STM32F0 utilizando o protocolo baseado em confirmação (ACK/NACK), onde cada comando enviado ao microcontrolador é validado antes da execução. As principais instruções que podem ser recebidas são:

- a) Iniciar Medida: Quando recebida, o STM32F373 inicia o processamento das amostras de tensão e corrente elétrica para calcular a energia consumida.
- b) Finalizar Medida: Interrompe o processo de medição e envia o valor final da energia consumida via UART.

Após o recebimento da instrução para iniciar a medição, o STM32F373 começa a processar as amostras de tensão e corrente em grupos de amostras adquiridas ao longo de 3 ms. Esse intervalo foi escolhido para otimizar o desempenho de processamento, garantindo que o sistema opere de forma eficiente sem sobrecarregar o microcontrolador e sem comprometer a confiabilidade dos dados calculados.

Para minimizar a influência de ruídos nas medições, foi implementado um filtro de média móvel sobre as amostras. Esse filtro suaviza as variações abruptas nos dados, garantindo a qualidade e a confiabilidade das medições. O cálculo da

energia consumida é realizado com base nas amostras filtradas, assegurando que os valores finais sejam precisos e consistentes. O mesmo filtro é aplicado às amostras de tensão e corrente elétrica, garantindo que o atraso introduzido seja idêntico para ambas as grandezas e, conseqüentemente, preservando o sincronismo das medições.

Além de calcular o valor final da energia consumida, o sistema foi configurado para permitir o monitoramento contínuo durante a recarga. A cada 1 segundo, o valor atual do consumo de energia é transmitido via UART para o microcontrolador responsável pela operação da estação de recarga, proporcionando um acompanhamento em tempo real do processo de recarga.

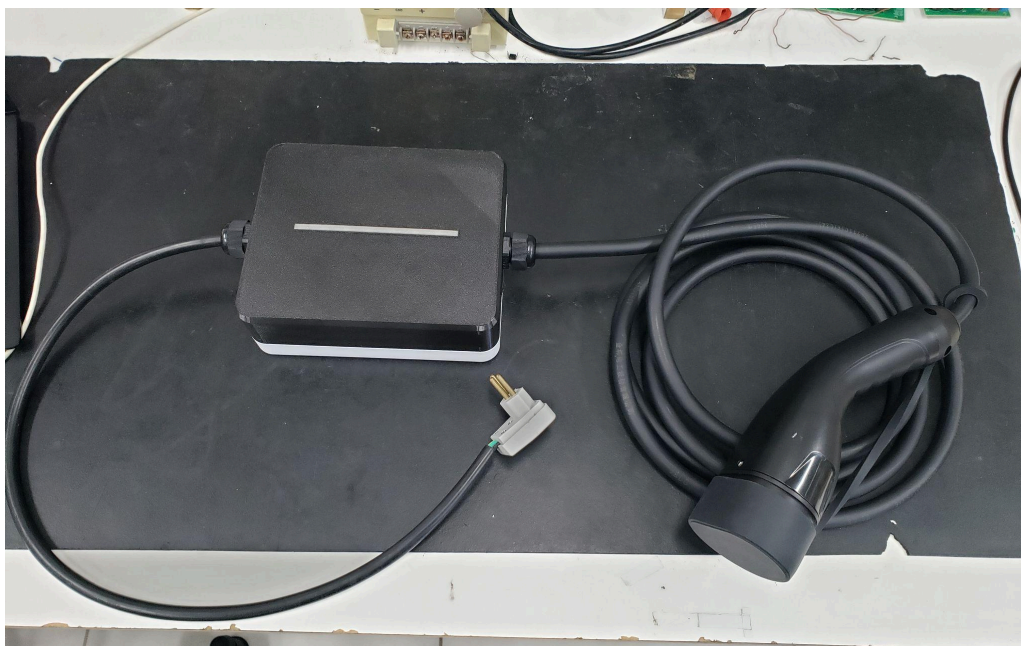
6 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DA ESTAÇÃO DE RECARGA PROPOSTA

Nesta seção, serão apresentados os resultados obtidos a partir dos testes realizados em laboratório com a estação de recarga desenvolvida neste trabalho. Inicialmente, foram conduzidos testes para avaliar o funcionamento geral da estação, com foco em quatro aspectos principais: a análise do sinal de comunicação *Control Pilot*, o acionamento dos relés, a indicação de estados por meio dos LEDs WS2812 e a operação da estação sob carga resistiva. Em seguida, é apresentado os resultados referentes ao medidor de energia. Para garantir a confiabilidade das medições, os valores obtidos pelo medidor de energia foram comparados com aqueles registrados pelo analisador de potência PA1000 desenvolvido pela Tektronix.

6.1 Construção do protótipo

Para garantir a robustez e a apresentação da estação de recarga, foi desenvolvido um gabinete utilizando uma impressora 3D ilustrado na Figura 30.

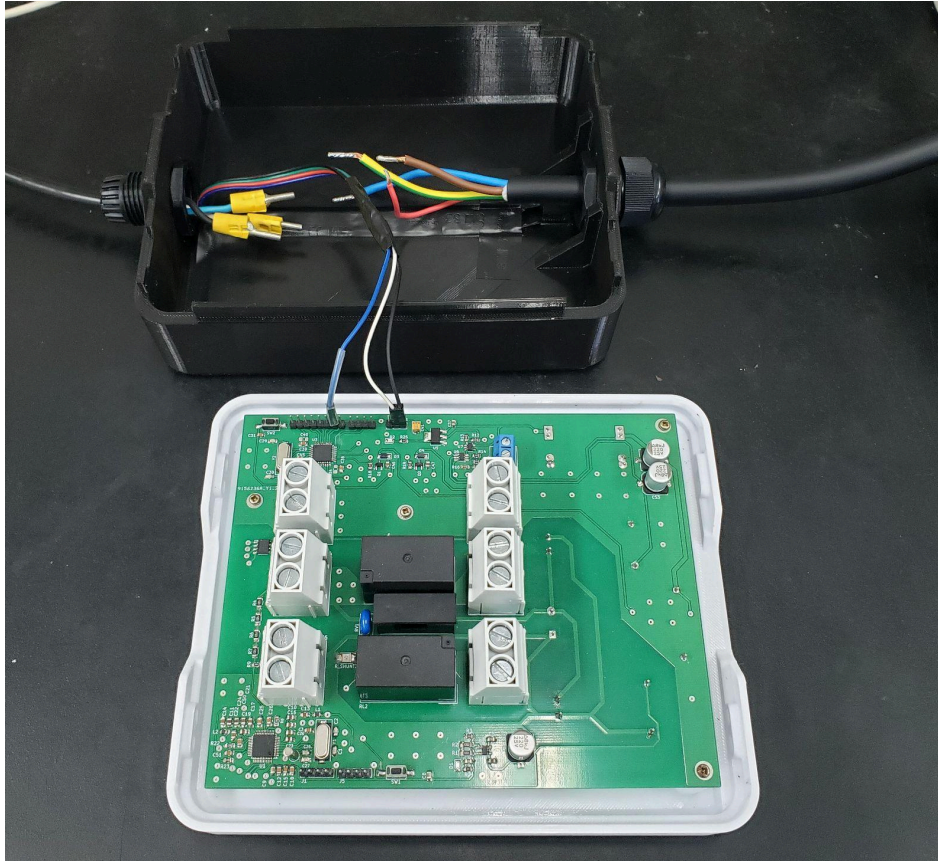
Figura 30 - Estação de recarga de veículos elétricos montada



Fonte: Elaboração própria (2025).

A placa de circuito impressa montada, contendo todos os componentes, pode ser visualizada na Figura 31.

Figura 31 - Apresentação da placa de circuito impresso montada



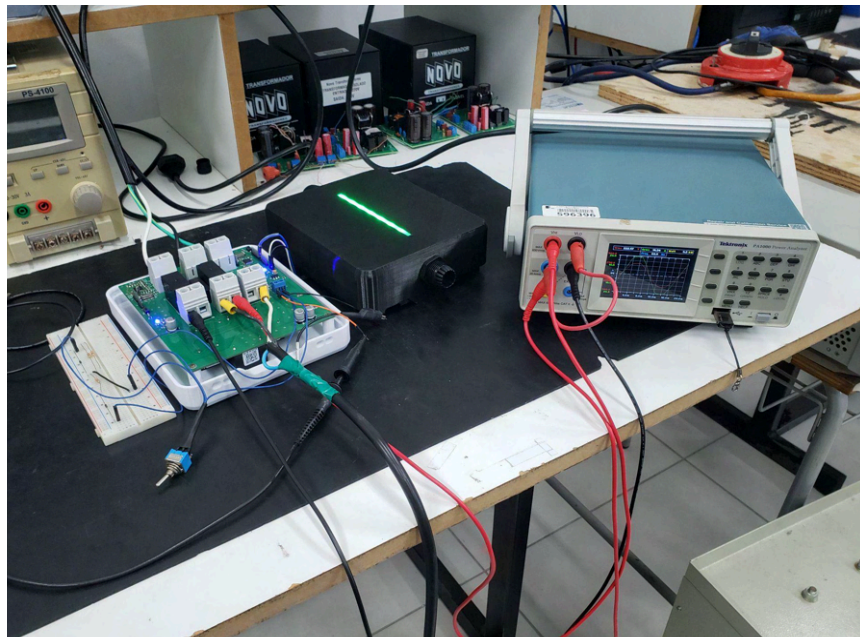
Fonte: Elaboração própria (2025).

6.2 Testes da estação de recarga

Para a realização dos testes do sinal de comunicação *Control Pilot*, foi necessário desenvolver o circuito apresentado na Figura 8, que simula o comportamento de um VE ao ser conectado à estação de recarga. Esse circuito permitiu o controle e a avaliação dos diferentes estados de operação da estação utilizando uma chave.

A configuração utilizada para a realização dos testes pode ser visualizada na Figura 32.

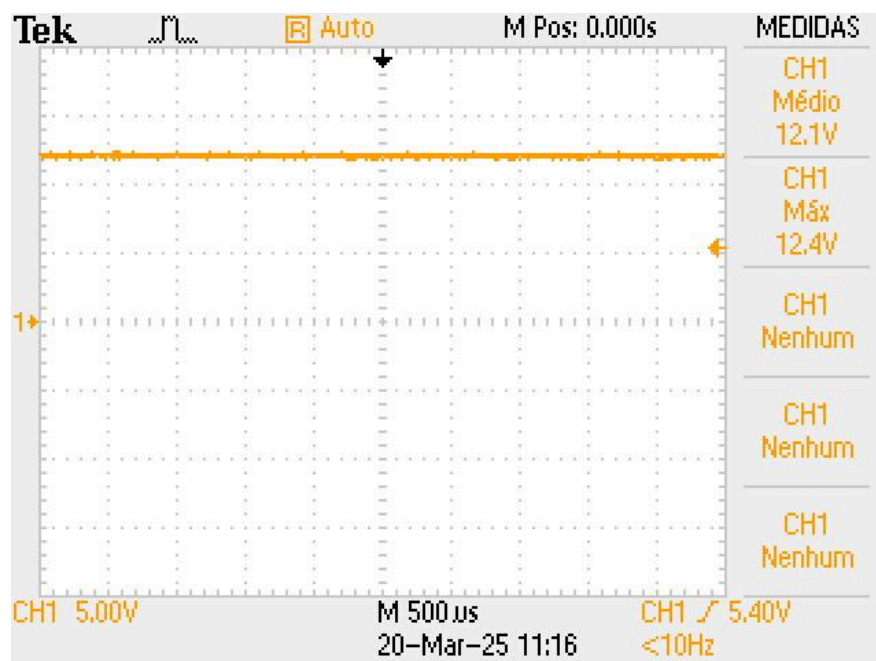
Figura 32 - Configuração para o teste do sinal de comunicação *Control Pilot*



Fonte: Elaboração própria (2025).

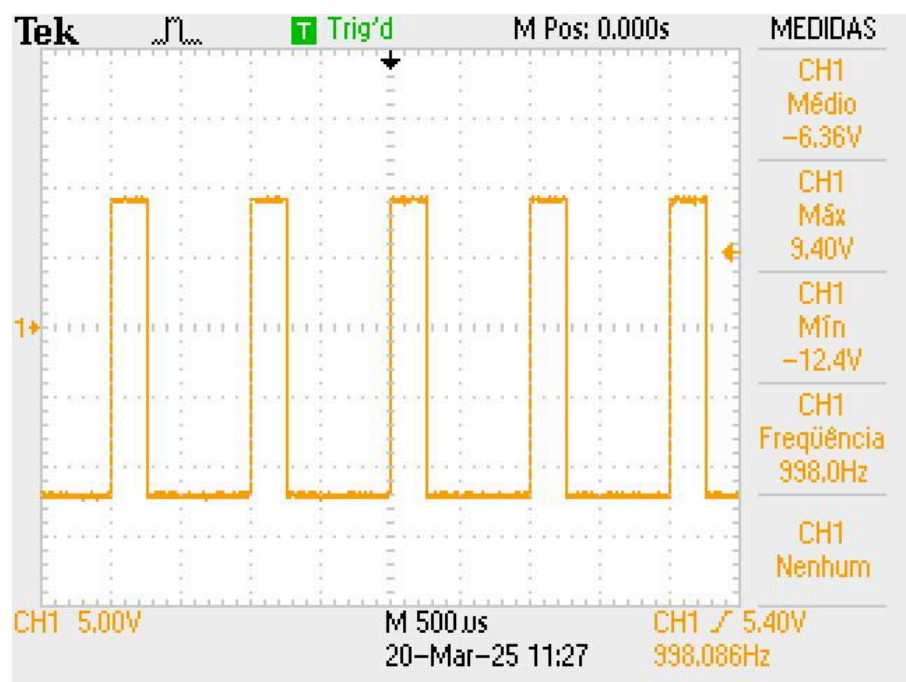
O sinal *Control Pilot* foi monitorado em todos os estados de operação da estação de recarga. Os resultados obtidos para cada estado podem ser observados nas Figuras 33, 34, 35 e 36 para os estados A, B, C e F respectivamente.

Figura 33 - Sinal de comunicação *Control Pilot* com a estação operando em estado A



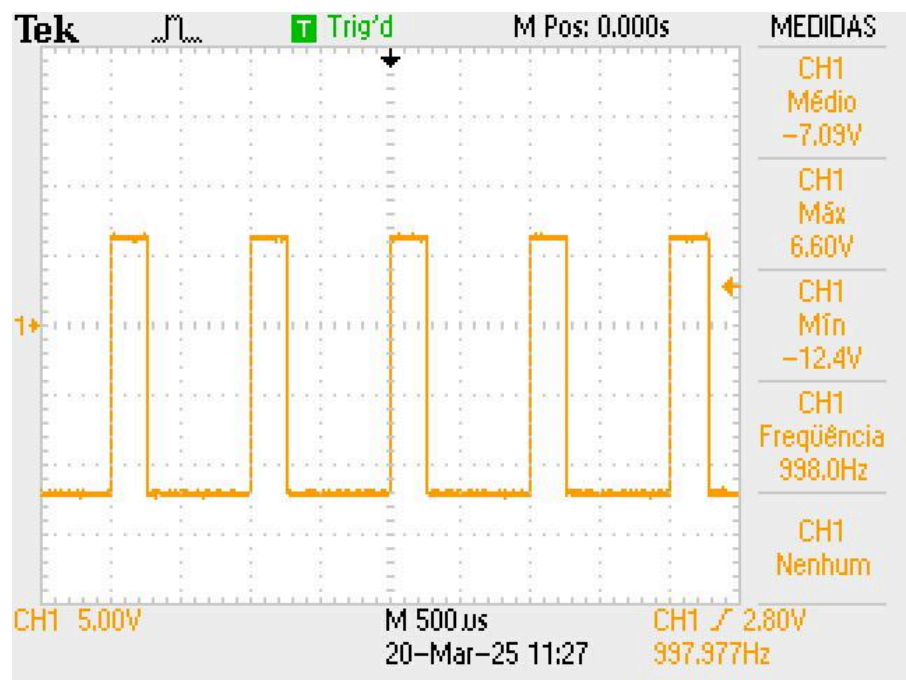
Fonte: Elaboração própria (2025).

Figura 34 - Sinal de comunicação *Control Pilot* com a estação operando em estado B



Fonte: Elaboração própria (2025).

Figura 35 - Sinal de comunicação *Control Pilot* com a estação operando em estado C



Fonte: Elaboração própria (2025).

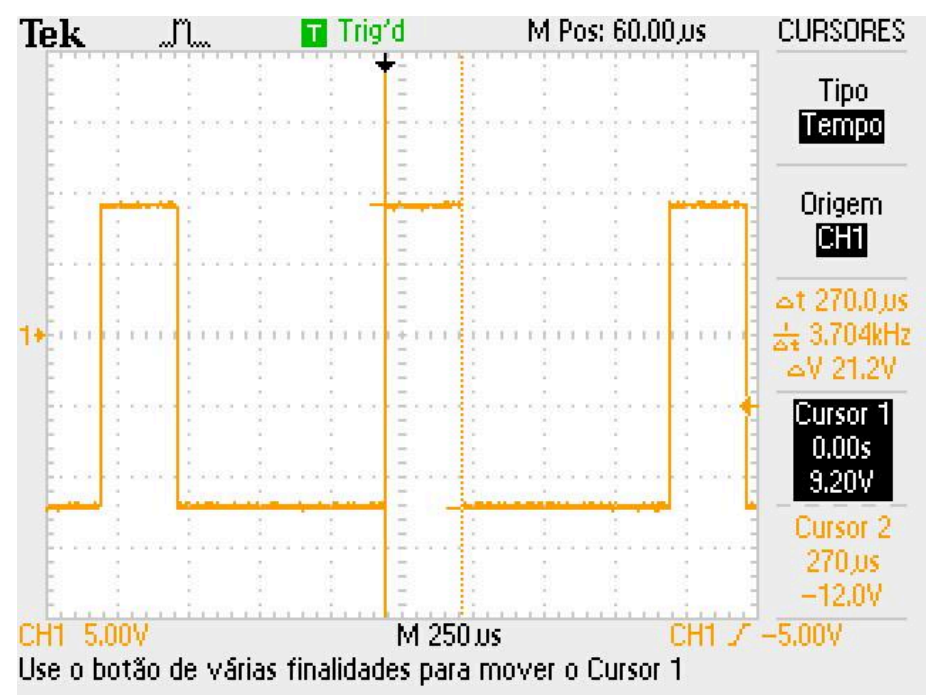
Figura 36 - Sinal de comunicação *Control Pilot* com a estação operando em estado F



Fonte: Elaboração própria (2025).

A razão cíclica do sinal PWM presente no estado B e no estado C, pode ser visualizada na Figura 37.

Figura 37 - Tempo do sinal *Control Pilot* em nível alto

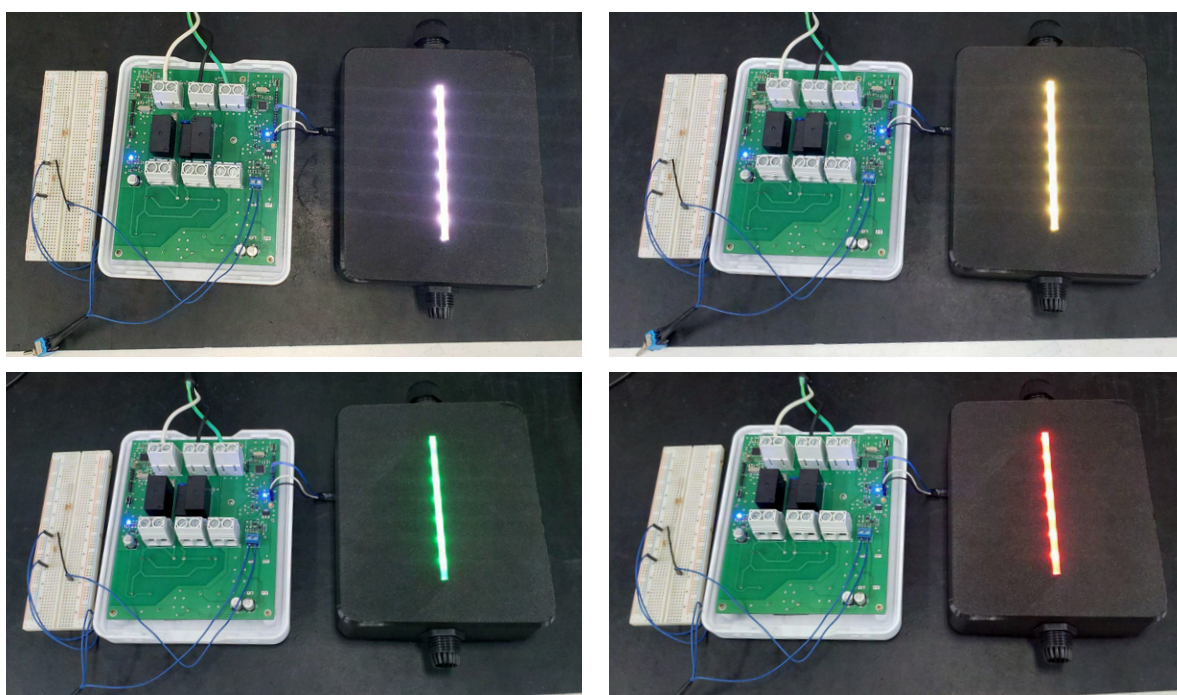


Fonte: Elaboração própria (2025).

O tempo do sinal PWM em nível lógico alto é de 270 μ s que equivale a uma razão cíclica de 27% para o sinal de período 1 ms.

Com o controle dos estados de operação, foi possível observar as indicações de estados por meio das cores emitidas pelos LEDs WS2812, de acordo com o que foi detalhado no Quadro 3. O resultado prático das indicações pode ser visualizado nas Figuras 38 para os estados A, B, C e F respectivamente..

Figura 38 - Indicações de estados por meio das cores emitidas pelos LEDs WS2812



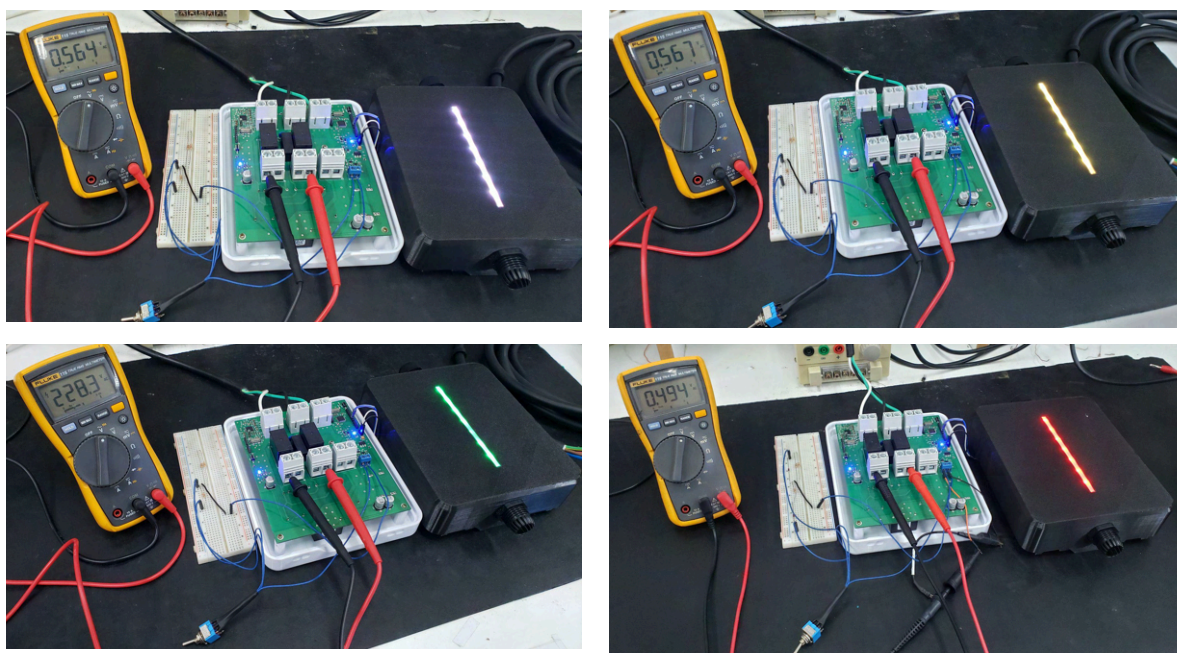
Fonte: Elaboração própria (2025).

De acordo com a Figura 38 é possível observar a estação de recarga em cada estado de operação e com a indicação correta de cada estado sendo transmitida pelas cores dos leds WS2812. A cor branca indica que a estação de recarga não está conectada ao VE, correspondendo a operação em estado A, a cor amarela indica que a estação foi conectada ao VE, e está aguardando a autorização para iniciar a recarga, correspondendo a operação em estado B, a cor verde indica que a estação de recarga está entregando energia ao VE e que a recarga está em andamento, correspondendo a operação em estado C, já a cor vermelha indica que a estação de recarga está bloqueada por conta de algum erro que compromete o

funcionamento da estação de recarga, correspondendo a operação em estado F. O resultado indica que o comportamento está adequado.

Para avaliar o acionamento dos relés, foi realizada a medição da tensão elétrica de saída durante cada estado de operação da estação de recarga. Esse teste pode ser visualizado nas Figuras 39 para os estados A, B, C e F respectivamente.

Figura 39 - Tensão de saída durante cada estado de operação



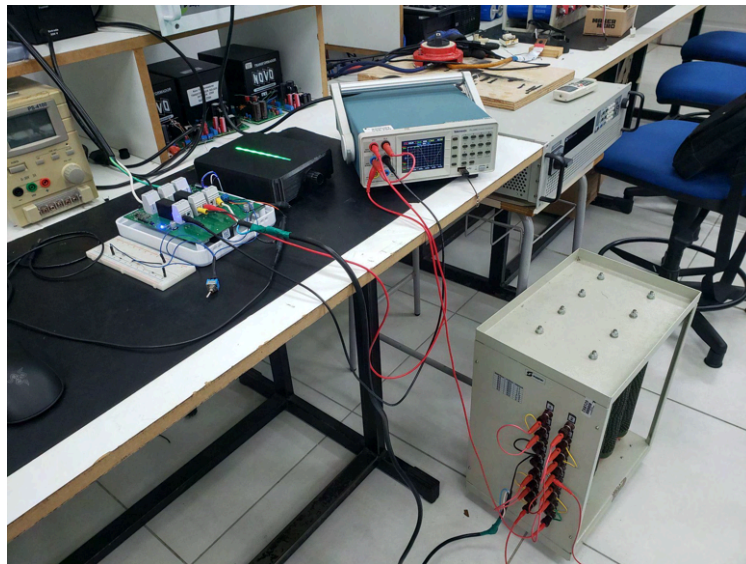
Fonte: Elaboração própria (2025).

A Figura 39 apresenta a tensão de saída em cada estado de operação, indicando que apenas quando a estação está operando em estado C a energia está sendo entregue ao VE, isso pode ser confirmado com a medida de 220 V presente apenas quando a estação está operando em estado C, como estabelecido pelo protocolo de comunicação. O resultado apresentado indica que a comutação da energia está sendo controlada de forma adequada para a operação da estação de recarga.

Para avaliar o funcionamento da estação de recarga em operação, foram realizados testes com carga resistiva, visto que em uma situação real de operação, a energia estará sendo consumida pelo OBC, que possui um fator de potência muito

próximo de um, o que corresponde ao comportamento de uma carga resistiva utilizada nos testes. A análise foi feita comparando com os resultados do equipamento PA1000 para avaliar a tensão e corrente elétrica na carga. A configuração para os testes pode ser visualizada na Figura 40.

Figura 40 - Configuração para os teste com carga utilizando o equipamento PA1000



Fonte: Elaboração própria (2025).

O primeiro teste foi realizado aplicando uma carga resistiva de aproximadamente 30Ω , com corrente elétrica esperada na carga de aproximadamente 7,33 A. A carga utilizada no teste está ilustrada na Figura 41.

Figura 41 - Carga resistiva referente ao primeiro teste



Fonte: Elaboração própria (2025).

Os resultados obtidos podem ser observados nas Figuras 42.

Figura 42 - Medidas realizadas no teste com carga de 30 Ω



(a) Sinais de tensão e corrente

(b) Valores medidos

Fonte: Elaboração própria (2025).

Como observado na Figura 42 o resultado apresentou uma tensão elétrica de 226,2 V e corrente elétrica de 7,4 A na carga de 30 Ω , próximo do valor esperado de 220 V e 7,33 A, o que indica que a estação de recarga está apresentando o comportamento adequado durante o processo de recarga. A pequena variação entre os valores medidos e os valores teóricos pode ser justificada pela tolerância do valor da carga resistiva, pequenas alterações na tensão da rede elétrica e variações nas condições de operação do sistema no momento em que o teste foi realizado.

O segundo teste foi realizado aplicando uma carga resistiva de aproximadamente 15 Ω , com essa carga é esperado uma corrente elétrica de aproximadamente 14,66 A. Esse valor foi o mais próximo da corrente elétrica nominal de 16 A que foi possível obter utilizando a carga resistiva disponível no laboratório. Os resultados podem ser observados na Figura 43

Figura 43 - Medidas realizadas no teste com carga de 15 Ω



(a) Sinais de tensão e corrente

(b) Valores medidos

Fonte: Elaboração própria (2025).

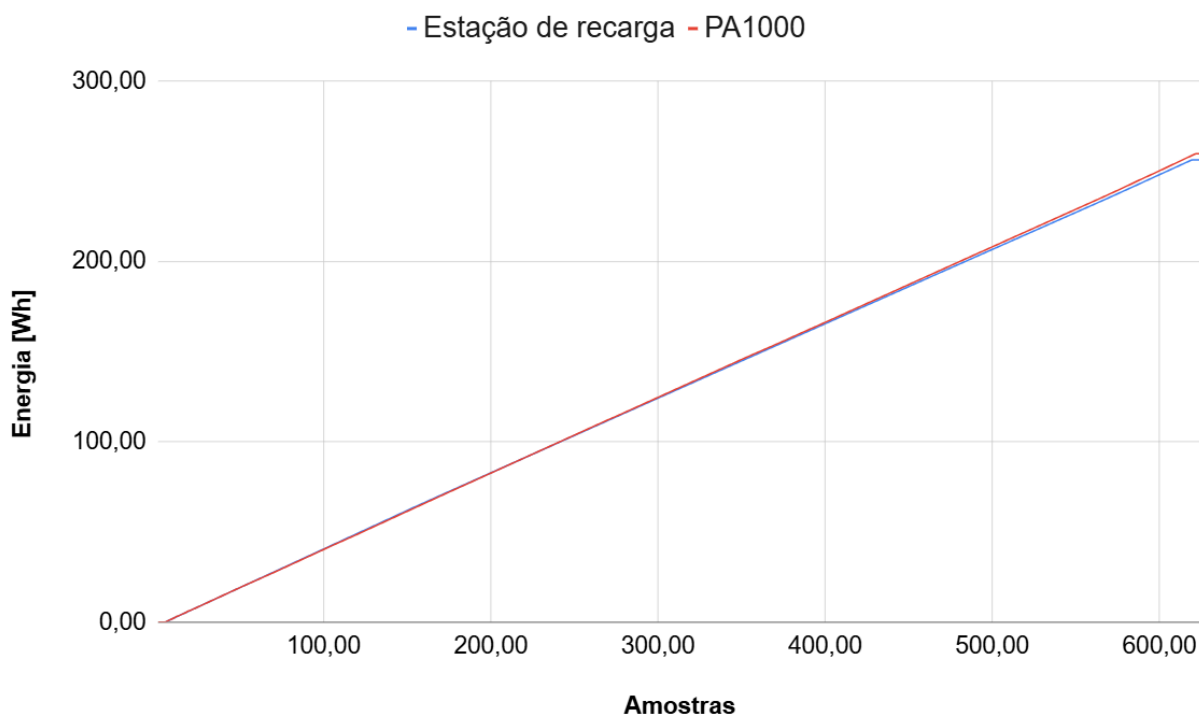
O resultado apresentado na figura 43 apresenta uma tensão elétrica de 223,3 V e uma corrente elétrica de 14,62 A na carga de 15 Ω , próximo dos valores teóricos de 220 V e 14,66 A, indicando que estação de recarga está apresentando o comportamento esperado para a operação com um carga próximo da nominal.

Para avaliar o desempenho do medidor de energia desenvolvido, foram conduzidos testes comparativos utilizando como referência o equipamento PA1000. Os experimentos foram realizados com cargas resistivas de 30 Ω e 90 Ω , mantendo-se um tempo de operação constante de aproximadamente 10 minutos para cada configuração. É importante destacar que o medidor de energia foi calibrado utilizando o próprio PA1000 como referência, considerando valores de ganho e *offset* da medida de energia.

O principal objetivo desses testes foi verificar a confiabilidade das medições, com diferentes cargas.

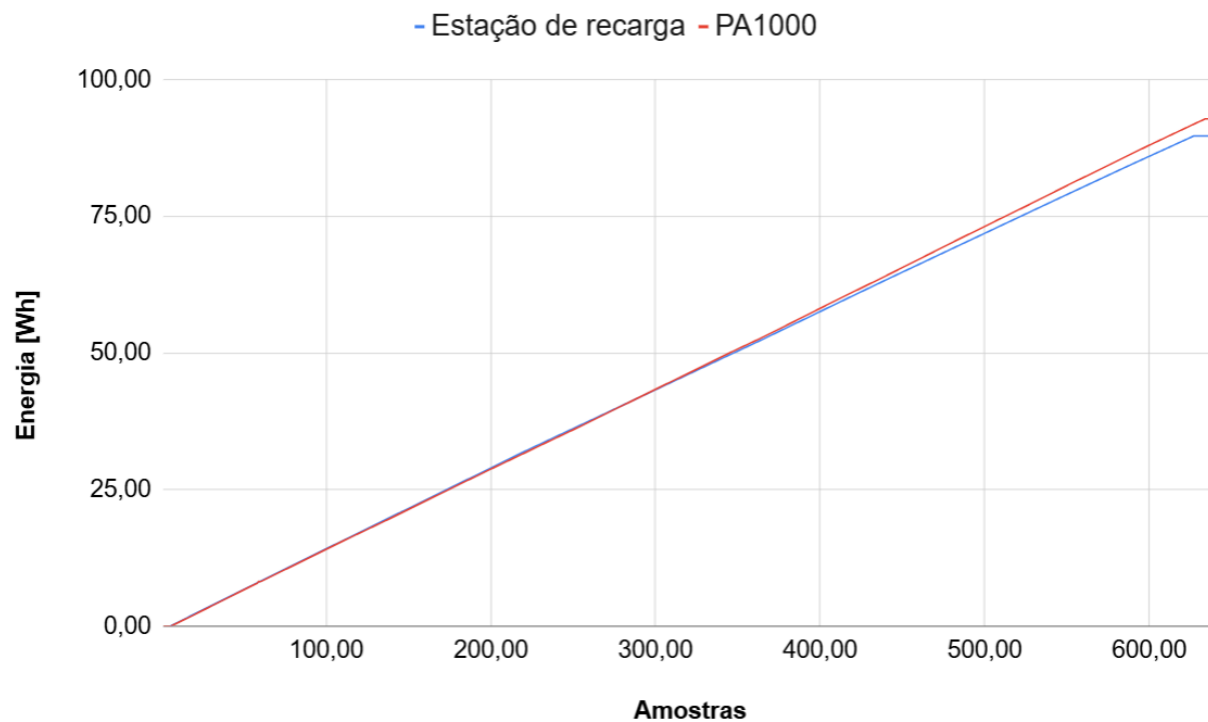
Os dados de consumo de energia obtidos pelo equipamento PA1000 e pelo medidor em desenvolvimento estão apresentados nas Figuras 44 e 45, permitindo uma análise comparativa direta entre os dois sistemas de medição.

Figura 44 - Gráfico da medida de energia com carga de 30 Ω em 10 minutos de operação



Fonte: Elaboração própria (2025).

Figura 45 - Gráfico da medida de energia com carga de 90 Ω em 10 minutos de operação



Fonte: Elaboração própria (2025).

A estação de recarga operando com carga de 30 Ω , apresentou um consumo de energia no valor de 256,42 Wh enquanto o equipamento PA1000 apresentou o valor de 259,85 Wh, indicando um erro de aproximadamente 1,32%. Para operação com carga de 90 Ω a estação de recarga apresentou o consumo de energia de 89,74 Wh enquanto o equipamento PA1000 apresentou 92,86 Wh, indicando um erro de 3,36%. Os dados adquiridos apontam que para correntes mais baixas, a medida de energia tende a apresentar um erro percentual maior. Isso pode ser justificado pela maior relevância de ruídos por conta da menor amplitude da corrente elétrica medida, perda da qualidade da informação por conta de limitações de resolução do ADC, entre outros motivos, influenciando diretamente no erro percentual da medida de energia.

6.3 Análise e discussão dos resultados

Os resultados obtidos a partir dos testes realizados na estação de recarga de veículos elétricos permitiram uma avaliação do funcionamento do sistema. A análise desses dados revelou a eficiência e o desempenho da estação, alinhando-se com as expectativas iniciais.

O sinal *Control Pilot*, monitorado com o auxílio de um osciloscópio, apresentou comportamento consistente com o padrão estabelecido pela norma IEC 61851-1:2021. Conforme observado nas Figuras 33, 34, 35 e 36, o sinal variou adequadamente entre os estados de operação, indicando que a comunicação entre a estação e o veículo simulado foi estabelecida com sucesso.

A utilização dos LEDs WS2812 para indicação de estados mostrou-se uma solução eficiente. Conforme apresentado nas Figura 38, as cores emitidas pelos LEDs corresponderam corretamente aos diferentes estados de operação da estação, proporcionando uma interface intuitiva e de fácil interpretação. Essa abordagem pode ser considerada uma alternativa viável para futuras implementações, especialmente em aplicações que demandam simplicidade.

Os dados coletados pelo medidor de energia integrado à estação foram comparados com as medições realizadas pelo equipamento PA1000. A comparação indicou uma margem de erro de aproximadamente 3,4%, o que pode ser

considerado elevado em relação à exatidão esperada, principalmente em operações com correntes mais baixas. Esse desvio provavelmente está associado a fatores como a presença de ruídos, que se tornam mais significativos em faixas de corrente reduzida, impactando a qualidade das medições. Além disso, a calibração do medidor pode ter influenciado os resultados, sugerindo a necessidade de um processo de calibração mais rigoroso para garantir maior exatidão e confiabilidade nas medições futuras. Outros fatores, como a exatidão dos sensores, a precisão dos componentes, o circuito de condicionamento de sinais e a conversão analógico-digital realizada pelo processador, apresentam erros associados que influenciam diretamente no resultado final obtido.

Os resultados obtidos demonstram que a estação de recarga desenvolvida é capaz de operar de forma eficiente e segura, atendendo aos requisitos técnicos estabelecidos, apenas necessitando uma redução no erro da medição de energia elétrica consumida pela estação de recarga. A solução proposta resultou em um sistema compacto e funcional, com potencial para aplicação em ambientes residenciais. Esses resultados reforçam a viabilidade técnica do projeto e contribuem para o avanço da infraestrutura de recarga de veículos elétricos, abrindo caminho para futuras otimizações e expansões.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo desenvolver e avaliar o desempenho de uma estação de recarga para veículos elétricos, integrando funcionalidades como comunicação com o VE, indicação de estados por meio de LEDs WS2812 e medição de energia. A análise dos resultados obtidos demonstrou que o sistema desenvolvido atende aos requisitos técnicos estabelecidos, operando de forma eficiente e segura.

Em relação ao medidor de energia integrado, os resultados revelaram uma margem de erro relativamente alta quando comparada aos resultados obtidos utilizando o equipamento PA1000. Apesar dessa limitação, o sistema como um todo mostrou-se funcional e compacto, com potencial para aplicação em ambientes residenciais. A integração dos componentes resultou em uma solução viável, contribuindo para o avanço da infraestrutura de recarga de veículos elétricos.

Em síntese, este trabalho contribuiu para o desenvolvimento de uma solução técnica viável e eficiente para estações de recarga de veículos elétricos, destacando-se pela simplicidade e potencial de aplicação prática, podendo ser utilizado como base para projetos futuros. Os resultados obtidos reforçam a importância de investimentos em pesquisas e desenvolvimento nessa área, visando à expansão e à consolidação da mobilidade elétrica.

7.1 Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestões para trabalhos futuros, recomenda-se a aplicação de filtros de interferência eletromagnéticas, para garantir a confiabilidade do processo de recarga, e também realização de testes em cenários reais, incluindo a recarga de VEs de diferentes marcas e modelos, a fim de validar o funcionamento da estação de recarga em diversas condições de operação. Isso permitiria avaliar a compatibilidade e a robustez do sistema em um contexto mais próximo da realidade.

Outra sugestão relevante seria a aplicação dos conceitos desenvolvidos neste trabalho em uma estação de recarga trifásica, que possui maior interesse comercial devido à sua capacidade de fornecer potências mais elevadas. Essa

expansão poderia ampliar a aplicabilidade do projeto, atendendo a um público mais diversificado, como postos de recarga públicos e empresas.

Além disso, seria interessante explorar a implementação de funcionalidades adicionais, como monitoramento remoto, incluindo o envio da informação de consumo de energia para nuvem e integração com sistemas de gestão de energia. Essas funcionalidades permitiriam o acompanhamento em tempo real do consumo de energia, a identificação de falhas e a otimização do uso da estação, contribuindo para uma operação mais eficiente e inteligente.

Com relação a melhorias no medidor de energia, sugere-se a realização do processo de calibração mais rigoroso, utilizando padrões de referência de alta exatidão, para reduzir a margem de erro observada, especialmente em faixas de corrente mais baixas. Também seria válido investigar técnicas de filtragem de ruídos e utilização de sensores de medidas que apresentem maior precisão e exatidão, assim como circuitos de condicionamento de sinais mais exatos, visando minimizar interferências que possam comprometer a qualidade das medições. Outro aspecto relevante é a implementação de uma interface de usuário que tenha a capacidade exibir de forma clara e organizada os parâmetros medidos, tensão, corrente e consumo de energia.

Essas propostas têm o potencial de aprimorar o desempenho e a aplicabilidade do sistema desenvolvido, contribuindo para o avanço da infraestrutura de recarga de veículos elétricos e para a consolidação da mobilidade sustentável.

REFERÊNCIAS

ABVE. **Eletrificados superam previsões, passam de 170 mil e batem todos os recordes em 2024**. Disponível em: <https://abve.org.br/>. Acesso em: 19 março. 2025.

AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA (AIE). **Global EV Outlook 2021**. Paris: AIE, 2021. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021>. Acesso em: 31 jan. 2025.

ANALOG DEVICES. **Isolated Energy Metering Chipset for Polyphase Shunt Meters**. Disponível em: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ade7978_7933_7932_7923.pdf. Acesso em: 03 fev. 2025.

ANEEL (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA). **Resolução Normativa nº 1.000**, que estabelece as diretrizes para unidades consumidoras com estações de recarga de veículos elétricos. Brasília, DF, 7 dez. 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/campanhas/resolucao-1000-da-aneel-seus-direitos-sobre-energia-eletrica-agora-num-so-lugar-2022>. Acesso em: 01 jan. 2025.

AQUAKENT. **Carregador de carro elétrico**. Disponível em: <https://www.aquakent.com.br/carregador-carro-eletrico> Acesso em 19 mar. 2025

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR IEC 61851-1:2021 - Sistemas de carregamento condutivo para veículos elétricos - Parte 1: Requisitos gerais**. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

COMISSÃO TÉCNICA DE NORMALIZAÇÃO ELETROTÉCNICA. **Guia técnico: Instalações elétricas para alimentação de veículos elétricos**. 3. ed, 2023. Disponível em: <https://www.iep.pt/wp-content/uploads/2023/10/Guia-VE-Ed.3-2023.pdf> Acesso em: 19 mar. 2025.

EASTRON. **Industry knowledge**. Disponível em: <https://www.eastrongroup.com/product/applications/ev-charging-metering/#:~:text=Metering%20is%20an%20important%20aspect,cost%20of%20the%20electricity%20provided>. Acesso em: 31 jan. 2025.

FREESCALE SEMICONDUCTOR, INC. **Kinetis-M Three-Phase Power Meter Reference Design**. 2014. Disponível em: <https://www.nxp.com/docs/en/application-note/DRM147.pdf>. Acesso em: 02 fev. 2025.

HART, Daniel W. **Eletrônica de Potência**. 1. ed. Porto Alegre: Bookman, 2011.

KHADER, Motaz. **System trade-offs for high- and low-side current measurements**. Disponível em: <https://www.ti.com/document-viewer/lit/html/SSZTA51>. Acesso em: 2 fev. 2025.

KOZUB, Radomir. **Time Domain Based Active Power Calculation**. Roznov pod Radhostem, Czech Republic: NXP, 2012. Disponível em: <https://www.nxp.com/docs/en/application-note/AN4504.pdf>

LATHI, B. P. **Sinais e sistemas lineares**. 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2007.

LE, Kelvin; LEON, Errol; SCIBILIA, Roberto. **AC Level 2 Charger Platform Reference Design**. Publicado em dezembro de 2022. Disponível em: <https://www.ti.com/lit/ug/tiduf04/tiduf04.pdf?ts=1742347053990>. Acesso em: 05 dez 2024.

MIENKINA, Martin. **Kinetis-M One-Phase Power Meter Reference Design**. 2013. Disponível em: <https://www.nxp.com/docs/en/application-note/DRM143.pdf>. Acesso em: 02 fev. 2025.

MESGANAW, Mekre. **Single-Phase Electric Meter With Isolated Energy Measurement**. 2016. Disponível em: <https://www.tij.co.jp/jp/lit/ug/tidu455a/tidu455a.pdf>. Acesso em: 19 mar 2025.

NEOCHARGE. **Tipos de carregadores para veículos elétricos**. Disponível em: https://www.neocharge.com.br/tudo-sobre/carregador-carro-eletrico/tipo-carregador-v-e?srsId=AfmBOoqIHobTXIbj0F_9JQfvGL8dIX75zaGxqLdCK9dJLLqcWablQGpi&utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 01 fev. 2025.

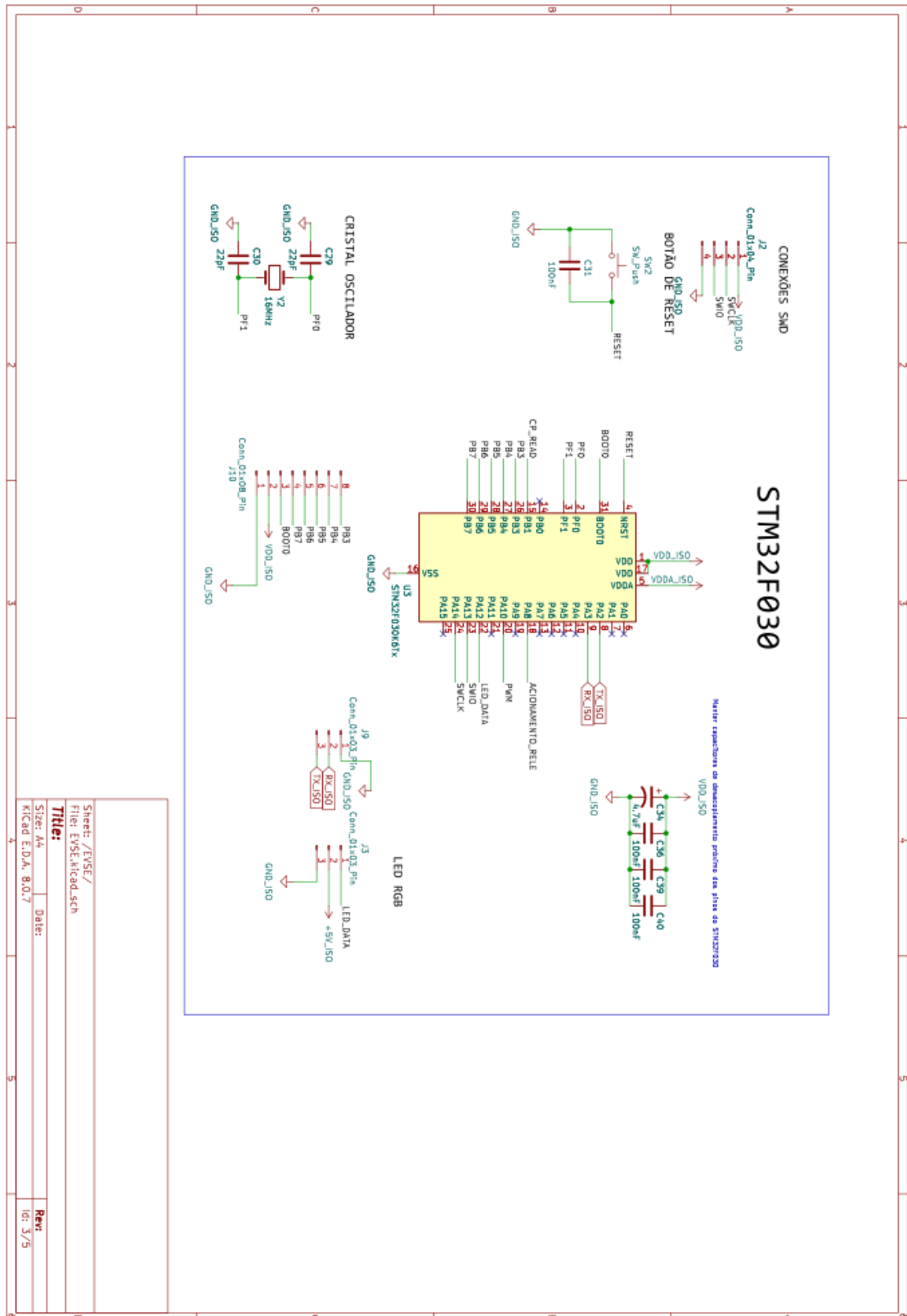
OPENEVSE. **Theory of Operation** Disponível em: <https://openev.freshdesk.com/support/solutions/articles/6000052070-theory-of-operation> Acesso em 19 mar. 2025.

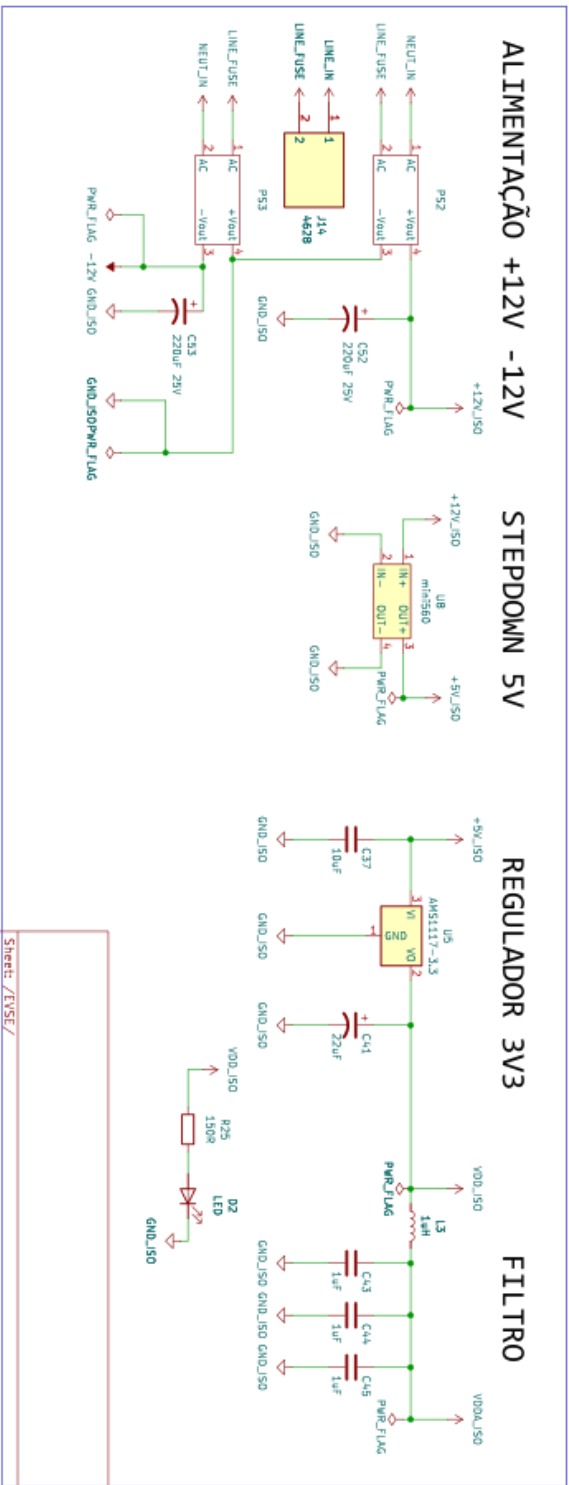
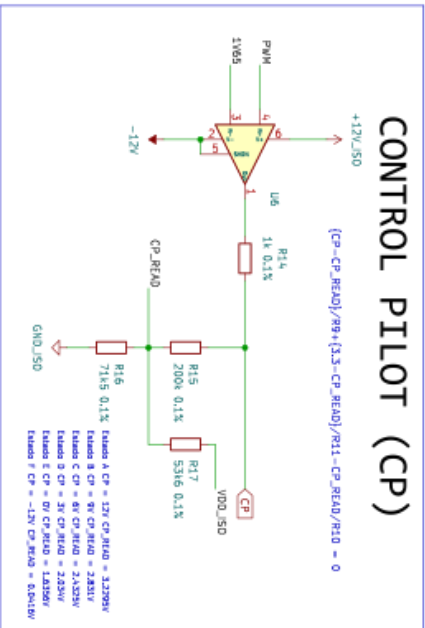
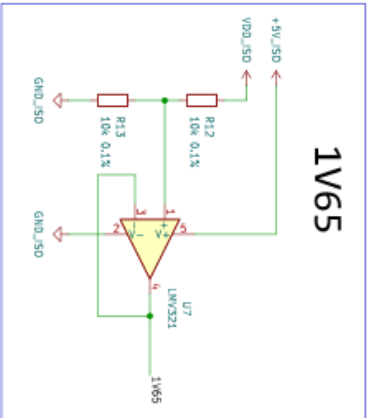
PIONIX. **Yeti and Yak hardware reference design**. Disponível em: <https://github.com/PionixPublic/reference-hardware>. Acesso em: 02 fev. 2025.

WORLDSEMI. **WS2812 Intelligent Control LED Integrated Light Source**. Disponível em: <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/WS2812B.pdf>. Acesso em: 2 dez 2024.

APÊNDICES

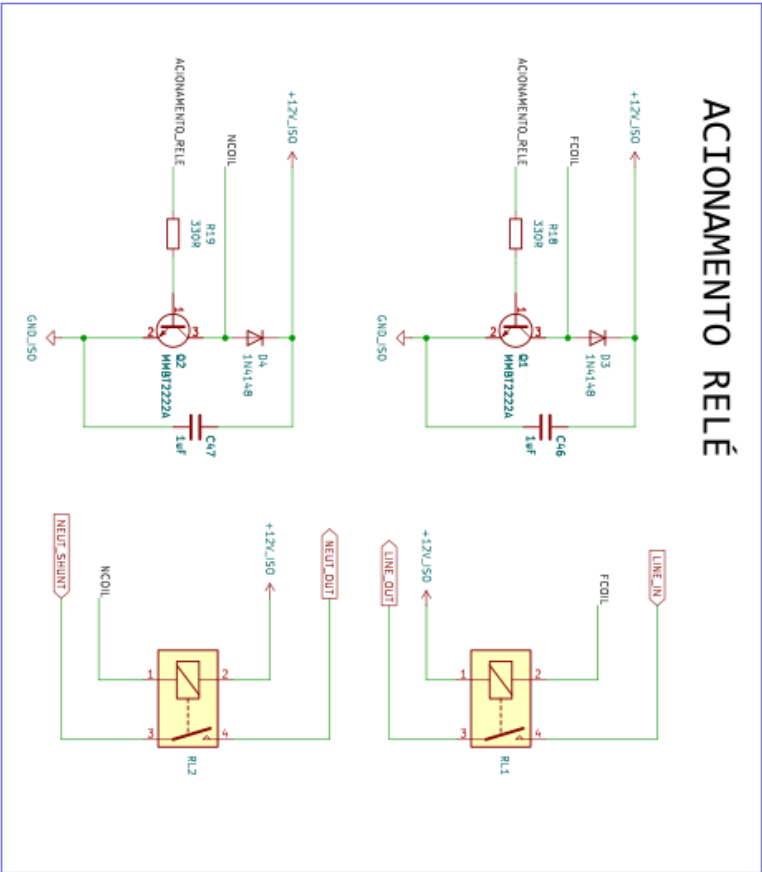
APÊNDICE A – Diagrama esquemático da estação de recarga de veículos elétricos





Sheet: /EYSE/	
File: EYSE.kicad.sch	
Title:	
Size: A4	Date:
KiCad E.D.A. 8.0.7	Rev:
	Id: 3/5

ACIONAMENTO RELÉ

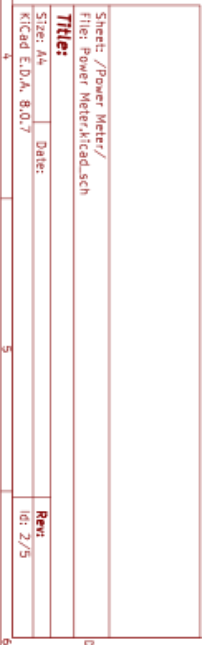


Sheet: /EYSE/	
File: EYSE.kicad.sch	
Title:	
Size: A4	Date:
Kicad E.D.A. 8.0.7	Rev:
	Id: 3/5

STM32F373

VDD must always be kept lower or equal to VDDA.
During the startup phase it is required that VDDn should arrive first and be greater than or equal to VDD.

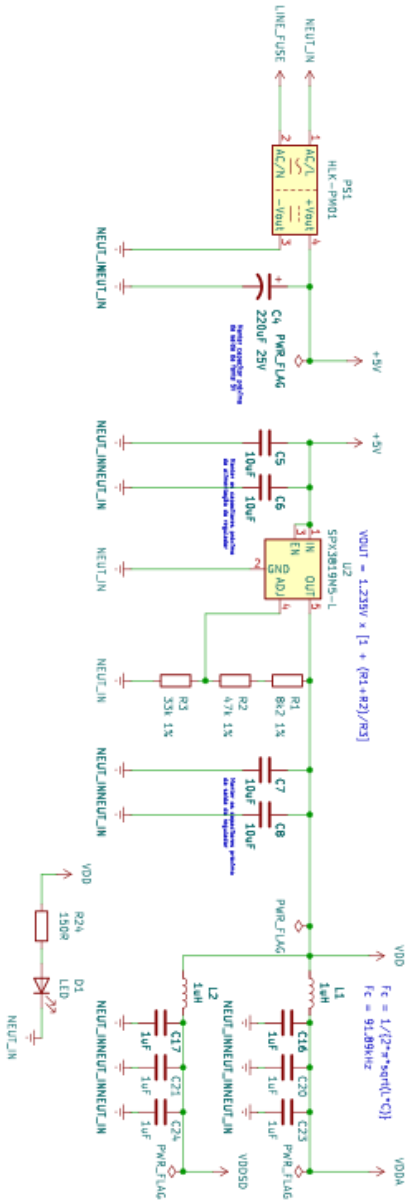
Allowed voltage difference for VDS > VDDA: 0.4V Max



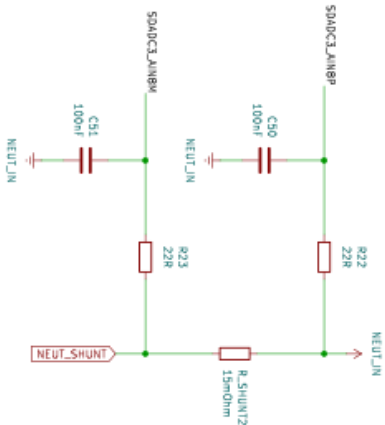
ALIMENTAÇÃO 5V

STEP DOWN 3V3

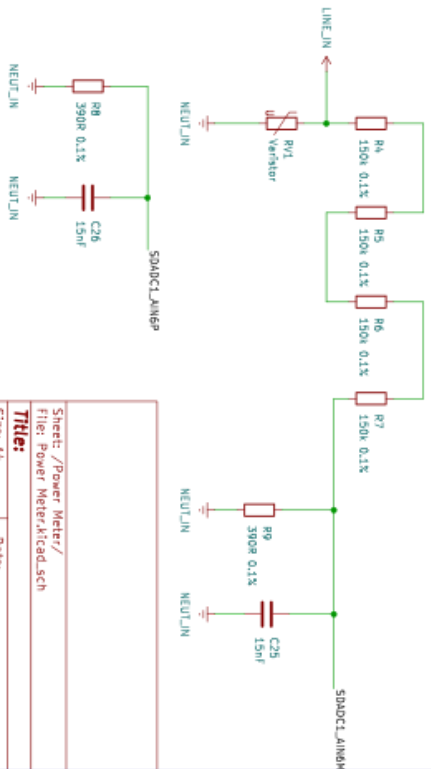
FILTRO



MEDIDA DE CORRENTE

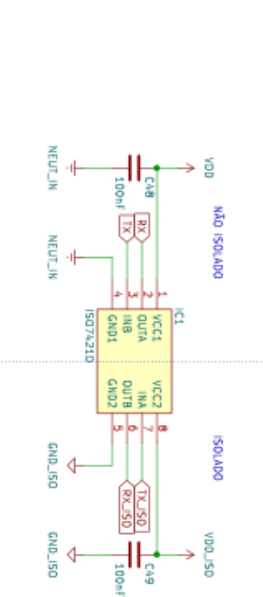


MEDIDA DE TENSÃO



Sheet: /Power Meter/
File: Power Meter.kicad.sch
Title:
Size: A4
Date:
Rev:
Id: 2/5

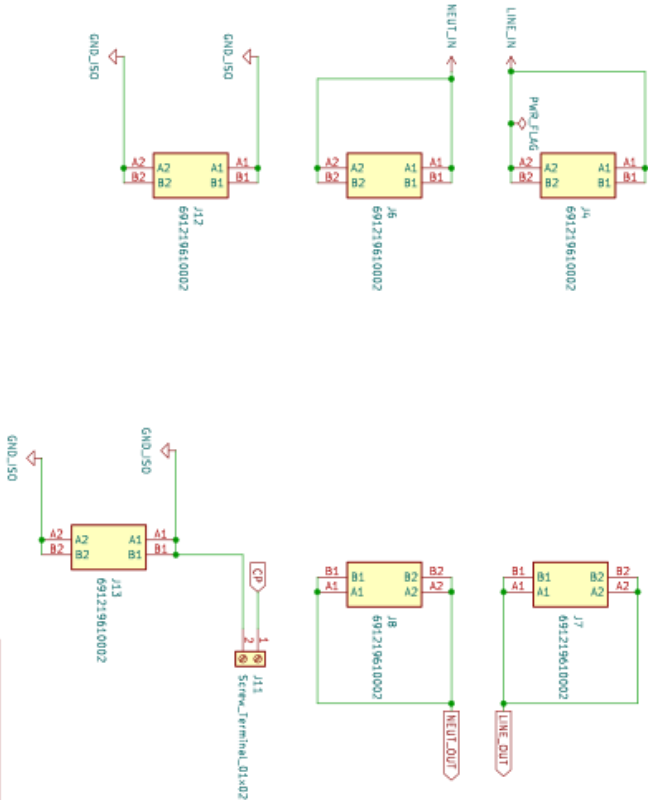
UART ISOLADA



Sheet: /UART Isolada/	
File: UART_Isolada.kicad.sch	
Title:	
Size: A4	Date:
KiCad E.D.A. 8.0.7	
Rev:	
Id: 4/5	

ENTRADA

SAÍDA



Sheet: /Conectores/	
File: Conectores.kicad_sch	
Titles:	
Size: A4	Date:
Kicad E.D.A., 8.0.7	Rev:
	Id: 5/5